

Systemsuppleties op Eilandkoppen

Modellering suppletievarianten Texel en Ameland



Systeemsuppleties op Eilandkoppen
Modellering suppletievarianten Texel en Ameland

Auteur(s)

Edwin Elias

Floortje Roelvink

Stuart Pearson

Systeemsuppleties op Eilandkoppen

Modellering suppletievarianten Texel en Ameland


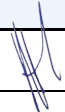

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Stefan Pluis
Referenties	
Trefwoorden	Suppleties, Waddenzee, morfologie

Documentgegevens

Versie	4.0
Datum	02-02-2021
Projectnummer	11205236-005
Document ID	11205236-005-ZKS-0006
Pagina's	202
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	
	Floortje Roelvink	
	Stuart Pearson	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
4.0	Edwin Elias 	Marcel Taal 	Toon Segeren 	
	Floortje Roelvink			
	Stuart Pearson			

Samenvatting

Dit rapport doet verslag van een analyse naar mogelijke systeemsuppleties bij de kusten van Texel en Ameland. Bij systeemsuppleties wordt niet alleen zand toegevoegd aan het kuststelsel, maar wordt tegelijkertijd bewust invloed uitgeoefend op de natuurlijke hydraulische en morfologische processen die de kust beïnvloeden. Doel is deze processen beter te benutten om de kustlijnontwikkeling op een positieve manier te beïnvloeden. Rijkswaterstaat heeft behoefte aan onderzoek naar systeemsuppleties omdat ze deze in de toekomst mogelijk wil toepassen. Doel is de kustlijn van eilandkoppen duurzamer te handhaven, door meer gebruik te maken van de natuurlijke processen.

In deze rapportage worden de resultaten van de vierde stap uit het onderzoek naar systeemsuppleties op eilandkoppen gepresenteerd. De eerste twee stappen omvatten inventarisatie en selectie van mogelijke toepassingsgebieden en suppletievarianten. Resultaat daarvan was de identificatie van het Oostgat (Ameland Noordwest) en het Molengat (Zuidwest Texel) als mogelijke locaties. Stap 3, voor deze locaties zijn vijf rekenontwerpen opgesteld door Rijkswaterstaat. In deze laatste stap wordt met Delft3D de situatie vóór aanleg van de suppletieontwerpen (stap 4a; T0 analyse) en de situatie met deze suppletieontwerpen (stap 4b; T1 analyse) morfo-statisch doorgerekend. Dit brengt de effecten op de stromingen, golven en sedimenttransporten in kaart. De berekende effecten op de kustindicatoren en een doorvertaling naar kansen en risico's van de suppletieontwerpen dienen als basis voor een afgewogen keuze van de voorkeursvariant.

De voorgestelde rekenontwerpen zijn een zandmotor suppletie in het Oostgat (Ameland Noordwest) en vier verschillende ontwerpen voor het Molengat (Zuidwest Texel). Twee daarvan zijn ontworpen als een vooroeversuppletie, in de vorm van een brekerbank (BB) en een suppletie op de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN). De andere twee ontwerpen voor Texel zijn zandmotorachtige suppletievarianten (ZM I en ZM II). De ZM I suppletie heeft de vorm van een grote, langgerekte strandsuppletie. De ZM II suppletie is een zanddam, waarbij het Molengat wordt afgesloten ter hoogte van het ebschild.

Een belangrijke conclusie uit de modellering is dat, zowel bij Ameland en bij Texel, de voorgestelde suppleties zijn aangebracht buiten de hoofdcirculatie van het zeegat. De grootschalige hydraulische en morfologische processen worden niet beïnvloed door de suppleties. Het risico dat de suppletie veranderingen op de schaal van het zeegat in gang zet lijkt beperkt.

De modellering van **Ameland Noordwest** leert dat de erosie daar samenhangt met versnelling van de stroming om de Noordwestpunt van Ameland heen. Het Oostgat is niet echt een geul, maar eigenlijk een langgerekte ontgrondingskuil. Het dichtzetten van deze ontgrondingskuil door de aanleg van de zandmotor suppletie heeft geen invloed op de processen die de kusterosie hier aansturen. Het getij propageert nog steeds over het Bornrif platform heen, maar de contractie vindt nu plaats om de kop van de zandmotor. Er zal een nieuwe ontgrondingskuil ontstaan. De kustzone is iets zeewaarts verlegd, maar de processen blijven onveranderd. Dat betekent ook dat de suppletie niet zal leiden tot onverwachte effecten in het zeegatsysteem. De kusterosie zoals deze in het verleden is opgetreden zal zich ook na aanleg van de zandmotor voortzetten en initieel zelfs toenemen. Het (extra) zandaanbod door de suppletie is klein ten opzichte van de natuurlijke ontwikkelingen. Waardoor het niet waarschijnlijk is dat deze rechtstreeks beïnvloed worden.

Van de vier varianten op **Texel Zuidwest** in het Molengat heeft de ZM II suppletie de grootste effecten op de stromingen en transporten. Dit werd al verwacht op basis van de omvang die met

bijna 9 miljoen m³, veel groter is dan de overige varianten. Bovendien is dit de enige suppletie die het Molengat met een zanddam dichtzet.

De modellering laat zien dat ook de invloed van deze variant vooral lokaal is, ter hoogte van de suppletie. Grote stromingen en transporten langs de kop van de suppletie zullen erosie veroorzaken van de suppletie en de voorliggende bank (Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks). Een deel van dit zand zal de afgesloten delen van het Molengat invullen. Een significante initiële grootschalige beïnvloeding van het zeegatsysteem blijkt niet uit het onderzoek. Belangrijkste oorzaak hiervoor is de beperkte uitwisseling tussen het Molengat en het Marsdiep. Het merendeel van de stroming en transporten wordt vanuit het Marsdiep richting het zuidelijke deel van de buitendelta gestuurd. De ZM II suppletie heeft weinig impact hierop.

De ZM I suppletie is aangelegd als een langgerekte strand-geulwandsuppletie waarbij het strand flink wordt uitgebouwd. Deze suppletie zorgt ervoor dat de kust zo'n 100 m zeewaarts uitbouwt. De stromingen en transporten verplaatsen hierbij zeewaarts, maar veranderen nauwelijks. De conclusie is dat de huidige erosie zich bij deze suppletie zal voortzetten en de suppletie gedraagt zich vergelijkbaar met de gebruikelijke suppleties. Het is wel mogelijk dat door de schaalvergroting voordelen ontstaan biedt. Er is over een lang kustvak veel zand beschikbaar en dit extra aanbod kan lokale "hot-spot" erosie onderdrukken.

De BB suppletie is op een soortgelijke manier ontworpen als reguliere vooroeversuppleties. Ze trekt de, langs de centrale eilandkust aanwezige, brekerbank door tot De Hors en doorsnijdt het noordelijke deel van het Molengat. Het onderzoek leert echter dat er geen duidelijke golfafscherming of beïnvloeding van het getij in het Molengat optreedt. Met een ontwerphoogte van -4 m NAP is deze te diep om significante golfafscherming creëren.

Een beïnvloeding van de processen door golfafscherming treedt wel op bij de NUN suppletie die een kruinhoogte van -2,5 m NAP heeft. Deze suppletie is ook breder dan de BB suppletie en daarmee anders dan een reguliere vooroeversuppletie. De verlenging van de golfafschermende werking van de buitendelta in noordelijke richting loopt tot ongeveer raai 1400. Hierdoor nemen ook de transporten langs de kust af en de NUN suppletie lijkt daarmee in staat de erosieve processen bij Zuidwest Texel te verminderen. Op basis van expert-judgement, worden er twee mogelijke ontwikkelingen van de NUN suppletie mogelijk geacht. In het eerste geval wordt de suppletie opgenomen in de huidige NUN en verliest zijn sediment dan geleidelijk aan de omliggende kust. Dit geeft wel een bijdrage aan de zandvolumes van de kustzone, maar een duidelijke respons in de kustlijnontwikkeling is dan niet te verwachten. In het tweede geval handhaaft de suppletie zich als bank, verplaatst onder de invloed van de golven landwaarts en verheelt uiteindelijk met de kust van Texel. Hierna kan de aangelande bank de kustlijn voor langere tijd voeden. Dit is een proces dat vergelijkbaar is met de Bornrif Strandhaak op Ameland.

De morfologische modellering laat zien dat de BB en ZM I suppletie op Texel Zuidwest en de ZM op Ameland Noordwest minder geschikt zijn als systeemsuppletie. Deze suppleties beïnvloeden de processen nauwelijks. De ZM I suppletie zorgt wel voor een grote kustuitbouw over een lang gebied en is in dat opzicht wel geschikt voor kustlijnhandhaving. De NUN en de ZM II suppleties reduceren de aan de kustlijnerosie onderliggende processen. De NUN suppletie vergroot het gebied van golfafscherming en de ZM II suppletie elimineert de getijstroming door het Molengat. De aanleg van de ZM II leidt lokaal tot (grote) morfologische aanpassingen. Dat betekent dat ze zowel meer kansen als meer risico's met zich meebrengt. Het risico van grootschalige morfologische verandering van het Zeegat systeem is bij beide varianten beperkt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Opzet van de studie & Leeswijzer	9
2	Keuze en uitwerking van de suppletievarianten en definiëren van kustindicatoren en kansen & risico's (stap 3)	12
2.1	Inleiding	12
2.2	Definiëren van een afwegingskader voor toetsing van de ontwerpen	14
2.2.1	Kustindicatoren	14
2.2.2	Identificeren van kansen & risico's	16
3	Analyse van suppletieontwerpen (stap 4a)	17
3.1	Een Zandmotor voor Ameland Noordwest (T1 situatie)	17
3.1.1	Een korte samenvatting van de belangrijkste geulen en platen	17
3.1.2	Een Zandmotor voor Ameland Noordwest	19
3.1.3	Kansen en risico's van het ontwerp	22
3.2	Een beschrijving van de suppletievarianten voor Texel	24
3.2.1	Een korte samenvatting van de belangrijkste geulen en platen (T0)	24
3.2.2	Texel Brekerbank (BB)	26
3.2.3	Suppletievariant 2: Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN)	29
3.2.4	Suppletievariant 3: Texel Zandmotor I (ZM I).	32
3.2.5	Suppletievariant 4: Zandmotor II (ZM II)	35
3.2.6	Een samenvatting van de MKL verandering en verwachte levensduur van de suppleties voor Texel ZW	39
4	Modellering	40
4.1	Het Delft3D FM model	40
4.2	De SedTRAILS tool	46
4.3	Randvoorwaarden; Morfologisch Getij en Golfklimaat	49
4.3.1	Keuze van het morfologische getij	49
4.3.2	Bepaling van een representatief golfklimaat	51
4.4	Een overzicht van de modelsimulaties	55
5	Modelresultaten voor zandmotor Ameland Noordwest (stap 4b)	57
5.1	Een analyse van de T0	57
5.1.1	Getijgedreven stromingen	57
5.1.2	Invloed van de buitendelta op het golfklimaat	61
5.1.3	Sediment transporten	62
5.2	Modelresultaten voor de Zandmotor suppletie	70
5.2.1	Invloed op het getij en de getij gedreven stromingen	70
5.2.2	Invloed op het golfklimaat	71
5.2.3	Jaargemiddelde sediment transporten	72
5.3	Toetsing suppletievarianten, kustindicatoren en kansen en risico's	75
6	Model resultaten voor Texel Zuidwest (stap 4b)	77
6.1	Getijgedreven stromingen (T0)	77
6.2	Invloed van de buitendelta op het golfklimaat (T0)	80

6.3	Sediment transporten (T0)	82
6.4	De samenhang van het morfologische systeem	89
6.5	Modelresultaten voor de suppletievarianten (T1)	95
6.5.1	Effect van de suppletievarianten op de getijgedreven transporten	95
6.5.2	Effect van de suppletievarianten op de golven	97
6.5.3	Effect van de suppletievarianten op de jaarlijks-gemiddelde stromingen	100
6.5.4	Sediment transporten in detail; Texel – Brekerbank (BB)	103
6.5.5	Sediment transporten in detail; Texel – Noordelijke Uitlopers Noorderhaaks (NUN)	105
6.5.6	Sedimenttransporten in detail; Texel – Zandmotor I	107
6.5.7	Sedimenttransporten in detail; Texel – Zandmotor II	109
6.5.8	Een samenvatting van de jaarlijks gemiddelde sedimenttransporten	111
6.5.9	Grootschalige effecten van de ZM II variant	113
6.6	Toetsing suppletievarianten, kustindicatoren en kansen en risico's	115
7	Conclusies & Aanbevelingen	119
7.1	Conclusies	119
7.1.1	Een Zandmotor voor Ameland Noordwest	119
7.1.2	Suppletievarianten voor Texel Zuidwest	119
7.1.3	Algemene conclusies	121
7.2	Aanbevelingen	121
8	Referenties	123
A	Overzicht rekenontwerp suppletievarianten	125
A.1	Ameland; Suppletievariant Zandmotor	125
A.2	Texel	128
A.2.1	Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Brekerbank	128
A.2.2	Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Verondieping NUN (Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks)	130
A.2.3	Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Zandmotor I	132
A.2.4	Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Zandmotor II	134
B	Aanvullend onderzoek indicatoren	136
B.1	Ameland Noordwest	136
B.1.1	T0 analyse	136
B.1.2	Invloed Zandmotor suppletie op het dwarsprofiel (T1)	142
B.2	Zuidwest Texel	143
B.2.1	T0 analyse	143
B.2.2	Dwarsprofielen voor de verschillende suppletievarianten.	147
C	Modelresultaten Ameland	152
C.1	T0 modelresultaten	152
C.2	ZM variant	154
C.3	Verschil tussen T0 en de ZM variant	157
D	Resultaten Texel	158
D.1	T0 analyse	158
D.2	Golfresultaten	160
D.3	BrekerBank variant	178
D.4	Noordelijke Uitlopers vd Noorderhaaks variant	183
D.5	Zandmotor I variant	188
D.6	Zandmotor II variant	193
E	SedTRAILS resultaten	198

1 Introductie

1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk de duurzame instandhouding van areaal en functies van de kust. Het programma kustlijn­zorg voorziet daarvoor in het suppleren van zand om structurele kusterosie tegen te gaan. De Basis KustLijn (BKL) geldt hierbij als referentie.

Het kustonderhoud van eilandkoppen kent extra uitdagingen door opdringende zandplaten en geulen. Hierom wordt er soms voor gekozen erosie toe te staan of alleen te bestrijden via regelmatige, kleinschalige, strandsuppleties. Om voor die gebieden tot een duurzamer handhaving van de kustlijn te komen wil Rijkswaterstaat systeem­suppleties onderzoeken. Systeem­suppleties zijn zandsuppleties waarbij de natuurlijke hydraulische en morfologische processen worden benut om de kustlijnontwikkeling op een positieve manier te beïnvloeden.

Na een eerste inventarisatie door Rijkswaterstaat zijn vier potentiële locaties (allen eilandkoppen) geïdentificeerd waar een systeem­suppletie mogelijk toegepast kan worden. Deze locaties zijn (1) Bollen van de Ooster (Goeree), (2) het Molengat (Texel Zuidwest), (3) Oostgat (Ameland Noordwest) en (4) Plaatgat bij Schiermonnikoog. Op deze locaties vindt structurele erosie plaats en wordt er regelmatig gesuppleerd (op Schiermonnikoog na).

Ter afweging en voorbereiding van een eventuele pilotsuppletie, is meer kennis van de mogelijke morfologische effecten nodig. Rijkswaterstaat in samenwerking met Deltares hebben hiervoor het benodigde onderzoek uitgevoerd met als doel:

1. Identificatie van 1 of 2 kansrijke locaties en komen tot gedragen oplossingsrichtingen (suppletieontwerpen) voor de toepassing van systeem­suppleties op eilandkoppen t.b.v. kustlijn­onderhoud.
2. Inzicht in de hydraulische en morfologische effecten van systeem­suppleties met een doorvertaling naar de impact op (grootschalige) morfologie, de relevante kustindicatoren en de bijbehorende kansen & risico's van ingrepen in en rondom geulen.

1.2 Opzet van de studie & Leeswijzer

Het onderzoek naar systeem­suppleties bestaat uit 5 stappen (Figuur 1-1). In de eerste twee stappen zijn de meest geschikte suppletielocatie(s) geïdentificeerd:

Stap 1; Beknopte morfologische verkenning van vier potentiële locaties voor een systeem­suppletie;. Deze analyse geeft inzicht in de onderliggende processen en eventuele overeenkomsten en verschillen in deze processen tussen de 4 locaties.

Stap 2; Workshop met kustexperts en kustbeheerders t.b.v. een keuze voor locaties van systeem­suppleties inclusief het opstellen van mogelijke suppletieontwerpen.

Deze sessie had als doel te komen tot een gezamenlijke onderbouwing en keuze voor:

- a. Indicatieve suppletieontwerpen per kustfundamentlocatie (inclusief indicatieve suppletievolumes) t.b.v. kustlijn­onderhoud.
- b. Opstellen van kansen en risico's per kustfundamentlocatie.

Stap 1 en 2 zijn gedocumenteerd in de rapportage van Elias et al. (2019) en de memo Elias (2020). Op basis van de workshop zijn door Rijkswaterstaat de studiegebieden Ameland Noordwest (Oostgat) en Zuidwest Texel (Molengat) gekozen voor een nadere uitwerking.

Het voorliggende rapport beschrijft de resultaten van **stappen 3 en 4**.

Stap 3 bestond uit een RWS interne ontwerpessie ten behoeve van het selecteren en opstellen van suppletieontwerpen. Dit resulteerde in vier rekenontwerpen voor Zuidwest Texel en één rekenontwerp voor Ameland Noordwest. Daarnaast is een set aan kustindicatoren opgesteld, bestaande uit kustlijnindicatoren en suppletie-indicatoren, en zijn per suppletieontwerp kansen en risico's gedefinieerd. Een beschrijving van de rekenontwerpen en de doorvertaling van rekenontwerp naar modelbodem ten behoeve van de morfostatische modelsimulaties wordt gegeven in Hoofdstuk 2 van deze rapportage.

Stap 4 bouwt voort op stappen 1, 2 en 3 en bestaat uit de deelstappen 4a en 4b. Stap 4a omvat het bepalen van de kustindicatoren voor de T0-situatie (vóór aanleg van de suppletie) en T1-situatie (na aanleg van de suppletie). Hiervoor worden de suppletieontwerpen (uit stap 3) in het numeriek model geïmplementeerd, zonder het model daadwerkelijk te draaien. Stap 4b bevat een verdere analyse van de T0-situatie en de T1-situatie aan hand van de uitkomsten van morfostatische modellering golven, stromingen en sediment transport paden met het numeriek model. De overige kustindicatoren worden hiermee ook bepaald en aan hand hiervan worden de kansen en risico's (gedefinieerd in stap 3) getoetst.

De modelsimulaties in deze rapportage zijn uitgevoerd met het Delft3D FM model. De modelopzet, methode en simulaties worden beschreven in Hoofdstuk 3. Voor beide gebieden zijn de rekenontwerpen doorgerekend. De resultaten voor Ameland Noordwest zijn gegeven in Hoofdstuk 5 en Appendix C. Hoofdstuk 6 en Appendix D bevatten de resultaten voor Zuidwest Texel. In Hoofdstuk 7 worden de belangrijkste inzichten en conclusies beknopt samengevat. Het onderzoek waar dit rapport verslag van doet was erop gericht de veranderingen in processen en sedimenttransporten ten gevolge van de suppletievarianten beter te begrijpen. Deze inzichten zijn cruciaal voor de keuze van de voorkeurs suppletievariant(en).

Stap 5 (Synthese); Het synthese rapport (Elias et al., 2021) bouwt voort op de voorliggende rapportage en geeft een synthese van de gehele studie en doorvertaling naar ondersteuning van een afgewogen keuze van suppletievarianten. Het geeft een totaalbeeld vanaf de afweging en keuze van de voorkeurslocaties, de identificatie van mogelijke suppletie oplossingen tot en met de keuze van de rekenontwerpen en een gewogen afweging van de uiteindelijke voorkeursvariant(en).

Opzet onderzoek Systemesuppleties op eilandkoppen

Stap 1 - T0 analyse

Doel: Morfologische T0 analyse van vier eilandkoppen op basis van jrk-data & vaklodingen incl. opstellen conceptueel model per eilandkop; rapportage Elias, 2020a.



Stap 2 – Expertsessie RWS & Deltares

Doel: 1) Identificeren van suppletievarianten en kansen & risico's en 2) Keuze maken voor 1 a 2 eilandkoppen t.b.v. stappen 3 en 4; memo Elias, 2020b



Stap 3 – Ontwerpsessies RWS

Doel: 1) Selecteren en ontwerpen van 4 a 5 suppletievarianten o.b.v. ontwerpkenis en kennis van uitvoering 2) Definiëren van kansen en risico's; rapportage Elias et al. 2021



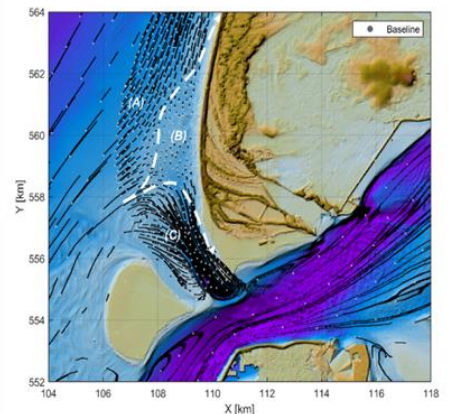
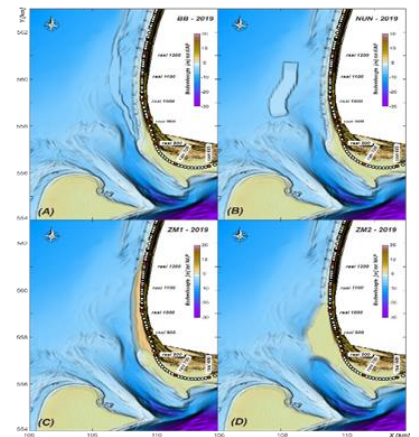
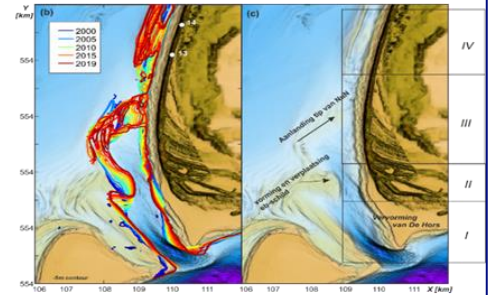
Stap 4 – (a) Uitgebreide T0 analyse en (b) T1 analyse

Doel stap 4a: Uitgebreide T0 analyse incl. update conceptueel model [stap 1] op basis van morfostatische modellering van golven, getij en sediment transporten.

Doel Stap 4b: 1) T1 analyse op basis van morfostatische modellering van golven, getij en sediment transporten ['morfostatisch doorrekenen suppletievarianten' uit stap 3] en 2) Beantwoording modeleringsvragen en toetsing van kansen en risico's. Rapportage Elias et al. 2021

Synthese

Doel Synthese: Beschrijving van het doorlopen proces [stappen 1 t/m 4] en conclusies & aanbevelingen Rapportage Elias, 2021



Figuur 1-1: Overzicht stappen uitgevoerd in het systeemsuppletie onderzoek.

2 Keuze en uitwerking van de suppletievarianten en definiëren van kustindicatoren en kansen & risico's (stap 3)

2.1 Inleiding

Vier potentiële locaties zijn door Rijkswaterstaat geïdentificeerd als geschikt voor de toepassing van een systeemsuppletie. Dit zijn: (1) Bollen van de Ooster (Goeree), (2) het Molengat (Zuidwest Texel), (3) Oostgat (Noordwest Ameland) en (4) Plaatgat (Noordwest Schiermonnikoog). Voor iedere locatie zijn in een workshop met experts van Deltares en Rijkswaterstaat suppletievarianten bedacht (stap 2; Elias, 2020). Op basis daarvan heeft RWS in een interne ontwerpessie een selectie gemaakt voor locaties en varianten van systeemsuppletie. Daarbij is rekening gehouden met de haalbaarheid van de varianten en de 'maakbaarheid' (vanuit uitvoering). Dit resulteerde in vijf suppletieontwerpen: vier voor de locatie (2) het Texel Zuidwest en één voor de locatie (3) Noordwest Ameland. Voor deze locaties zijn een set aan kustindicatoren gedefinieerd en toetsbare kansen en risico's per ontwerp geïdentificeerd.

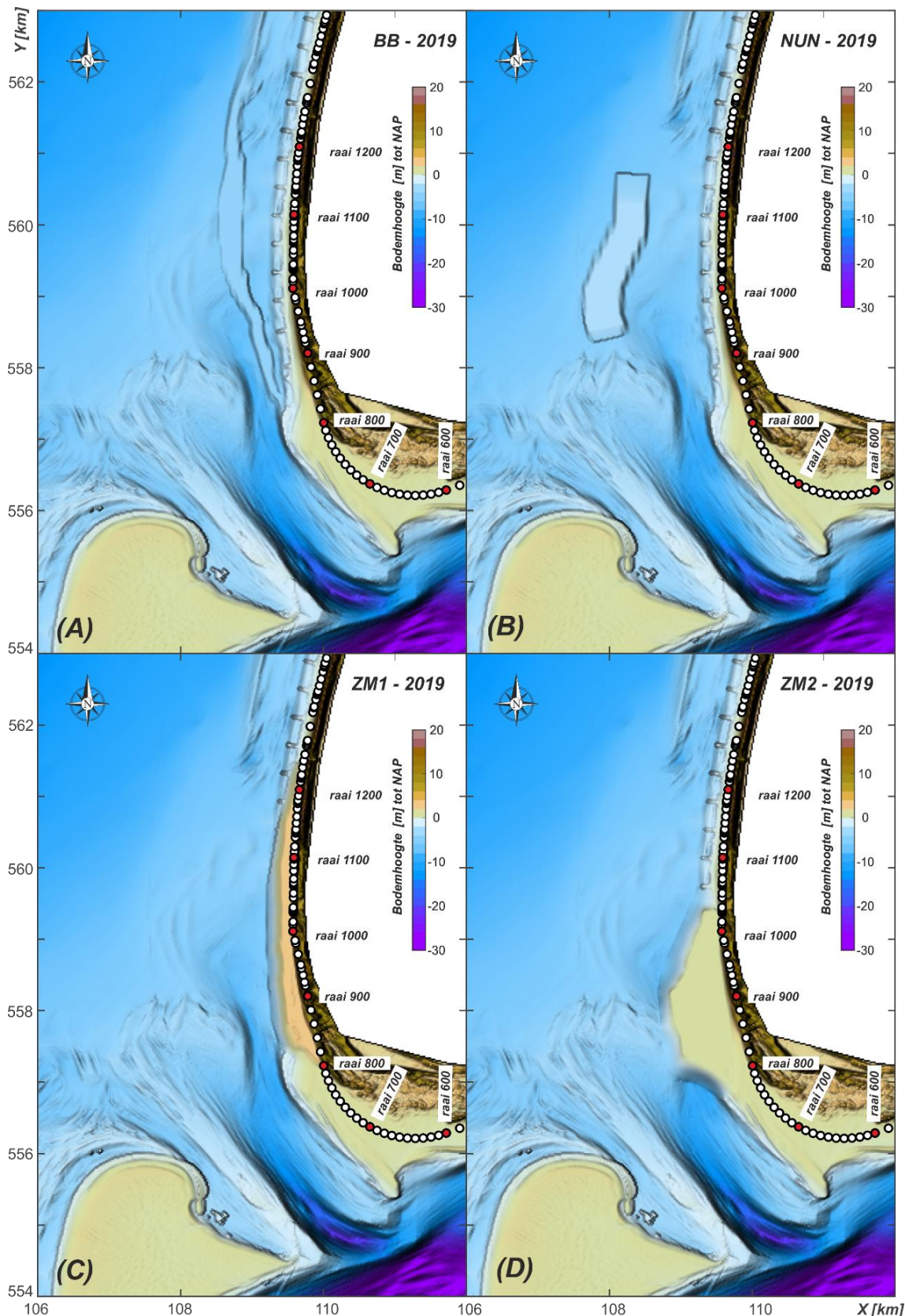
Tabel 2.1 geeft de algemene kenmerken van deze suppletievarianten kort weer. De volledige rekenontwerpen, zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat, zijn weergegeven in Appendix A.

Tabel 2.1: Overzicht van de eigenschappen van de 5 geselecteerde suppletievarianten.

Eigenschap	Texel Zuidwest				Ameland Noordwest
	Texel – Brekerbank (BB)	Texel – Verondieping NuN (NUN)	Texel – Zandmotor I (ZM I)	Texel – Zandmotor II (ZM II)	
Naam	Texel – Brekerbank (BB)	Texel – Verondieping NuN (NUN)	Texel – Zandmotor I (ZM I)	Texel – Zandmotor II (ZM II)	Ameland – Zandmotor (ZM)
Type suppletie	Vooroever (regulier)	Vooroever (buitendelta)	Strand-vooroever	Strand / Vooroever (zanddam)	Strand-vooroever
Totale in situ volume suppletie rekenontwerp [m ³]	1.550.000	2.280.000	3.800.000	8.900.000	9.100.000
Volume in modelbodem [m ³] ¹	1.772.000	2.819.000	3.494.000	8.829.000	9.275.000
Van/Tot (raaien)	860-1249	960-1148	840 – 1230	820 – 1033	100 – 420
Lengte suppletiegebied	4300 meter	1880 m	3900 m	2000 m	3200 m

Dit hoofdstuk beschrijft de onderliggende rekenontwerpen voor deze suppletieontwerpen en werkt ze uit tot modelbodems die geïmplementeerd kunnen worden in het numerieke model (Hoofdstuk 3). De modelbodems vormen de basis voor de analyses die in dit rapport staan. In Figuur 2-1 zijn de 4 varianten voor Texel Zuidwest in één figuur samengevat. In Hoofdstukken 3.2.1 tot en met 3.2.4 worden deze bodems in detail getoond.

¹). De modelbodems kunnen in volume en detailuitwerking iets afwijken van het rekenontwerp. Dit komt door de manier van implementatie. Op basis van de 2019 Jarkus datasets, aangevuld met de meest recente meetdata, is per modelgebied een T0 bodem geconstrueerd. De rekenontwerpen van de suppletie zijn aan deze modelbodem toegevoegd. De "ruwe" suppletiebodem is vervolgens handmatig gecontroleerd op consistentie. Dit wil zeggen dat verstoringen in de bodem zoals abrupte diepteovergangen, gaten of uitstekels, zijn geëgaliseerd om een vloeiende suppletiebodem te verkrijgen. Dit opvullen van gaten in combinatie met de resolutie van het rekenrooster zorgt ervoor dat de modelontwerpvolumes iets af kunnen wijken van het aangeleverde rekenontwerp (zie ook Tabel 2-1).



Figuur 2-1: De 4 suppletievarianten voor Texel Zuidwest samengevat in 1 figuur: (A) suppletieontwerp Brekerbank (BB), (B) suppletieontwerp Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN), (C): suppletieontwerp Zandmotor 1 (ZM I) en (D): suppletieontwerp Zandmotor 2 (ZM II).

2.2 Definiëren van een afwegingskader voor toetsing van de ontwerpen

2.2.1 Kustindicatoren

Naast de bepaling van de rekenontwerpen (stap 3) is ook een afwegingskader voor de ondersteuning van de voorkeursvariant bepaald. Dit afwegingskader bestaat uit een set kustindicatoren. Daarnaast zijn per ontwerp kansen en risico's geïdentificeerd die getoetst kunnen worden met behulp van analyses van modelresultaten.

De kustindicatoren sluiten aan op de manier waarop de jaarlijkse toetsing van de kustlijn plaatsvindt. Een overzicht van de kustlijnindicatoren is gegeven in Tabel 2.2. De indicatoren zijn daarbij ingedeeld in pre-run en post-run indicatoren. De pre-run indicatoren zijn bepaald door het suppletieontwerp in Delft3D FM te analyseren zonder simulatie. Ze volgen rechtstreeks uit de analyse van de T0 en T1 bodem en de verschillen ertussen. Dit is stap 4a van het onderzoek.

De post-run indicatoren (onderste deel van Tabel 2.2) volgen uit de morfostatische Delft3D FM modellering van stromingen, golven en sediment transporten. Hiervoor zijn simulaties voor zowel de T0 en T1 uitgevoerd. Dit is stap 4b van deze studie.

Waar mogelijk wordt ook een doorkijk van de ontwikkeling van zowel de pre-run als de post-run kustindicatoren gemaakt; de T2 analyse. De T2 analyse is altijd op basis van expert judgement en maakt gebruik van zowel de geobserveerde trends en de uitkomsten van de modellering. Met de modellering kan worden vastgesteld of het huidige gedrag nog optreedt of dat dit gedrag veranderd.

Indicatoren als MKL (Momentane KustLijn), GLW (Gemiddelde Laagwater lijn), GHW (Gemiddelde Hoogwaterlijn), DV (Duinvoet) en lengte van de beïnvloeding kunnen rechtstreeks vanuit de bodemdata worden bepaald. Ze bestaan uit een bepaalde hoogte (bijv. de +3m voor de duinvoet) en de daarbij behorende afstand tot de bijbehorende RSP (Rijkst Strandpalen) positie. Voor 2019 zijn deze waarden al bepaald voor de kustlijnbeoordeling 1-1-2020 en opgeslagen in netcdf bestanden (ww.opendap.deltares.nl). Op basis van de in dit bestand aanwezige hoogte van de indicator worden de bijbehorende afstanden bepaald voor de T0 en T1 bodems.

De lengte van de suppletie en initiële bedekking volgt rechtstreeks uit de bodemdata. De lengte van de suppletie is een directe maat voor de kustlangse beïnvloeding van de kustlijnen. De droge strandbreedte kan worden berekend als de afstand tussen GHW en DV. Het intergetijdegebied als afstand tussen GLW en GHW. Hierbij wordt opgemerkt dat het intergetijdegebied alleen toeneemt als de kruin van de suppletie tussen GLW en GHW valt. In alle ander gevallen neemt het intergetijdegebied initieel af aangezien de aanleghelling steiler is dan het oorspronkelijke kustprofiel.

De indicator levensduur is in de huidige aanpak met morfostatische berekeningen niet rechtstreeks te bepalen. Dit kan eigenlijk alleen op basis van expert judgement. Om de schatting te onderbouwen is een beknopt aanvullend onderzoek uitgevoerd op de geobserveerde kustlijnontwikkeling van de suppletiegebieden. Op basis van de eerder geobserveerde trends in het kustvak kan een eerste schatting gemaakt worden van de snelheid van kustlijnverplaatsing in het verleden. Deze schatting vormt de basis voor het bepalen van de levensduur.

Een beschrijving van de processen van de verschillende kustvakken was onderdeel van stap 1 van deze studie. In deze beschrijving zijn de kustindicatoren nog niet in voldoende detail uitgewerkt en waren aanvullende analyses benodigd. Deze analyses zijn samengevat in Appendix B.

Tabel 2.2: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievarianten op kustindicatoren. Hierin is aangegeven of de analyse kwalitatief of kwantitatief wordt uitgevoerd.

Kustindicator	Toelichting	Hoe?
Pre-run kustindicatoren (a.d.h.v. alleen implementatie suppletieontwerp)		
Dwarsprofielen	Mate van verstoring van het directe dwarsprofiel	T1 bodem – T0 bodem; T2 expert judgement
Bathymetrie	Mate van verstoring bathymetrie (op schaal van morfologische eenheden zoals verandering in platen en geulen)	T1 bodem – T0 bodem; T2 expert judgement
Kustlijnen MKL GLW GHW DV	Berekende verandering in indicator. (Alle begrenzingen conform kustlijn-beoordeling 1-1-2020) MKL volume Positie van de GLW Positie van de GHW Positie van de DV	Kwantitatief voor zowel de T0 als de T1 situatie verandering in [m]; (per raai) verplaatsing per raai [m]; verplaatsing per raai [m]; verplaatsing per raai [m];
Lengte suppletie	Lengte van de suppletie. Geeft ook direct de lengte van de directe verstoring van de kustlijnen	T0 bodem versus modelbodem [m]
Levensduur suppletie	Schatting van de levensduur	o.b.v. expert judgement [jr] voor de T2 situatie
Initiële bedekking	Berekend oppervlakte v/d suppletie (na aanleg)	T1 bodem – T0 bodem [m ²]
Strandbreedtes	DV - GHW	[m]
Intergetijdegebied	Oppervlakte tussen de GLW en GHW	[m ²]
Duinontwikkeling	Verwachte effect op de duinen	expert judgement (T2)
Post-run kustindicatoren (a.d.h.v. morfostatische modellering)		
Erosietrends	Schatting van de erosietrends	Verskil in residueel sedimenttransport (T1 t.o.v. T0)
Golfbelasting	Golfhoogte t.p.v. de kustlijn	Verskil in jaarlijks gemiddelde golfhoogte (T1 t.o.v. T0)
Stroomsnelheid	Stroomsnelheid in Molengat	Verandering in stroomsnelheid (instantane en residuele eb-, vloedstromingen) (T1 t.o.v. T0)
Efficiëntie suppletie	Afschatting van de sedimentverliezen uit het kust vak (o.b.v. optredende sedimenttransporten t.o.v. T0)	Combinatie van data, expert Judgement en verschil in sedimenttransportpatronen. (T1 t.o.v. T0)

2.2.2 Identificeren van kansen & risico's

Naast de kustlijnindicatoren is de evaluatie van de suppleties gebaseerd op een afweging van de kansen en risico's voor ieder rekenontwerp. Deze kansen en risico's per ontwerp worden gegeven in Appendix A en zijn samengevat in (Tabel 2.3). Voor ieder suppletieontwerp zijn op basis van deze kansen en risico's vragen opgesteld die door het model kunnen worden getoetst.

Tabel 2.3: Een overzicht van de te toetsen kansen en risico's als voorbeeld.

Kansen	Risico's
Vergroting zandvolumes kustzone (MKL zone); effect op kustlijn.	Dichtzetten geul / vaarroute recreatievaart
Uit de kust drukken van de stroming in de voorliggende geul.	Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegatsysteem
Reductie van golfbelasting op de kust.	Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem)
Potentieel tot verheling met kustlijn; lange-termijn voeding van de kust.	Vergroten geul gedreven erosie (in de kust drukken van het Molengat of Oostgat)
Langere levensduur dan traditionele strandsuppletie	Beperkt effect m.b.t. handhaving kustlijn
Bevordering van de duingroei	Gevaar voor recreanten (grote intergetijdezone)
	Beïnvloeding van de omliggende banken.
	Gevaar voor recreanten (complexe intergetijde morfologie)
	Beïnvloeding van bestaande harde constructies (zeewering, strandhoofden)

3 Analyse van suppletieontwerpen (stap 4a)

Dit hoofdstuk beschrijft de bepaling van de pre-run kustindicatoren. Op basis van de T0 en T1 bodems kunnen deze al worden berekend voordat het model gerund heeft. Het verschil in indicator tussen de T0 en T1 geeft de initiële effecten van aanleg van de suppletie weer en vormt de basis voor het verdere onderzoek. Naast het bepalen van deze pre-run indicatoren worden ook per ontwerp de kansen en risico's uitgewerkt in de vorm van vragen die middels de modellering kunnen worden beantwoord.

3.1 Een Zandmotor voor Ameland Noordwest (T1 situatie)

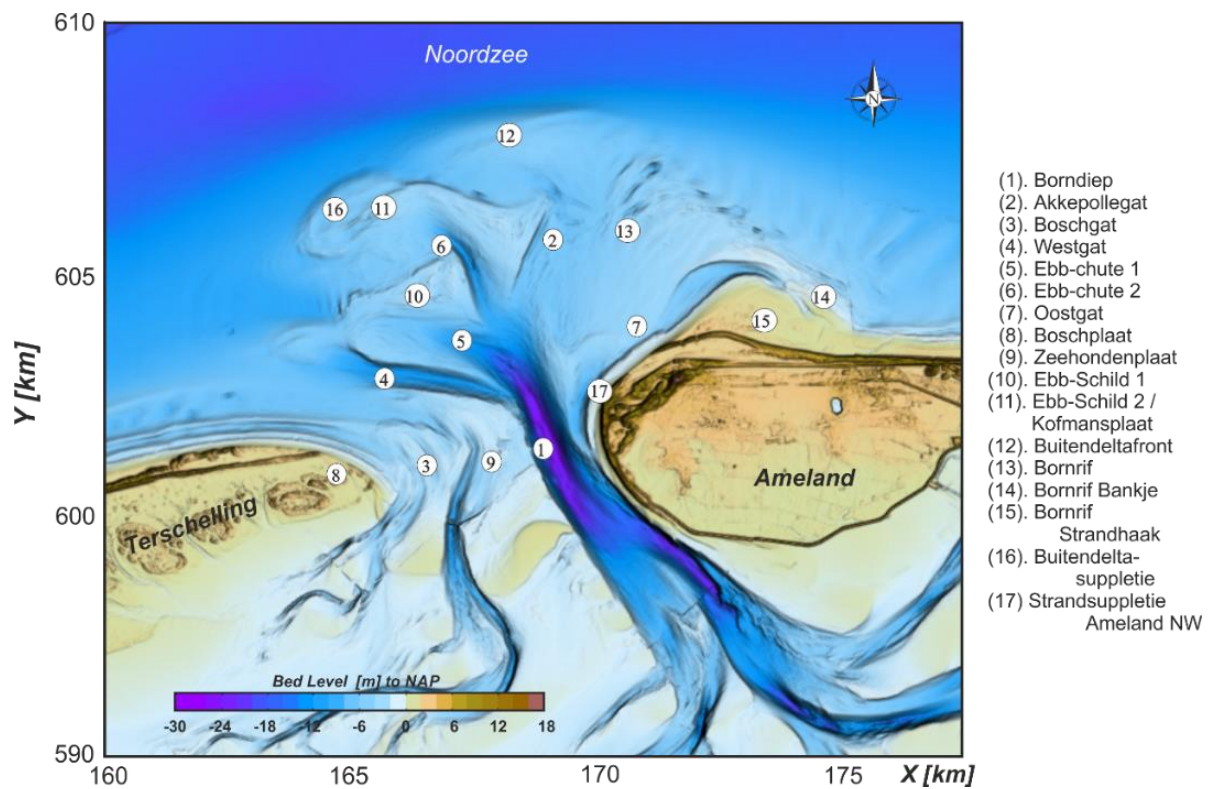
3.1.1 Een korte samenvatting van de belangrijkste geulen en platen

Voor de volledigheid worden hieronder de belangrijkste geulen en platen van het Amelanders Zeegat weergegeven (Figuur 3-1) aan de hand van de 2019 bodem (T0). Voor een volledige beschrijving van het zeegat wordt verwezen naar Stap 1 van de studie (Elias, 2020). De 2019 bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde, langs de westkust van Ameland (het Borndiep [1]). Het Borndiep gaat op de buitendelta over in het Akkepollegat [2].

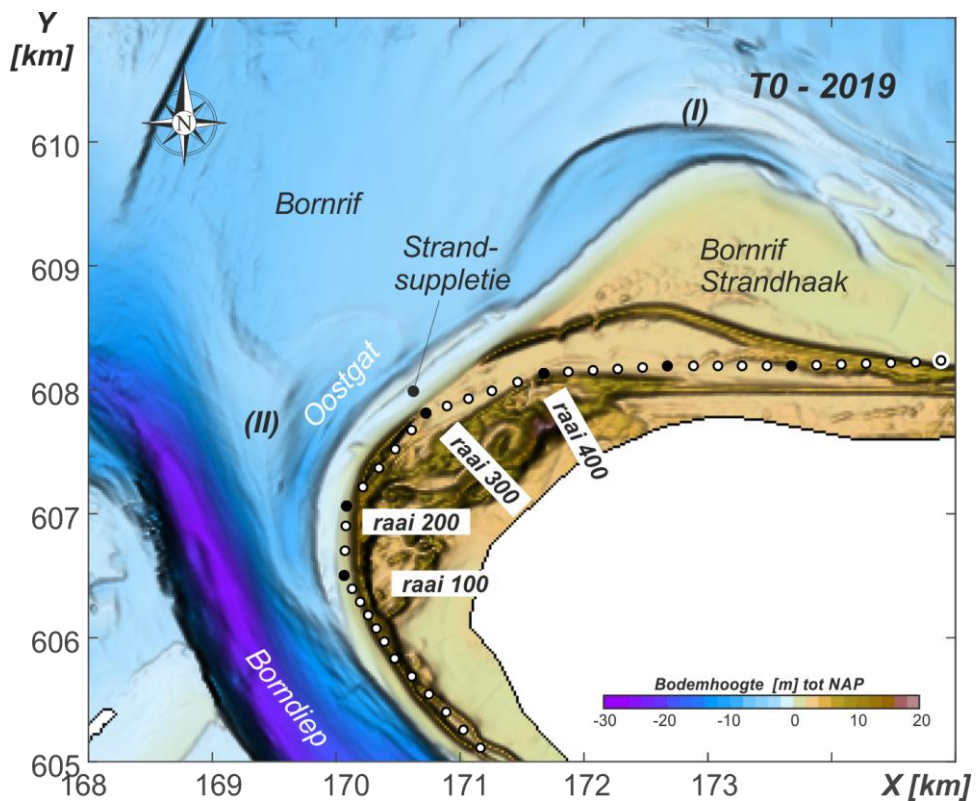
De eilandstaart van Terschelling wordt Boschplaat [8] genoemd. Aan de zeewaartse zijde, bevindt zich een kleinere vloed gedomineerde geul, Westgat [4]. Tussen de Boschplaat en het Borndiep bevindt zich een ondiep gebied waarin diverse kleinere geulen zichtbaar zijn [3]. De grootte van deze geulen varieert door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat (zoals in de jaren 1975 en 1989). Deze verbinding is in het verleden vaak Boschgat [3] genoemd. Richting het bekken bevindt zich nog een wat hoger plaatoppervlakte (de zeehondenplaat [9]). Deze plaat vormt zo een scheiding tussen het oostelijke en westelijke deel van het bekken. Het oostelijke deel maakt verbinding met het Borndiep, het westelijke deel met het Boschgat.

Op de buitendelta bevinden zich 3 duidelijk platen. De grootste plaat, Bornrif [13], ligt oostelijk van het Akkepollegat. Als onderdeel van de "sediment-bypassing cycle" vormen er zich periodiek kleinere platen op het Bornrif. Een voorbeeld hiervan is het Bornrif Bankje [14] dat in 2019 al is verheeld met de kust van Ameland. De aanlanding van het Bornrif Bankje vindt net ten oosten van de Bornrif Strandhaak [15] plaats. Aan de westzijde van de buitendelta, op de Kofmansbult, hebben zich recent verschillende ebschaar en ebschild systemen gevormd [5,10 en 6,11]. Het meest zeewaartse ebschild noemen we de Kofmansplaat [11].

Figuur 3-1 geeft een overzicht van de T0 bodem ter plaatse van Ameland Noordwest. Het zwaartepunt van deze analyse ligt op het gebied tussen raaien 100 en 400. Dit stuk kust ligt achter de buitendelta van het Zeegat van Ameland (het Bornrif). Ten oosten van raai 400 is de kust nog sterk uitgebouwd als gevolg van het aanlanden van een grote zandplaat in 1986, waardoor de Bornrif Strandhaak werd gevormd. De vervorming van de Bornrif Strandhaak domineert sindsdien de ontwikkeling van de kust. Direct na aanlanding van het Bornrif in 1986 was ook de kust tussen raai 200-400 nog sterk uitgebouwd, maar dit zand werd hier snel westelijk afgevoerd richting het Borndiep. Sindsdien wordt dit gebied gekenmerkt door een structureel smalle kustzone die gevoelig is voor erosie. De erosiesnelheden zijn hier weliswaar veel kleiner dan op de kop van de Bornrif Strandhaak, maar doordat de kustzone small is, veroorzaakt dit wel direct terugtrekking van de kustlijn, erosie van de duinvoet en overschrijding van de BKL. Ter hoogte van raai 300 is de buitenste duinenrij zelfs doorbroken. Om de erosie tegen te gaan zijn regelmatig terugkerende zandsuppleties nodig. In de T0 bodem (Figuur 3-2) is de grote strandsuppletie (2,76 miljoen m³), die in 2019 nog in aanleg is, duidelijk zichtbaar.



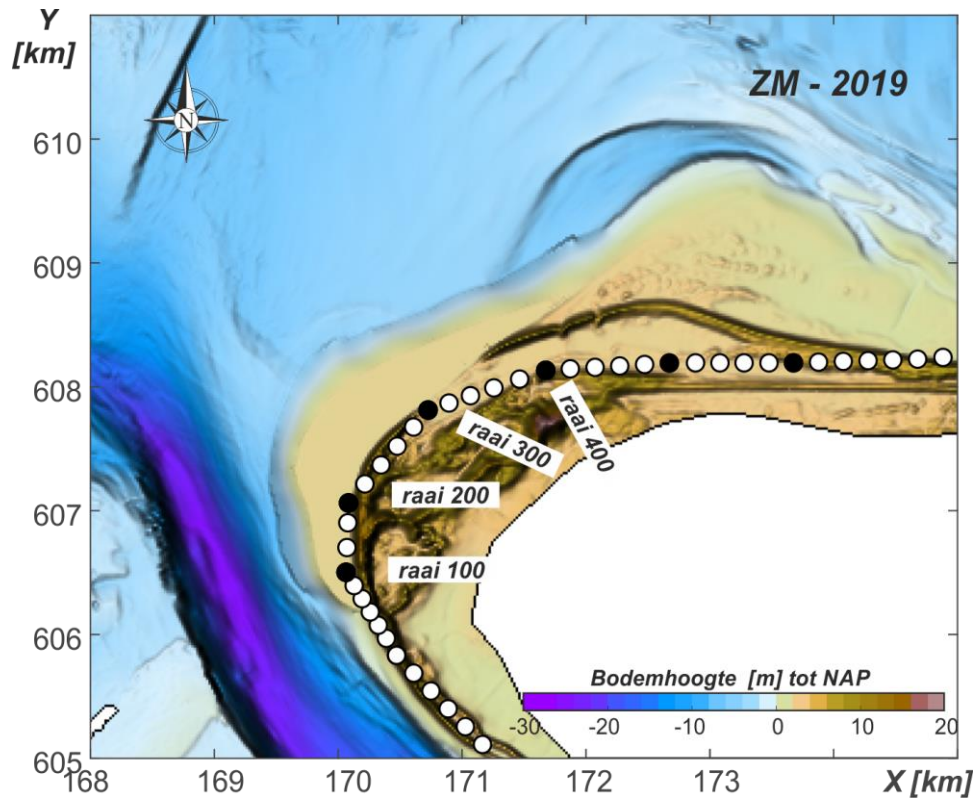
Figuur 3-1: Een overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (boven) en een beschrijving van de dominante morfologische kenmerken (2019 bodem).



Figuur 3-2: Een detailoverzicht van de T0 bodem in 2019 en ligging van de raaien 100, 200, 300 en 400.

3.1.2 Een Zandmotor voor Ameland Noordwest

Voor Ameland Noordwest is één suppletievariant voorgesteld door Rijkswaterstaat. Dit is een gecombineerde strand-vooroeversuppletie als een zandmotor tussen raaien 100 en 400 (Figuur 3-3). Dit is een vergrote versie van de suppletie Ameland Westkop die in 2019 is uitgevoerd en is bedoeld om het Oostgat langs het meest erosieve gedeelte van de kust dicht te zetten. De suppletie pakt ook een groot deel van de eilandkop in waardoor er voor lange tijd voldoende zand aanwezig is. Deze suppletie heeft een ontwerpvolume van 9,1 miljoen m³ en de lengte van het suppletiegebied is 3,2 km. De aanleghoogte van de suppletie bedraagt ongeveer +2 m NAP op het strand. De initiële bedekking van deze suppletie bedraagt 2,6 miljoen m².



Figuur 3-3: Een overzicht van de Zandmotor suppletie bij Ameland Noordwest zoals geïmplementeerd in Delft3D (T1).

Het grote volume van de suppletie geeft een grote verstoring van de bathymetrie (Figuur 3-3) en dwarsprofielen (Figuur 3-5). Over een lengte van 3,2 km wordt de kustzone beïnvloed en zorgt voor een verre zeewaartse verplaatsing van de kustlijnen. De suppletie zet het voorliggende Oostgat dicht. De vloedstroming moet dan over de voorliggende ondiepte stromen wat hier waarschijnlijk veranderingen van de onderliggende morfologie geeft. Door oostelijke verspreiding van de suppletievolumes zal er ook aanzanding richting de Bornrif Strandhaak optreden.

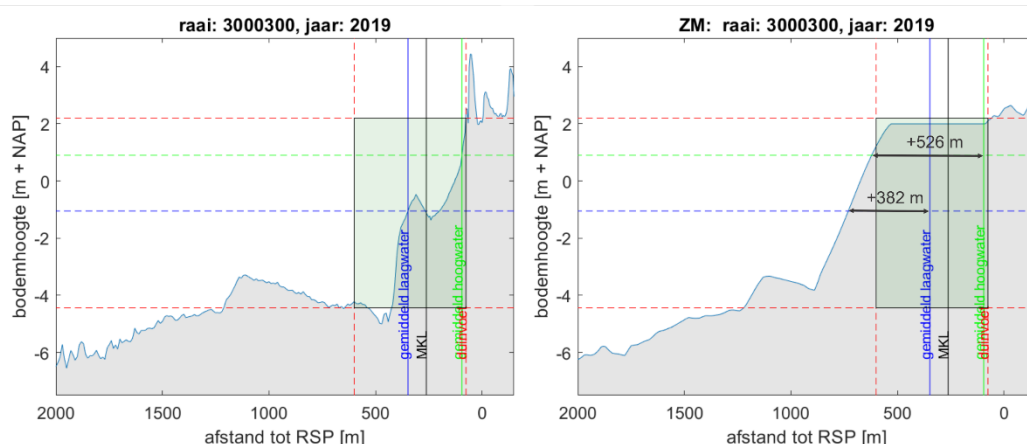
Tabel 3.1: Eigenschappen van de Zandmotor suppletie.

Eigenschap	Waarde
Naam	Ameland - Zandmotor
Locatie	Ameland NW
Strand/vooroever	Strand-vooroever
Totale in situ volume suppletie	8.829.000 m ³
Van/Tot (raaien)	100 – 420
Lengte suppletiegebied	3200 m

Invloed van de suppletie op de pre-run kustindicatoren

Het aanbrengen van bijna 9 miljoen m³ zand op de Noordwestzijde van de kust geeft een aanzienlijke beïnvloeding van de MKL en kustlijnen. Deze verplaatsen ver zeewaarts zoals te zien is in Figuur 3-5 en Tabel 3-2. In de Figuur wordt alleen de positie van de MKL weergegeven maar de overige kustlijnen vertonen een gelijkwaardig beeld.

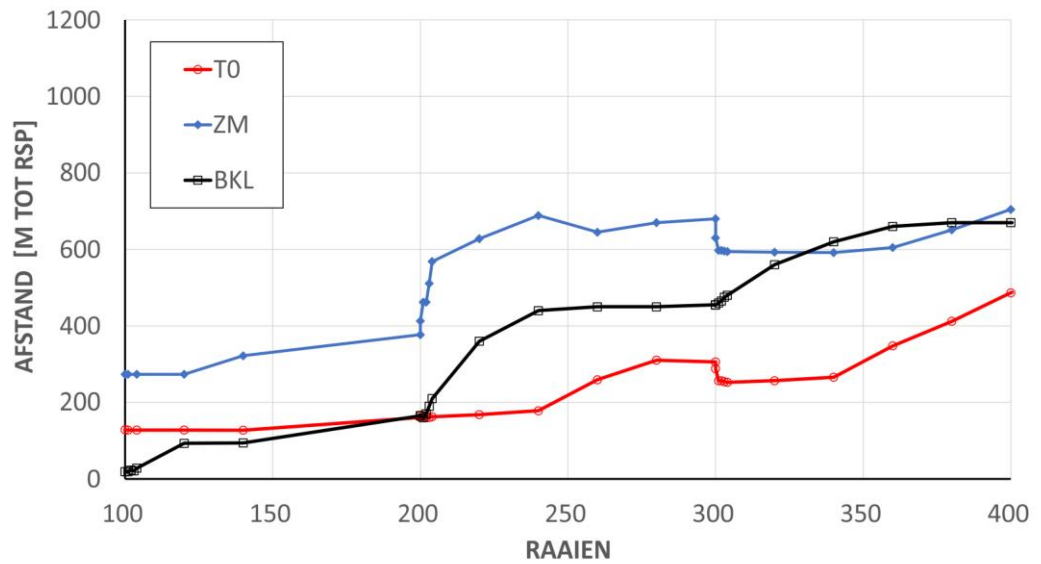
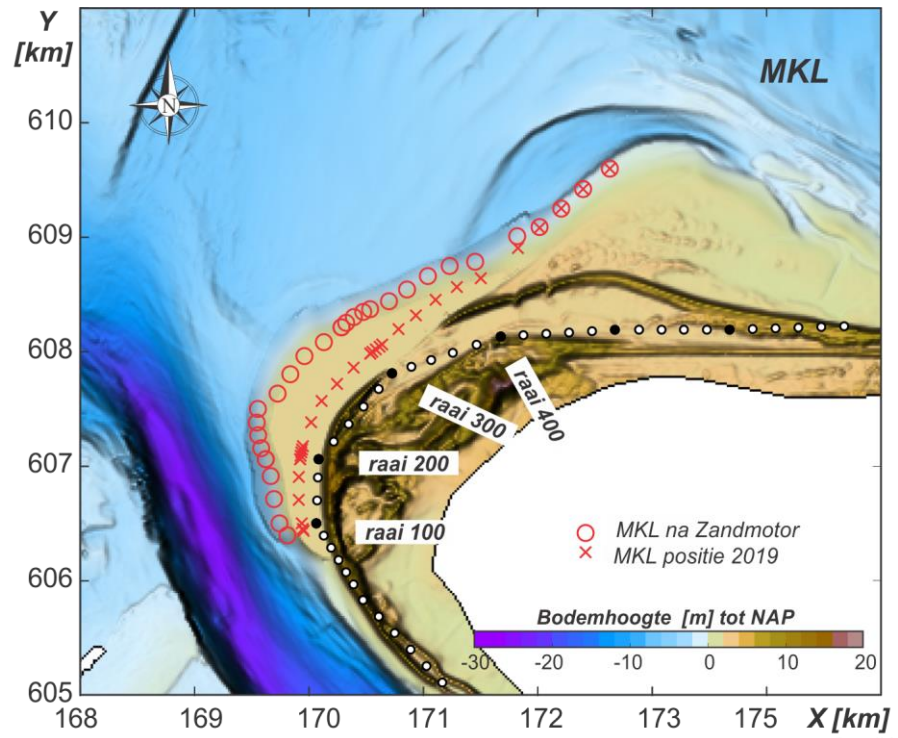
De grootste zeewaartse uitbouw vindt plaats tussen raai 200 en 350. Hier verplaatst de MKL tussen met meer dan 340 m zeewaarts. Tussen raai 100 en 200 is deze toename 150 tot 250m. Door de aanleghoogte (+2 m NAP) neemt de droge strandbreedte, het strand tussen GHW en de DV sterk toe. Tussen raai 200 en 300 ligt die toename rond de 400m. De aanleghoogte zorgt ervoor dat het intergetijdegebied initieel niet toeneemt. Ook heeft de suppletie geen directe invloed op de duinvoet (gedefinieerd als de +3m NAP). Op langere termijn zal de suppletie wel degelijk kunnen bijdragen aan duinontwikkeling. Door de aanleghoogte ontstaat een relatief brede strandvlakte waarop windgedreven transporten kunnen optreden. De breedte lijkt hiervoor voldoende, maar de levensduur kan een knelpunt vormen. De vlakte moet lang genoeg aanwezig blijven voor een significant effect op de duingroei.



Figuur 3-4: Een overzicht van de verandering in dwarsprofiel voor de T0 (links) en de T1 na aanleg van de ZM (rechts). In beide figuren geven de lijnen de ligging van de GHW (blauw), GLW (groen), MKL (zwart) en DV (rood) weer. Deze lijnen zijn bepaald voor de T0 situatie. In de rechter figuur zijn deze lijnen ook weergegeven. Het verschil in de ligging van deze lijnen met het nieuwe profiel geeft duidelijk de invloed van de suppletie weer op de verschillende indicatoren. In profiel 300 verplaatst de GLW 382m zeewaarts en de GHW 526m zeewaarts. In Appendix B.1 worden ook de overige raaien 100-400 getoond.

Tabel 3.2: Invloed van de Zandmotor suppletie op de pre-run kustindicatoren MKL, GLW, GHW en strandbreedte voor geselecteerde raaien. Alle afstanden relatief tot RSP.

Raai	MKL [m]		GLW [m]		GHW [m]		GHW-DV [m]	
	T0	ZM (T1)	T0	ZM (T1)	T0	ZM (T1)	T0	ZM (T1)
100	110	254	145	260	-9	210	57	267
200	73	319	212	470	12	400	28	416
300	-144	230	348	730	94	620	29	555
400	-173	45	557	700	445	600	42	197



Figuur 3-5: Een overzicht van de verandering in MKL-positie door het aanbrengen van de zandmotor suppletie (T1 situatie).

Met behulp van de in het verleden geobserveerde trends kan een schatting van de levensduur worden gemaakt (zie Appendix B.1.1). De toename van de stromingen na aanleg laat zien dat de erosie hoger zal zijn dan in de huidige situatie. Ook in het verleden is de kustlijn hier verstoord door onder andere suppleties en de aanlanding van het Bornrif. Na aanlanding van het Bornrif werd kustlijnterugtrekking van 50-60 m/j geobserveerd. Een analyse van de MKL terugtrekkingen na suppleties geeft hier waarden van tot 80 m/jaar tussen raai 100-200 en 40 m/j in raai 200-400. Er van uitgaande dat de erosie tussen raai 200-400 de verliezen van raai 100-200 weer gedeeltelijk aanvult geeft dit een levensduur van 5 tot 6 jaar. Dit wil niet zeggen dat de gehele suppletie na 5 jaar verdwenen is, maar tussen raai 100-200 zal dan de MKL weer terug op de oorspronkelijke positie liggen. De 2019 strandsuppletie vertoont veel overeenkomsten met de voorgestelde zandmotor suppletie. Een analyse van de ontwikkeling ervan kan daarom veel aanvullend inzicht verschaffen in de werking van de ZM suppletie. Geadviseerd wordt, mocht de in de toekomst de ZM suppletie gekozen worden als voorkeursvariant op dat moment, als er meer data over de ontwikkeling is, een analyse van de 2019 strandsuppletie uit te voeren.

3.1.3 Kansen en risico's van het ontwerp

Deze suppletie geeft direct een bijdrage aan de achterliggende kustveiligheid. De kust bouwt ver zeewaarts uit. Hierdoor wordt de MKL ook zeewaarts verlegt en ontstaat een breed droog strand. Met doorgaande verspreiding van de suppletie zal er op termijn ook een groot intergetijdgebied kunnen ontstaan. Dit kan echter wel gevaar op leveren voor de recreatie.

Door verspreiding van de suppletie kan deze voor voeding zorgen van de aangrenzende kustvakken. Een risico zijn de waarschijnlijk grote verliezen richting het Borndiep. Deze verliezen zullen voor een groot deel bepaald worden door de morfologische ontwikkeling in de vooroever. Door dichtzetten van het Oostgat wordt een belangrijk proces achter de kustlijnerosie geminimaliseerd. Als het Oostgat opnieuw vormt om de punt van de Zandmotor dan zullen de verliezen onverminderd doorgaan. De voorliggende ondiepte kan mogelijk de vorming van een nieuwe geul vertragen en zo de verliezen aanzienlijk verkleinen.

Het Oostgat is geen doorgaande getijgeul zoals bijvoorbeeld het Molengat. Ter plaatse van de suppletie is het Oostgat eigenlijk een ontgrondingskuil die ontstaat omdat de getijstrooming die vanaf het Bornrif komt om de eilandpunt van Ameland heen versnelt richting het Borndiep. Een vraag voor de modellering (zie H5) is of de suppletie in staat is de vloedstroming zo om te leiden dat deze ontgrondingskuilen zich niet direct langs de kust terug hervormen. Als de ontgrondingskuil hervormt, zeewaarts van de suppletie, zal er een groot verlies richting het Borndiep optreden.

Tabel 3.3: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievariant na aanleg op de pre-run kustindicatoren.

Kustindicator	T1 (direct na aanleg)
<i>Beïnvloeding dwarsprofielen</i>	Dwarsprofiel wordt zeewaarts verlegt en ontgrondingskuil dichtgezet.
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	Ontgrondingskuil dichtgezet. Kustlijnoriëntatie verandert.
<i>Beïnvloeding kustlijnen</i>	(zie Tabel 3-5)
<i>Kustlijnen – MKL</i>	+299 m
<i>Lengte beïnvloeding (m)</i>	3,2 km
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	5-6 jaar
<i>Initiële bedekking</i>	2,6*10 ⁶ m ²
<i>Strandbreedtes</i>	+200-500 m
<i>Intergetijdgebied</i>	geen verandering
<i>Duinontwikkeling</i>	geen verandering

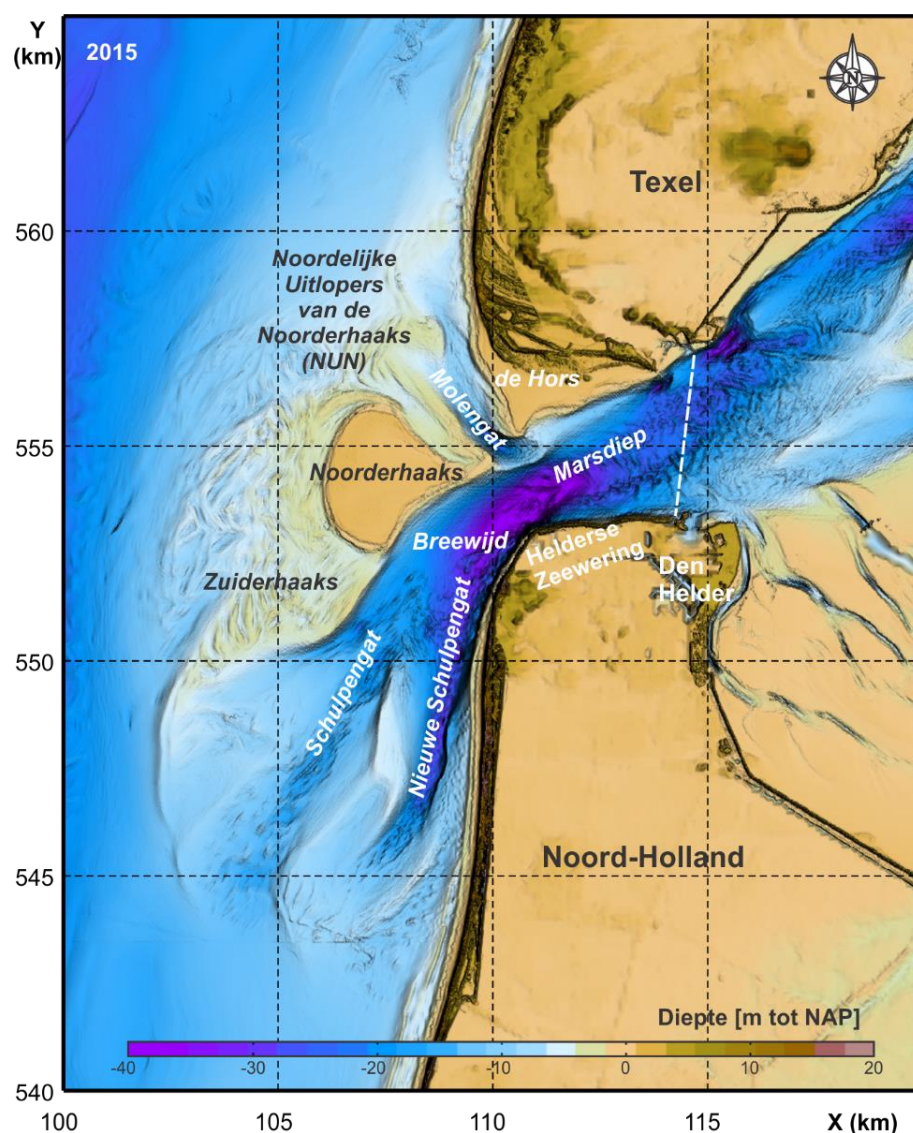
Tabel 3.4: Kansen & risico's van het ontwerp geïdentificeerd door RWS

Kansen	(Vragen m.b.t.) Risico's
<ul style="list-style-type: none"> • Directe voeding kust • Vergroten zandvolumes kustzone • Reduceren van kustlangse getij-erosieprocessen • Bevorderen van duingroei 	<ul style="list-style-type: none"> • Kan de vloedstroming omgeleid worden door deze ingreep? • Wat is de effectiviteit van de suppleties op gebieden I (raaien 0-200) en II (raaien 20-400). • Is het uitvoerbaar? • Kunnen onverwachte (getij)stromingen rondom de zandmotor ontstaan? • Leidt deze ingreep tot onverwachte effecten in het zeegatsysteem? • Gevaar voor recreanten (niet bij aanleg, maar bij verspreiding van de suppletie).
Vragen t.b.v. de modellering ZM	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hoe beïnvloedt deze suppletie de stroming in het Oostgat? 2. Worden de zandverliezen in de kustzone verkleind? 3. Vindt er een transport plaats vanaf de ZM in oostelijke of in westelijke richting? 4. Zijn er op de schaal van de buitendelta verschillen te onderscheiden? 	

3.2 Een beschrijving van de suppletievarianten voor Texel

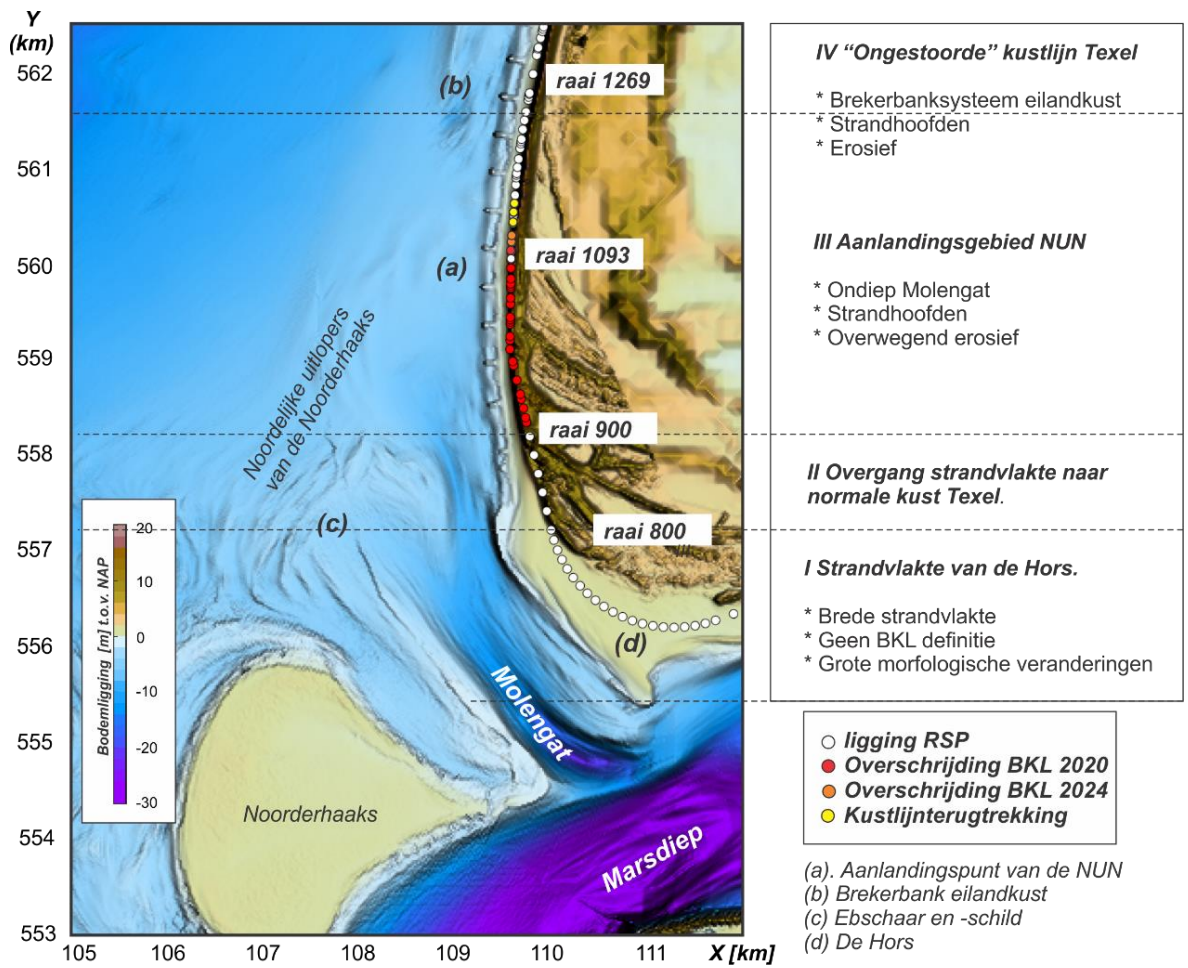
3.2.1 Een korte samenvatting van de belangrijkste geulen en platen (T0)

Figuur 3-6 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen en platen van het Zeegat van Texel. De onderliggende bodem is van 2015, maar is ook representatief voor de huidige situatie. Eigenlijk heeft de buitendelta al sinds 1975 deze dominante geulen en platen. Het Marsdiep is de hoofdgeul in de keel van het Zeegat. Aan de zuidzijde hiervan bevindt zich de Helderse Zeewering. Versnelling van de stroming om de Noordwestelijke punt van deze Zeewering heeft de geul lokaal uitgeschuurd tot dieptes van meer dan 50 m. De put op het diepste punt wordt de Helsdeur genoemd. Het Marsdiep verbindt de hoofdgeulen in het bekken via het Breewijd met de hoofdgeulen op de buitendelta: Schulpengat en Nieuwe Schulpengat. De buitendelta strekt zich ongeveer 10 km zeewaarts en 25 km kustlangs uit. De ongeveer 4 km² grootte ondiepte Noorderhaaks vormt het middelpunt van de buitendelta, waarvan de oostzijde zich tijdens normale omstandigheden boven water bevindt (de Razende Bol). Aan de noordkant bevindt zich een langgerekte spit: de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN). Tussen de NUN en de kust van Texel ligt de vloedgedomineerde geul Molengat. In het verleden was het opdringen (landwaarts verplaatsen) van het Molengat een belangrijke reden waarom er grote zandverliezen in dit kustvak plaatsvonden.



Figuur 3-6: Een overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Texel op basis van de 2015 Vakloding.

Figuur 3-7 geeft een gedetailleerd beeld van de T0 bodem (2019) nabij Zuidwest Texel. Het zwaartepunt van de uitgevoerde analyse ligt op het gebied tussen raaien 800 en 1200. Vanaf raai 900 noordwaarts is hier een BKL vastgesteld. Dit stuk kust ligt achter de noordelijke helft van de buitendelta van het Zeegat van Texel. De zandbank Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) strekt zich hier voor de kust uit en vormt zo een natuurlijke golfbreker voor de achterliggende kust. Tussen de NUN en de kust bevindt zich een ondiepe geul het Molengat. Aan de zuidzijde is het Molengat diep en verbonden met het Marsdiep, de hoofdeul van het Zeegat. In noordelijke richting neemt de diepte van het Molengat sterk af en rond raai 1000 is een geul niet meer te zien. Hier maakt de NUN verbinding met de kust via een ondiep platform rond de -5 m NAP. Voor een uitgebreide beschrijving van de recente morfologische ontwikkelingen van het Zeegat van Texel wordt verwezen naar Elias en Van der Spek. (2019) en stap 1 van de studie (Elias, 2020). Op basis van de lokale kustlijnveranderingen en voorliggende vooroever kan Zuidwest Texel in een viertal deelgebieden worden onderverdeeld. Deze 4 gebieden met hun kenmerken zijn weergegeven in Figuur 3-7 en behandeld in Elias (2020, stap 1 van deze studie).



Figuur 3-7: Overzicht van de T0 bodem van Zuidwest Texel op basis van de 2019 vakloding.

3.2.2 Texel Brekerbank (BB)

Omschrijving:

Langs de kust van Texel is al een doorgaande brekerbank aanwezig. Deze brekerbank stopt net ten noorden van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN), ongeveer ter hoogte van raai 1200. De vooroeversuppletie voorziet in het doortrekken van deze brekerbank in zuidwaartse richting tot ongeveer net ten noorden van de Hors (Figuur 3-8). De brekerbank sluit dan ter hoogte van raai 800 aan op de kust. Deze suppletie doorkruist het noordelijke deel van het Molengat, maar sluit de geul niet geheel af. Het diepere deel van de geul, ten zuiden van raai 800, stroomt zeewaarts uit over de NUN. De suppletie vormt dan eigenlijk een nieuwe geulwand iets zeewaarts van de kustlijn. De totale lengte van de suppletie is een kleine 4,5 km met een volume in de modelbodem van 1,8 miljoen m³. Dit volume is iets hoger dan het aangeleverde rekenontwerp (1,5 miljoen m³) en de aanleghoogte van de suppletie bedraagt ongeveer -4 m NAP en sluit hierbij aan op de hoogte van de natuurlijke brekerbank. De initiële bedekking bedraagt een oppervlak van 1,38 miljoen m². Daarmee heeft deze suppletie het kleinste bedekkingsoppervlakte van de 4 varianten.

Invloed op de pre-run kustindicatoren

Het merendeel van de suppletie wordt buiten de MKL-zone uitgevoerd. Direct na aanleg geeft dat dan alleen tussen raaien 950 – 1150 een directe, kleine, bijdrage aan het MKL volume/positie. Hier verplaatst de MKL dan gemiddeld 100m zeewaarts. Deze suppletie geeft verder geen directe beïnvloeding van de strandlijnen en strandbreedte (Figuur 3-12).

Figuur 3-8 laat zien dat de suppletie qua vorm en ontwerp goed past bij de huidige morfologische situatie. Het geeft eigenlijk een continuering van het banksysteem dat iets noordelijker al aanwezig is. Toch wordt deze suppletie geclassificeerd als grote verstoring van het dwarsprofiel en bathymetrie. De bodem wordt immers in een andere morfologische staat gebracht: van een ondiep platform van de buitendelta naar een brekerbank systeem.

Kansen en risico's van het ontwerp

De werking van deze suppletie doet denken aan die van de klassieke vooroeversuppletie. Door het creëren van een lange brekerbank ontstaat een ondiepte waarop golven kunnen breken. Door golfbreking op de suppletie vindt er een afscherming van de achterliggende kust plaats. Dit zou de golfgedreven transporten en dus ook de erosie hier kunnen reduceren. Naast de golfafscherming wordt ook de stroming door het Molengat over een klein deel, tussen raai 900 en 1000, zeewaarts gedrukt. Hierdoor ontstaat een luwtegebied, tussen de brekerbank en de kust van Texel, waar sedimentatie kan optreden. Als mogelijke risico is geïdentificeerd dat deze suppletie het Molengat gedeeltelijk dichtzet waardoor er een beïnvloeding van de vaargeul kan optreden. Door het dichtzetten van het Molengat kan de nu stabiele geul beïnvloed worden. Geulmigratie zou kustlijnerosie of ondermijning van de strandhoofden kunnen geven. Het is mogelijk dat deze suppletie slechts een beperkte levensduur heeft. In de huidige situatie is er geen brekerbank aanwezig. Het is niet zeker of deze dan ook gehandhaafd wordt of heel snel verdwijnt.

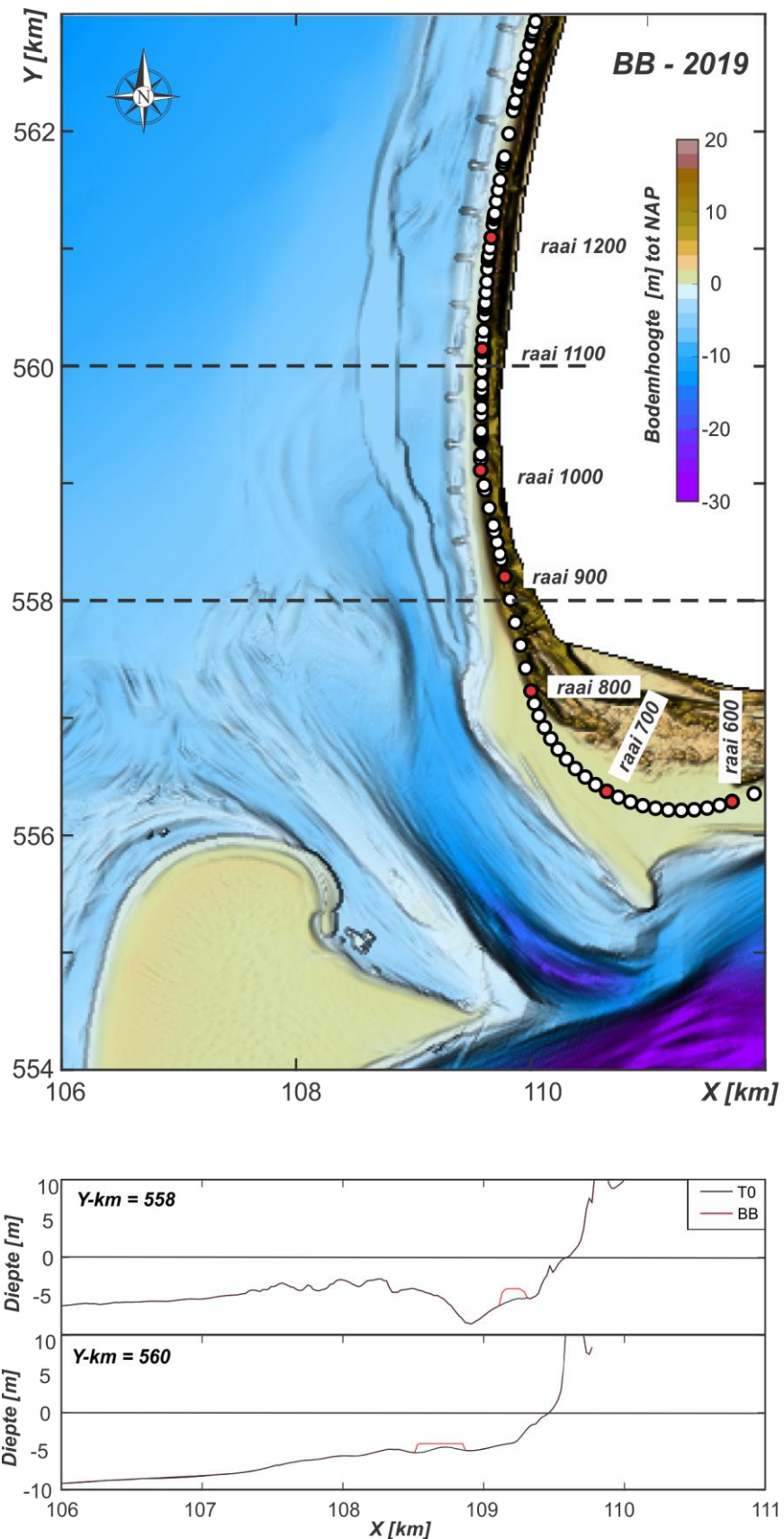
In Tabel 3.5 worden de pre-run kustindicatoren samengevat en in Tabel 3.6 wordt een overzicht van de kansen & risico's van dit ontwerp gepresenteerd zoals aangeleverd door RWS. Deze vragen zijn vervolgens vertaald naar onderzoeksvragen ten behoeve van de modellering.

Tabel 3.5: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievariant na aanleg op de pre-run kustindicatoren.

Kustindicator	T1 (direct na aanleg)
Beïnvloeding dwarsprofielen	creëert een brekerbank in het profiel welke natuurlijk niet aanwezig zou zijn
Beïnvloeding bathymetrie	langgerekte brekerbank ontstaat op de vooroever
Beïnvloeding kustlijnen	zeewaarts aangelegd, alleen beïnvloeding bij de aansluiting op het strand (tussen raai 1000 en 1100)
Kustlijnen – MKL	+100 m tussen raai 1000 en 1100
Lengte beïnvloeding (m)	4,3 km (lengte suppletie), kustlijn 0 m
Geschatte levensduur suppletie	geen schatting mogelijk op basis van de T0 en T1
Initiële bedekking	1,4*10 ⁶ m ²
Strandbreedtes	geen verandering
Intergetijdegebied	geen verandering
Duinontwikkeling	geen verandering

Tabel 3.6: Een overzicht van kansen & risico's van het ontwerp geïdentificeerd door RWS en een doorvertaling naar onderzoeksvragen t.b.v. de modellering.

Kansen	Risico's
<ul style="list-style-type: none"> • Vergroting zandvolumes kustzone (MKL zone); effect op kustlijn. • Reductie van golfbelasting op de kust. • Uit de kust drukken van de stroming in het Molengat. • Potentieel tot verheling met kustlijn (lange-termijn effecten van de suppletie) • Langere levensduur dan een traditionele suppletie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtzetten geul/ vaarroute recreatievaart • Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem) • Duur in uitvoering/ inefficiënt • Beperkt effect m.b.t. kustijnhandhaving • Beïnvloeding van bestaande harde constructies (zeewering, strandhoofden)
Vragen t.b.v. de modellering BB	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Wat is het effect van deze suppletie op de getijstroming? 2. Wordt de stroming in het Molengat beïnvloed? 3. Vindt er significante golfbreking plaats op deze suppletie gegeven de kruinhoogte van -4m? 4. Wat is het effect van deze suppletievariant op de sedimenttransportpatronen? <ol style="list-style-type: none"> a. Vindt er een rechtstreekse beïnvloeding plaats (voeding vanaf de suppletie richting de kust)? b. Worden de sedimenttransporten indirect beïnvloed door bijv. afscherming of invangen van sediment? 	



Figuur 3-8: Overzicht ligging suppletievariant Texel Brekerbank zoals geïmplementeerd in Delft3D FM (T1 situatie). Onderste 2 deelfiguren geven 2 representatieve raaien t.p.v. Y-km 558 en 560 (zie gearceerde lijnen voor ligging). De bodem is gebaseerd op de 2019 Jarkus-grids.

3.2.3 Suppletievariant 2: Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN)

Omschrijving

De tweede variant, NUN, (Figuur 3-9) is uitgevoerd als onderwatersuppletie op het meest noordelijke deel van de NUN als onderdeel van de buitendelta van het Zeegat van Texel. De totale lengte van de suppletie is een kleine 1,9 km met een volume van 2,8 miljoen m³. Dit volume is iets hoger dan het in situ volume van 2,8 miljoen m³ dat vanuit het rekenontwerp is bepaald. De aanleghoogte van de suppletie bedraagt -2,5m NAP. Deze hoogte is ongeveer gelijk aan het meer zuidelijk gelegen deel van de NUN, waar deze aansluit op de Noorderhaaks. De suppletie is echter niet zo ontworpen dat deze direct op de Noorderhaaks aansluit, maar is als een duidelijk blok zichtbaar in de bodem. De initiële bedekking van deze suppletie is met 1,4 miljoen m³ vrijwel gelijk aan die van BB variant.

Invloed op de pre-run kustindicatoren

Ook deze suppletie wordt geheel buiten het bereik van de indicatoren aangelegd. Een directe invloed op MKL of strandlijnen is dan ook niet aanwezig, omdat de suppletie buiten de rekenschijf wordt aangelegd. De suppletie heeft wel een grote invloed op de lokale dwarsprofielen, de lokale beïnvloeding is groot, maar kustlangs is de verstoring slechts over een kleine lengte aanwezig. De verstoring van de bathymetrie wordt hier geclassificeerd als beperkt. De redenering hierachter is dat er geen verandering in de morfologische kenmerken van het gebied optreedt. Er worden geen geulen afgesloten, alleen de lokale plaathoogte van de NUN wordt hoger.

Kansen en risico's

Het creëren van een ondiepte op de NUN geeft twee belangrijke effecten. Ten eerste vindt er een beïnvloeding van het golfklimaat plaats. Door golfbreking op de suppletie wordt de achterliggende kustlijn afgeschermd. De lengte van dit afschermingsgebied is waarschijnlijk kleiner dan de BB variant, doordat de lengte van de suppletie kleiner is, maar de suppletie wordt wel ondieper aangebracht wat kan leiden tot extra golfafscherming ten opzichte van de BB variant. Of dit ook werkelijk zo is, zal blijken uit de modellering (zie H4). Ten tweede, door de ondiepe ligging van de suppletie zal er initieel een grote verandering optreden. De suppletie levert dan sediment aan de NUN waardoor er een extra voeding van de kust optreedt. Deze voeding zal waarschijnlijk de huidige NUN volgen waardoor er extra zandtoevoer zal plaatsvinden tussen raai 1100-1200. Het is ook mogelijk dat deze bank als geheel landwaarts gaat verplaatsen en uiteindelijk zal aanlanden op de kust van Texel. Dit zou dan tijdelijk een zandmotor geven die de kust kan voeden. Een risico bij deze bankverplaatsing is wel dat er vaak, tijdelijk, extra erosie van de kustlijn optreedt. Naarmate de bank de kustlijn dichter nadert vertraagt de verplaatstingssnelheid. Dit komt door de geul die tussen de bank en de kustlijn ontstaat. In deze geul versnellen de stromingen en ontstaat er een ontgrondingskuil of lokale kustlijnerosie. Deze erosie is niet alleen negatief voor de kustlijn, maar kan mogelijk ook de aanwezige strandhoofden op Texel ZW ondermijnen. Door goede monitoring en eventueel aanvullende strandsuppleties om de verheling te versnellen kunnen deze risico's worden geminimaliseerd. Een vraagteken bij deze suppletie is ook de effectiviteit voor de kustlijnhandhaving. Aangezien de suppletie buiten de rekenschijf van de MKL wordt aangelegd zijn deze effecten niet direct zichtbaar.

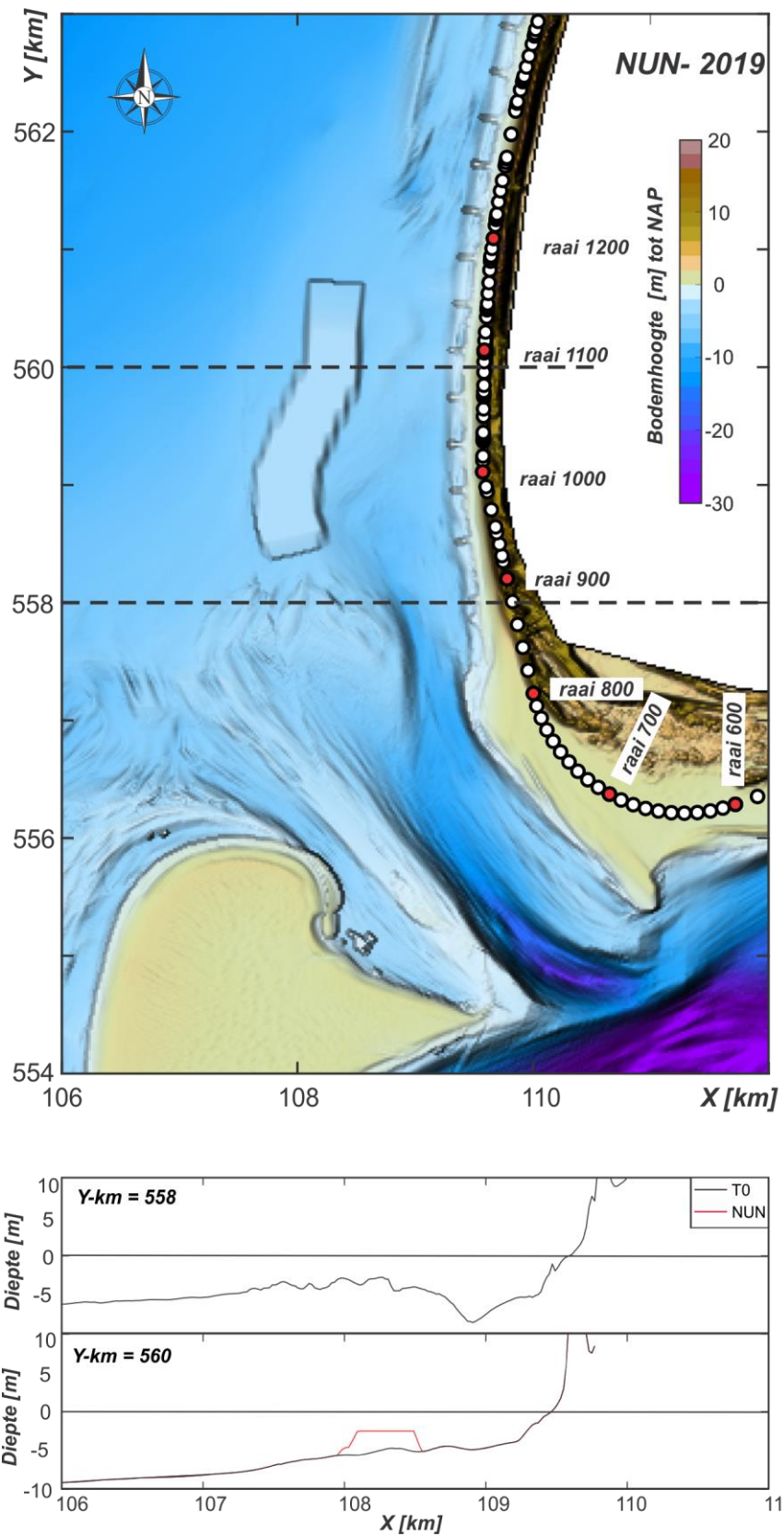
In Tabel 3.7 worden de pre-run kustindicatoren samengevat en in Tabel 3.8 wordt een overzicht van de kansen & risico's van dit ontwerp gepresenteerd zoals aangeleverd door RWS. Deze vragen zijn vervolgens vertaald naar onderzoeksvragen ten behoeve van de modellering.

Tabel 3.7: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievariant na aanleg op de pre-run kustindicatoren.

Kustindicator	T1 (direct na aanleg)
Beïnvloeding dwarsprofielen	verhoging van de bestaande bank
Beïnvloeding bathymetrie	verhoging van bestaande bank
Beïnvloeding kustlijnen	zeewaarts aangelegd
Kustlijnen – MKL	0 m
Lengte beïnvloeding (m)	0 m
Geschatte levensduur suppletie	geen schatting mogelijk op basis van T0 en T1
Initiële bedekking	1,5*10 ⁶ m ²
Strandbreedtes	0 m
Intergetijdegebied	geen verandering
Duinontwikkeling	geen verandering

Tabel 3.8: Kansen & risico's van het ontwerp geïdentificeerd door RWS

Kansen	Risico's
<ul style="list-style-type: none"> • Reductie van golfbelasting op de kust. • Potentieel tot verheling met kustlijn (langetermijn effecten van de suppletie) • Langere levensduur dan een traditionele suppletie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Duur in uitvoering/ inefficiënt • Beperkt effect m.b.t. handhaving kustlijn • Vergroten geul gedreven erosie (in de kust drukken van het Molengat of Oostgat) • Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegatsysteem • Beïnvloeding van de omliggende banken.
Vragen t.b.v. de modellering NUN	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Wat is het effect van deze suppletie op de golven? <ol style="list-style-type: none"> a. Vindt er een duidelijke golfafscherming plaats van de aanliggende kust? b. Hoe verhoudt deze suppletie zich in relatie tot de BB variant. 2. Wat is het effect van deze suppletievariant op de sedimenttransportpatronen? <ol style="list-style-type: none"> a. Worden de getij gedreven transporten beïnvloed? b. Wat is het effect van golfafscherming op de sedimenttransporten? c. Worden de sedimenttransporten bij de kustlijn indirect beïnvloed door bijv. afscherming of invangen van sediment? 3. Is er een kans op verheling van de NUN met de kust van Texel Zuidwest? 	



Figuur 3-9: Overzicht ligging suppletievariant Texel NUN zoals geïmplementeerd in Delft3D (T1 situatie). Onderste 2 deelfiguren geven 2 representatieve raaien t.p.v. Y-km 558 en 560 (zie gearceerde lijnen voor ligging). De bodem is gebaseerd op de 2019 Jarkus-grids.

3.2.4 Suppletievariant 3: Texel Zandmotor I (ZM I).

Omschrijving

Deze suppletie wordt uitgevoerd als een kustlangse zandmotor tussen raaien 840 en 1230 (Figuur 3-10). Eigenlijk heeft deze suppletie de kenmerken van een strandsuppletie alleen zijn het volume en de lengte wel groter dan gemiddeld en wordt de suppletie doorgetrokken tot op de vooroever. In totaal heeft deze suppletie een ontwerpvolume van 3,5 miljoen m³ en de lengte van het suppletiegebied is een kleine 4 km. De aanleghoogte van de suppletie bedraagt ongeveer +3 m NAP op het strand. De initiële bedekking van deze suppletie is met 1,5 miljoen m³ iets groter dan de voorgaande varianten (BB en NUN). Een verschil is wel dat het merendeel van de bedekking op het strand en in het intergetijdegebied plaatsvindt.

Invloed op de pre-run kustindicatoren

Deze suppletie geeft de grootste (kustlangse) beïnvloeding van de kustlijnen en MKL. Door deze suppletie verplaatst de MKL na uitvoering gemiddeld 96 m zeewaarts. Lokaal is de toename veel hoger. Ter hoogte van raaien 850-950 neemt de MKL met 155-165 m toe (Figuur 3-12).

De suppletie heeft een aanleghoogte van +3m NAP. Dit heeft direct een groot effect op de gemiddelde hoog- en laagwaterlijnen, welke zeewaarts verplaatsen. Door deze aanleghoogte is er geen waarneembaar effect op het intergetijde gebied (tussen de GLW en GHW). Op basis van het suppletieontwerp zal dit theoretisch eerst afnemen; de ontwerphelling is steiler dan de natuurlijke helling van de vooroever. De helling zal zich echter direct na aanleg hervormen naar een natuurlijk evenwicht waardoor het effect op het intergetijdegebied na aanleg minimaal zal zijn. Na aanleg zal de suppletie zich verder vervormen. De hoogte zal afnemen en het volume kustlangs worden verspreidt. Hierdoor worden de aangrenzende kustvakken gevoed. Een deel van dit zand zal bijdragen aan duingroei en duinontwikkeling. Door de hoge aanleghoogte ontstaat een langgerekt platform. Op dit platform hebben de aeolische processen vrij spel waardoor er een significante zandtransport naar de duinen zal optreden. De breedte en levensduur van de suppletie zullen waarschijnlijk niet voldoende zijn om embryonale duinvorming te verkrijgen. Een deel van het zand zal ook kustlangs verspreiden.

Morfologisch gezien geeft de suppletie slechts een beperkte verstoring van de dwarsprofielen. Lokaal wordt de kustzone na aanleg wel steiler, maar het is de verwachting dat dit snel vervormt naar een nieuw evenwicht. Deze suppletie geeft geen grote beïnvloeding van het Molengat of de NUN. De verstoring van de bathymetrie is dan ook beperkt tot het strand. Vanuit een ecologisch perspectief vindt een grote invloed plaats op het intergetijdegebied door de aanleg over een lengte van 4 km en het doortrekken tot de -2 m/ -5 m NAP, maar vanuit een morfologisch perspectief is deze beïnvloeding echter beperkt.

Kansen en risico's

Het idee achter de suppletie is dat een langgerekte suppletie uitgevoerd op het strand direct een grote bijdrage aan de kustveiligheid levert. De MKL-positie bouwt fors uit na aanleg (orde 100 m), waardoor de kustlijn met de BKL als referentie gehandhaafd wordt. Door het grote volume fungeert de suppletie op langere tijdschalen als een zandmotor voor de naastliggende kustvakken. Morfologische risico's lijken er aan deze suppletie niet verbonden te zijn, hiervoor is de beïnvloeding van het systeem te gering. Als nadelen van deze variant kunnen wel worden aangemerkt dat de suppletie niet heel innovatief is en is de suppletie wel effectiever dan een reguliere suppletie?

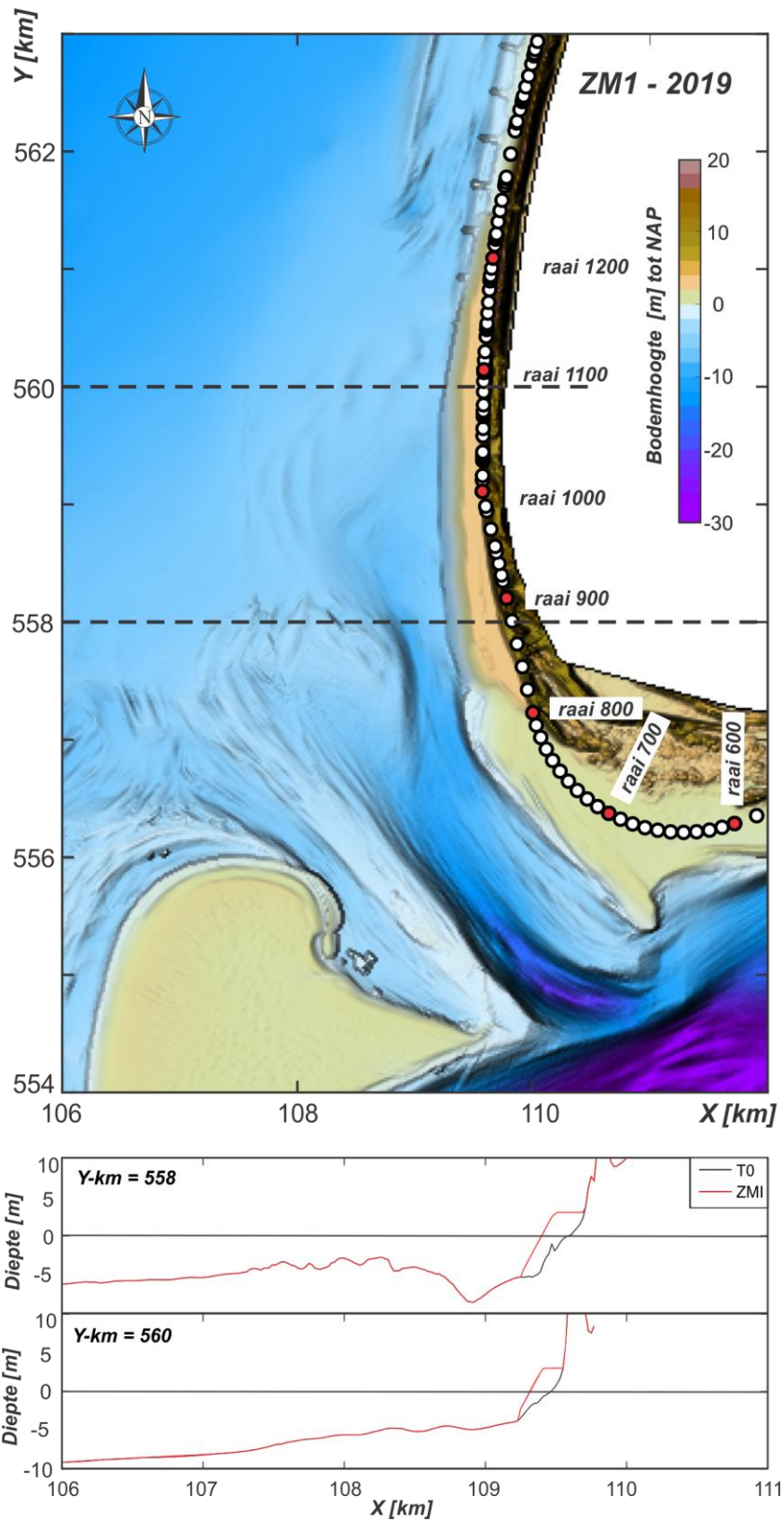
In Tabel 3.9 worden de pre-run kustindicatoren samengevat en in Tabel 3.10 wordt een overzicht van de kansen & risico's van dit ontwerp gepresenteerd zoals aangeleverd door RWS. Deze vragen zijn vervolgens vertaald naar onderzoeksvragen ten behoeve van de modellering.

Tabel 3.9: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievariant na aanleg op de pre-run kustindicatoren.

Kustindicator	T1 (direct na aanleg)
Beïnvloeding dwarsprofielen	Dwarsprofiel wordt zeewaarts verplaatst.
Beïnvloeding bathymetrie	Geen significante beïnvloeding.
Beïnvloeding kustlijnen	raaien 850-1200
Kustlijnen – MKL	+100 m
Lengte beïnvloeding (m)	3,9 km
Geschatte levensduur suppletie	7-8 jaar
Initiële bedekking	1,5*10 ⁶ m ²
Strandbreedtes	tot +220 m
Intergetijdegebied	Initieel alleen zeewaartse verlegging
Duinontwikkeling	Initieel geen verandering

Tabel 3.10: Kansen & risico's van het ontwerp geïdentificeerd door RWS

Kansen	Risico's
<ul style="list-style-type: none"> • Vergroting zandvolumes kustzone (MKL zone); effect op kustlijn. • Uit de kust drukken van de stroming in het Molengat. • Langere levensduur dan een traditionele strandsuppletie. • Bevordering van duingroei. 	<ul style="list-style-type: none"> • Duur in uitvoering/ inefficiënt. • Vergroten geul gedreven erosie (door verkleinen doorstroomoppervlakte Molengat). • Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegatsysteem. • (gedeeltelijk) dichtzetten geul/vaarroute recreatievaart.
Vragen t.b.v. de modellering ZM I	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Is er een effect van deze suppletie op de stromingen in het Molengat? 2. Is er een verstoring van de processen in de surfzone te onderscheiden? Ontstaat er een bredere of smallere surfzone na aanleg en Zijn de transporten in de surfzone meer complex na aanleg? 3. Worden de sedimenttransporten en transportpatronen beïnvloed? 	



Figuur 3-10: Overzicht ligging suppletievariant Texel Zandmotor I zoals geïmplementeerd in Delft3D (T1 situatie). Onderste 2 deelfiguren geven 2 representatieve raaien t.p.v. Y-km 558 en 560 (zie gearceerde lijnen voor ligging). De bodem is gebaseerd op de 2019 Jarkus-grids.

3.2.5 Suppletievariant 4: Zandmotor II (ZM II)

Omschrijving

Deze variant staat haaks op de kust en lijkt hierin qua vorm op de zandmotor, maar wel met kleiner volume (Figuur 3-11). Het doel van deze suppletie is het Molengat hydraulisch gezien dichtzetten waardoor de stroming uit de kust wordt gedrukt.

In totaal heeft deze suppletie een ontwerpvolume van 8,8 miljoen m³. De lengte van het suppletiegebied is een kleine 2 km. Toch heeft deze suppletie met 2,2 km² wel de grootste bedekking. De suppletie is zodanig aangelegd dat deze een verbinding maakt met het voorliggende ebschild, waardoor deze suppletie fungeert als een zanddam. Het Molengat wordt hierdoor gesplitst in een noordelijk en zuidelijk deel. Het zuidelijke deel van het Molengat krijgt dan een enkele uitstroom, de ebschaar zeewaarts van de zandmotor. De aanleghoogte bedraagt 1m+ NAP terwijl de teen op de -3m tot -6m NAP ligt.

Invloed op de pre-run kustindicatoren

Deze suppletie geeft de grootste beïnvloeding van de kustlijnen en MKL, maar de lengte van beïnvloeding is wel kleiner dan in de kustlangse suppletievariant. De MKL wordt over een lengte van 500 m gemiddeld 325m zeewaarts verlegd. Ter plaatse van raai 900 is de zeewaartse verplaatsing zelfs 900m (Figuur 3-12).

De suppletie heeft een maximale aanleghoogte van +1m NAP. Dit heeft direct een groot effect op de gemiddelde laagwaterlijn. Deze verplaatst zeewaarts. Door deze aanleghoogte wordt ook een groot intergetijde gebied gecreëerd. In de T0 situatie heeft het intergetijdegebied ter plaatse van de suppletie een oppervlakte van 0,4 km². Direct na suppletie neemt dit toe met meer dan 1 km².

De suppletie geeft een grote initiële verstoring van het dwarsprofiel, maar wel over een relatief kleine afstand (beperkt aantal raaien). Deze suppletie geeft echter een grote beïnvloeding van de bathymetrie door het gedeeltelijk afsluiten van het Molengat, waardoor de getijstroming mogelijk een andere weg moet zoeken.

Technisch gezien is deze suppletie aangelegd in de intergetijde zone. Toch lijkt een positieve uitwerking op de duinvoet waarschijnlijk. Door de aanleghoogte ontstaat een uitgestrekt platform. Op dit platform hebben de aeolische processen een groot deel van de getijcyclus vrij spel waardoor er zandtransport naar de duinen kan optreden. Hierdoor zou het mogelijk moeten zijn om embryonale duinvorming te verkrijgen. Deze duingroei is ook terug te zien op de naastgelegen Hors. In een periode van 20 jaar zijn hier duinen tot 5m hoogte ontstaan. Omdat deze suppletie aansluit op de grote zandvlakte van de Hors is het de verwachting dat zand toevoer vanaf de Hors kan bijdragen aan deze duinvorming. Eigenlijk wordt de Hors in Noordelijke richting uitgebreid. De processen op de Hors (zoals duinvorming) zullen dan ook in noordelijke richting, waarschijnlijk zo tussen raai 800 en 900, kunnen optreden.

Kansen en risico's

Het idee achter de suppletie is dat het de aanliggende kustvakken over lange tijd kan voeden. Het is de verwachting dat de suppletie zowel naar het noorden als naar het zuiden zal verplaatsen. Afsluiting van het Molengat verkleint de kustlangse stroming en neemt zo een bron van erosie weg. Aan weerszijden van de zanddam ontstaan luwtegebieden waarin het kustlangse sediment kan worden ingevangen. Dit zou kunnen bijdragen aan een langdurig behoud van zandvolumes in de kustzone.

Naast de mogelijke positieve effecten geeft deze suppletie variant ook grotere risico's dan de andere varianten. Door de zeewaartse uitbouw van het strand ontstaan complexe plaatpatronen die gedeeltelijk droogvallen gedurende de getijcyclus. Dit geeft een veiligheidsrisico voor insluiting van recreanten.

Soortgelijke problemen treden ook op bij bijvoorbeeld de Zandmotor in Zuid-Holland of de Verklipperplaat op Schouwen. Een tweede risico is de mogelijke beïnvloeding van het zeegatsysteem. Het Molengat is een onderdeel van het zeegat van Texel dat al vele decennia aanwezig is. Afsluiting van het Molengat ter hoogte van het ebschild tussen raaien 800 en 900 kan ervoor zorgen dat er ook op de schaal van de buitendelta veranderingen gaan optreden. Deze veranderingen, bijv. vorming van een nieuw Molengat, zijn moeilijk voorspelbaar. Op zich hoeft de vorming van een nieuw Molengat geen negatief effect te hebben, maar het is de onvoorspelbaarheid van de mogelijke effecten dat een risico vormt.

Een derde risico is de vorming van 2 diepe putten aan weerszijden van de suppletie. De diepe geul aan weerszijden van de afgesloten geul kan een bezinkput vormen waarin veel sediment achterblijft. Dit sediment kan geleverd worden door de suppletie, maar ook zandverlies vanaf de kustzone kan optreden. Wanneer de getijstrooming afneemt, kan de strooming het kustprofiel mogelijk niet meer in stand houden. Het uitzakken van het dwarsprofiel waardoor de geuldiepte afneemt, maar de kustlijn sterk terugtrekt is ook in de huidige situatie op de Hors al te zien.

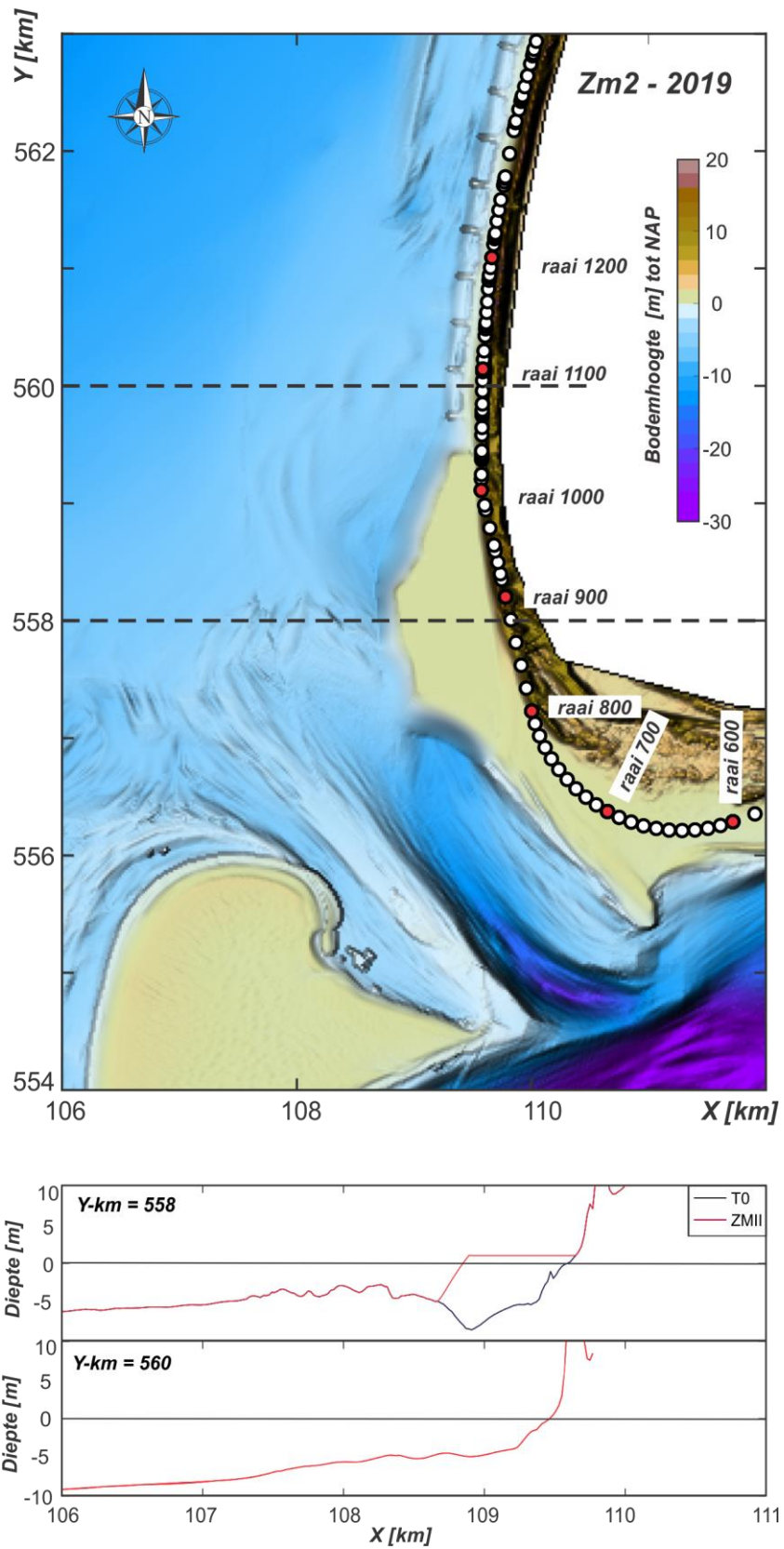
In Tabel 3-11 worden de pre-run kustindicatoren samengevat en in Tabel 3-12 wordt een overzicht van de kansen & risico's van dit ontwerp gepresenteerd zoals aangeleverd door RWS. Deze vragen zijn vervolgens vertaald naar onderzoeksvragen ten behoeve van de modellering.

Tabel 3.11: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievariant na aanleg op de pre-run kustindicatoren.

Kustindicator	T1 (direct na aanleg)
<i>Beïnvloeding dwarsprofielen</i>	Grote vormverandering dwarsprofiel; geul wordt dichtgezet.
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	Molengat geul per plaatse van de suppletie dichtgezet.
<i>Beïnvloeding kustlijnen</i>	raaien 850-900
<i>Kustlijnen – MKL</i>	+500-600 m
<i>Lengte beïnvloeding (m)</i>	2 km
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	>10 jaar
<i>Initiële bedekking</i>	2,2*10 ⁶ m ²
<i>Strandbreedtes</i>	tot +870 m
<i>Intergetijdegebied</i>	grote toename door aanleghoogte
<i>Duinontwikkeling</i>	direct geen effect, maar indirect wel mogelijkheid tot duingroei

Tabel 3.12: Kansen & risico's van het ontwerp geïdentificeerd door RWS

Kansen	Risico's
<ul style="list-style-type: none"> • Vergroting zandvolumes kustzone (MKL zone); effect op kustlijn. • Langetermijn voeding van de kustlijn. • Reductie van golfbelasting op de kust. • Uit de kust drukken van de stroming in het Molengat. • Langere levensduur dan een traditionele suppletie. • Bevorderen van duingroei. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtzetten geul / vaarroute recreatievaart • Gevaar voor recreanten (grote intergetijdezone) • Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem) • Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegatsysteem • Beïnvloeding van de omliggende banken. • Uitzakken van het kustprofiel
Vragen t.b.v. de modellering ZM II	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hoe beïnvloedt deze suppletie de stroming in het Molengat en op de voorliggende NUN? 2. Worden de stromingen in het Zeegat beïnvloed door afsluiting van het Molengat? 3. Worden de stromingen zodanig beïnvloed dat er veranderingen in het kustprofiel zijn te verwachten (uitzakking)? 4. Wat is de invloed op het golfklimaat? <ol style="list-style-type: none"> a. Vindt er afscherming van golven plaats aan de zuidzijde van de suppletie? b. Vindt er geconcentreerde golfbreking plaats op de punt van de suppletie? 5. Vindt er een significante beïnvloeding plaats van de sedimenttransporten zoals: <ol style="list-style-type: none"> a. de transporten op de voorliggende NUN, b. de transporten in het Molengat richting de kust van Texel (noordwaarts), c. de uitwisseling met het Marsdiep? 6. Zijn er op de schaal van de buitendelta verschillen? 	



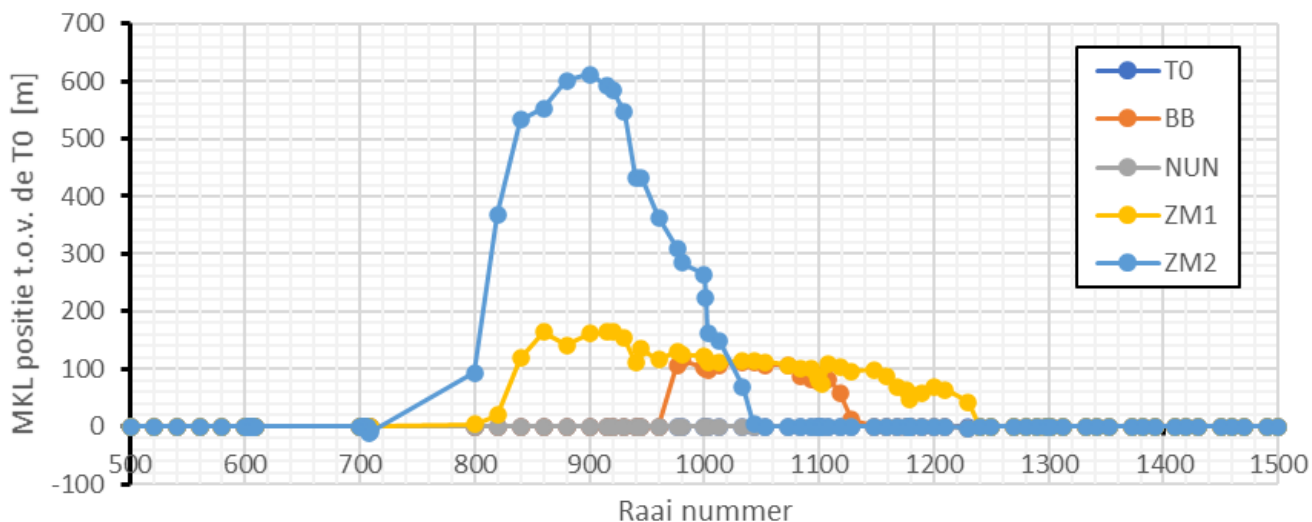
Figuur 3-11: Overzicht ligging suppletievariant Texel Zandmotor I zoals geïmplementeerd in Delft3D (T1 situatie). Onderste 2 deelfiguren geven 2 representatieve raaien t.p.v. Y-km 558 en 560 (zie gearceerde lijnen voor ligging). De bodem is gebaseerd op de 2019 Jarkus-grids.

3.2.6 Een samenvatting van de MKL verandering en verwachte levensduur van de suppleties voor Texel ZW

Figuur 3-12 vat de MKL verandering van de 4 varianten samen. Dit geeft een goede weergave van de korte termijn effecten van de suppleties op de kustlijn. De BB en NUN varianten geven initieel nauwelijks een effect op de indicatoren omdat ze geheel (NUN) of vrijwel geheel (BB) buiten de rekenschijf zijn aangebracht. De BB suppletie geeft alleen in het meest zuidelijke deel, waar verbinding gemaakt wordt met de kust (rond raai 1000-1100) een toename in MKL volume.

De ZMI en ZMII suppleties geven een direct effect. De ZMI suppletie heeft dan initieel het langste invloedsgebied. Onder de aanname dat processen niet wijzigen kan op basis van de in het verleden geobserveerde trends voor deze 2 varianten, dan al een eerste schatting van de levensduur worden gemaakt. De ZMI suppletie geeft een gemiddelde toename van de MKL met 100 m. Gemiddeld trekt de kustlijn zich hier terug 20 m/jaar. Dit geeft dan een verwachte levensduur van rond de 5 jaar echter door schaalvergroting zal de levensduur, gemiddeld over de gehele suppletie, gunstiger zijn dan van kleine suppleties. De levensduur wordt daarom geschat op 7 tot 8 jaar. Echter "hot-spot" erosie ten gevolge van de complexe vooroever zal ook hier blijven voorkomen, waardoor lokaal deze periode niet gehaald zal worden. In de gebieden waar nu al grotere erosie optreedt (bijv. tussen raai 199-1100) treden erosiewaarden op tot 40 m/jaar. Lokaal zal de kustlijn na 2 tot 3 jaar terug op te T0 positie liggen.

De levensduur van de ZMII suppletie is dan automatisch veel langer omdat er meer volume is aangebracht dan de ZMI suppletie. Op zijn breedste punt geeft de suppletie een vooruitgang van de MKL van 500 tot 600 m. Deze suppletie brengt de morfologie van de buitendelta ter plekke echter ver uit evenwicht, waardoor het waarschijnlijk is dat er maximale erosiesnelheden zullen optreden. Zelfs met een erosiesnelheid van 40 m/j geeft dit nog een verwachte levensduur van meer dan 10 jaar.



Figuur 3-12: Invloed van de suppletievarianten op de MKL-ligging. Alle posities zijn weergegeven ten opzichte van de T0 bodem. Suppletieontwerpen: Brekerbank (BB), Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN), suppletieontwerp Zandmotor 1 (ZM1) en Zandmotor 2 (ZM2).

4 Modelling

De doelstelling van de modellering is niet om een volledig morfologisch voorspellingsmodel van de suppletie varianten te maken. Door middel van morfostatische simulaties waarin de bodem niet verandert wordt de verandering in sediment transport door aanleg van de suppletie (T1 situatie) ten opzichte van de natuurlijke situatie (T0-situatie) in kaart gebracht. Deze veranderingen verschaffen een beeld van de mogelijke effecten van de suppletie in termen van golven, stromingen en sediment transport en kunnen worden gebruikt om de waardes voor de post-run kustindicatoren (zie Tabel 2.2) te bepalen. In dit hoofdstuk behandelen we kort de gebruikte modellen, de gebruikte schematisaties zoals die van het grid en de randvoorwaarden (morfologisch getij en representatief golf klimaat) en geven we een overzicht van de uitgevoerde simulaties.

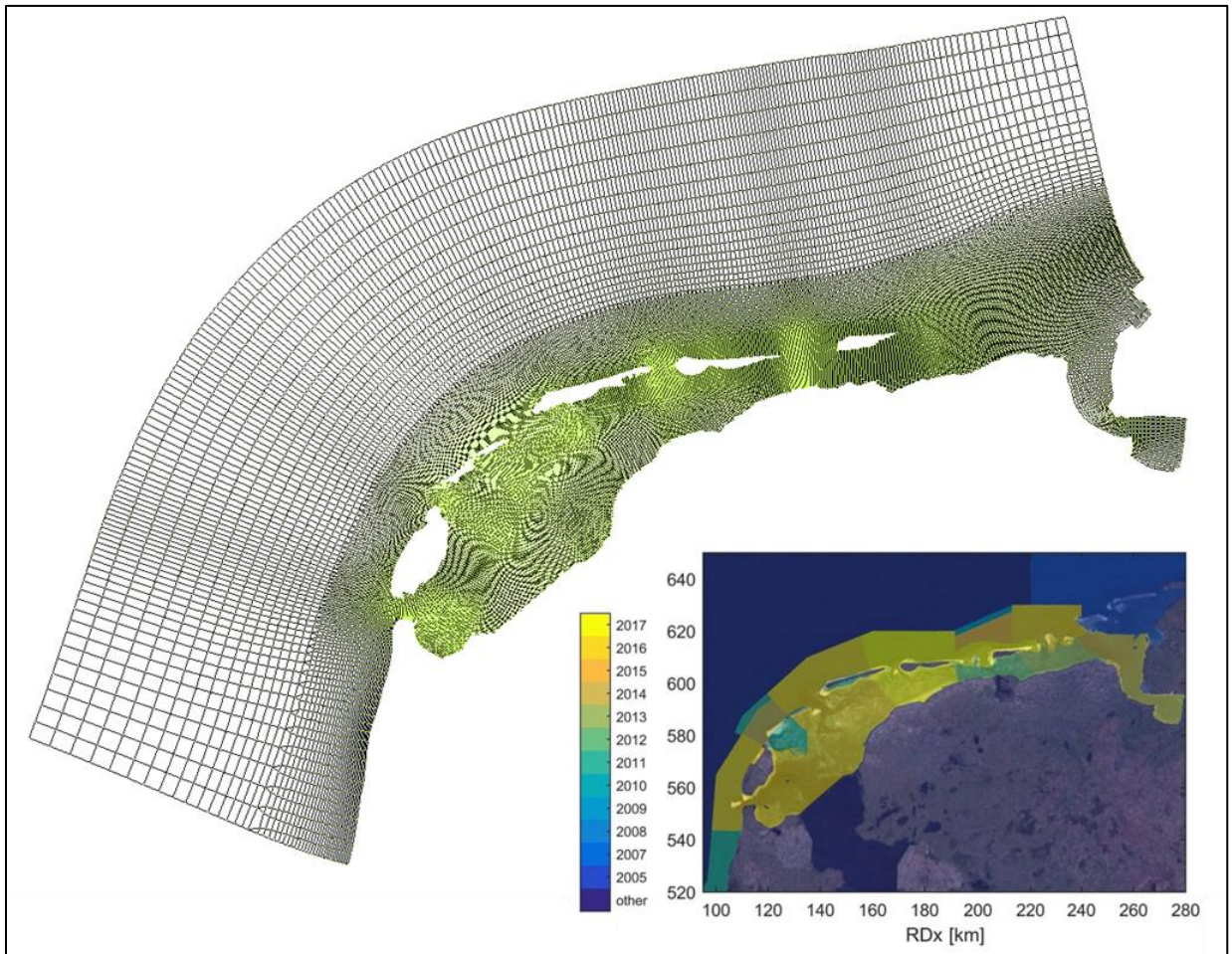
4.1 Het Delft3D FM model

In deze studie worden de simulaties uitgevoerd met het Delft3D Flexible Mesh (FM) stromings- en sedimenttransportmodel van de gehele Waddenzee (Figuur 4-1). De basis van dit FM model is het Delft3D 4 (gestructureerde) Waddenzee model zoals gedocumenteerd in De Graaff (2009). Het gestructureerde Waddenzee model is door Laan (2019) omgezet naar een Flexible Mesh rekenrooster. Het rooster is hierbij al verder geoptimaliseerd in resolutie. In de Waddenzee en de zeegaten heeft dit model een resolutie van rond de 200-300m.

Het rekenrooster van het Waddenzee model is zodanig gekozen dat zowel de ondiepe zone langs de kust (brandingszone) als de hoofdgeulen in de zeegaten in hoge resolutie worden weergegeven. De resolutie neemt af richting de modelranden zodat nauwkeurige, maar tevens ook efficiënte modelsimulaties gemaakt kunnen worden. 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 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. Dit laatste is voor onze studie belangrijk. Ter plaatse van de suppleties moet voldoende resolutie beschikbaar zijn om het suppletieontwerp goed weer te geven.

Het Waddenzee model is van voldoende resolutie om grootschalig de getijvoortplanting en stromingen in de Waddenzee door te rekenen, maar niet gedetailleerd genoeg voor de doorrekening van de suppletievarianten. Voor beide zeegaten zijn de domeinen verder verfijnd en geoptimaliseerd zodat er voldoende resolutie ter plaatse van de suppletie aanwezig is. Er is gekozen om deze optimalisatie per zeegat apart uit te voeren. Dit geeft dus 2 aparte modelroosters, één voor het Zeegat van Ameland (Figuur 4-2) en één voor het Zeegat van Texel (Figuur 4-3). Deze aanpak lijkt op het eerste gezicht minder efficiënt, maar door het gebruik van afzonderlijke roosters zijn deze kleiner en dus minder rekenintensief dan één allesomvattend rooster. Een bijkomend voordeel is dat de 2 aparte roosters vervolgens onafhankelijk van elkaar op het rekencluster rekenen.

De keuze voor een grootschalig model dat de gehele Waddenzee beslaat is tweevoudig. Ten eerste zorgt dit model ervoor dat de getijvoortplanting in de Waddenzee en de voorliggende Noordzee nauwkeurig berekend wordt. Hierdoor kan uitwisseling tussen de verschillende bekkens voldoende nauwkeurig meegenomen worden en fouten door het lokaal opleggen van de randvoorwaarden worden voorkomen. Ten tweede, door een identiek basismodel te gebruiken voor beide zeegaten kunnen gelijke aannamen en schematisaties (bijv. van het getij) worden gebruikt. Ondanks dat de twee studies onafhankelijk van elkaar gedraaid worden, zijn de werkwijze maar ook de resultaten dan wel onderling vergelijkbaar.

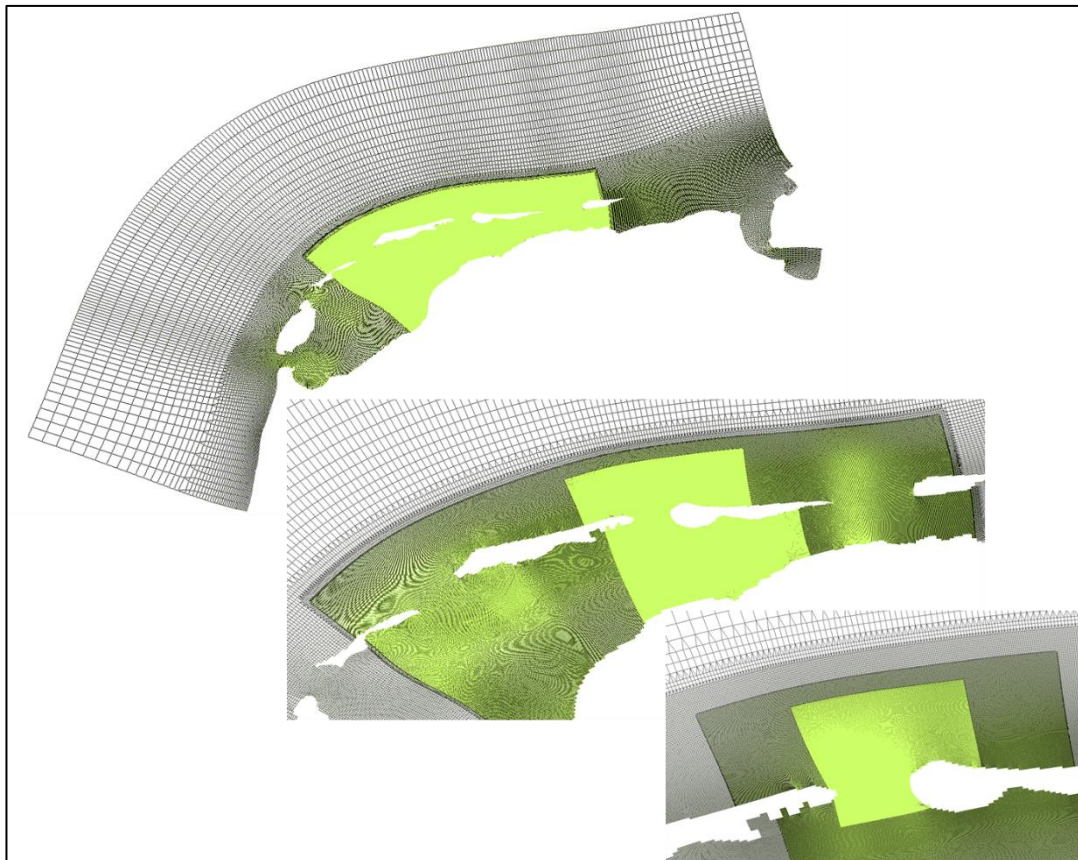


Figuur 4-1: Grootschalige stromingsrooster van de Waddenzee zoals gebruikt in deze studie. De subplot geeft de gebruikte jaren voor de bodemdata weer voor de grootschalige schematisatie (bron: Laan, 2019).

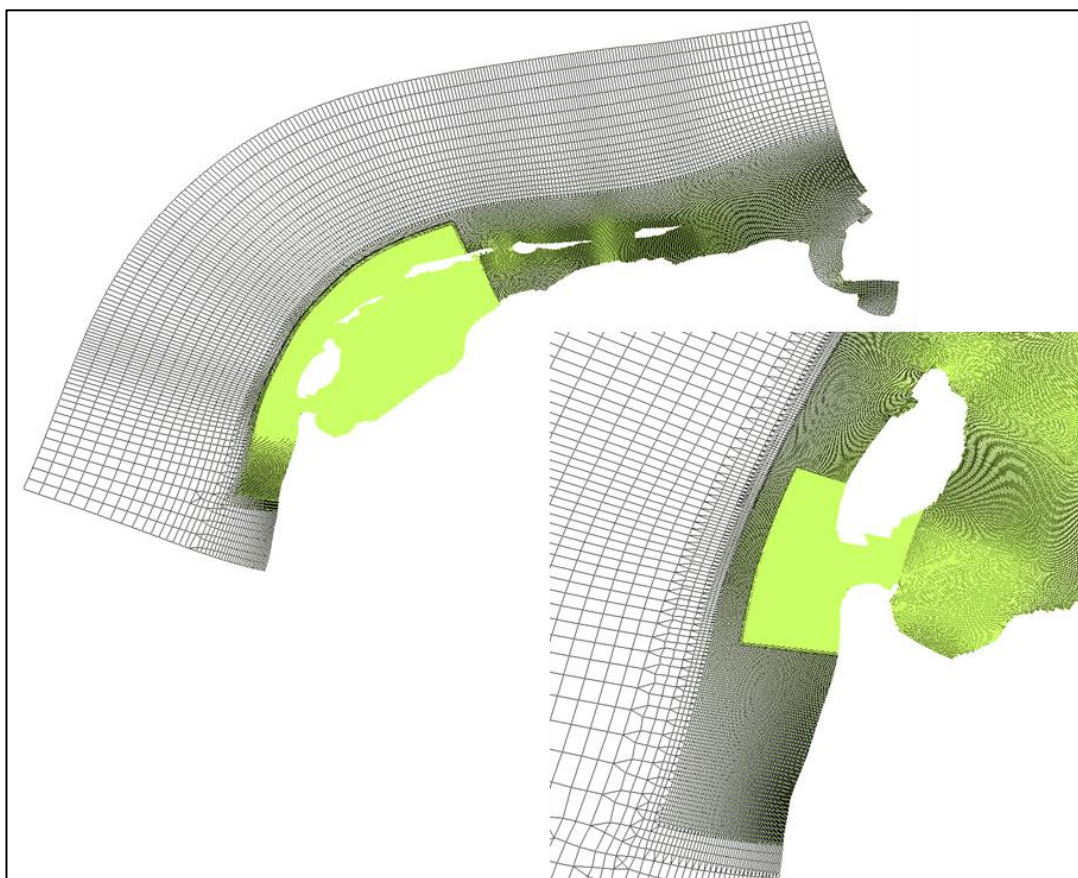
Het Zeegat van Ameland heeft in oorspronkelijke resolutie een roostergrootte van ongeveer 280m. Een eerste verfijning reduceert dit rooster tot ongeveer 70 m. Deze 70m resolutie komt overeen met de Kustgenese modellen (Nederhoff et al. 2019) en is doorgevoerd in de twee naastliggende zeegaten. Middels een tweede en derde verfijningslag wordt een resolutie van 17 m ter plaatse van de suppletie verkregen (Figuur 4-2). Deze resolutie is dan vrijwel gelijk aan die van de bodemdata en wordt dan ook als voldoende nauwkeurig gezien.

Een hoge resolutie in het Zeegat van Texel is verkregen door eerst de Westelijke Waddenzee te verfijnen van 250 m naar 60 m. Hierbij worden zowel het Zeegat van Texel als het Vlie verfijnd om de uitwisseling tussen deze twee zeegaten nauwkeurig te modelleren. Een tweede verfijning brengt dan de resolutie ter plaatse van de suppletie naar 15 m (Figuur 4-3).

Beide modellen worden gerund in 2DH setting. De toename in rekentijd van een 3D simulatie weegt hier 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 hier minder belangrijk. De 2DH benadering lijkt daarom voldoende nauwkeurig.



Figuur 4-2: Een overzicht van de gebruikte stromingsroosters voor het Zeegat van Ameland.



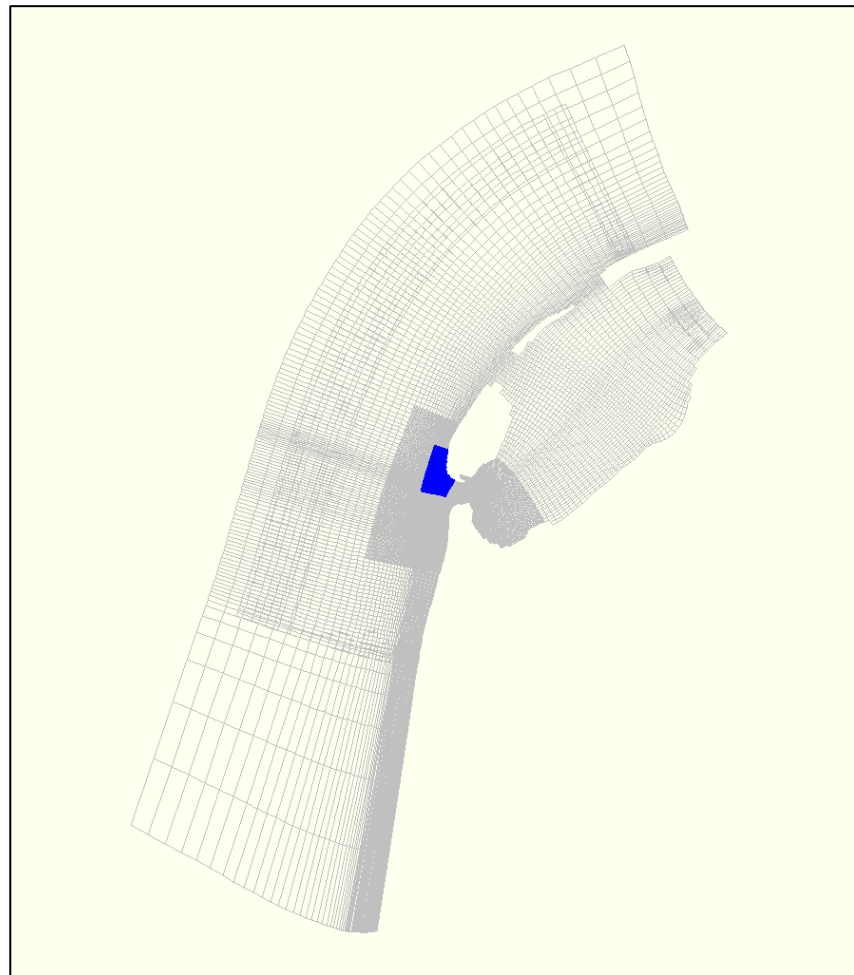
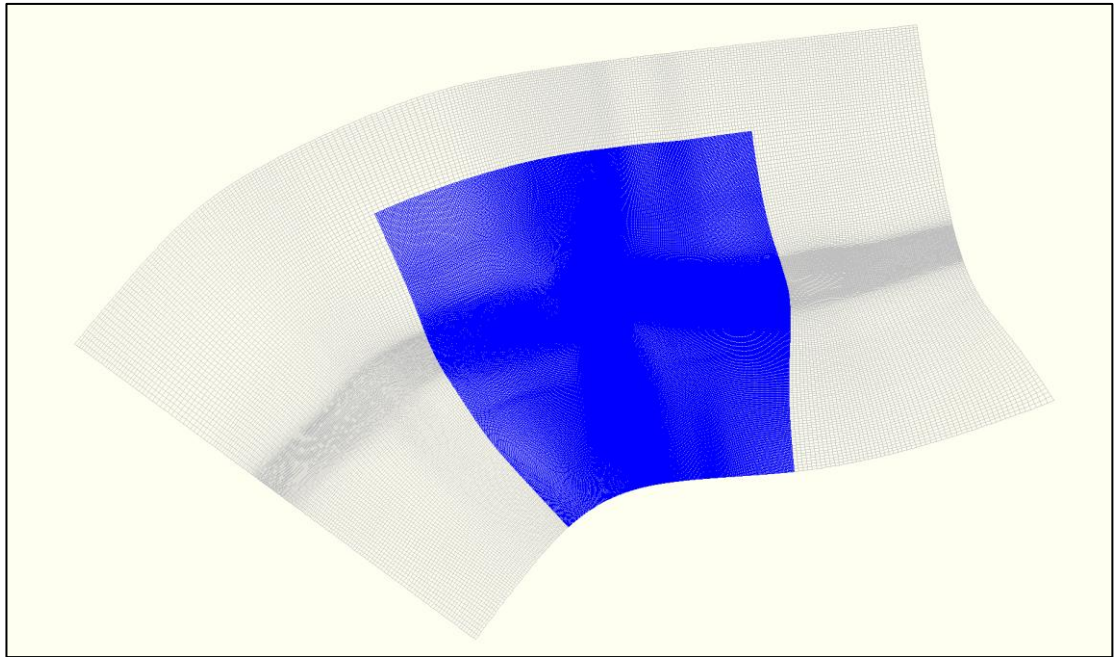
Figuur 4-3: Een overzicht van de stromingsroosters voor het Zeegat van Texel.

De onderliggende modelbodem van het grootschalige model is in essentie gebaseerd op de 2017 Vaklodingen (Figuur 4-1). Missende data punten zijn dan met oudere bodems ingevuld (Laan, 2019). Ter plaatse van de detailmodellen, op de schaal van de zeegaten, is de modelbodem geactualiseerd met de meest recent beschikbare Vaklodingen en Jarkus-datasets. Voor het zeegat van Texel zijn de 2018 Vaklodingen en de 2019 Jarkus-metingen gebruikt. De bodem van het zeegat van Ameland is gebaseerd op 2019 metingen. Door grootschalig de bodem van Laan (2019) te handhaven blijft ook de kalibratie en validatie van het model geldig en is hiervoor geen aanvullend onderzoek benodigd.

De open-zee randvoorwaarden zijn voorgeschreven als waterstanden en verkregen door nesting in een grootschalig Noordzee model (DCSMv6-ZuNov4, Zijl et al., 2013). Het Waddenzee model is door middel van de bodemruwheid gekalibreerd op een nauwkeurige weergave van de waterstanden in de diverse meetstations van de Waddenzee en Noordzee. Een Manning ruwheid van $0.023 \text{ s/m}^{1/3}$ geeft hierbij de beste resultaten. Laan (2019) geeft een verschil in root mean square error (RMSE) van ongeveer 10 cm tussen model en meting. De waterstandsranden zijn gebruikt om een morfologisch getij te bepalen dat uiteindelijk gebruikt is om de suppletievarianten door te rekenen (zie Hoofdstuk 3.3 voor details). Het is goed om te realiseren dat de exacte fout van het basismodel eigenlijk van ondergeschikt belang is. Het is alleen belangrijk dat de grootschalige processen goed opgelost worden. De respons van de suppletievarianten ten opzichte van een T0 simulatie wordt geanalyseerd. De relatieve respons tussen de modellen zal niet of nauwelijks beïnvloed worden door de RMSE van het grote model. Een RMSE 10 cm is voldoende nauwkeurig om grootschalig de getijvoortplanting en waterstanden te voorspellen. In deze studie zijn dan ook geen aanvullende kalibratie berekeningen uitgevoerd.

Voor ieder zeegat is een bijpassend golfmodel gebouwd. De golven worden berekend met het gekoppelde spectrale golfmodel SWAN. Het SWAN golfmodel gebruikt gestructureerde roosters en kan dus niet rechtstreeks op de stromingsroosters worden toegepast. Voor het Zeegat van Ameland zijn de golfmodellen zoals opgesteld voor Kustgenese toegepast. Deze zijn in detail beschreven in Nederhoff et al. (2019). Deze golfmodellen beslaan niet de gehele Waddenzee maar zijn van voldoende grootte om de golfvoortplanting over de buitendelta bij Ameland nauwkeurig door te rekenen (Figuur 4-4). Dit maakt ze ook geschikt voor de doorrekening van de suppletie varianten.

De golfmodellen voor het Zeegat van Texel bestaan uit 4 geneste domeinen en beslaan een veel groter gebied dan de Ameland roosters. Uit eerdere studies (o.a. Elias, 2006; Elias, 2016) blijkt dat het golvenmodel gevoelig is voor verstoringen op de zuidelijke rand. Deze 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 golvenmodel in zuidelijke richting uit te breiden. De randeffecten zijn dan uitgedempt voordat het stromingsmodel wordt bereikt. Naast dit grote, lage resolutie model zijn er 3 aanvullende domeinen nodig om een geleidelijke overgang van lage resolutie naar hoge resolutie te creëren. Ter plaatse van de suppletie heeft het golfmodel dan een gelijke resolutie aan het stromingsmodel.



Figuur 4-4: Golfroosters gebruikt in deze studie voor Ameland (boven) en het Zeegat van Texel (onder). De grootschalige modellen worden weergegeven met de grijze lijnen, het hoge resolutie model ter plaatse van de suppletie met de blauwe lijnen.

Golfgedreven stromingen zijn vooral van belang langs de aanliggende eilandkusten en op de ondieptes van de buitendelta waar golven breken. Voor een nauwkeurige weergave van de golfstroom interactie wordt het golvenmodel elke 30 minuten opnieuw berekend. Elke 30-minuten is er dus een uitwisseling tussen het golf- en stromingsmodel waarbij het stromingsmodel de waterstanden, stromingen etc. doorgeeft aan SWAN. SWAN berekent vervolgens het bijbehorende golfveld (stationair) en de golfinformatie wordt weer teruggegeven aan FLOW en meegenomen in de volgende 30 minuten van de stromingsberekening. De gebruikte instellingen van het golfmodel zijn gebaseerd op het Kustgenese model (Nederhoff et al., 2019). SWAN is gerund in 3-generatie modus waarin alle relevante processen zijn geactiveerd (wind input, quadruplet interacties en whitecapping). De bodemruwheid gebruikt een default waarde van $0.038 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$. Golfbreking is gebaseerd op de brekerformulering van Salmon & Holthuijsen (2011). In deze formulering is de brekerindex gerelateerd aan bodemhelling en diepte. De numerieke nauwkeurigheid is vastgezet op een strikt criterium van 2.5 % voor relatieve en absolute golfhoogte verschillen in 98% van de natte roostercellen. De golfcondities zijn parametrisch opgelegd door de significante golfhoogte, periode en richting voor een standaard JONSWAP spectrum en gebaseerd op een schematisatie zoals uitgewerkt in hoofdstuk 2.2.

De in Delft3D FM aanwezige Van Rijn (2007a,b,c) sedimentformuleringen zijn gebruikt voor de online berekening van de sediment-transporten. Lesser et al. (2004) geven een uitleg hoe de formuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D 4, deze aanpak is ook voor Delft3D FM geldig. In de Van Rijn formulering worden zowel de bodem- als suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld. De bodemtransporten representeren de transporten die 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 een advectie-diffusie vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korrel diameter van $200 \mu\text{m}$. Deze korrel diameter wordt gezien als representatief voor de buitendelta. In werkelijkheid zal er een gradering van sediment aanwezig zijn. In de geulen is de korrel diameter over het algemeen wat groter en op de buitendelta iets kleiner. Bij een onderlinge vergelijking van simulaties waarin steeds dezelfde korrel diameter wordt gebruikt, is dit echter van ondergeschikt belang.

In deze studie wordt de bodemhoogte gedurende de simulatie niet aangepast, maar wordt er een morfostatische berekening uitgevoerd. De sedimenttransporten verkregen door deze methode worden ook wel de "potentiële sedimenttransporten" genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten een bodemaanpassing veroorzaken. Hierdoor varieert de bodem en dus ook de transporten door de tijd. Door in het model de bodem constant te houden, kan juist de verandering in sedimenttransport onder verschillende hydrodynamische forcering (de verschillende golfcondities) en voor verschillende bodemconfiguraties (de suppletievarianten) nauwkeurig in kaart worden gebracht. Deze methode maakt het ook mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat hier zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden. Hiervoor worden de transporten over de verschillende golfcondities berekend en de resultaten gewogen bij elkaar opgeteld. 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.

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 numerieke rekentijd worden opgelost.

4.2 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 verstoring van de verschillende suppletie varianten op dit systeem. Een veel gebruikte analysemethode is het afleiden van de residuele transporten. Veranderingen in de residuele patronen geven dan inzicht in de toekomstige morfologische veranderingen.

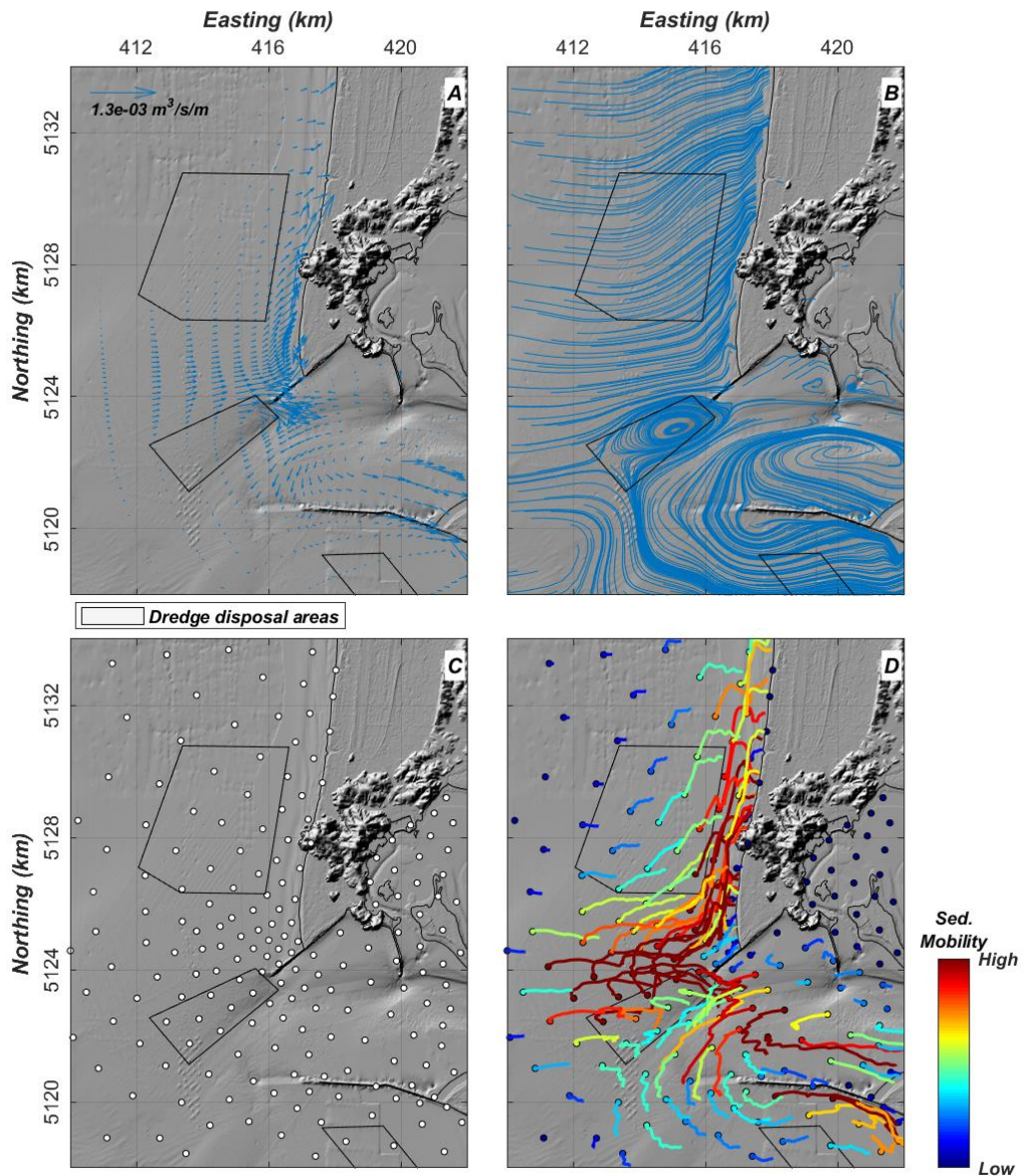
Naast de berekening van de residuele transporten wordt de SedTRAILS methode gebruikt om de sedimenttransporten in het gebied van interesse en de relatie met het omliggende systeem in verder in kaart te brengen. *SedTRAILS*, (*Sediment TRANsport vlsualization & Lagrangian Simulator*) is geen nieuwe of 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 transportpaden berekend. In Figuur 4-5 wordt een voorbeeld van de methode getoond (zie Elias et al. 2020 voor een uitleg).

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

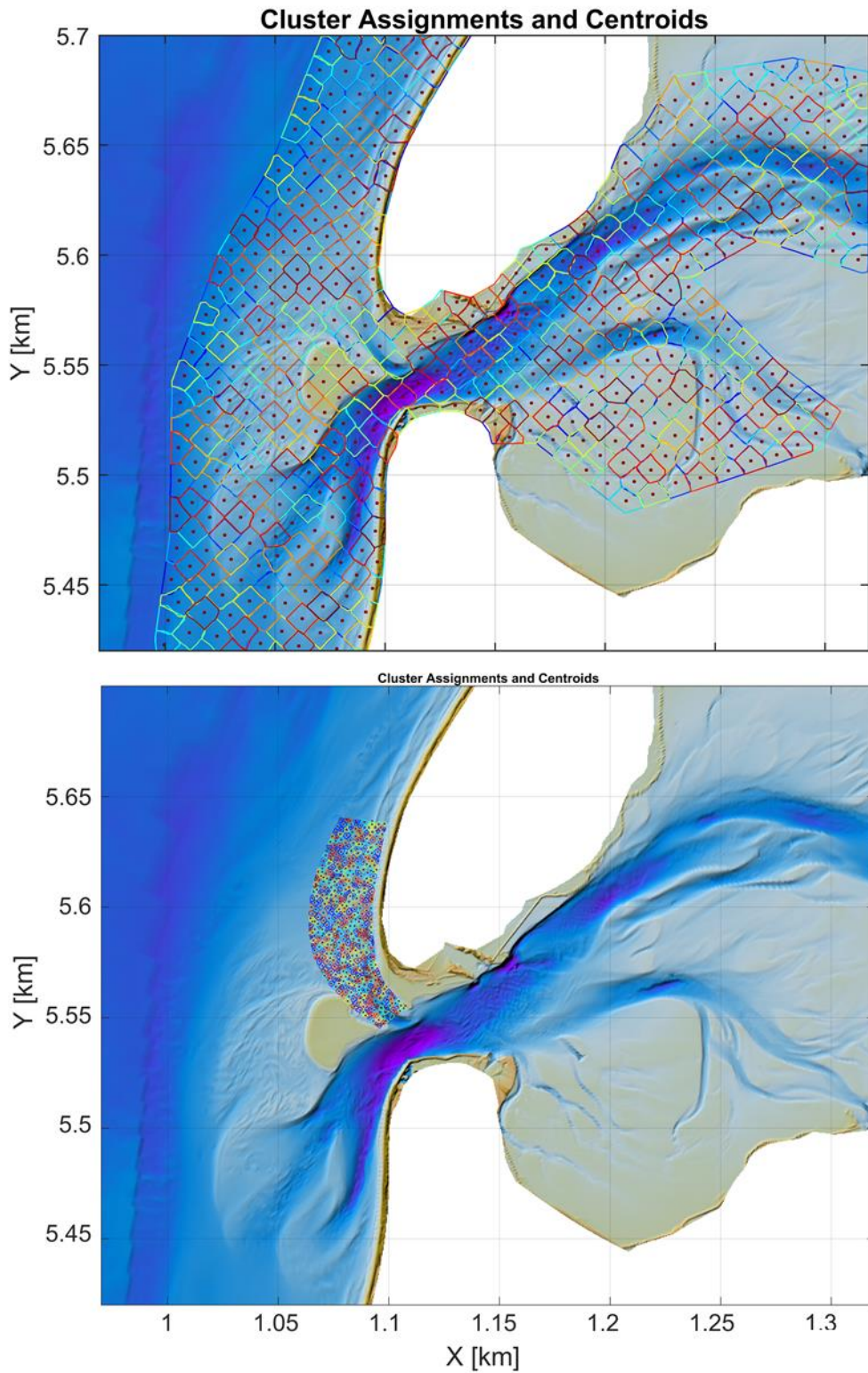
- Waar sediment van een bepaalde bron zich (allemaal) heen verspreidt;
- Vanwaar het sediment komt dat op bepaalde plekken accumuleert;
- Langs welke wegen het sediment reist tussen twee punten;

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

Vanuit de berekende sediment transporten worden de suppletievariant(en) met de waarschijnlijk grootste ruimtelijke beïnvloeding geselecteerd. Voor deze varianten worden de sedimenttransportpaden gevisualiseerd door 500 bronnen aan te brengen verspreid over het zeegat. Deze bronnen zijn evenwichtig verdeeld over de verschillende morfologische elementen (de karakteristieke geulen en platen). Daarnaast zijn er 500 bronnen, in hoge resolutie, aangebracht ter plaatse van de suppletielocaties (Figuur 4-6). Als basis van de SedTRAILS berekening wordt een morfologisch, jaarlijks representatief, getij gebruikt. Voor iedere suppletievariant worden hiervoor de per golfconditie berekende 10-minuten gemiddelde sedimenttransporten gewogen bij elkaar opgeteld. Er ontstaat zo een tijdserie van sedimenttransporten die de jaarlijks gemiddelde condities representeert. Deze tijdserie dient als basis voor SedTRAILS. SedTRAILS wordt vervolgens in “cyclische mode” gedraaid, waarbij de tijdserie van gewogen sedimenttransporten een x aantal keer wordt herhaald. Hierdoor kunnen goed ontwikkelde transportpaden worden gegenereerd. Dit wil zeggen dat deze transportpaden voldoende lang zijn om de uitwisseling van het deeltje met de omliggende morfologische eenheden weer te geven. In de huidige implementatie van SedTRAILS is de verplaatsingssnelheid van de deeltjes nog niet gekalibreerd, maar gekozen op basis van numerieke stabiliteit van de uitkomsten. De transportpaden geven wel aan hoe een deeltje beweegt, maar de snelheid van verplaatsing heeft nog geen fysische betekenis. De absolute verplaatsing heeft geen waarde, maar de relatieve verplaatsing van het ene deeltje ten opzichte van andere deeltjes geeft wel aan of er verschillen in dynamiek of transportsnelheid aanwezig zijn.



Figuur 4-5: Een voorbeeld van de SedTRAILS methode. Door Delft3D wordt het sedimenttransport vectorveld berekend. Deze vectoren kunnen we ook als stroomlijnen weergeven (B). Een veld met sedimentbronnen wordt opgelegd (C). In deze sedimentbronnen worden sedimentdeeltjes losgelaten die dan op basis van de stroomlijnen propageren door het rekenrooster. Het stroomlijnenveld varieert door de tijd (met het getij en de golven) hierdoor ontstaan complexe sedimenttransportpaden (D). De transportpaden tonen de verplaatsing en de relatieve verplaatsingssnelheid van het sediment. De cirkel is de plaats van loslating en de lengte van de staart is een mate van verplaatsing. Let op, SedTRAILS is niet afgeregeld op de werkelijke verplaatsingssnelheid van het sediment. De lengte van de staart vertoont daarom de relatieve mate van verplaatsing. Een langere staart betekent meer verplaatsing dan een kortere staart. 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.



Figuur 4-6: Locaties van de 500 sedimentbronnen op grote schaal (boven) en op kleine schaal (onder) ten behoeve van de SedTRAILS simulatie voor Zuidwest Texel.

4.3 Randvoorwaarden; Morfologisch Getij en Golfklimaat

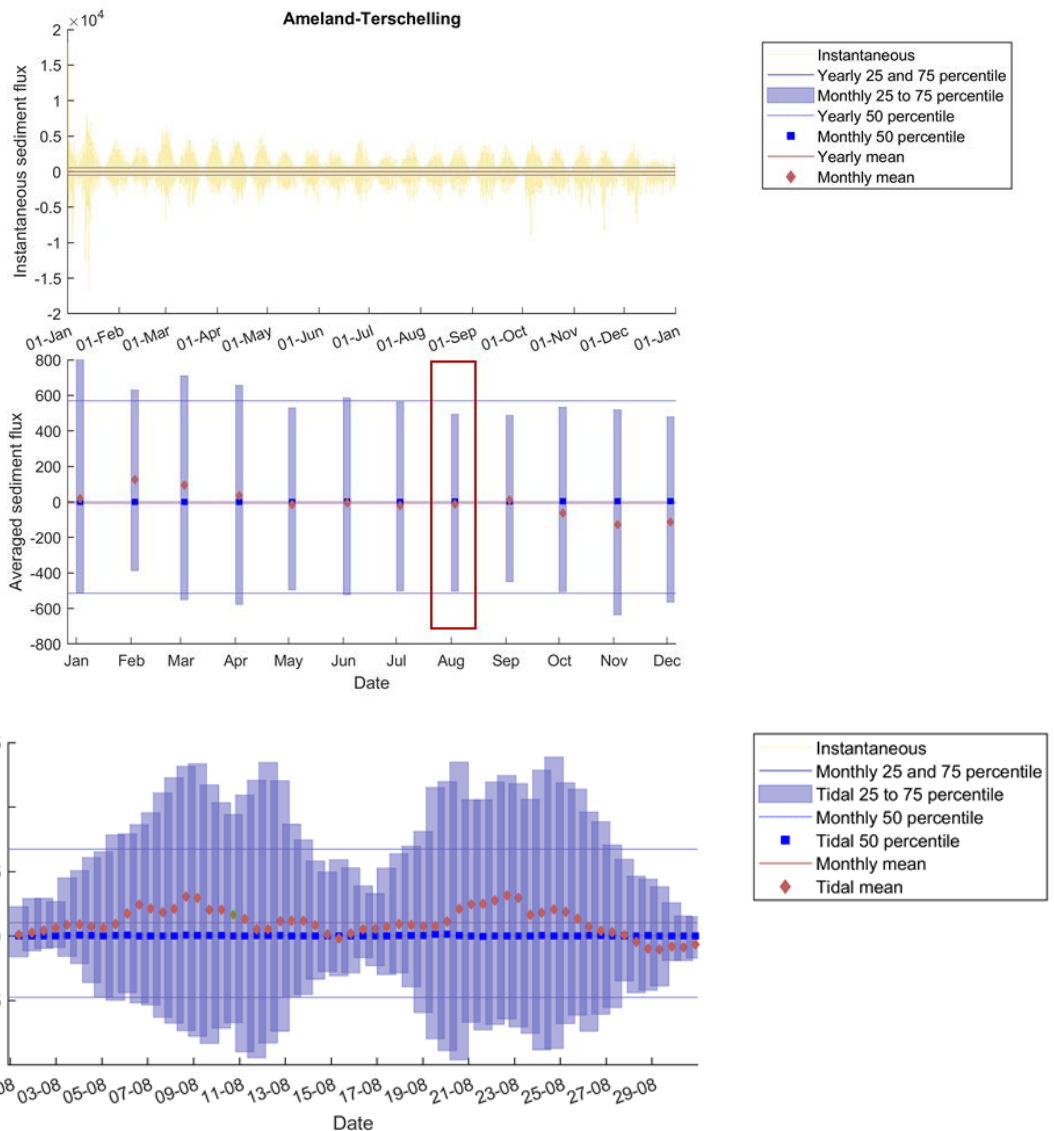
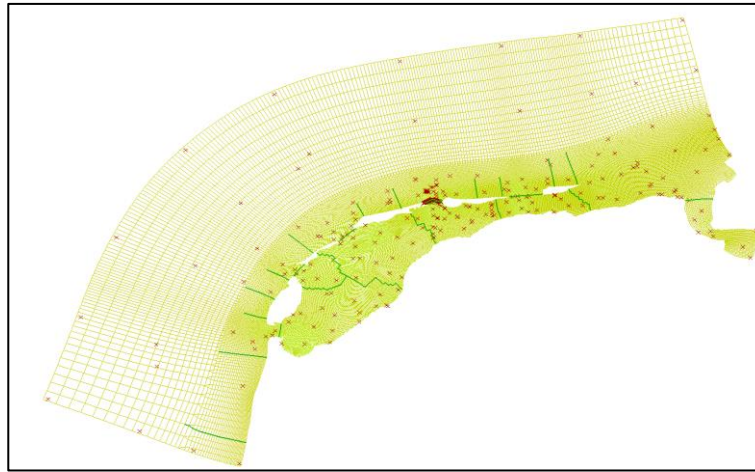
Het volledig berekenen van transportpatronen, representatief voor de lange termijn trends vereist zeer lange modelsimulaties. De modelsimulaties moeten immers een grote en representatieve spreiding van getij, wind en golfcondities doorrekenen. Met proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D zijn dergelijke simulaties eigenlijk niet mogelijk gezien de benodigde rekeninspanning. Een benadering van representatieve transportpatronen kan wel gemaakt worden door gebruik te maken van geschematiseerde condities. Deze geschematiseerde condities noemen we het morfologisch getij- en het representatieve golfklimaat.

4.3.1 Keuze van het morfologische getij

Het doel van de morfologische getij schematisatie is het vervangen van de complexe tijdseries van waterstanden en snelheidsfluctuaties door een versimpeld getij. Het residuele signaal van de complexe tijdserie en het versimpelde getij moet dan een (vrijwel) identieke uitkomst geven, maar met een veel kleinere rekeninspanning. Een uitgebreide beschouwing van de redeneringen achter morfologische schematisaties wordt gegeven door Lesser (2009). In Lesser (2009) is het doel van het morfologische getij om de morfologische veranderingen te reproduceren. In morfostatische simulaties is dat echter niet mogelijk, want de bodem blijft gelijk. Het doel van het morfologisch getij is dan ook om de residuele transportvectoren zo accuraat mogelijk te representeren. Dit vergt een iets andere aanpak in de afleiding van de representatieve condities. Deze afleiding bestaat uit 2 stappen. Als eerste stap wordt de getijbeweging over een voldoende lange periode gesimuleerd. Het grootschalige Waddenzee model is hiervoor over een volledig jaar (2017) gerund met randvoorwaarden verkregen uit het grootschalige model DCSMv6-ZuNov4 (Zijl et al., 2013). Deze randvoorwaarden bevatten zowel de getijmodulatie als grootschalige setup. Voor een groot aantal representatieve raaien, zoals de zeegaten, over de wantijen en langs de eilanden, worden de sediment transporten bepaald (zie Figuur 4-7, voor raailiggingen). Op basis van deze sediment transporten wordt het jaarlijks gemiddelde sediment transport bepaald. Gemiddeld over de geselecteerde raaien geeft de maand Augustus de beste benadering van het gemiddelde jaarlijkse transport (zie Figuur 4-7, midden voor een voorbeeld voor 1 raai).

De geselecteerde maand is vervolgens in de detailmodellen van de twee zeegaten gemodelleerd. Hierbij zijn de sedimenttransportvelden gemiddeld over de maand en is de getijperiode geselecteerd welke deze transporten optimaal representeert. Daarbij is gekeken naar zowel de residuele vectoren als de grootte van de instantane transporten door de raaien (zie Figuur 4-7, onder als voorbeeld). Als eerste selectiecriteria worden de getijden die een goede weergave geven van het maandelijks gemiddelde sediment transporten geselecteerd. Zoals te zien in Figuur 4-7 zijn er meerdere getijden waarbij de grootte van het sediment transport correct voorspeld wordt; monthly mean (rood) en tidal mean (blauw blokje) liggen dan op elkaar. Als tweede selectiecriteria voor deze getijden wordt dan een correlatieanalyse van de vectoren uitgevoerd en het morfologische getij met kleine afwijking in grootte en beste correlatie in vector (m.a.w. richting) wordt geselecteerd. Dit getij is het optimum, morfologisch getij dat als basis dient voor de simulaties. Het geselecteerde getij loopt van 05-08 13:40 tot 06-08 02:00 voor Ameland en van 07-08 13:10 tot 08-08 01:30 voor het Zeegat van Texel. Het morfologische getij is niet een enkele getijcyclus maar beslaat 2 getijcycli.

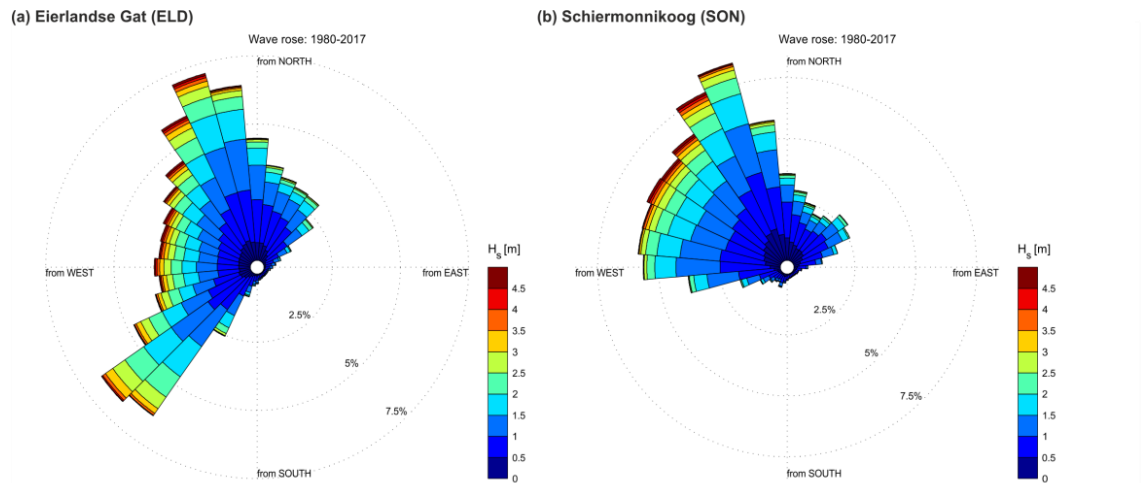
De selectie en keuze van een morfologisch getij roept vaak vragen en discussie op. In principe is het afleiden van een morfologisch getij in deze studie niet strikt noodzakelijk. De effecten van de suppletie worden vergeleken ten opzichte van een T0 simulatie. De relatieve effecten zullen tussen een willekeurig getij en een morfologisch getij vrijwel identiek zijn.



Figuur 4-7: Voorbeeld figuren voor afleiding morfologische getij. Bovenste figuur: de raaien die gebruikt zijn voor de evaluatie van de representatieve springtij–doodtij cyclus aangegeven met groene lijnen. Middelste 2 figuren: een tijdserie van sedimenttransport over het wantij Ameland-Terschelling en de maandgemiddelde sedimentfluxen. Onder: berekening van de getij gemiddelde sedimenttransporten gedurende de maand Augustus.

4.3.2 Bepaling van een representatief golfklimaat

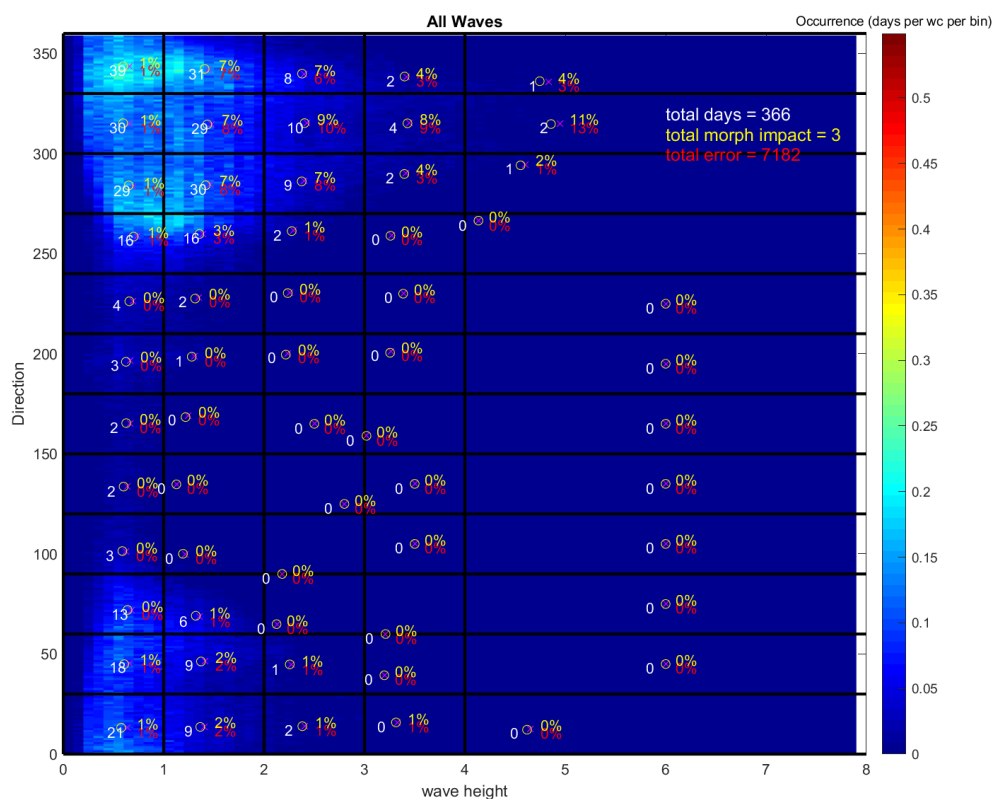
Het afleiden van een morfologisch representatief golfklimaat is geen triviale zaak. In morfologische simulaties zijn de rekentijd en het aantal golfcondities direct aan elkaar gekoppeld. Meer golfcondities betekent een aanzienlijk langere simulatie. De uitdaging in het afleiden van het morfologische golfklimaat ligt dan ook in het vinden van het minimaal aantal representatieve golfklassen. Zo'n morfologische schematisatie bestaat dan typisch uit een 3 tot 10 golfklassen. In morfostatische simulaties speelt het probleem van rekentijd een veel kleinere rol. Omdat de modelbodem constant blijft kan iedere golfconditie afzonderlijk worden gedraaid. Op een rekencluster is het dan mogelijk meerdere golfcondities tegelijk door te rekenen, waardoor de totale duur van de simulaties beperkt blijft. Dit maakt het afleiden van het representatieve golfklimaat eenvoudiger, omdat meer golfcondities gebruikt kunnen worden is een strikte optimalisatie niet nodig. Het golfklimaat afgeleid voor Texel bestaat dan ook uit 18 klassen terwijl voor Ameland 15 golfcondities worden gebruikt.



Figuur 4-8: Golfcondities representatief voor (a) het Zeegat van Texel op basis van ELD (Eierlandse Gat) golfboei en (b) Ameland op basis van SON (Schiermonnikoog) golfboei.

Door de kromming van de Waddenzeekust is het golfklimaat ter hoogte van Texel duidelijk anders dan het golfklimaat van Ameland (Figuur 4-8). Voor beide zeegaten is het representatieve golfklimaat daarom afzonderlijk afgeleid. Voor het Zeegat van Texel is dit gebaseerd op metingen van de net ten noorden van het zeegat gelegen golfboei Eierlandse gat (ELD). Voor het Zeegat van Ameland is de Schiermonnikoog (SON) golfboei gebruikt.

De SON golfboei ligt net ten oosten van Ameland. Voor de bepaling van het representatieve golfklimaat wordt de ruwe golfdata (1988-2017) ingedeeld in golfhoogte en -richtingsklassen. Als eerste indeling worden de golven opgedeeld in golfhoogteklassen van 1 m en richtingsklassen van 30 graden. Voor iedere klasse wordt dan de kans van voorkomen berekend. De klassen met de kleinste kans van voorkomen worden gecombineerd, waardoor het aantal klassen wordt gereduceerd. Dit resulteert uiteindelijk in de set van 15 golfcondities zoals weergegeven in Figuur 4-9 en Tabel 4.1. Voor ieder klasse wordt de gemiddelde golfhoogte, richting en periode bepaald. Ook wind is benodigd voor een correcte berekening van de golfhoogte. De windsnelheid wordt bepaald door de relatie tussen golfhoogte en windsnelheid te plotten en hier een lineaire relatie aan te koppelen. De bijbehorende windrichting wordt gelijkgesteld aan de golfrichting.

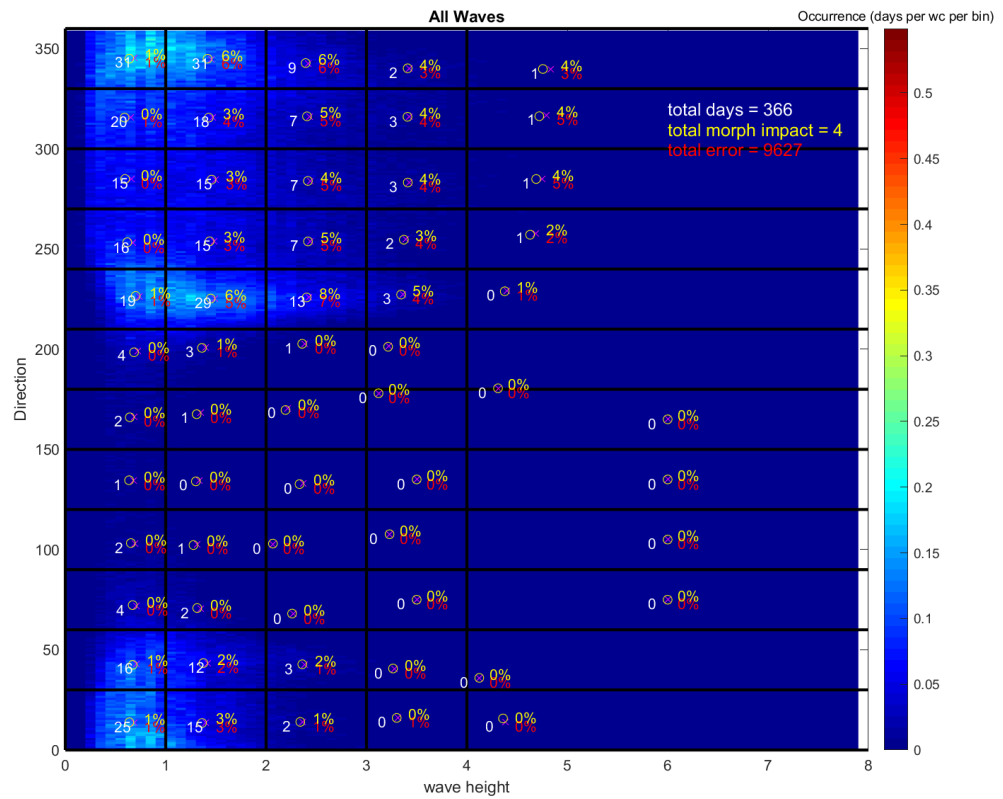


Figuur 4-9: Onderverdeling in golfklassen en richtingen en de berekening van de representatieve golfhoogte, richting en kans van voorkomen per klasse gebaseerd op de SON boei.

Tabel 4.1: Overzicht van de golf- en windcondities gebruikt voor de modellering van Ameland.

Conditie	Hsig [m]	Tp [s]	Dir [deg]	Prob [%]	Wvel [m/s]	Wdir [deg]
1	0,64	4,03	20,20	8,26	3,78	20,20
2	0,68	3,63	63,55	6,19	4,01	63,55
3	0,67	3,44	189,71	4,56	3,95	189,71
4	0,7	3,91	282,94	15,25	4,13	282,94
5	0,65	4,82	337,41	15,04	3,84	337,41
6	1,4	4,71	20,43	3,49	8,26	20,43
7	1,39	4,38	59,98	3,09	8,20	59,98
8	1,34	4,29	220,72	1,56	7,91	220,72
9	1,44	4,69	285,37	15,94	8,50	285,37
10	1,46	5,26	335,35	12,34	8,61	335,35
11	2,54	5,68	19,36	0,69	14,99	19,36
12	2,25	5,16	53,44	0,24	13,28	53,44
13	2,45	5,22	231,05	0,08	14,46	231,05
14	2,65	5,88	293,52	5,04	15,64	293,52
15	2,69	6,22	331,88	4,92	15,87	331,88

De SON golfboei is niet geheel representatief voor het Zeegat van Texel. Door de draaiing van de Waddenzee kust wordt deze boei afgeschermd voor golven uit zuidelijke richting (Figuur 4-8). Voor het Marsdiep is daarom op gelijke wijze een schematisatie gemaakt van de Eierlandse Gat (ELD) golfboei. Op deze locatie zijn tijdseries beschikbaar over de periode 1980-2017. Na schematisatie resulteert dit in een golfklimaat dat bestaat uit 18 klassen (Figuur 4-10 en Tabel 4.2).



Figuur 4-10: Onderverdeling in golfklassen en richtingen en de berekening van de representatieve golfhoogte, richting en kans van voorkomen per klasse voor de Eierlandse Gat (ELD) boei.

Tabel 4.2: Overzicht van de golf- en windcondities gebruikt voor de modellering van Zeegat van Texel.

Conditie	Hsig [m]	Tp [s]	Dir [deg]	Prob [%]	Wvel [m/s]	Wdir [deg]
1	0,69	4,11	25,82	11,45	4,08	25,82
2	0,70	3,50	103,25	2,35	4,14	103,25
3	0,74	3,64	211,90	3,26	4,38	211,90
4	0,70	3,93	243,37	7,57	4,14	243,37
5	0,65	4,17	293,41	6,41	3,85	293,41
6	0,68	4,75	340,00	11,44	4,03	340,00
7	1,61	5,05	27,98	8,82	9,53	27,98
8	1,40	4,29	97,42	1,20	8,29	97,42
9	1,80	4,84	216,78	6,32	10,66	216,78
10	1,87	5,10	242,66	12,23	11,07	242,66
11	1,85	5,27	291,92	8,95	10,95	291,92
12	1,78	5,61	337,67	14,86	10,54	337,67
13	3,34	6,21	27,84	0,20	19,77	27,84
14	3,18	6,43	141,31	0,00	18,83	141,31
15	3,43	5,83	219,42	0,34	20,31	219,42
16	3,64	6,23	245,48	1,42	21,55	245,48
17	3,92	6,72	290,66	1,49	23,21	290,66
18	3,96	7,18	333,08	1,52	23,44	333,08

4.4 Een overzicht van de modelsimulaties

In dit hoofdstuk wordt de gevolgde modelaanpak samengevat en geïllustreerd in Figuur 4-11. De modellering bestaat uit 2 stappen:

Stap I: Afleiden van de randvoorwaarden (blauwe blok in Figuur 4-11)

De basis van de modelsommen wordt gevormd door een grootschalig model van de gehele Waddenzee. Dit model wordt 1 jaar doorgerekend met de berekende waterstanden op de open-zee randen. Vanuit de modelresultaten wordt een morfologisch representatieve maand bepaald. Deze maand wordt in detail doorgerekend voor beide zeegaten. Voor ieder zeegat wordt dan de meest representatieve getijperiode bepaald. Het representatieve of morfologische getij geeft een optimale representatie van de residuele transporten (in grootte en patroon). Het morfologische getij vormt de basis voor de simulaties van de suppletievarianten.

Stap II: Berekenen van de sedimenttransporten per locatie (groene blok in Figuur 4-11)

Voor het zeegat van Ameland worden één getij simulatie en 15 golfklassen doorgerekend voor de duur van een jaar. 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. Deze simulaties worden uitgevoerd voor zowel de T0 bodem (2019 bodem) en de Zandmotor suppletievariant. In totaal geeft dit dus 32 simulaties.

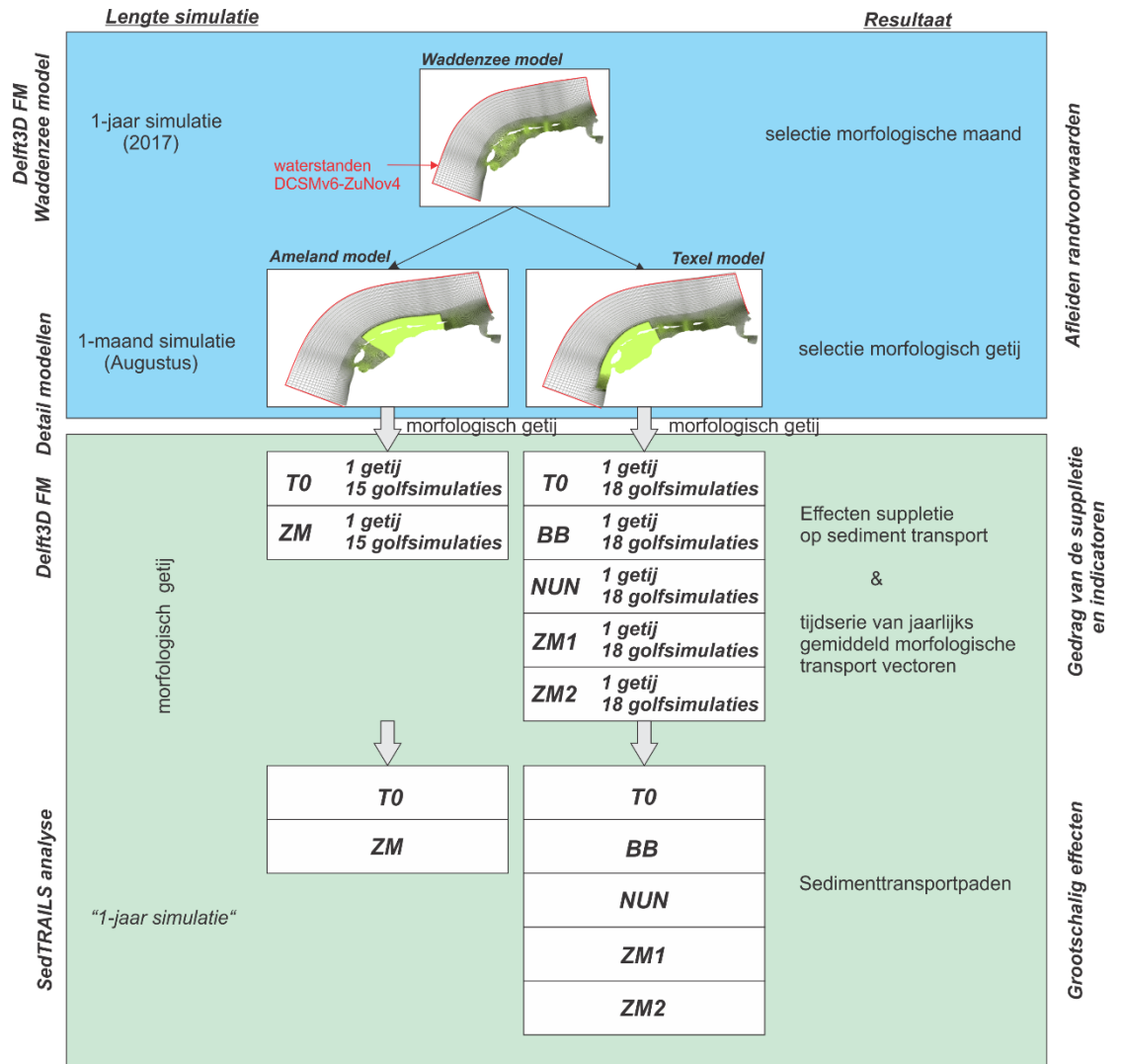
In de analyses en in de figuren gepresenteerd in deze rapportage komen dan 2 varianten van het getijgemiddeld transport voor. Ten eerste, het getijgedreven transport. Dit is dus het transport dat veroorzaakt wordt door alleen de getij forcering opgelegd door het morfologische getij. Ten tweede, het jaarlijks representatief of jaarlijks gemiddelde transport. Dit gemiddelde bevat de invloed van zowel getij als golven.

Voor het Zeegat van Texel wordt een soortgelijke aanpak gevolgd. Het enige verschil hier is dat naast de T0 er 4 suppletievarianten (Brekerbank – BB, Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks -NUN, Zandmotor 1 -ZM1 en Zandmotor 2 -ZM2) worden gemodelleerd. Per variant worden 18 golfsommen en 1 getijsom gedraaid. In totaal zijn dit 95 simulaties.

Stap III: Toepassing SedTRAILS

Het jaarlijks gemiddelde transport wordt bepaald voor de residueel, maar ook op de 10-minuten gemiddelde waarden van het morfologisch getij. Dit resulteert in een tijdseries van representatieve transporten. Deze tijdserie vormt de basis voor de uitgevoerde analyses en voor de SedTRAILS simulaties.

Met behulp van SedTRAILS worden de *near-field* en *far-field* effecten van de suppletie in kaart gebracht. De verplaatsing van de sedimentdeeltjes wordt over 1 jaar gevolgd door het jaarlijks-gemiddeld morfologische getij 365 keer te herhalen. Deze tijdsduur is voldoende lang om voldoende ontwikkelde transportpaden te creëren. De *far-field* effecten beschrijven de invloed van de suppletie op zeegatschaal. Deze analyse wordt door middel van de sedimenttransportpaden in kaart gebracht. Door middel van een gedetailleerde analyse van de verspreiding van het suppletiesediment kunnen ook de lokale verspreiding (*near-field* effecten) in kaart worden gebracht.



Figuur 4-11: Een overzicht van de gevolgde modelaanpak en uitgevoerde modelsimulaties. Het blauwe vak geeft de "voorbereidende" simulaties weer, het groene vak de "productie" simulaties.

5 Modelresultaten voor zandmotor Ameland Noordwest (stap 4b)

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. De T0 bodem voor Ameland bestaat uit een 2019 bodemopname. Een goed begrip van het functioneren van het systeem voor aanleg van de suppletie is essentieel om de invloed van de suppletie goed te begrijpen. Het tweede deel richt zich op het doorrekenen van de suppletievariant (T1 situatie).

Het begrijpen van de T0 bestaat uit het begrijpen van alleen de getijgedreven stromingen en transporten (H. 5.1), de golven (H. 5.2) en uit een analyse van jaarlijks-representatieve transporten (H. 5.3). De getijanalyse wordt uitgevoerd omdat grootschalig het gedrag van het Zeegat (de vorm, grootte van buitendelta en de uitwisseling met het bekken) gedomineerd wordt door de getijforcering. Een beïnvloeding van de getijgedreven processen kan op de schaal van het zeegat veranderingen veroorzaken. Een analyse van de zandmotor suppletie is gegeven in H. 5.2, omdat deze suppletie het getij en de golven niet significant beïnvloedt zijn de detailanalyse hiervan beknopt uitgevoerd en ligt de nadruk op de analyse van de jaargemiddelde transporten.

Ten behoeve van de leesbaarheid worden niet alle figuren in het hoofdrapport getoond aanvullende figuren worden weergegeven in Appendix C. Een probleem in het weergeven van de resultaten is het grote ruimtelijke verschil in de transportvectoren. In de figuren is daarom de schaalvector per deelfiguur aangepast om een zo duidelijk mogelijk beeld van de vectoren te genereren.

5.1 Een analyse van de T0

5.1.1 Getijgedreven stromingen

De belangrijkste aandrijver van de sedimenttransporten in het Zeegat van Ameland is de getijstrooming. De geulen en het volume van de buitendelta hebben een directe relatie met het getij door het zeegat heen. De suppletie beïnvloedt de stromingen in het Oostgat. Het begrijpen van deze getijgedreven strooming en de uitwisseling tussen het Oostgat en het Borndiep is daarom essentieel. In Figuur 5-2 en Figuur 5-3 wordt de getijbeweging op een aantal belangrijke momenten (zie Figuur 5-1) in het getij weergegeven voor het gehele zeegat en de suppletielocatie in detail. In onderstaande tekst verwijzen de letters tussen [...] naar de betreffende deelfiguren van Figuur 5-2 en Figuur 5-3.

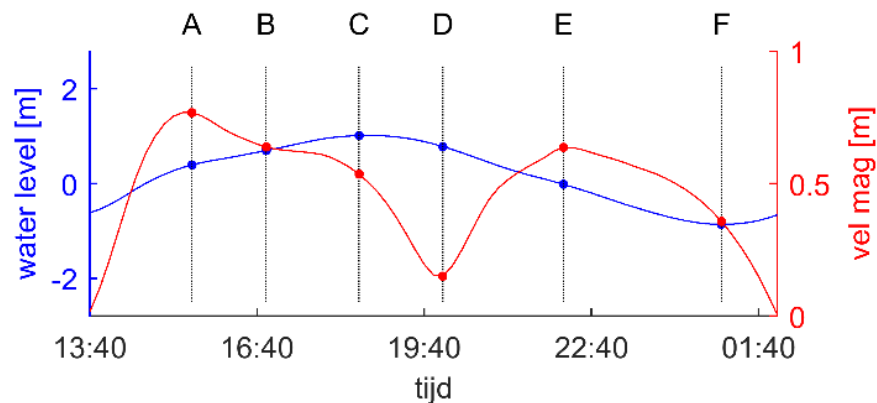
Wat direct opvalt is dat de getijstrooming in en direct rond het zeegat complex is door de uitwisseling van het kustlangse getij op zee, het kustdwarse getij door het zeegat en de onderliggende bodem met zijn variëteit in geulen en platen. Langs de Noordzeekust zijn de stromingen over het algemeen kustlangs gericht, west-oost of oost-west. In het zeegat worden de stromingen vervormd, ze volgen de geulen en platen en staan hier dan eigenlijk dwars op de kust en het zeegat in.

De vloedstrooming dringt vanuit het westen, langs het eiland Terschelling, het zeegat binnen. De hoogste snelheden worden aan de westzijde van het zeegat en in het Borndiep waargenomen [A]. Voor het geselecteerde getij-, ligt de maximale stroomsnelheid op de buitendelta rond de 0,80 m/s, dat is hoger dan de ebstrooming van 0,60 m/s. Op de buitendelta roteren de stromingen richting het zeegat, hierdoor zijn de stromingen langs de Noordwestkust van Ameland westelijk gericht, tegengesteld aan de strooming op zee. Op het centrale deel van het Bornrif platform zijn de stromingen klein. Ook in het Oostgat worden over het algemeen slechts kleine stroomsnelheden waargenomen. In dat opzicht werkt het Oostgat dan ook niet als stroom-voerende geul zoals bijvoorbeeld het Borndiep.

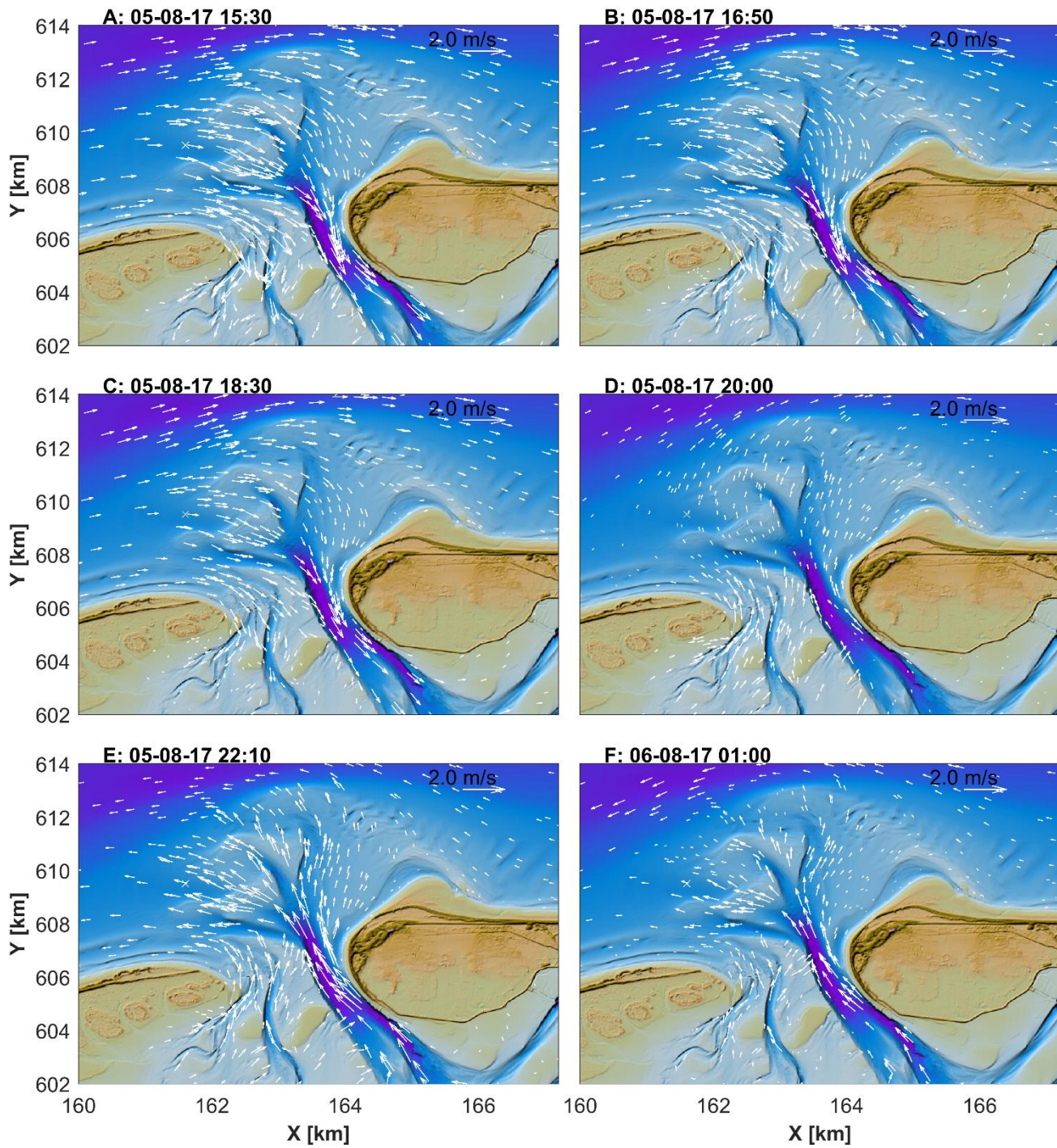
De stroming in het zuidelijke deel, richting het Borndiep, is naar het zeegat toe gericht. De stroming in het oostelijke deel van het Oostgat, rond de Bornrif Strandhaak, is juist oostelijk gericht. Nederhoff et al., (2016) geeft aan dat het Oostgat eigenlijk bestaat uit 2 ontgrondingskuilen, één rond de kop van Ameland en één rond de kop van de Strandhaak. Richting het Borndiep, zo tussen raai 300 en 100, nemen de snelheden in het Oostgat sterk toe.

Naarmate het getij vordert nemen de vloednelheden af en rond 20:00 [D] treedt kentering op. De stroomsnelheden reduceren dan tot vrijwel nul. Na kentering nemen de ebsnelheden sterk toe en rond 22:10 [D] worden dan de maximale ebsnelheden geobserveerd. De ebsnelheden vertonen eigenlijk een gelijkwaardig beeld met de vloednelheden, alleen zijn die nu zeewaarts gericht. Tijdens eb vinden de grootste stromingen weer plaats in het Borndiep. De uitstroom vanuit Borndiep is dan vooral west en noord gericht. De stroming richting het Bornrif is eerder beperkt. Wat hier ook opvalt is dat de stroomsnelheden richting het Oostgat vrijwel nihil zijn. Alleen op de voorliggende ondiepte en in het Akkepollegat zijn de stroomsnelheden iets hoger. Dit laat zien dat er tijdens eb weinig uitwisseling met Ameland NW plaats vindt. Zowel tijdens eb als tijdens vloed werkt het Oostgat dan ook niet als een stroomvoerende getijgeul.

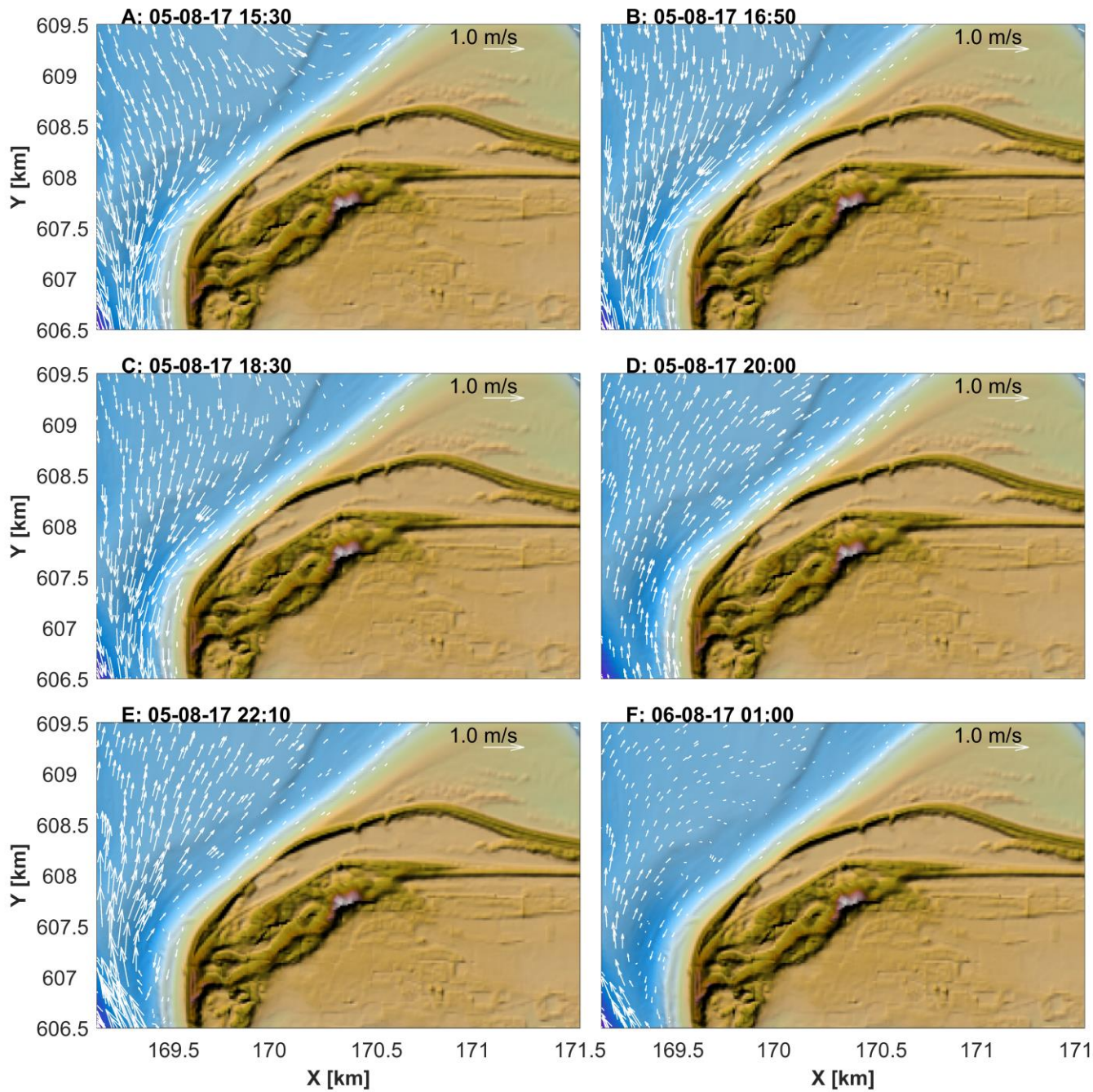
Vanuit de analyse van de stroomsnelheden kunnen we al een deel van de geobserveerde erosie van Ameland NW verklaren. Tijdens vloed nemen de stromingen hier sterk toe richting het Borndiep. De vloedstroming versnelt rondom Noordwest Ameland. Sediment wordt dus opgepikt en het Borndiep in getransporteerd. Tijdens eb zijn de stromingen juist heel klein. Er is wel een duidelijk getijgedreven sedimentafvoer richting het Borndiep, maar geen of een zeer beperkte aanvoer vanuit het Borndiep terug richting het Oostgat. De stroming 'waaiert' uit over het Bornrif in plaats van zich te concentreren in het Oostgat.



Figuur 5-1: Tijdsree van het verloop van de waterstand en snelheid in de Noordzee, net ten westen van de buitendelta (x-km: 165, y-km: 610). A-F geeft de tijdopname van de snapshots van stromingen en transport in onderstaande figuren.



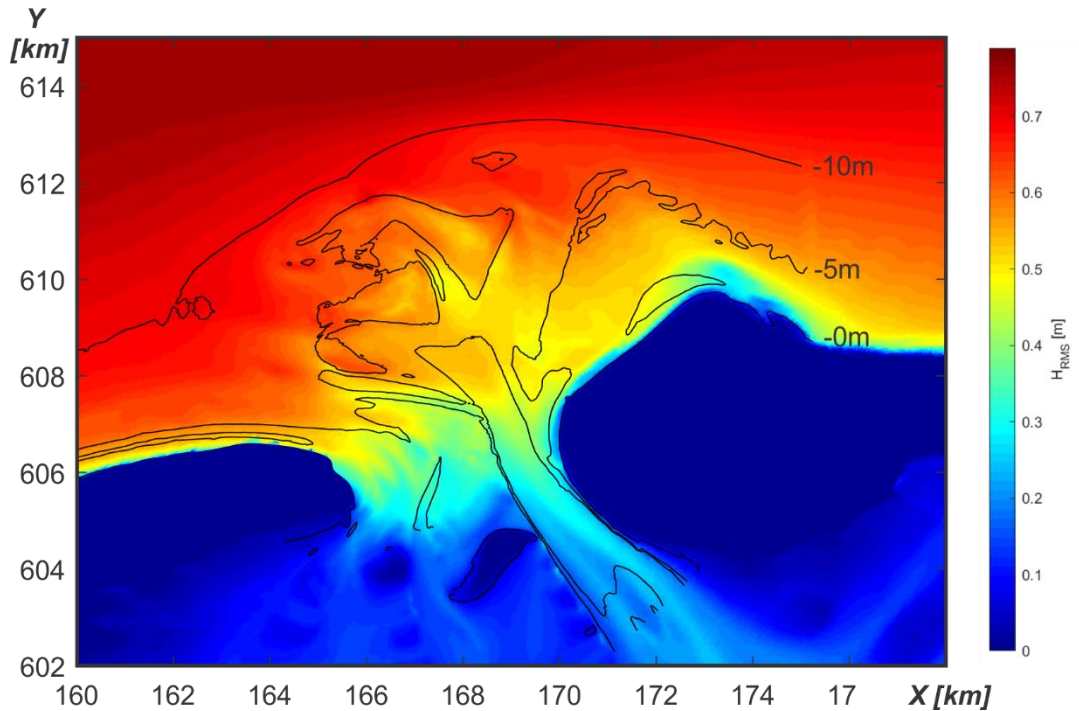
Figuur 5-2: Enkele karakteristieke snapshots van de stromingen in het zeegat van Ameland op basis van de T0 getijsimulatie. De tijdserie in de onderste subplot geeft het verloop van de waterstand en snelheid net ten westen van de buitendelta (x-km: 165, y-km: 610).



Figuur 5-3: Enkele karakteristieke snapshots van de stromingen rond de kop van Ameland Noordwest op basis van de T0 getijsimulatie. Het grijze vlak geeft ter referentie de locatie weer van de ZM suppletie (deze is niet in het T0 model aanwezig).

5.1.2 Invloed van de buitendelta op het golfklimaat

Figuur 5-4 geeft een overzicht van de jaargemiddelde golfhoogte nabij het zeegat van Ameland. De gemiddelde golfhoogte neemt sterk af op de buitendelta. Jaar-gemiddeld ligt de golfhoogte op zee rond de 0.80m. Richting de buitendelta neemt de golfhoogte dan af tot 0.65 m ter plaatse van de -10m NAP contourlijn. Golfbreking op de ondiepe banken van de buitendelta, weergegeven door de -5m contourlijn, geeft dan een verdere afname van de golfhoogte. Langs de kust van Ameland ligt de golfhoogte tussen de 0.35 en 0.50 m. De kleinste golven treden op nabij het Borndiep. In het zeegat reduceert de golfhoogte nog verder tot ongeveer 0.30 m. In het bekken zijn de golven beperkt. Golven kunnen beperkt via het Borndiep in het bekken doordringen. Hier ligt de jaargemiddelde golfhoogte tussen de 0.20 en 0.30m. Langs de kust van Terschelling is golfdissipatie door de buitendelta eerder beperkt. Hier kunnen de golven vrijwel ongestoord tot de kust propageren. Op de Boschplaat zijn dan ook relatief hoge golven aanwezig.



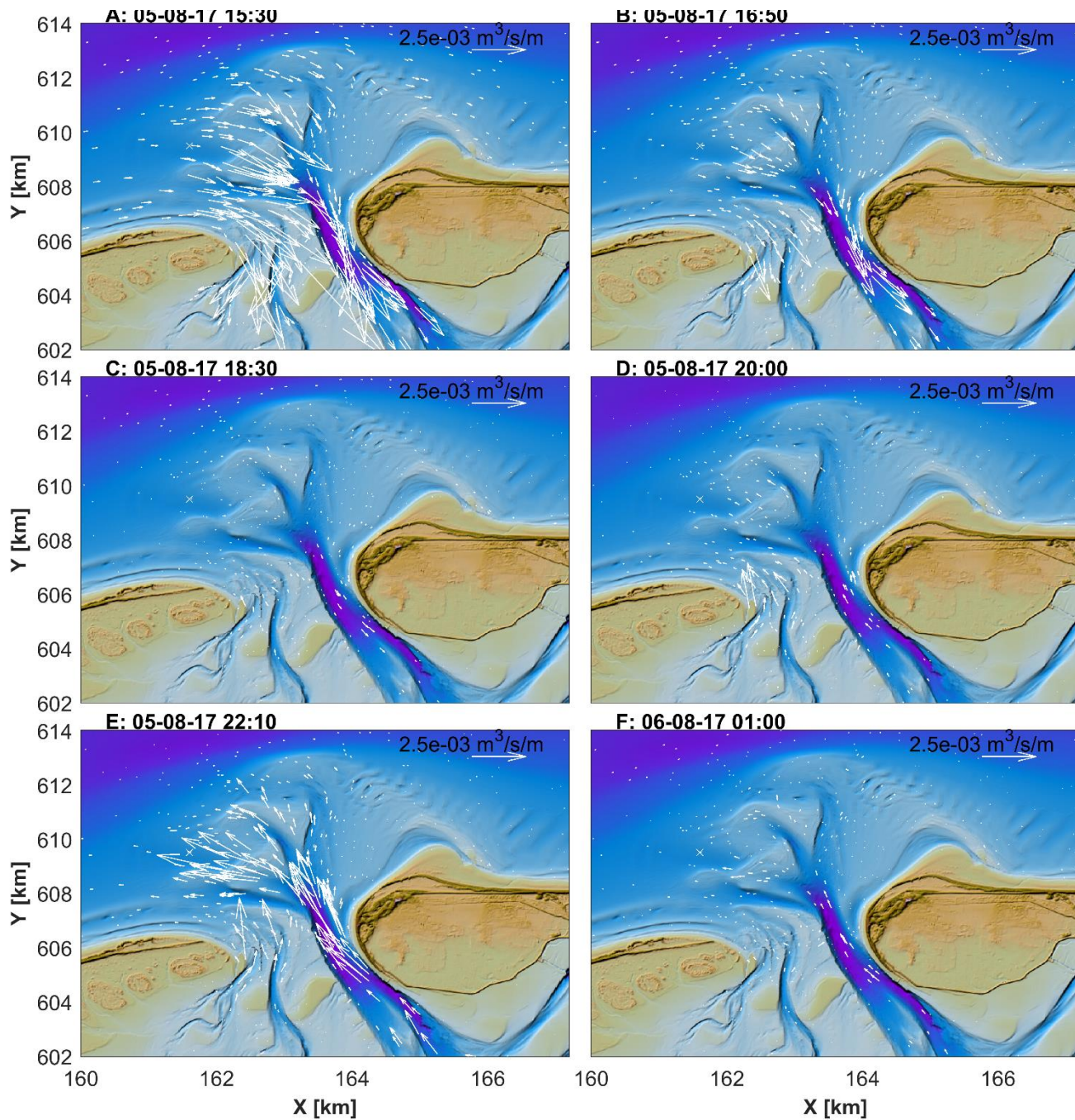
Figuur 5-4: Overzicht van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte (H_{rms}) voor de T0 variant. De zwarte lijnen geven de -10m, -5m en 0m contour lijnen weer.

5.1.3 Sediment transporten

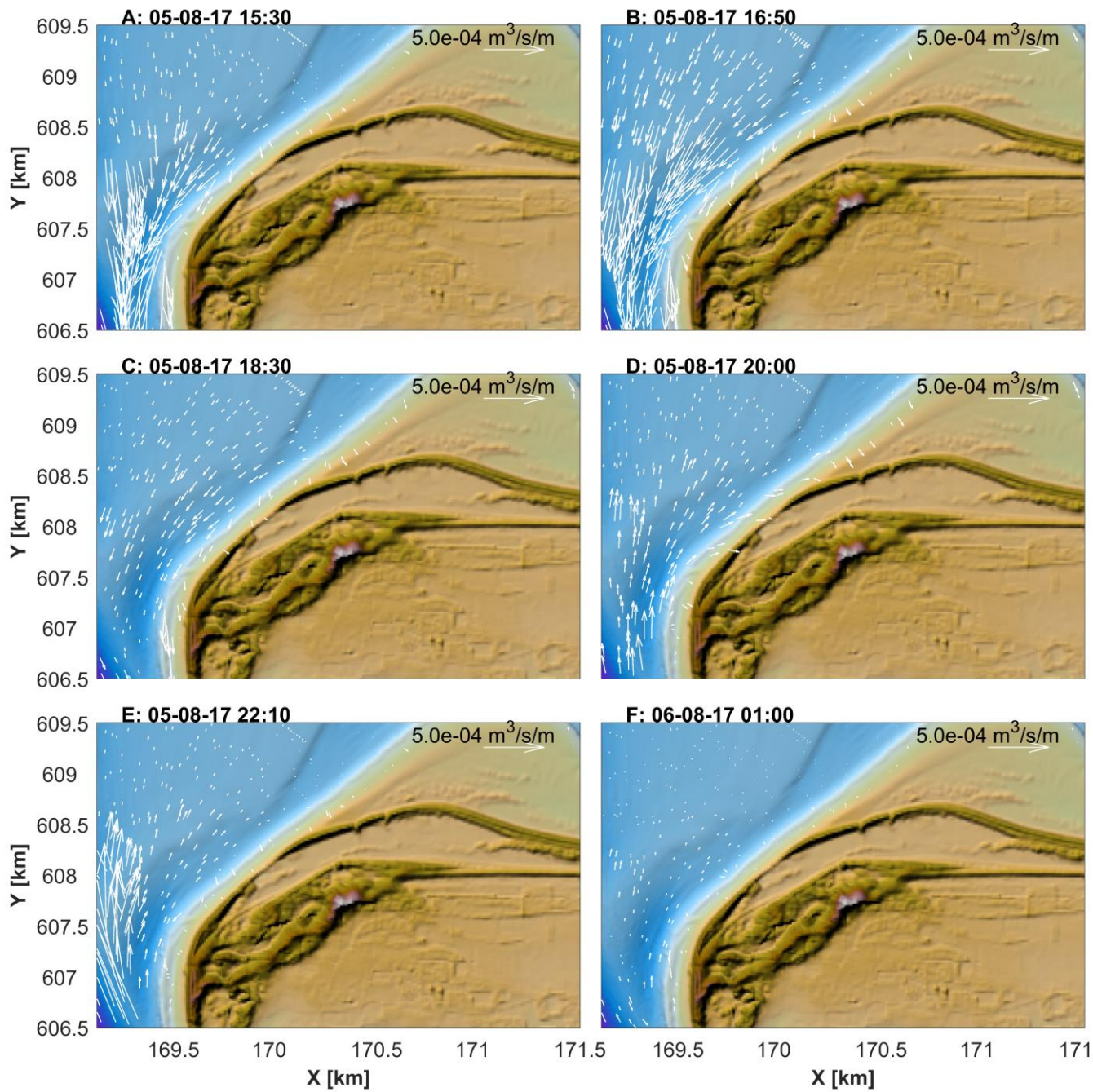
Een overzicht van de instantane sedimenttransporten (jaarlijks representatieve condities) wordt getoond in Figuur 5-5 en Figuur 5-6. In principe vertonen deze transporten een overeenkomstig beeld met de stromingen, alleen worden de verschillen tussen hoge en lage stroomsnelheden verder geaccentueerd. De toevoeging van golven verandert het grootschalige beeld niet, alleen zijn de transporten veel hoger (in Appendix B, Figuur D-1 en D-2 worden identieke figuren getoond voor alleen de getijsimulatie). Deze grotere transporten zijn zichtbaar op de banken en ondiepten. Door golfbreking worden hier golfgedreven stromingen en transporten gegenereerd. Ook in de geulen zijn de transporten hoger. Dit komt doordat er meer sediment beschikbaar is dat vervolgens door de getijstromingen kan worden verplaatst.

De grootste transporten treden op in het Borndiep en op de oostzijde van het zeegat. Transporten op het Bornrif en in het Oostgat zijn klein ten opzichte van de grote transporten in de geulen. Dit beeld wordt bevestigd door de transporten tijdens maximale vloed (Figuur 5-5A) en eb (Figuur 5-5E).

Een beeld van de transporten bij Ameland Noordwest wordt weergegeven in Figuur 5-6. In deze figuur is de schaalvector aanzienlijk vergroot. Hierdoor zijn de transportpijlen in het Borndiep zeer groot. Met deze schaalvector worden wel de transporten langs Ameland Noordwest zichtbaar. Tijdens vloed (Figuur 5-6A, B) zijn de effecten van de versnellende stroming door het Oostgat richting het Borndiep terug te zien. De sedimentvectoren zijn in het centrale deel van het Oostgat nog klein, maar nemen aanzienlijk toe bij de overgang naar het Borndiep. Wat hierbij opvalt is dat de transporten niet alleen in het Oostgat plaatsvinden, maar ook op het naastliggende Bornrif zijn deze transporten terug te vinden. Dit bevestigt het beeld dat ook voor het sedimenttransport het Oostgat geen duidelijk geul vormt. Wat in Figuur 5-6 ook opvalt is de asymmetrie tussen de eb- en vloedtransporten in het Oostgat: de vloedtransporten zijn veel groter dan de transporten tijdens eb. Dit verschil zien we dan ook duidelijk terug in het residuele transport veld zoals weergegeven in Figuur 5-7 en Figuur 5-8.



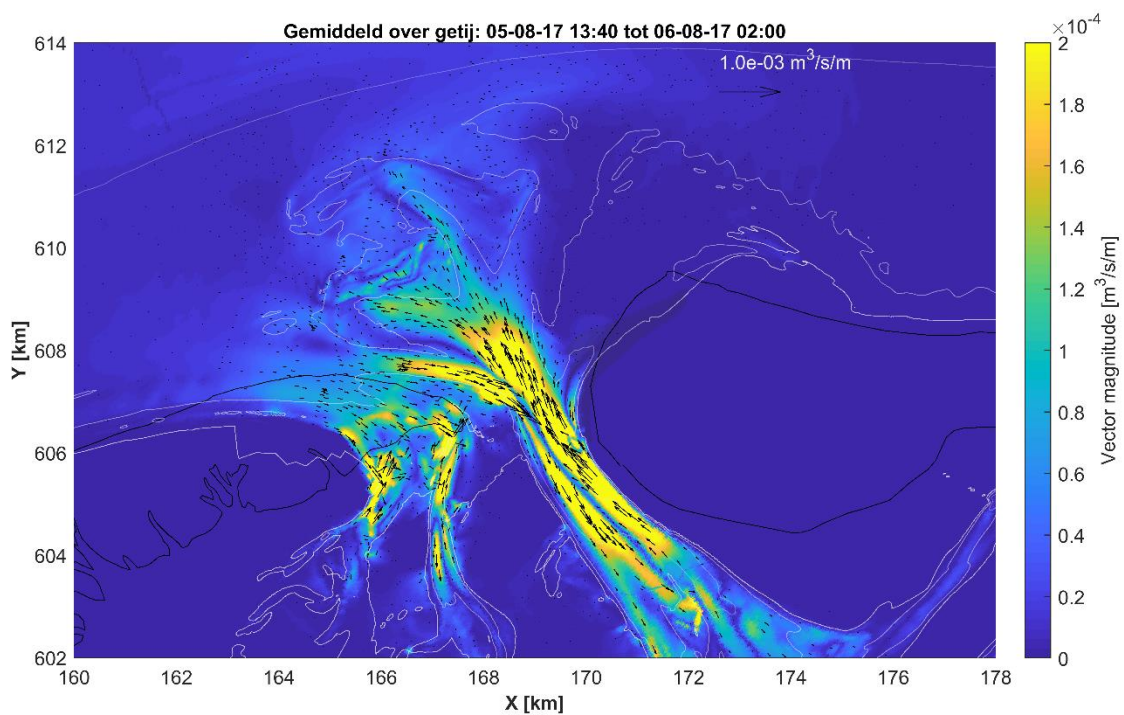
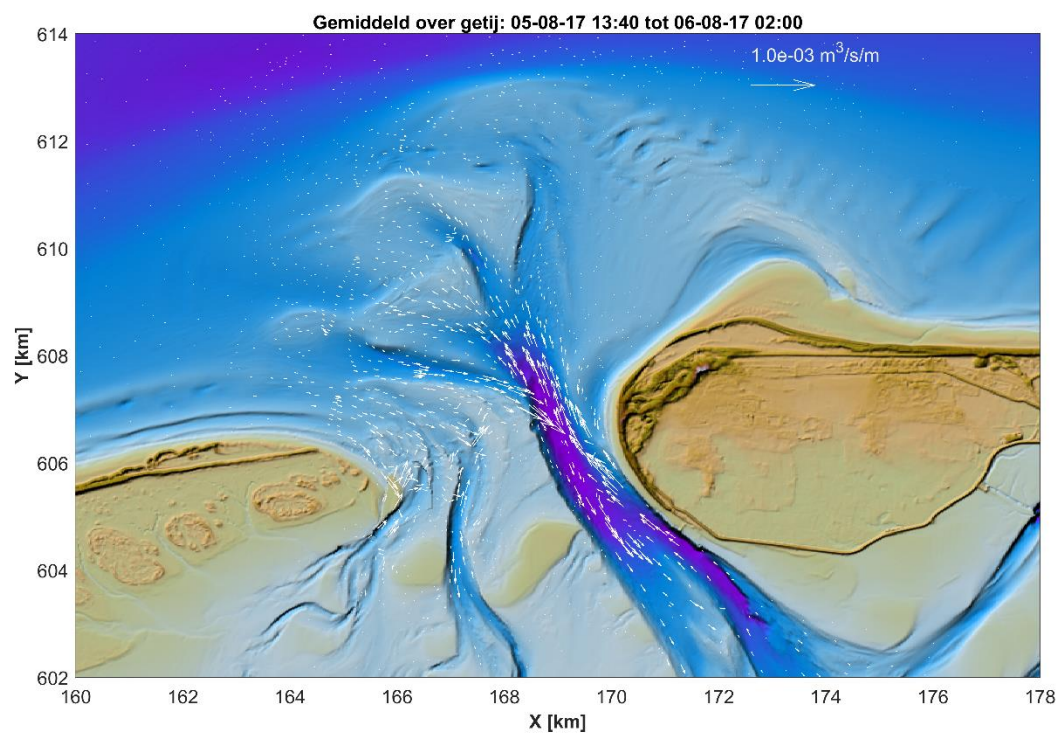
Figuur 5-5: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten in het zeegat van Ameland op basis van de T0 simulatie representatief voor de jaarlijkse condities. Zie Appendix C.1 voor de getijgedreven transporten.



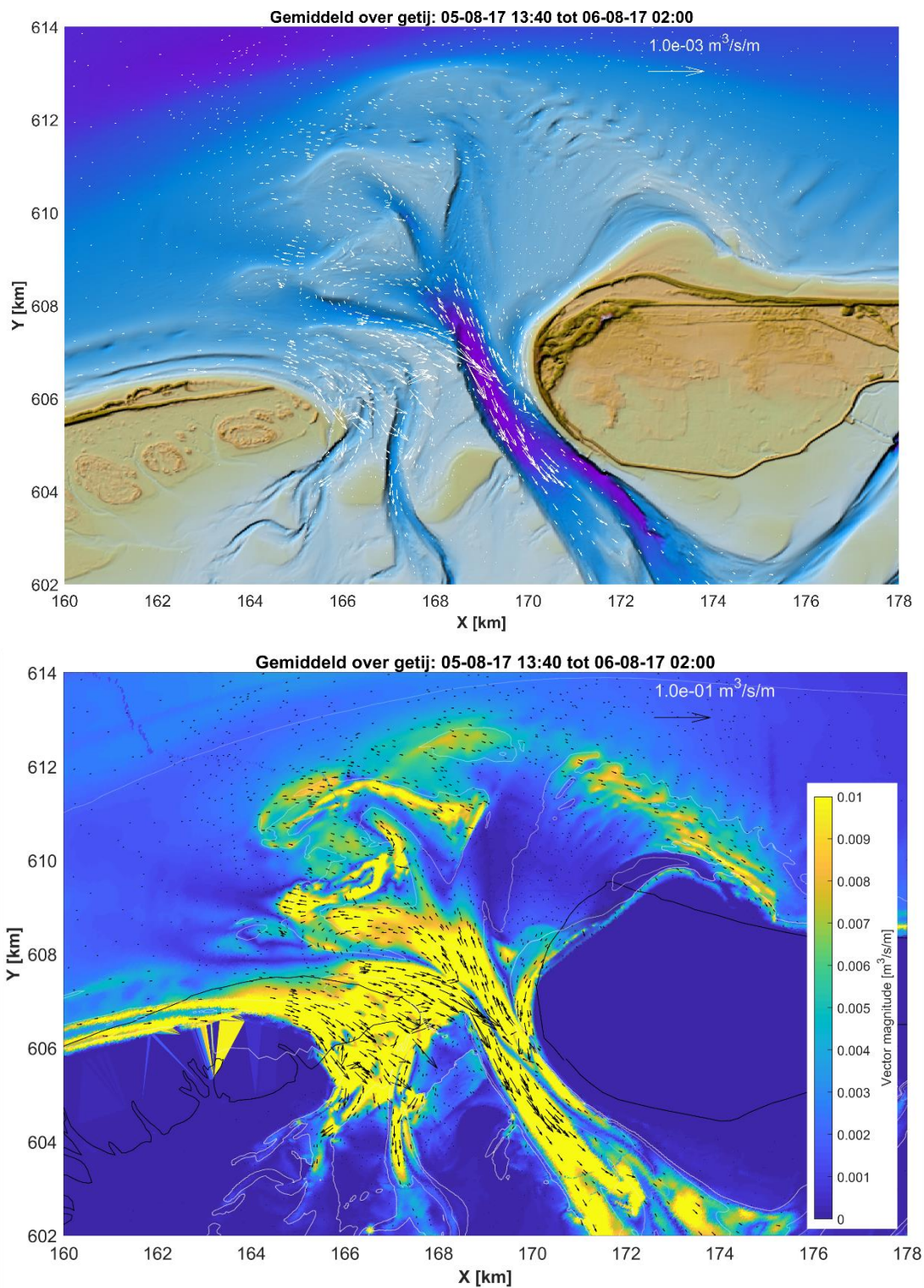
Figuur 5-6: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten rond Ameland NW op basis van de T0 simulatie representatief voor de jaarlijkse condities. Zie Appendix C.1 voor de getijdreven transporten.

Het effect van de instantane transporten, gemiddeld over de getijcyclus, kan worden samengevat door de residuele transportvectoren. Figuur 5-7 geeft een beeld van de residuele transporten voor alleen het getij. Deze transporten vertonen de grootste residuele transporten in het Borndiep en de geulen in het westelijke deel van de buitendelta. Ook op de ondieptes rond het Boschgat zijn transporten zichtbaar, deze vallen echter buiten ons interessegebied. In de keel van het zeegat zijn de transporten ebgedomineerd aan de westzijde van de geul en vloedgedomineerd langs de oostzijde (Ameland). Op de buitendelta vinden we een ebdominant transport zeewaarts, richting de ebschilden en het Akkepollegat. Aan de westzijde van het zeegat observeren we netto ebdominante transporten langs de Boschplaat (Terschelling) en in het Westgat. Een belangrijke observatie is dat de gemodelleerde transporten overeenkomen met de morfologische kenmerken van de buitendelta en de bodemvormen (zie Elias 2019 en Elias et al. 2020 voor uitgebreide beschrijvingen). De getoonde transportverdelingen lijken dus voldoende representatief te zijn om het gedrag van het Zeegat weer te geven. De getijgedreven bijdrage van de transporten op het oostelijk deel van de buitendelta en langs de kust van Ameland Noordwest is beperkt. In dit opzicht bevestigen ze het beeld dat ook ontstaat uit de instantané transporten.

Door toevoeging van golven worden de residuele transporten op de ondieptes van de buitendelta een stuk groter en ook langs de eilandkusten ontstaat er een duidelijk transport in de surfzone (Figuur 5-8). Golfbreking en dissipatie draagt rechtstreeks bij tot brandingsstromen en transporten en indirect zorgen golven ervoor dat er meer sediment omgewoeld wordt dat vervolgens verplaatst met de getijstromingen. De verschillen zijn vooral zichtbaar in het ondiepe gebied tussen Boschplaat en Borndiep en op de ebschilden die aan de westzijde van het zeegat liggen. Op het centrale deel van het Bornrif zijn de residuele transporten nog beperkt. Wel zien we hier duidelijk een transportpad dat zich langs de rand van de buitendelta bevindt. Langs de kustlijn van Ameland NW zien we ook de brandingsgedreven transporten terug die richting het zeegat zijn gericht. Deze transporten zijn echter veel lager dan de grote transporten door de hoofdgeulen van het zeegat. De lage transporten op het Bornrif platform zijn wel te verklaren. Het Bornrif platform is vrij uniform van diepte. Golven breken op de zeewaartse rand van dit platform en genereren dan daar veel transport. Op het achterliggende platform is er dan weinig golfenergie over. Aangezien ook het getij hier weinig transport genereert blijft dit platform dan ook stabiel liggen. Er kan wel sedimenttransport over het platform plaatsvinden, maar dat is dan in de vorm van migrerende bodemvormen of banken. Deze verplaatsingen worden in een morfostatische simulatie niet opgelost.



Figuur 5-7: Een overzicht van de getij-gemiddelde, getijgedreven sedimenttransporten in het Zeegat van Ameland weergegeven op de 2019 (T0) bodem (boven) en met de magnitude van de transporten (onder).

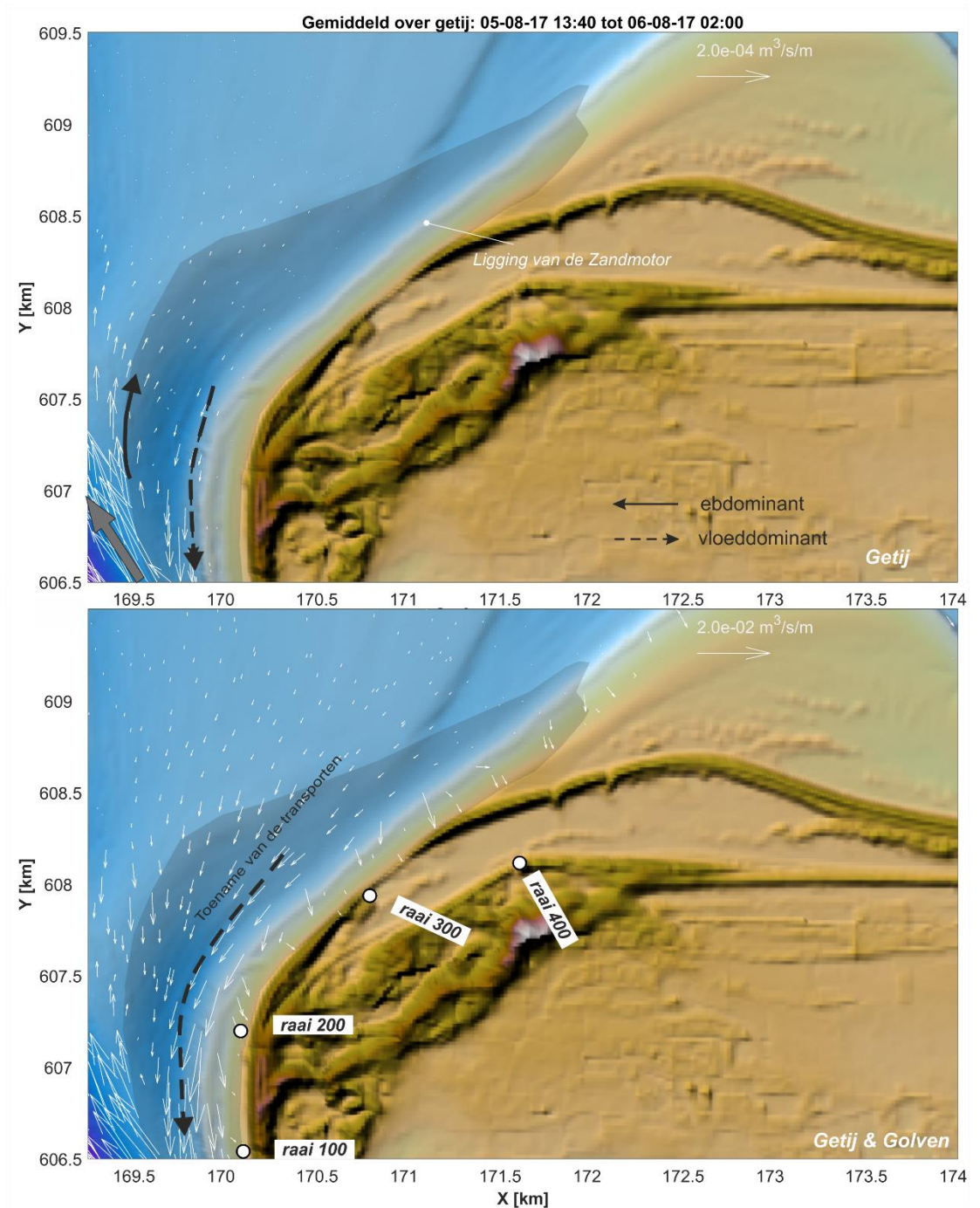


Figuur 5-8: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten in het Zeegat van Ameland representatief voor de jaarlijkse condities weergegeven op de 2019 (T0) bodem (boven) en met de magnitude van de transporten (onder).

In Figuur 5-9 worden de residuele sediment transport patronen bij Ameland NW in detail getoond voor de simulatie met alleen getij (boven) en voor de jaarlijks representatieve transporten (onder). De getijgedreven transporten bevestigen het eerder geschetste beeld. Deze transporten zijn eigenlijk heel klein in het merendeel van het Oostgat. Alleen bij de overgang naar het Borndiep nemen ze duidelijk toe. Een toename van de transportvector grootte betekent in principe dat sediment opgepakt wordt en verplaatst. Deze patronen verklaren al voor een deel waarom er hier structurele erosie van de kust plaatsvindt. Het getij gaat hier dag in, dag uit heen en weer. Met ieder getij vindt deze erosie plaats. Dit tekort wordt niet aangevuld door de golven. De simulatie inclusief golven (Figuur 5-9, onder) toont immers een gelijkwaardig beeld. Ook hier nemen de transporten toe richting het Borndiep. De vectoren zijn echter nog groter dan alleen voor getij. Dit laat zien dat golven de erosie juist versterken. Hoge golven breken op de ondiepten van de buitendelta, maar de kleine golven zullen nog steeds ongestoord de kust kunnen bereiken. Deze kleine golven breken op de kust en zorgen voor een golfgedreven transport en eigenlijk een aanbod van zand voor het getij. Het getij zorgt ervoor dat het zandaanbod van de golven langs de kust, richting het Borndiep worden verplaatst. Vanaf raai 400 vinden we al een naar het zeegat gericht transport. Samenvattend: de vloedstroming rondom de kop van Ameland zorgt voor erosie van de kustlijn van Ameland Noordwest (tussen raaien 100 – 400) en daardoor voor afvoer van zand naar het Borndiep toe. Dit heeft te maken met de verschillen in de transportpatronen van de vloed- en ebstroming (H4.2). Er vindt daardoor wel afvoer van zand van het Oostgat naar het Borndiep plaats, maar geen aanvoer van zand van het Borndiep naar het Oostgat plaats. De afvoer van zand wordt verder versterkt door kleine golven (zie Fig. 4-9); immers de grote golven breken reeds op de rand van de buitendelta en het Bornrif platform en bereiken de kustlijn van Ameland Noordwest niet.

Op basis van deze modelsommen kan al een belangrijke conclusie worden getrokken. Op de huidige bodem zullen de processen (getij, golven) een structurele erosie van de kust veroorzaken. Er is netto wel een afvoer van sediment, maar geen duidelijke toevoer. Zolang de voorliggende buitendelta een ondiep platform blijft en de geulpatronen niet veranderen, zullen ook deze structurele verliezen niet veranderen. Er is dus een grootschalige verandering van de morfologie nodig om de verliezen te stoppen. Een voorbeeld van zo'n structurele verandering is bijvoorbeeld de aanlanding van het Bornrif Bankje.

Een richting het Borndiep gericht residueel transport langs de kustlijn van Ameland Noordwest werd ook in de eerdere studie van Nederhoff et al. (2016) geobserveerd. In deze studie werd ook geconcludeerd dat er, zo tussen raai 300 en 400, een divergentiepunt in de sediment transporten aanwezig was. De (kleine) transporten ten oosten hiervan stonden richting de Bornrif Strandhaak gericht. Dit divergentiepunt is in deze simulaties niet te onderscheiden. Ten oosten van het divergentiepunt zijn de transporten nihil. Dit verschil kan veroorzaakt zijn door de gebruikte schematisatie van het golfklimaat, maar ook door de nieuwe modelbodem. Aangezien de dominante transporten in beide simulaties richting het Borndiep zijn gericht geeft het wel of niet meenemen van het divergentiepunt geen wezenlijk verschil in modeluitkomsten.

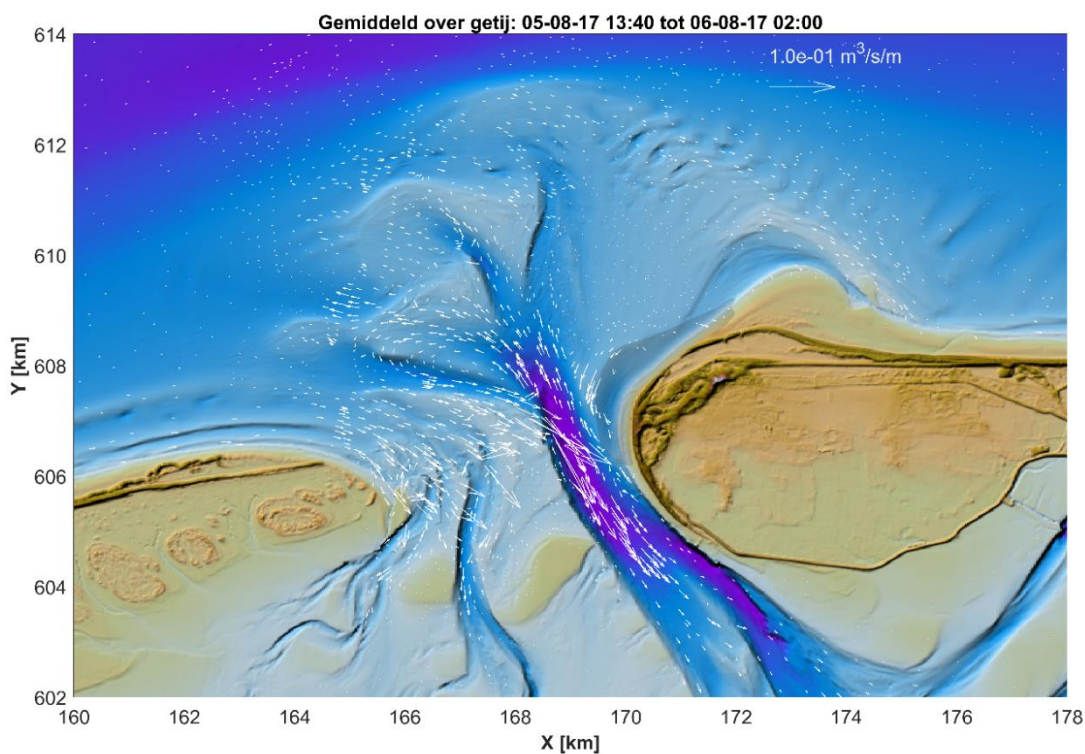


Figuur 5-9: Een detailbeeld van de getijgemiddelde sedimenttransporten bij Ameland NW voor getij (boven) en voor de jaarlijks representatieve condities (incl. golven). Het donkere gebied geeft de ligging van de suppletie aan. Let op dat de schaalvector voor beide figuren een andere grootte heeft.

5.2 Modelresultaten voor de Zandmotor suppletie

5.2.1 Invloed op het getij en de getij gedreven stromingen

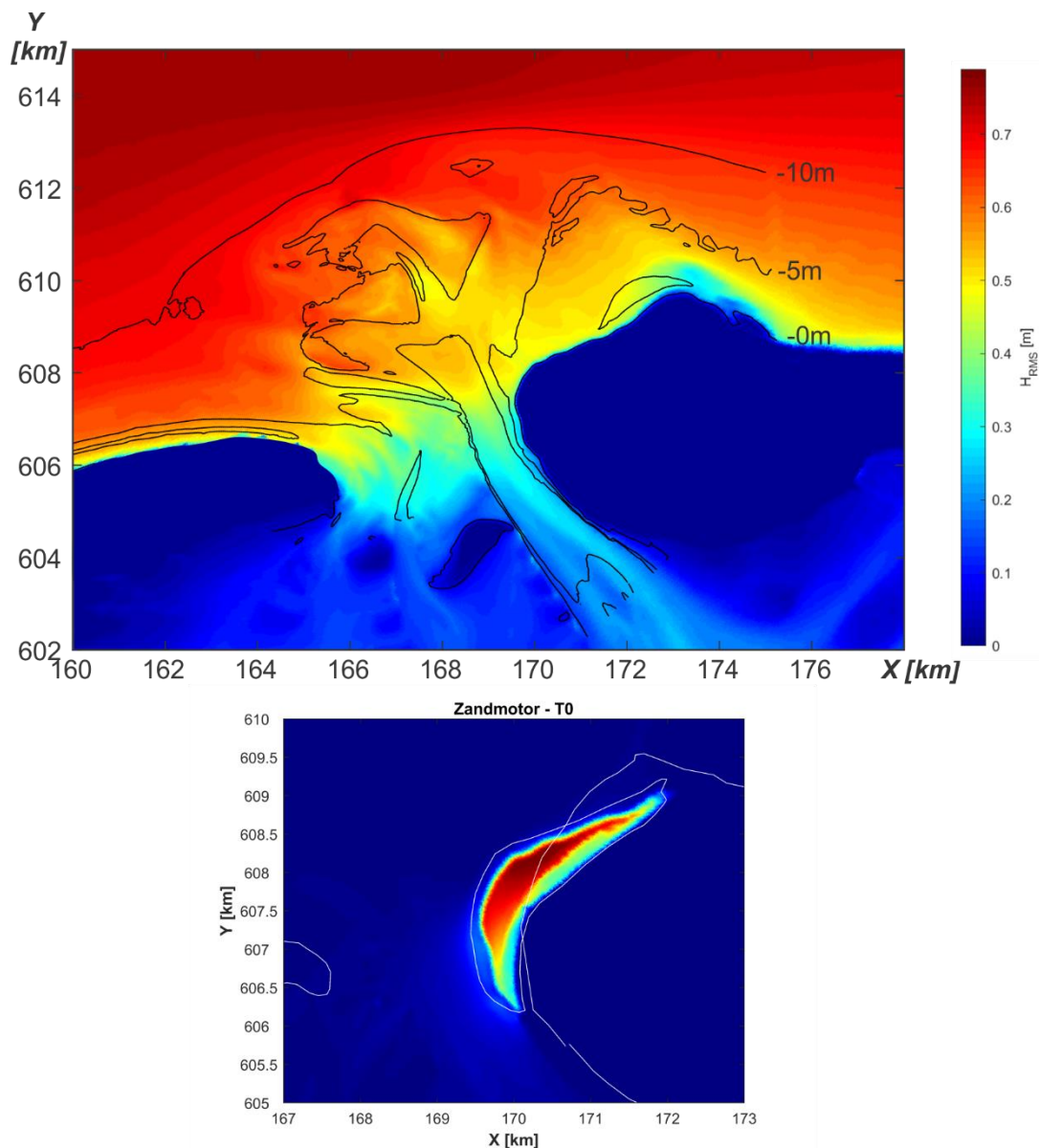
In de T0 simulatie is al aangetoond dat het Oostgat geen dominante stroomvoerende geul van het zeegat is. De uitwisseling met het Borndiep is zelfs zeer beperkt. Er treedt wel een afvoer van sediment op tijdens eb, maar tijdens vloed is er vrijwel geen transport vanuit het Borndiep naar het Oostgat. De aanleg van de zandmotor (T1 simulatie) zal dan ook geen grootschalige veranderingen veroorzaken. Het getij-gemiddelde transport is voor en na suppletie dan ook vrijwel identiek. Alleen net langs de suppletie zijn er grotere transportvectoren te onderscheiden (vergelijk Figuur 5-7 en Figuur 5-10). Door toevoeging van golven verandert dit beeld niet. Een analyse van de verschillen wordt daarom gegeven in H. 5.2.3 aan de hand van de jaargemiddelde transporten.



Figuur 5-10: Residuele getij-gemiddeld sedimenttransport in het Zeegat van Ameland na aanleg van de suppletie.

5.2.2 Invloed op het golfklimaat

Door aanleg van de ZM suppletie vindt er geen grootschalige beïnvloeding van het golfklimaat plaats. Aangezien de suppletie aangelegd is op de kust vindt er zeewaarts van de suppletie, op de buitendelta, geen beïnvloeding van de golven plaats. De jaargemiddelde golfhoogte (Figuur 5-11, boven) is dan ook identiek aan de T0 situatie (Figuur 5-4). Alleen lokaal, waar de suppletie aangelegd is, is een invloed te onderscheiden omdat hier geen golven meer voorkomen (Figuur 5-11, onder). De suppletie geeft geen golfafschermende werking van de kusten links en rechts van de suppletie. Hier is het verschil aan de kust verwaarloosbaar. Ten zuiden van de suppletie, in het Borndiep, is een kleine beïnvloeding (orde centimeters) te zien. Het verschil is echter zeer beperkt en waarschijnlijk gerelateerd aan golfstroom interactie die niet iets anders opgelost wordt na aanleg. Gezien de grootte diepte van het Borndiep op deze locatie is het niet de verwachting dat dit effect belangrijk is. Het is ook de vraag of dit effect in werkelijkheid zichtbaar zal zijn.



Figuur 5-11: Overzicht van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte (H_{rms}) voor de T0 variant. De zwarte lijnen geven de -10m, -5m en 0m contourlijnen weer. Onderste figuur geeft het verschil in golfhoogte t.o.v. de T0 variant.

5.2.3 Jaargemiddelde sediment transporten

De residuele sedimenttransporten voor de Zandmotor variant worden getoond in Figuur 5-12. De vectorpatronen zijn over het algemeen gelijk aan de T0 simulatie (Figuur 5-8). Zichtbare verschillen treden eigenlijk alleen op in de directe omgeving van de suppletie. Ter plaatse van de suppletie treedt er geen sediment transport op. Deze vectoren zijn zeewaarts verplaatst. Het patroon met een toename in sediment transport richting het Borndiep blijft hier wel gelijk. Aanvullende resultaten worden gegeven in Appendix B.2.

Een verschilplaatje tussen de T0 en ZM-simulatie (Figuur 5-13) bevestigt dit beeld. Ter plaatse van de suppletie zien we eigenlijk twee grote verschillen. Ten eerste, op de locatie van de suppletie reduceren de transporten tot nul. Aangezien de transporten zonder suppletie richting het zeegat staan geeft dit in de verschilkaart juist een tegenovergestelde zeewaartse transportpijl. Ten tweede worden de transporten zeewaarts van de suppletie veel groter. In de T0 stond hier nog een klein zeewaarts transport. Door de suppletie ontstaan er juist grote landwaarts, richting het Borndiep, gerichte transporten en ook in het Borndiep nemen de transporten toe. Op zich is dit wel te verwachten. Het Borndiep staat bijna haaks op de suppletie. De vloedstroming vanaf het Bornrif moet om de suppletie heen het Bornrif in draaien. Hier vindt dan een contractie van de stroomlijnen plaats waardoor de stromingen versnellen en de transporten toenemen. Dit proces is voor en na aanleg van de suppletie onveranderd aanwezig.

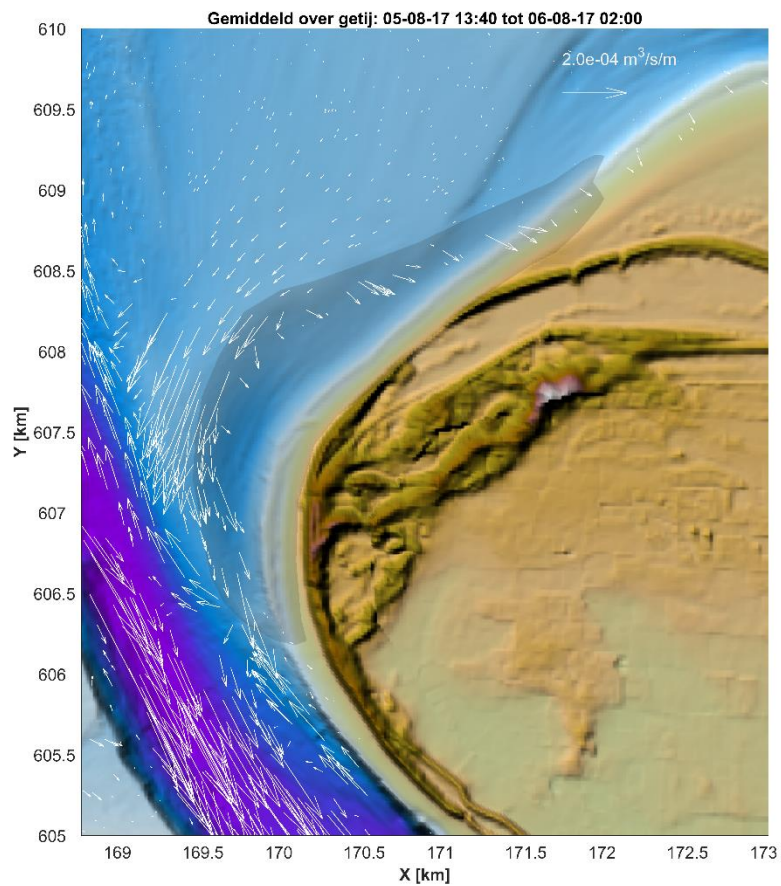
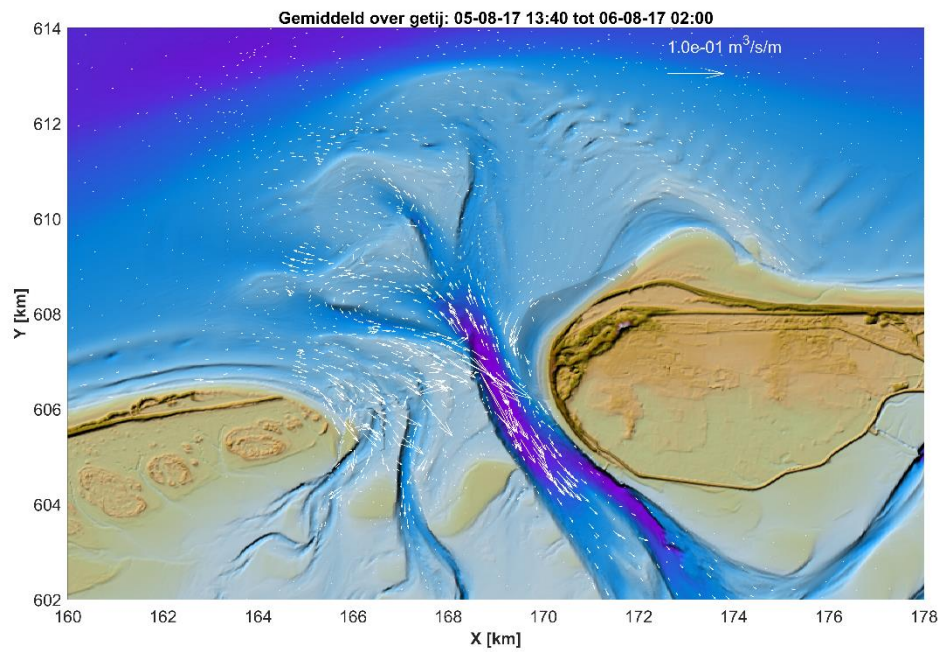
De invloed van de suppletie op de golven is beperkt. Aangezien de suppletie langs de kustlijn is aangebracht blijft golfbreking onverminderd optreden. Deze breking is voor en na suppletie vrijwel gelijk. Het enige wezenlijke verschil is de kustlijn oriëntatie. Deze ligt na suppletie meer Zuidwestelijk gericht. Aangezien de transportvectorrichtingen voor en na suppletie beide richting het Borndiep zijn gericht kan geconcludeerd worden dat de verandering in oriëntatie van de kustlijn geen wezenlijke verandering in de transporten geeft.

Een belangrijke observatie is ook dat de transportvectoren richting het Borndiep in de ZM variant groter zijn dan de transporten van de T0 variant. Dit verschil in grootte is ook te begrijpen. Op de schaal van de buitendelta is de suppletie nog steeds klein en heeft geen invloed op de grootschalige waterbeweging. Het totale volume water wat zich tijdens vloed over het Bornrif en door het Oostgat beweegt verandert niet. Echter, de waterdiepte zeewaarts van het Oostgat is veel kleiner dan in het Oostgat. Dit komt ook omdat hier een ondiepe zandplaat ligt. Met een gelijkblijvende forcering moeten de snelheden hier wel hoger worden. Aangezien het sedimenttransport een functie is van de snelheid, nemen deze dan ook toe. Naast de grote verschillen ter plaatse van de suppletielocatie zijn er ook in het Borndiep verschillen te observeren. Deze verschillen ontstaan omdat er extra sediment het Borndiep in wordt getransporteerd. Dit verandert de residuele transportvectoren in de geulen die aansluiten op het Borndiep.

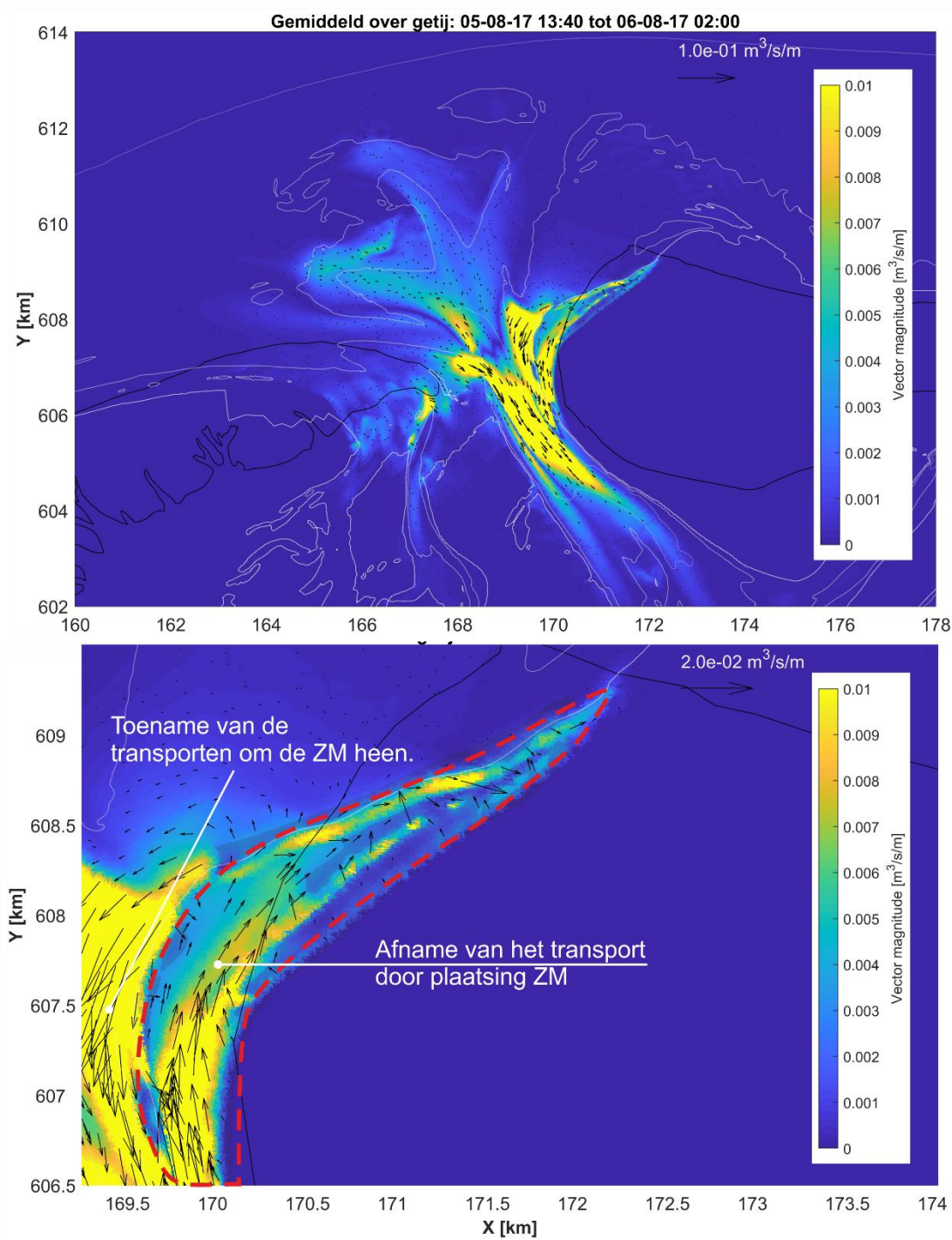
De transporten laten geen verschillen ten oosten van raai 400 zien. De suppletie resulteert dus niet direct in een voeding richting de Bornrif Strandhaak. De modelresultaten geven hier alleen aan dat er een toename van de bekken gerichte transporten optreedt, maar er verder geen bijdrage aan de kustlijnontwikkeling optreedt.

Op basis van deze modelresultaten kan worden verwacht dat er aanzienlijke erosie aan de kop van de Zandmotor zal optreden. Deze erosie zal groter zijn dan de kustlijninterugtrekking van voor de suppletie. Afsluiting van het Oostgat door de suppletie haalt de erosieve druk dus niet weg, maar deze verschuift met de suppletie zeewaarts.

Een samenvatting van de modelresultaten ter beantwoording van de vragen gesteld m.b.t de kansen en risico's (zie H. 2.4) wordt gegeven in Tabel 5.1.



Figuur 5-12 (rechts): Residuele getij-gemiddeld sedimenttransport representatief voor de jaarlijkse condities in het Zeegat van Ameland (boven) en ter hoogte van Ameland NW (onder).



Figuur 5-13 Vershil in jaarlijks representatief sediment transport tussen de T0 en ZM variant voor het zeegat (boven) en ter plaatse van de ZM suppletie (onder).

5.3 Toetsing suppletievarianten, kustindicatoren en kansen en risico's

Ter toetsing van de kansen en risico's van deze suppletievariant zijn een aantal modelleringsvragen opgesteld (Hoofdstuk 3.1.3, Tabel 3.4). Aan de hand van de modellering en analyses worden deze vragen hieronder beknopt beantwoord en samengevat in Tabel 5.1.

Vraag 1: Hoe beïnvloedt deze suppletie de stroming in het Oostgat?

De modellering laat zien dat het Oostgat eigenlijk geen stroomvoerende geul is. De vloedstroming stroomt eigenlijk over het gehele Bornrif platform richting het Borndiep. Deze stroming versnelt om de Noordwestzijde van Ameland heen. Hierdoor is er een ontgrondingskuil ontstaan. De Zandmotor vult deze ontgrondingskuil op, maar verandert het onderliggende proces niet. De stroming versnelt nu om de Zandmotor heen en zal hier aan de voorzijde weer een nieuwe ontgrondingskuil vormen.

Vraag 2: Worden de zandverliezen in de kustzone verkleind?

Direct na aanleg van de suppletie zullen de zandverliezen waarschijnlijk sterk toenemen. De ontgrondingskuil die aanwezig is voor aanleg van de suppletie laat zien hoe de natuurlijke situatie er uit moet zien. Aangezien de processen niet veranderen maar iets zeewaarts verplaatsen is de bodem voor suppletie de beste schatting voor het uiteindelijke evenwicht dat zich gaat instellen na suppletie. Direct na het aanbrengen van de suppletie is de diepte van de voorliggende vooroever nog beperkt. Dit betekent dat er grote stroomsnelheden zullen optreden. De modelresultaten laten dit ook duidelijk zien. Na aanleg nemen de stromingen en transporten toe. De verliezen zullen dan ook toenemen. Deze stroomsnelheden eroderen de voorliggende kustzone maar zullen ook aan de voorkant van de suppletie grote transporten genereren. Hierdoor vindt er tijdens vloed een verlies plaats van zand richting het Borndiep. Tijdens eb vindt er vrijwel geen toevoer van zand vanuit het Borndiep plaats.

Vraag 3: Vind er een transport plaats vanaf de ZM in oostelijke of in westelijke richting?

De modelresultaten laten zien dat er ter plaatse van de suppletielocatie er een overwegend westelijke gericht transport plaatsvindt. De netto transporten in oostelijke richting zijn zeer klein. De modelresultaten laten ook zien dat er een grote lang gradiënt in de transporten aanwezig is. Richting het Borndiep (raai 100-300) worden de transporten duidelijk gedomineerd door het getij. Hier overheerst de westelijke component. Oostwaarts van raai 300 zijn de transporten veel kleiner.

Vraag 4: Zijn er op de schaal van de buitendelta verschillen te onderscheiden?

Op de schaal van de buitendelta heeft deze suppletie waarschijnlijk een klein effect. De uitwisseling van het Oostgat met het Borndiep is zeer klein. Door aanleg van de suppletie veranderen de processen niet. De transporten worden iets noordwaarts verplaatst. Hierdoor worden lokaal de transportvelden wel beïnvloedt, maar het is niet de verwachting dat er een grootschalig effect optreedt.

De suppletie geeft wel een extra zandhoeveelheid in het systeem van bijna 9 miljoen m³. Met een verwachte levensduur van 5 tot 6 jaar geeft dit een jaarlijkse bijdrage van ongeveer 1.5 miljoen m³/jaar. Een deel van dit sediment zal het bekken in verplaatst worden en een deel de buitendelta op. Alleen al op de buitendelta ligt de jaarlijkse bruto volumeverandering rond de 35 miljoen m³. Het is niet de verwachting dat de extra sediment toevoer de morfologische processen gaat veranderen.

Tabel 5.1: Een uitwerking van de post-run kustindicatoren, kansen en risico's aan de hand van de modellering.

Post-run kustindicatoren	
Erosietrends	Initieel een vergroting van de transporten aan de kop van de suppletie. Zandverliezen richting het Borndiep
Golfbelasting	Geen verschil. Surfzone wordt zeewaarts verlegt door de suppletie, maar de golfbelasting veranderd niet.
Stroomsnelheid	Vergroting van de stroming aan de kop van de suppletie. Overige invloed beperkt.
Efficiëntie suppletie	Een toename van de sedimentverliezen uit het kustvak wordt verwacht. De sedimenttransporten aan de kop van de suppletie nemen toe.
Kansen	
Directe voeding kust	Initieel een vergroting van de transporten aan de kop van de suppletie. Zandverliezen richting het Borndiep
Vergroten zandvolumes kustzone	Geen verschil. Surfzone wordt zeewaarts verlegt door de suppletie, maar de golfbelasting veranderd niet.
Reduceren van kustlangse getij-erosieprocessen	Vergroting van de stroming aan de kop van de suppletie. Overige invloed beperkt.
Bevorderen van duingroei	Een toename van de sedimentverliezen uit het kustvak wordt verwacht. De sedimenttransporten aan de kop van de suppletie nemen toe.
(vragen m.b.t.) Risico's	
Kan de vloedstroming omgeleid worden door deze ingreep?	De ontgrondingskuil wordt dichtgezet en de vloedstroming zeewaarts geleid om de suppletie heen. Er is echter geen afname van de (vloed)stromingen en erosieve processen te verwachten.
Wat is de effectiviteit van de suppleties op gebieden	De suppletie neemt de erosieve processen niet weg. Het is de verwachting dat initieel de erosie veel hoger zal zijn dan in de T0 situatie. In dat opzicht is de suppletie niet effectiever dan de huidige suppleties.
Leidt deze ingreep tot onverwachte effecten in het zeegatsysteem?	Geen grootschalige beïnvloeding wordt geobserveerd in de modelresultaten. Grootschalige morfologische effecten zijn dan ook niet te verwachten.
Gevaar voor recreanten.	De stromingen om de suppletie heen zullen toenemen. In dat opzicht kan dit gevaar voor recreatie opleveren.

6 Model resultaten voor Texel Zuidwest (stap 4b)

Ook 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. De T0 bodem van het zeegat van Texel bestaat uit de 2018 Vakloding en de 2019 Jarkus-metingen voor de kustzone. Een goed begrip van het functioneren van het systeem voor aanleg van de suppletie is essentieel om de invloed van de suppletie goed te begrijpen. Het tweede deel richt zich op het doorrekenen van de verschillende suppletievarianten.

De T0 analyse bestaat uit het begrijpen van alleen de getijgedreven stromingen en transporten (H. 6.1), de golven (H. 6.2) en uit een analyse van jaarlijks-representatieve transporten (H. 6.3). Voor dit zeegat is er extra aandacht besteed aan de samenhang van het suppletiegebied met het omliggende zeegat. Hiervoor is een SedTRAILS analyse uitgevoerd (H. 6.4). Het effect van de verschillende suppletievarianten op de getijstromingen, golven en de sedimenttransporten is weergegeven in H. 6.5.

Ten behoeve van de leesbaarheid worden niet alle figuren in het hoofdrapport getoond aanvullende figuren worden weergegeven in Appendix D. Een probleem in het weergeven van de resultaten is het grote ruimtelijke verschil in de transportvectoren. In de figuren is daarom de schaalvector per deelfiguur aangepast om een zo duidelijk mogelijk beeld van de vectoren te genereren.

Ter verduidelijking is de locatie van de suppleties in de T0 figuren aangegeven met een gekleurde arcering. De suppletievarianten zitten hier dus niet verwerkt in de onderliggende bodems.

6.1 Getijgedreven stromingen (T0)

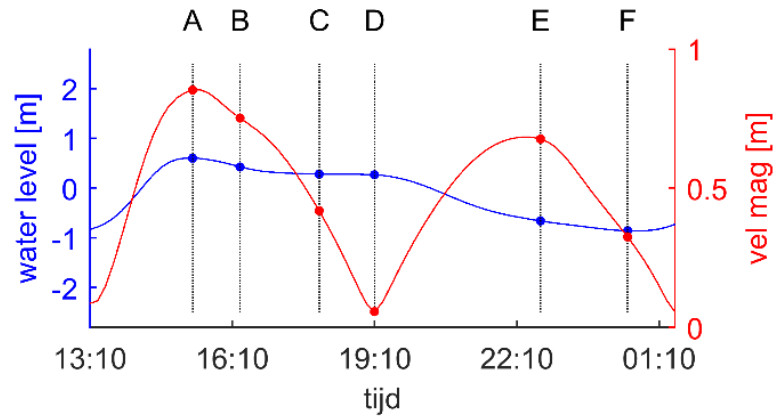
Een belangrijke aandrijver van de sedimenttransporten in het Zeegat van Texel is de getijstrooming. In Figuur 6-2 wordt de getijbeweging op een aantal belangrijke momenten in het getij weergegeven aan de hand van de T0 getijsimulatie. De suppletievarianten zijn hier al aangegeven met de gekleurde polygonen zodat het duidelijk is waar deze liggen in relatie tot de stroomsnelheden. In onderstaande tekst verwijzen de letters tussen [...] naar de betreffende deelfiguren van Figuur 6-2.

Tijdens vloed staat de stroming op zee van zuid naar noord en dringt dan vanaf de geulen, Schulpengat en Nieuwe Schulpengat, langs de kust van Noord-Holland het Marsdiep binnen [A, B]. Tussen de Noorderhaaks en Helderse zeevering in de kop van Noord-Holland versnelt de stroming en het Marsdiep is hier dan ook diep uitgeschuurd. Aan de zeezijde van de Noorderhaaks volgen de stromingen het noord-zuid gerichte Noordzee getij. Op de NUN draaien de vectoren dan landwaarts richting de kust van Texel. Direct langs het droogvallende deel van de Noorderhaaks overheersen deze landwaarts gerichte stromingen. In het Molengat draaien ze dan richting het zeegat en staan dan eigenlijk in tegenovergestelde, zuidelijke, richting in vergelijking met de noordwaarts gerichte stroming op de Noordzee. De stromingen in het Molengat zijn wel hoger dan op zee en op NUN, maar veel kleiner dan de stromingen in het Marsdiep.

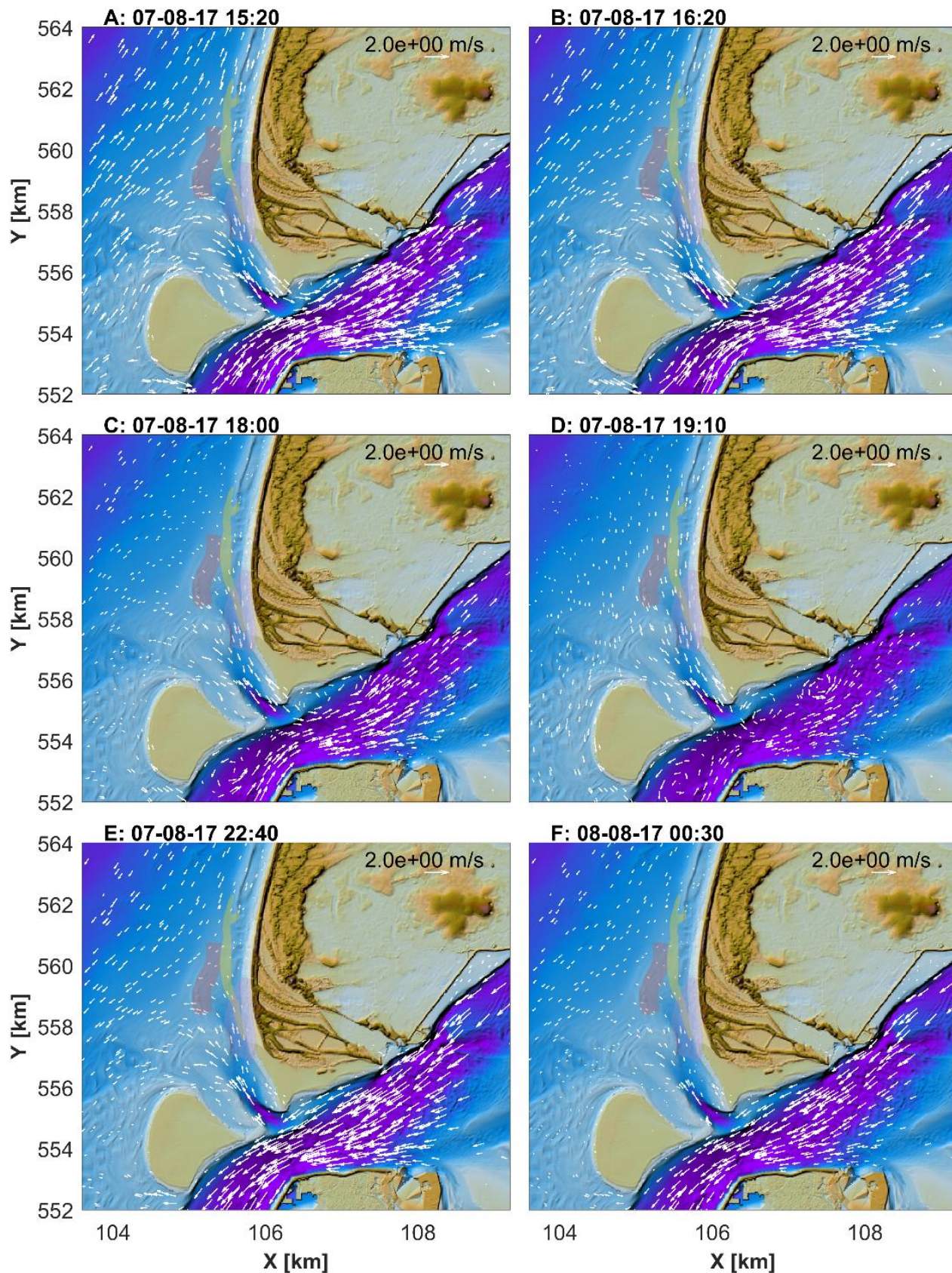
Rond 19:20 [D] treedt kentering van de stroming op. De stroomsnelheden reduceren dan tot vrijwel nul in het Marsdiep. In het Molengat staat dan nog wel een kleine stroming naar het Marsdiep gericht. Na kentering nemen de ebsnelheden sterk toe en rond 22:40 worden dan de maximale ebsnelheden geobserveerd [E]. De ebsnelheden vertonen eigenlijk een gelijkwaardig beeld met de vloodsnelheden, alleen is die nu zeewaarts gericht. De grootste stromingen vinden plaats in het Marsdiep, waar de stroming via de Texelstroom en de Noorderhaaks de zuidzijde van de buitendelta op wordt gedrukt. De stroming vanuit het Marsdiep het Molengat in is eerder beperkt en veel kleiner dan de vloedstroming.

Een duidelijke versnelling om de punt van De Hors noordwaarts richting het Molengat is niet te onderscheiden. De stroming in het Molengat volgt het diepe deel van de geul richting de ebschaar, waar deze uitstroomt over de NUN. Op de NUN staan deze stromingen vrijwel haaks op de noord-zuid gerichte stroming in de Noordzee. Ook hier ontstaat een soort stuwpunt langs de kust van Texel waar de noordelijk gerichte stroming door het Molengat de zuidelijk gerichte stroming langs de kust van Texel ontmoet.

De berekende stromingspatronen komen overeen met de eerdere observaties en conceptuele modellen van Cleveringa (2001), Stein en Jeuken (2000) en Elias (2006). Dit geeft vertrouwen in de modelsimulaties.



Figuur 6-1: Tijdserie van het verloop van de waterstand en snelheid in de Noordzee, net ten westen van de Zuiderhaaks (x-km: 100, y-km: 545). A-F geeft de tijdopname van de snapshots van stromingen en transport in onderstaande figuren.



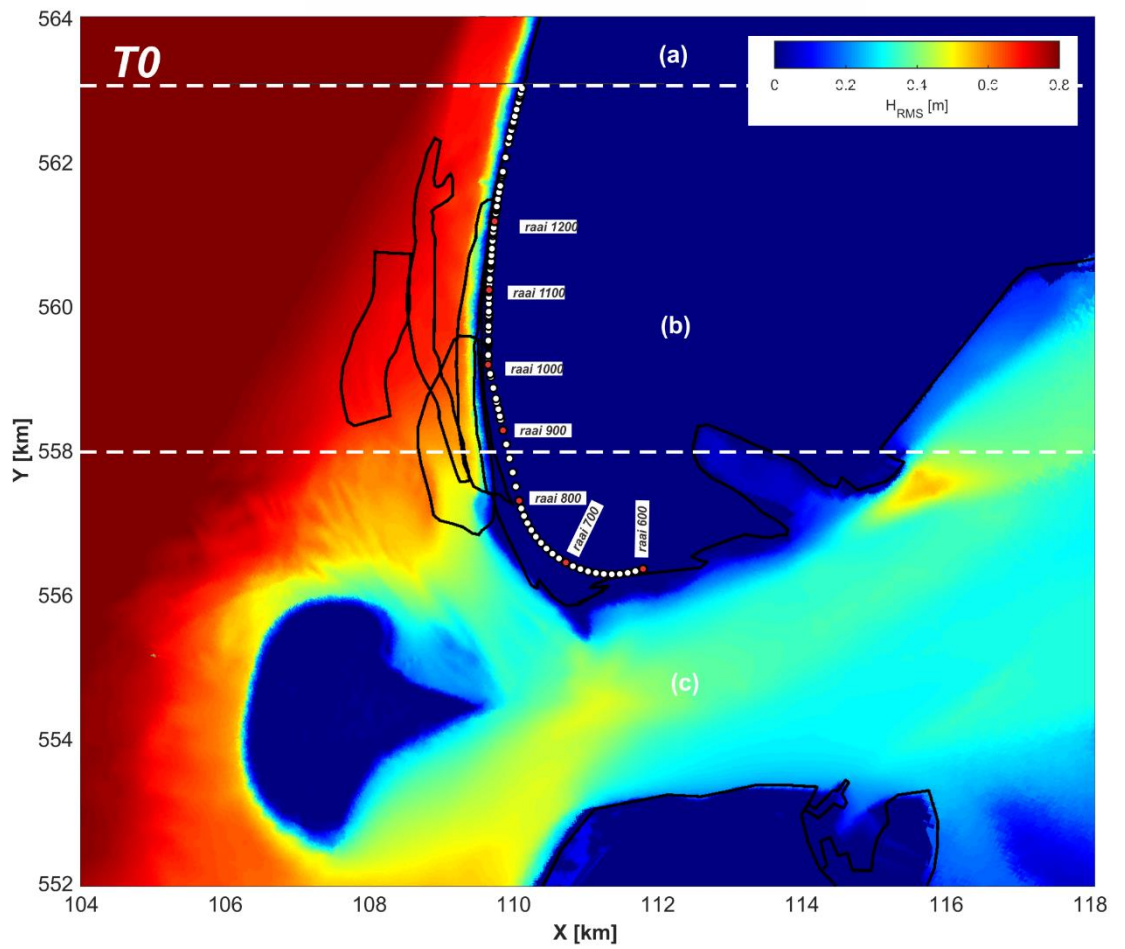
Figuur 6-2: Enkele karakteristieke snapshots van de stromingen in het zeegat van Ameland op basis van de T0 getijsimulatie. Zie Figuur 6-1 voor de bijbehorende tijdserie van waterstand en snelheid. Zie Appendix D-1 voor bijbehorende transportvelden.

6.2 Invloed van de buitendelta op het golfklimaat (T0)

De ondiepten van de buitendelta vormen een soort natuurlijke golfbreker voor de achterliggende kust. Deze golfbrekende werking is vooral afhankelijk van de hoogte van de buitendelta. Zo zal het centrale deel van de Noorderhaaks, dat geheel boven water ligt, eenzelfde bufferende werking op golven hebben. Dat komt doordat aan de zeezijde dan golfbreking plaatsvindt net als bij een normale kust. Op de diepere delen van de buitendelta zal golfbreking alleen plaatsvinden tijdens stormen. Onder normale omstandigheden kunnen de golven dan gewoon richting de kust door propageren tot ze de kust bereiken. In Figuur 6-3 wordt een ruimtelijk beeld van de jaarlijks-gemiddelde golfhoogte op de buitendelta gegeven. Deze figuur is verkregen door de getijgemiddelde golfhoogte van de 18 golfcondities gewogen bij elkaar op te tellen (zie Appendix D.2). Op basis van de geobserveerde golfhoogte kan de buitendelta in een aantal delen worden opgedeeld (zie wit gearceerde lijnen in Figuur 6-3).

- a) Ten noorden van Y km 563 (raai 1400) propageren de golven vrijwel ongestoord richting de kust van Texel. Golfbreking vindt daar vooral plaats op de voorliggende brekerbank en relatief smalle surfzone (ongeveer 1 km) is aanwezig.
- b) Tussen km 558 en 563 (raai 900-1300) is er een overgangszone. De vooroever is hier ondieper dan langs de ongestoorde kustlijn van Texel. In zuidelijke richting nemen de buitendeltabanken (NUN) in hoogte en omvang toe. Golfbreking op de voorliggende ondiepte van de NUN resulteert in een brede zone van golfdissipatie en golfhoogte afname. De breedte van deze zone neemt toe van ongeveer 1 km in het noorden naar 5 km in het zuiden, bij de aansluiting van de NUN op de Noorderhaaks.
- c) Ten zuiden van km 558 (raai 900) breken de golven rechtstreeks op de ondiepten van de buitendelta (de Noorderhaaks). Hier vormt de surfzone zich niet langs de kust maar eigenlijk om de rond de Noorderhaaks heen. De Noorderhaaks schermt dan de achterliggende kustzone af van de golven. Dit effect is met name zichtbaar zuidelijk van raai 800. De Noorderhaaks zorgt er ook voor dat de golven vrijwel niet doordringen in het bekken. In het Breewijd is nog een wat hogere golfhoogte zichtbaar. Dit komt door de geulen Schulpengat en Nieuwe Schulpengat waar golven uit zuidelijke en Zuidwestelijke richting kunnen doordringen. In het Marsdiep is de golfhoogte dan over het algemeen beperkt ($< 0.3\text{m}$).

In Figuur 6-3 zijn de suppletieontwerpen door de zwarte polygonen aangegeven. Met uitzondering van de ZM II suppletie liggen de suppletieontwerpen eigenlijk net buiten de invloedssfeer van de buitendelta. Golfbreking en afscherming door de Noorderhaaks heeft eigenlijk alleen een direct effect op de ZM II suppletie.



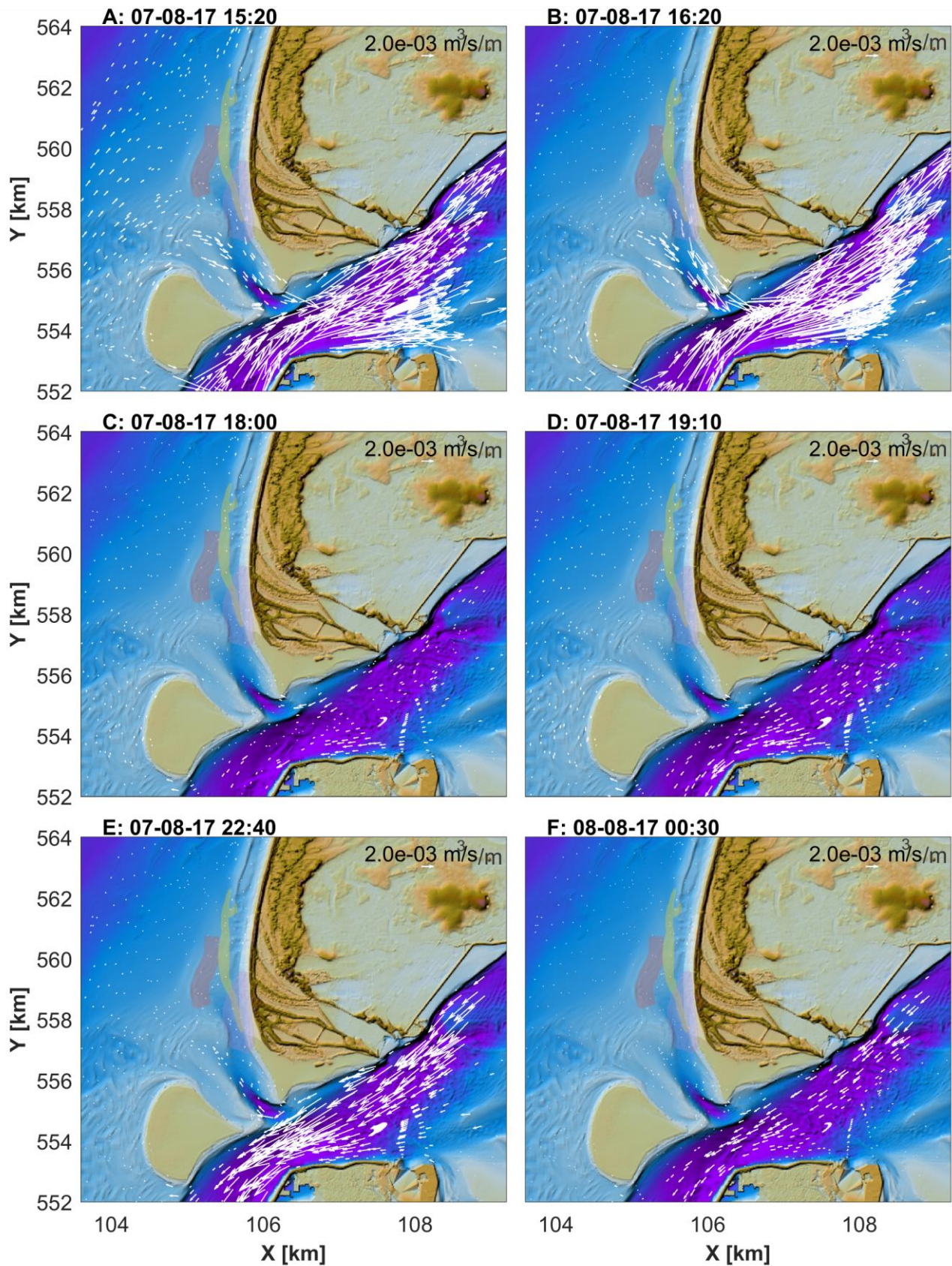
Figuur 6-3: Overzicht van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte voor de T0 variant. Polygonen geven de ligging van de verschillende suppletievarianten weer.

6.3 Sediment transporten (T0)

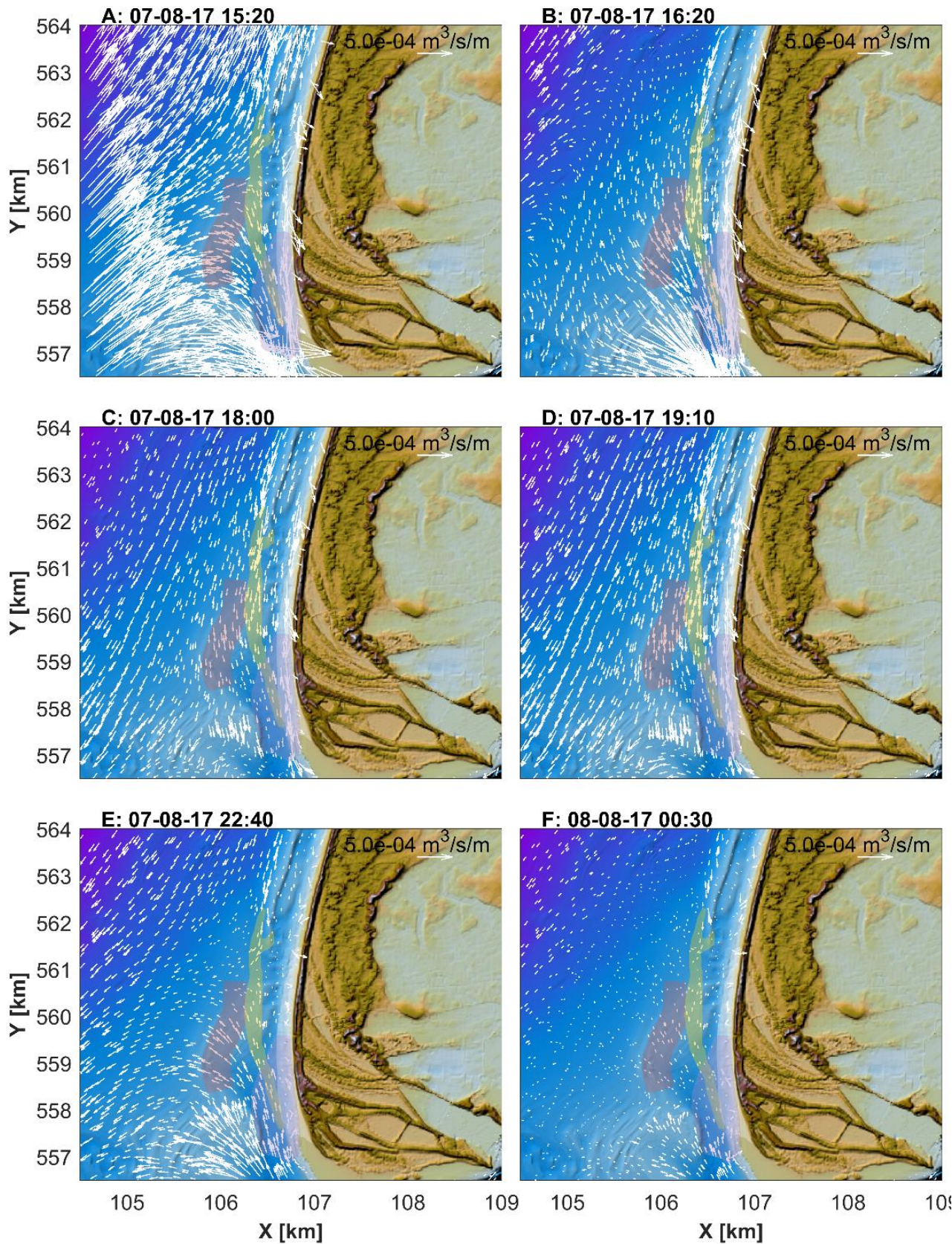
Een overzicht van de instantane sedimenttransporten wordt getoond in Figuur 6-4 (zeegat) en Figuur 6-5 (Zuidwest Texel). In Appendix D-1 worden soortgelijke tijdseries voor alleen de getijgedreven component getoond. Doordat de sedimenttransporten in principe gelijk zijn aan de stroming tot een macht 3 tot 5 wordt het verschil in transportgrootte tussen het Marsdiep en het Molengat verder geaccentueerd (Figuur 6-4). De transporten op de NUN en in het Molengat zijn klein ten opzichte van de grote transporten in de geulen. Alleen door in te zoomen op het Molengat (en de schaalvector aan te passen) kan een beter beeld verkregen worden van de transporten hier (Figuur 6-5).. Zeewaarts van de NUN zijn de transporten noordelijk gericht. Op de NUN draaien de transporten richting de kustlijn. Ten zuiden van km 561 (raai 1200) zijn de transporten dan richting het zeegat gericht en ten noorden hiervan zijn ze noordwaarts gericht. Tijdens maximale vloed is er een divergentiepunt in de transporten langs de kust zichtbaar tussen km 560 en 561 (raai 1100-1200).

Een vergelijk van [A] en [B] geeft inzicht in het belang van golven en het belang van de golf-getij interactie. Tijdstip [B] geeft het transportbeeld weer met een kleine getijgedreven stroming. De transporten zijn dan vooral golf-gegenereerd. Langs de ongestoorde kust (ten noorden van km 561, raai 1200) vindt golfbreking plaats op de voorliggende brekerbank. De golfgedreven transporten resulteren dan in een netto zuidwaarts transport. Tijdens maximale vloedstroming [A] is het transport hier echter noordwaarts. Het getij is dan dominant over de golfgedreven transporten. Over de gehele ongestoorde kustzone treedt een noordwaarts transport op. Ook tijdens maximale eb [E] treedt een tweedeling in noordwaarts en zuidwaarts transport op alleen zijn de richtingen nu omgedraaid. Rond km 561 (raai 1200) ontstaat nu een convergentie punt. Transporten ten noorden van km 561 (raai 1200) zijn zuidwaarts gericht en transporten vanaf het zeegat zijn noordwaarts gericht.

Op basis van de sediment transportpatronen zou geconcludeerd kunnen worden dat de transporten ten noorden van km 562 (raai 1300) representatief zijn voor de ongestoorde eilandkust. Golven zorgen voor een golfgedreven transport op de brekerbank en de getijgedreven transporten zijn uniform over het dwarsprofiel, noordelijk gericht tijdens opkomend tij en zuidelijk tijdens afgaand getij. Ten zuiden van km 559 (raai 1000) worden de transporten duidelijk beïnvloedt door de voorliggende buitendelta en het zeegat. De transporten roteren op de ondieptes van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks en er treedt versnelling van de stroming, en dus vergroting van de transporten, op in de geulen.



Figuur 6-4: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten in het zeegat van Texel op basis van de T0 simulatie voor jaarlijks gemiddelde condities (getij+golven). Zie Figuur 6-1 voor de bijbehorende tijdserie van waterstand en snelheid.



Figuur 6-5: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten in het zeegat van Texel op basis van de T0 simulatie voor jaarlijks gemiddelde condities (getij en golven) en ingezoomd op de NUN en het Molengat.. Zie Figuur 6-1 voor de bijbehorende tijdserie van waterstand en snelheid.

De berekende sedimenttransporten voor de T0 bodem zijn samengevat in Figuur 6-6 en Figuur 6-7 in de vorm van de residuele transporten voor respectievelijk het morfologische getij en de jaarlijks-gemiddelde condities.

Getijgemiddelde getijgedreven transporten

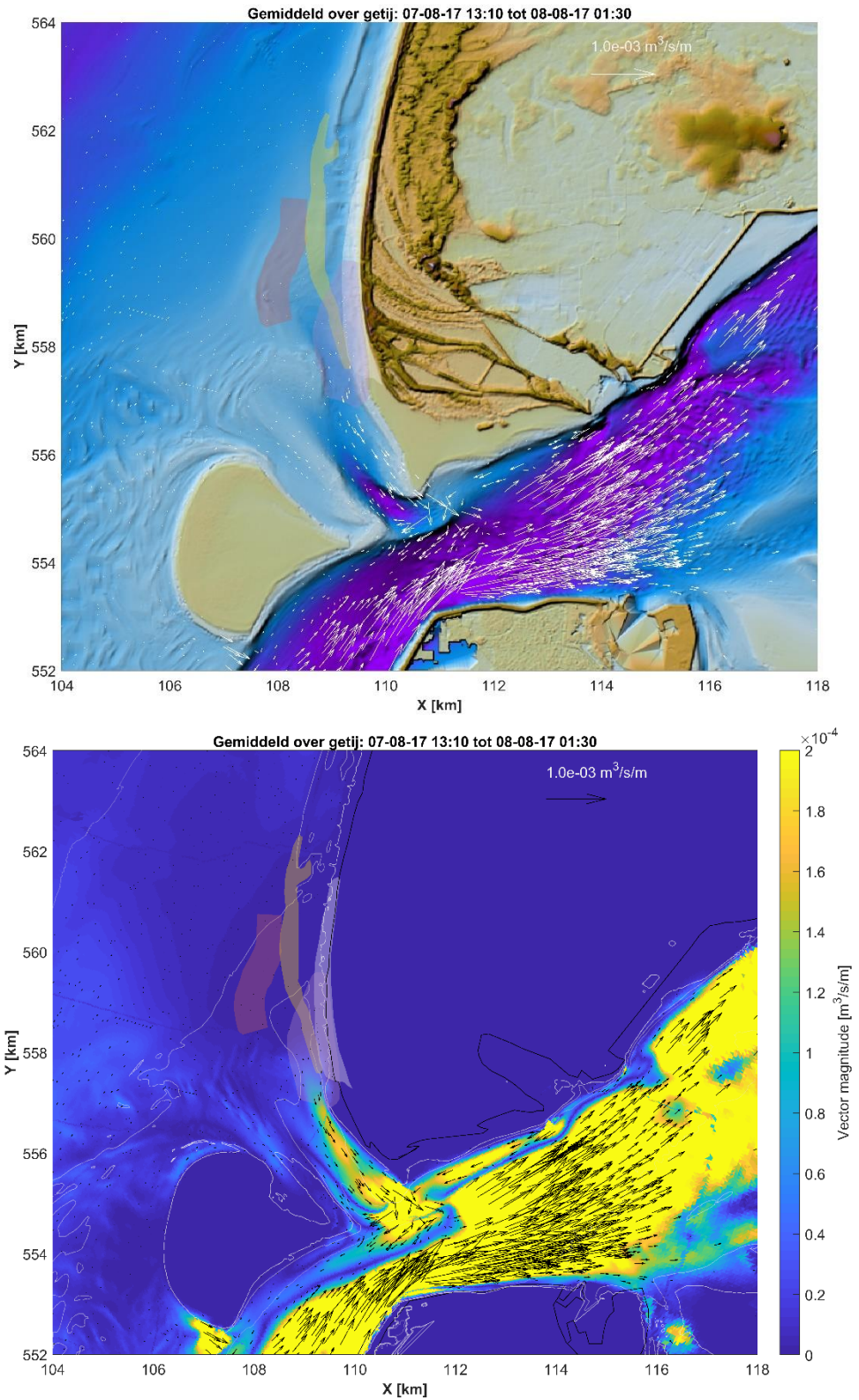
Ook de getijgemiddelde transporten laten een dominantie zien van de transporten in het Marsdiep. In het Marsdiep zijn de transporten richting het bekken gericht. Deze richting komt overeen met de geschatte sedimentimport door het Marsdiep van zo'n 2 miljoen m³/jaar (Elias, 2019). Het getijgedreven transport in het Molengat is eerder beperkt. Alleen ter plaatse van de Hors (ruwweg zuidelijk van raai 800) vindt er een zuidwaarts transport plaats richting het Marsdiep. De getijgedreven transporten op de NUN zijn in verhouding zeer klein en eigenlijk niet zichtbaar met de gekozen schaalvector. Door in te zoomen op de NUN en de schaalvector hierop aan te passen kunnen de transporten wel inzichtelijk gemaakt worden (Figuur 6-8). In de transporten is de eerder geobserveerde tweedeling in transportrichting duidelijk terug te zien. Transporten op diep water en ten noorden van km 561 (raai 1200) zijn noordwaarts gericht. Transporten op de NUN buigen landwaarts. Ten zuiden van km 559 (raai 1000) zijn de transporten in het Molengat en langs de kust dan zuidelijk gericht. Dit beeld bevestigt het stuwpunt dat ook in de studies van Stein en Jeuken (2000) en Cleveringa (2001) werd beschreven.

Getijgemiddelde transporten voor jaarlijkse representatieve condities

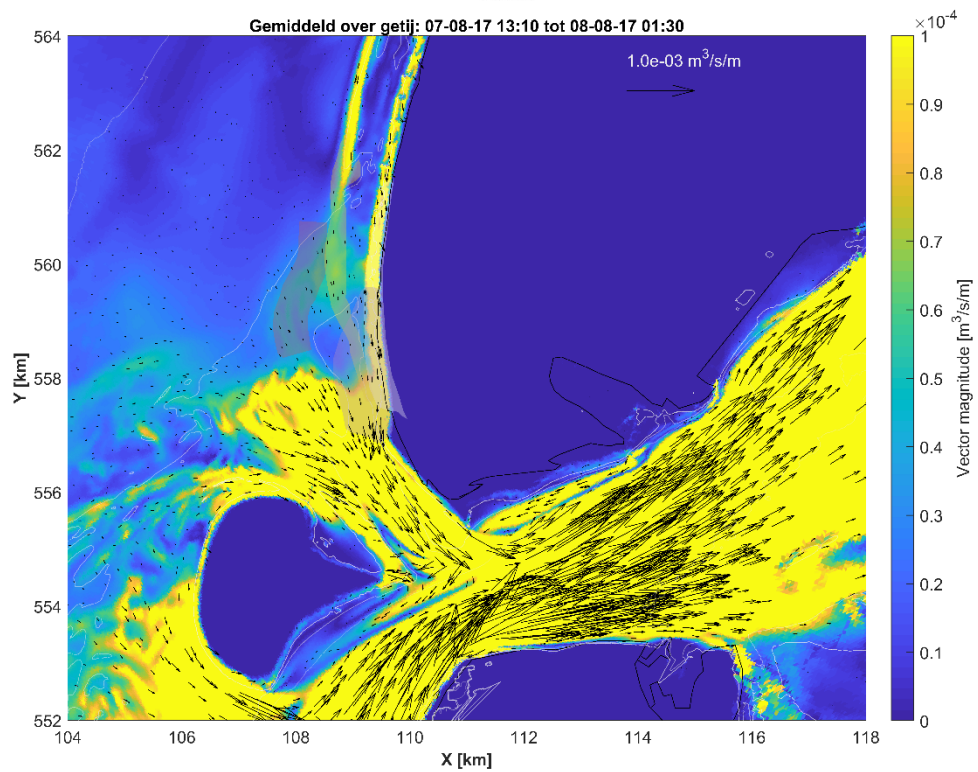
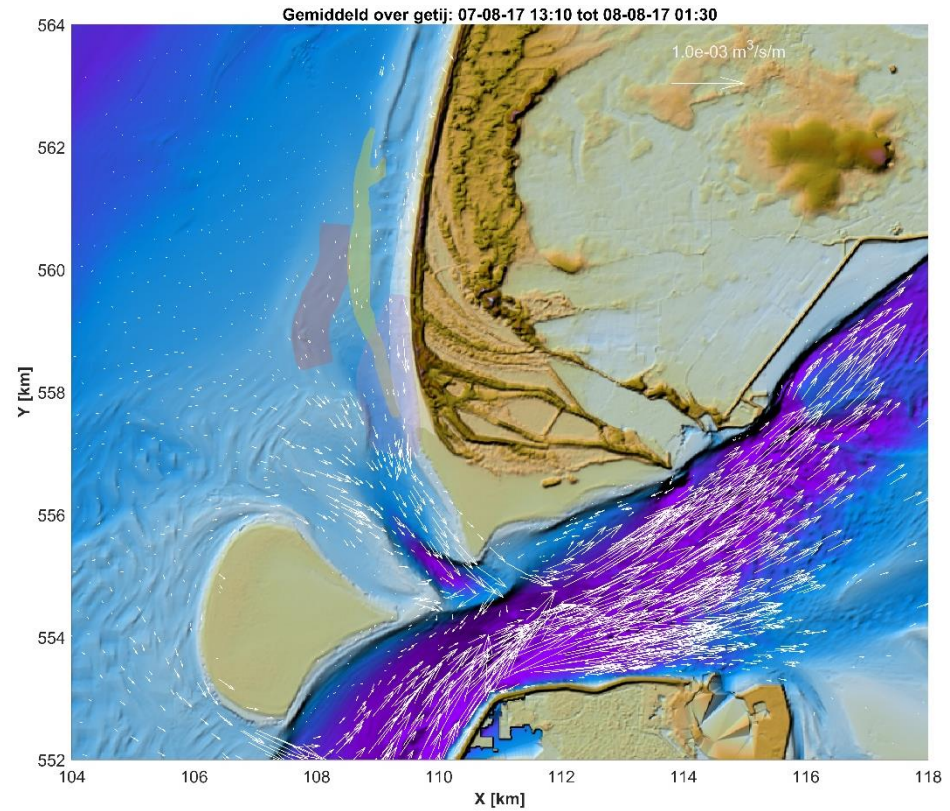
Door toevoeging van golven worden de residuele transporten vergroot (Figuur 6-7). Golfbreking en -dissipatie draagt rechtstreeks bij aan brandingsstromen en transporten en indirect zorgen golven ervoor dat er meer sediment omgewoeld wordt dat vervolgens verplaatst met de getijstromingen. De verschillen zijn vooral zichtbaar op de ondiepe bankgebieden van de buitendelta. Met name langs de noord- en zuidkant van de Noorderhaaks zijn nu duidelijke transporten zichtbaar (Figuur 6-7), maar ook langs de eilandkust zien we nu een transport op de brekerbank en langs de kust in zuidwaartse richting. Door de toevoeging van golven, worden op de NUN relatief grote transporten in zuidoostelijke richting gegenereerd, in de richting van het Molengat (Figuur 6-8, rechts). Deze transporten zorgen ervoor dat de transporten door het Molengat en de uitwisseling tussen Molengat en Marsdiep aanzienlijk toenemen. Ook in het Marsdiep zijn de transporten incl. golven een stuk hoger dan alleen door het getij. De patronen blijven hier echter wel gelijk. Door golven is er veel meer sediment beschikbaar gemaakt op de buitendelta dat door de vloedstroming opgepikt kan worden en het bekken in wordt getransporteerd.

Een belangrijke conclusie die op basis van deze residuele transporten kan worden getrokken is dat de suppleties voor het merendeel net buiten de grote sedimenttransportstromen van de buitendelta liggen. Deze observatie geldt dus niet alleen voor het getij, maar ook voor de simulaties met getij en golven.

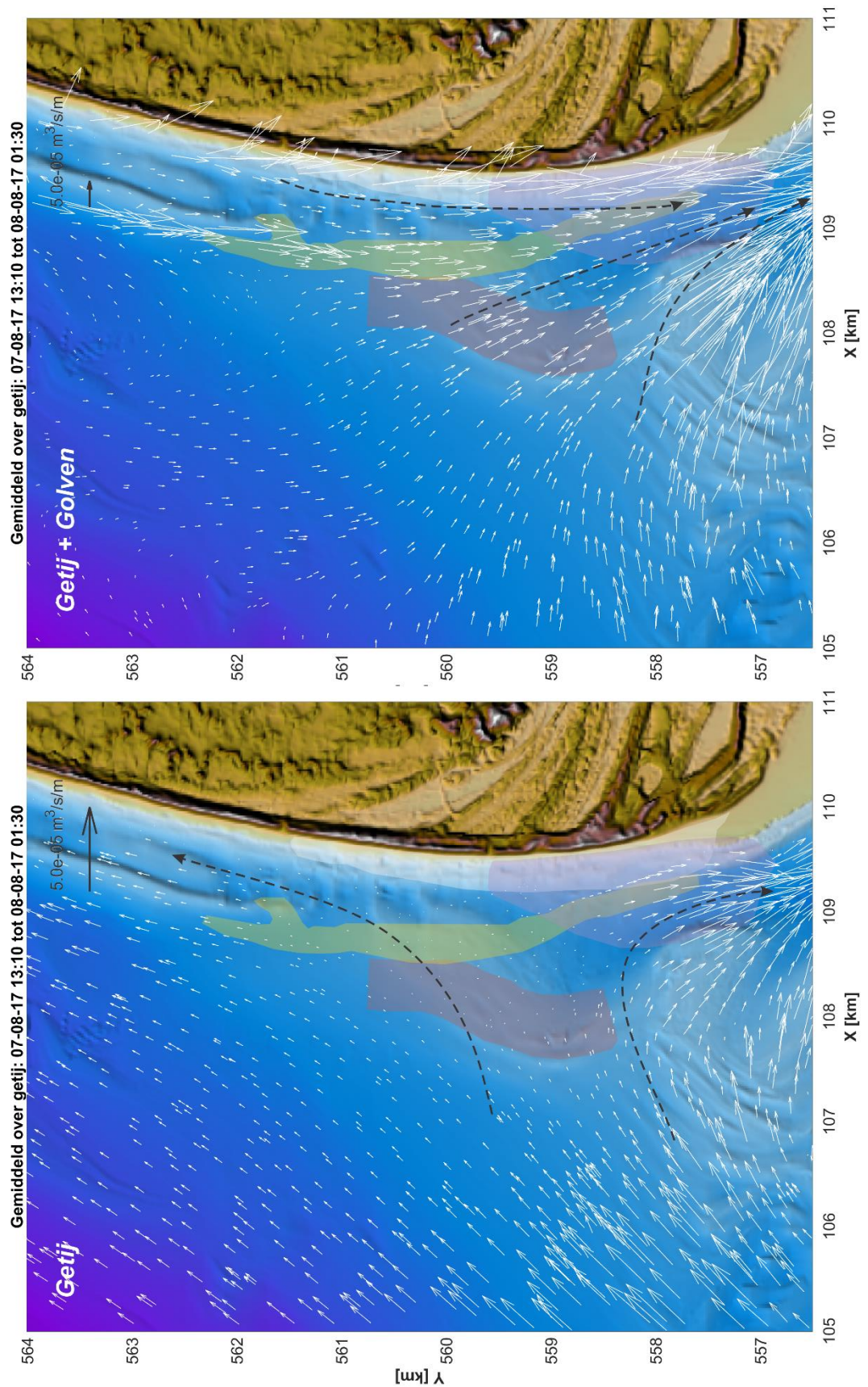
In de residuele, jaarlijks-gemiddelde, transporten is een stuwpunt, zoals geconcludeerd in de studie van Stein en Jeuken (2000), niet direct te onderscheiden. Dit stuwpunt treedt ook in deze studie op, maar ligt veel noordelijker (zie Figuur 6-9). Deze verplaatsing is mogelijk een gevolg van een ander schematisatie van het golfklimaat waarbij een klein verschil in relatieve dominantie van de noordelijke en zuidelijke condities een verschil in transporten kan veroorzaken. Mogelijk speelt ook de onderliggende bodem een rol. Sinds 2000 heeft de NUN zich veel verder noordwaarts ontwikkeld. Het stuwpunt kan daarmee ook noordelijk verplaatst zijn.



Figuur 6-6: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten in het Zeegat van Texel op basis van alleen het morfologische getij en weergegeven op de 2019 (T0) bodem (boven). In de onderste figuur worden zowel de vector als de magnitude van het transport weergegeven.



Figuur 6-7: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten in het Zeegat van Texel representatief voor de jaarlijkse condities weergegeven op de 2019 (T0) bodem (boven). In de onderste figuur worden zowel de vector als de magnitude van het transport weergegeven.



Figuur 6-8: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten langs de kust van Zuidwest Texel voor getij (links) en voor de jaarlijks representatieve condities (rechts).

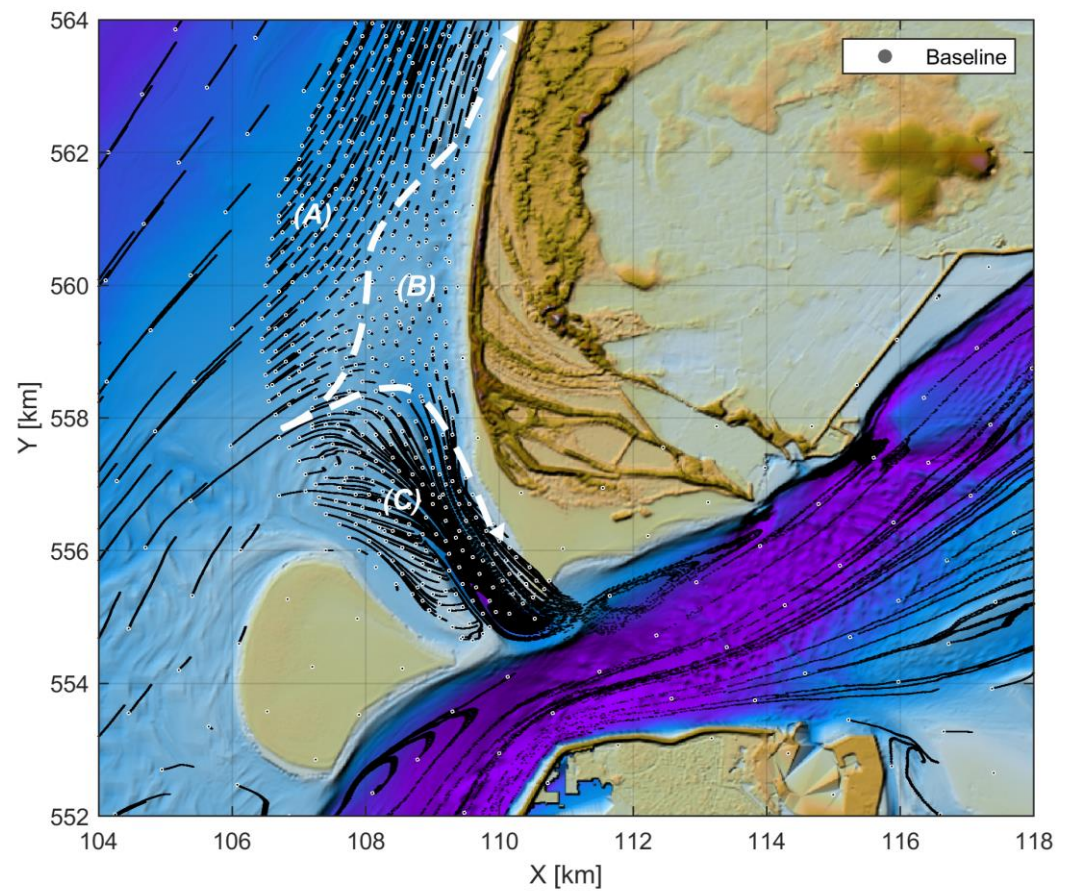
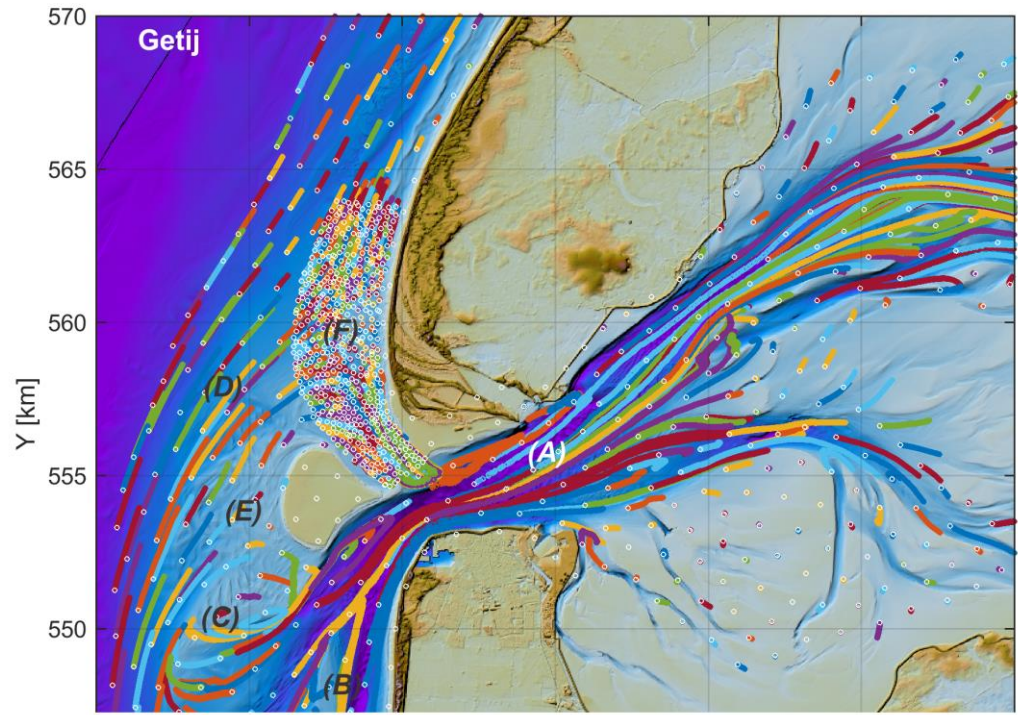
6.4 De samenhang van het morfologische systeem

Een analyse met behulp van de SedTRAILS methode geeft een beeld van de grootschalige sedimenttransportpaden in het zeegat van Texel. De verplaatsing van 500 deeltjes wordt hierbij gevolgd. In Figuur 6-9 zijn de transportpaden voor alleen het getij gevisualiseerd voor het gehele zeegat (boven) en langs de kust van Zuidwest Texel (onder).

Het geobserveerde transportbeeld komt overeen met de conceptuele modellen zoals geschetst in Cleveringa (2001) en Elias (2006). Het Marsdiep (A) is vloeddominant, vrijwel alle transportpaden staan hier vanaf de buitendelta het zeegat in. De uitstroom van de hoofdgeulen op de buitendelta het Schulpengat en het Nieuwe Schulpengat (B) is ebdominant. Deze geulen voeden de voorliggende banken (ebschild). Het Schulpengat voedt de naastliggende bank Zuiderhaaks (C). Aan de zeezijde zijn de transporten op de Zuiderhaaks noordelijk gericht. Een deel van deze transporten verplaatst zich dan via het front van de buitendelta naar de noordzijde van de Noorderhaaks (E). Tussen de ondiepte die aanwezig is tussen de Zuiderhaaks en de Noorderhaaks vindt een landwaarts transport plaats, terug richting het Schulpengat. Zo ontstaat hier een residuele sediment circulatie.

Aan de Noordzijde van de Noorderhaaks zijn de transporten noordelijk (D) en landwaarts gericht, richting de NUN en het Molengat (F). Door de hoge resolutie van de sedimentbronnen zijn de transportpaden hier op zeegat schaal niet meer duidelijk te volgen. Een gedetailleerd van de sedimentstromen is wel zichtbaar in de ingezoomde figuur (Figuur 6-9, onder).

Aan de noordzijde van de Noorderhaaks kunnen 3 zones (ieder met een ander transportpad) worden geïdentificeerd. Op de diepere vooroever, zeewaarts van de NUN vindt een doorgaand transport plaats vanaf het front van de buitendelta richting de centrale eilandkust van Texel (A). Ingeklemd tussen zone A en de kust van Texel Zuidwest, bevindt zich een luwtegebied (zone B) tussen km 558 en km 562 (raai 900 en raai 1300) en de NUN omvat. In dit luwtegebied zijn getijgedreven transporten zeer klein. In het zuidelijk deel van de NUN (inclusief het ebschild) en in het Molengat is er juist een groot vloeddominant transport aanwezig (C). Hier zijn de transporten sterk richting het Marsdiep gericht. Het transportbeeld lijkt in dit opzicht op het conceptuele plaatje van Cleveringa (2001) en Stein en Jeuken (2000) met het verschil dat een echt convergentiepunt niet aanwezig lijkt, maar wel een grote zone (zone B) aanwezig is waar weinig getijgedreven transport plaats vindt.



Figuur 6-9: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor gemiddelde getij-gedreven transporten voor het gehele zeeget (boven) en voor Texel Zuidwest in detail (onder).

De transportpaden geven een gedetailleerd, maar ook complex beeld van de sedimentpaden in het zeegat. Door middel van een clustering in een beperkt aantal morfologische eenheden (15 gebieden, zie Figuur 6-10, bovenste plot) kunnen de verbanden tussen deze eenheden in kaart worden gebracht door middel van een connectiviteitsanalyse. Op basis van het getij kunnen 3 clusters worden onderscheiden waarin veel uitwisseling optreedt. De verbindingen tussen deze clusters zijn dan beperkt. In onderstaande beschrijving wordt [...] gebruikt om naar de deelpolygonen van Figuur 6-10 te verwijzen.

Cluster 1 beschrijft het transportpad tussen het zuidelijk deel van de buitendelta van het zeegat van Texel en de Waddenzee. Vanuit het Marsdiep [4] vindt het dominante transport plaats door de Texelstroom [14] het bekken in. In het bekken vindt er dan uitwisseling plaats tussen het platengebied van de Doove Balg en de Texelstroom. Er vindt ook uitwisseling plaats met het zuidelijke deel van de buitendelta. Er zijn verbindingen tussen het Schulpengat en Nieuwe Schulpengat met het bekken. Het zuidelijke deel van de buitendelta, de Zuiderhaaks [7], wisselt uit met het Marsdiep [4] en met het Schulpengat [7]. Deze laatste uitwisseling was zichtbaar in de vorm van de circulatie cel. De Noorderhaaks scheidt cluster 1 van de andere 2 clusters.

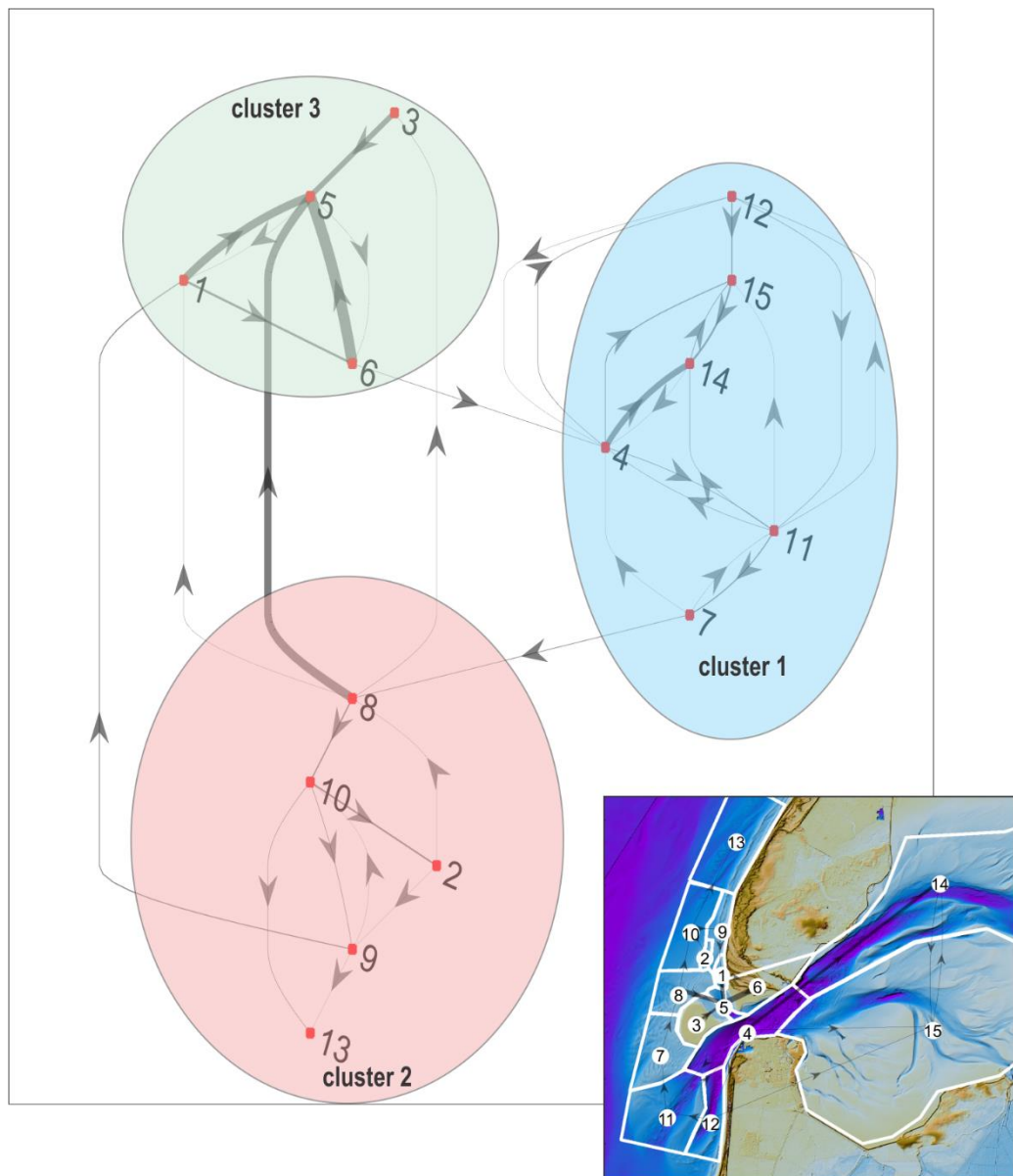
Cluster 2 beschrijft de uitwisseling van het zeewaarts gelegen noordelijk deel van de buitendelta via de NUN naar de centrale eilandkust van Texel. De enige rechtstreekse verbinding tussen cluster 1 en cluster 2 wordt gevormd door de verbinding van polygoon 7-8 ter hoogte van de zeewaartse kant van de Noorderhaaks. De getij gedreven uitwisseling tussen het zuidelijk en noordelijk deel van de buitendelta gebeurt dus voornamelijk over het front van de buitendelta. Ingrepen die de verbinding tussen polygoon 7 en 8 verstoren hebben dan ook een groot effect op het gehele systeem van de buitendelta. Vanuit cluster 2 zijn alle verbindingen eenrichtingsverkeer naar cluster 3.

Cluster 3 beschrijft de sediment paden van het landwaarts gelegen noordelijke deel van de buitendelta. Vanuit alle polygonen in cluster 2 vindt er een transport plaats richting cluster 3. Een rechtstreekse dominante verbinding bestaat tussen polygoon 8 en 5 (het Molengat). Ingrepen in dit transportpad hebben waarschijnlijk ook een groot effect. Naast deze dominante verbinding, bestaan er ook kleinere connecties van alle eenheden richting het Molengat. Verstoring van deze paden heeft dan waarschijnlijk een klein effect, er zijn namelijk nog veel alternatieve paden. Interessant is dat het rechtstreekse transportpad vanaf Molengat [5] naar het Marsdiep [4] een beperkte connectie toont. Er is veel meer uitwisseling met de Noorderhaaks [3] en de Hors [5]. De beperkte verbinding tussen het noordelijke deel van buitendelta en de rest van het zeegat is een indicatie dat het aanbrengen van verstoringen (ingrepen, suppleties) waarschijnlijk lokaal een effect geeft, maar geen grootschalig effect op de transporthuishouding van het zeegat. De dominante verbindingen worden niet beïnvloed.

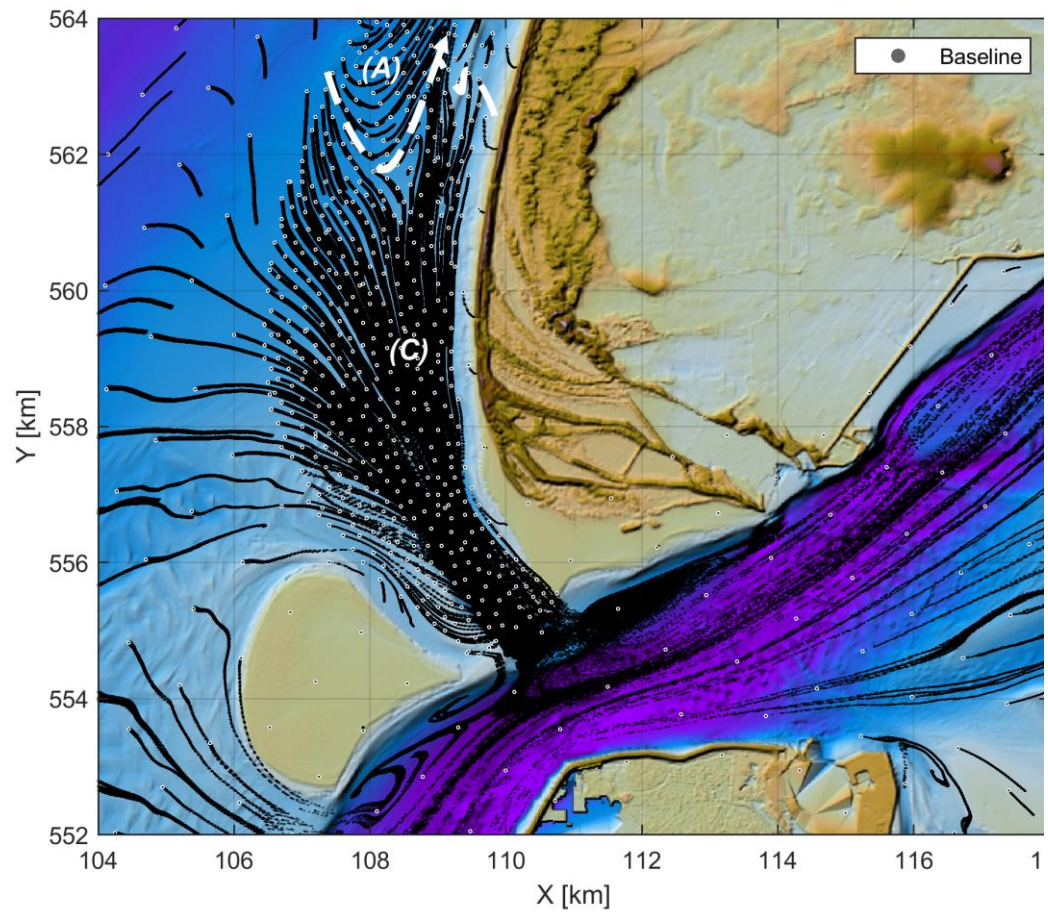
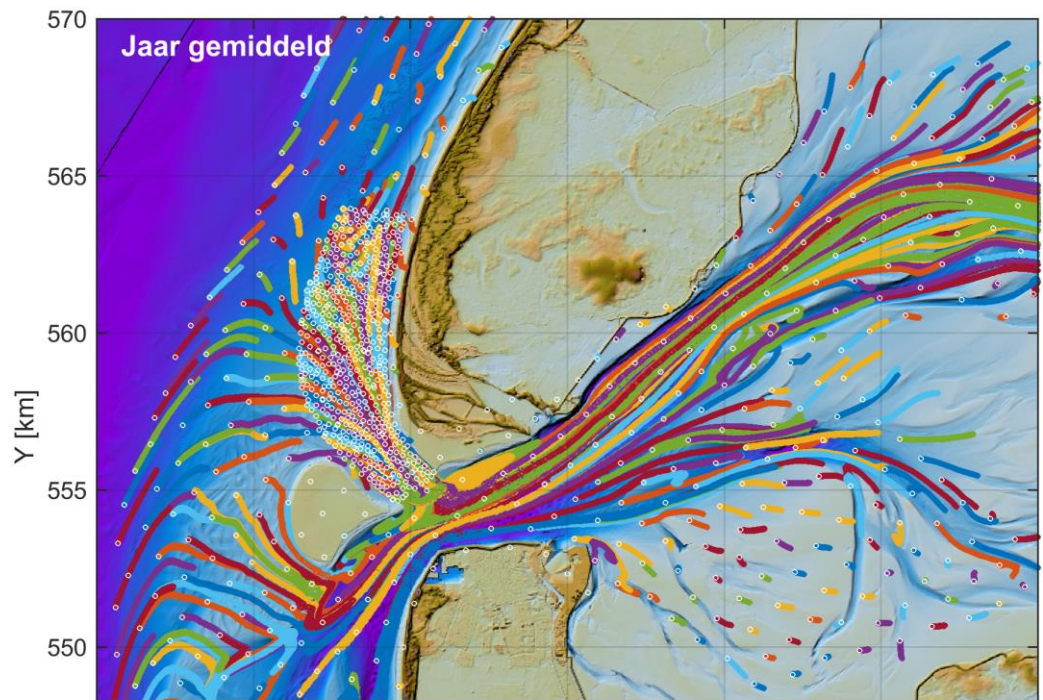
In Figuur 6-11 en Figuur 6-12 zijn de transportpaden en connectiviteitsmatrix weergegeven voor de jaargemiddelde condities. De transportpaden voor de jaargemiddelde condities komen in de basis overeen met de transportpaden door alleen het getij. In de geulen zijn met name de transporten groter, maar richtingen in de geulen blijven over het algemeen gehandhaafd. De connectiviteitsmatrix (Figuur 6-12) vertoont een soortgelijke clustering als die voor de getijsimulatie (Figuur 6-10). De verbindingen in het bekken (cluster 1) vertoont een soortgelijke samenhang als voor de getijsimulatie met een uitwisseling tussen het bekken, Marsdiep en het zuidelijke deel van de buitendelta. Op buitendelta doet zich een grote verandering op in de uitwisseling tussen cluster 2 en 3. Door toevoeging van golven is het transport over de buitendelta veel sterker landwaarts gericht. Aan weerszijden van de Noorderhaaks ontstaan nu belangrijke transportpaden. In de connectiviteitsmatrix ontstaan nu ook veel verbindingen met het Molengat.

Transporten op de NUN en in het Molengat zijn door toevoeging van golven sterk zuidwaarts gericht (Figuur 6-11a). Dit gebied met zuidwaartse stroming strekt zich veel verder uit dan alleen voor getij. Een luwtezone zoals geobserveerd in de getijsimulatie komt nu niet voor. De transporten ten noorden van km 562 (raai 1200) buigen noordwaarts af. Deze afbuiging is het sterkst zeewaarts aan de hier aanwezige brekerbank. Tussen de brekerbank en de kust draaien de transporten ten noorden van km 563 (raai 1400). Deze transportpaden bevestigen de aanwezigheid van het divergentiepunt in brandingstransporten zoals gepresenteerd in Cleveringa (2001). Wel lijkt dit divergentiepunt verder noordwaarts te liggen. Deze verplaatsing zou gerelateerd kunnen zijn aan de verdere noordelijke uitbouw van de NUN.

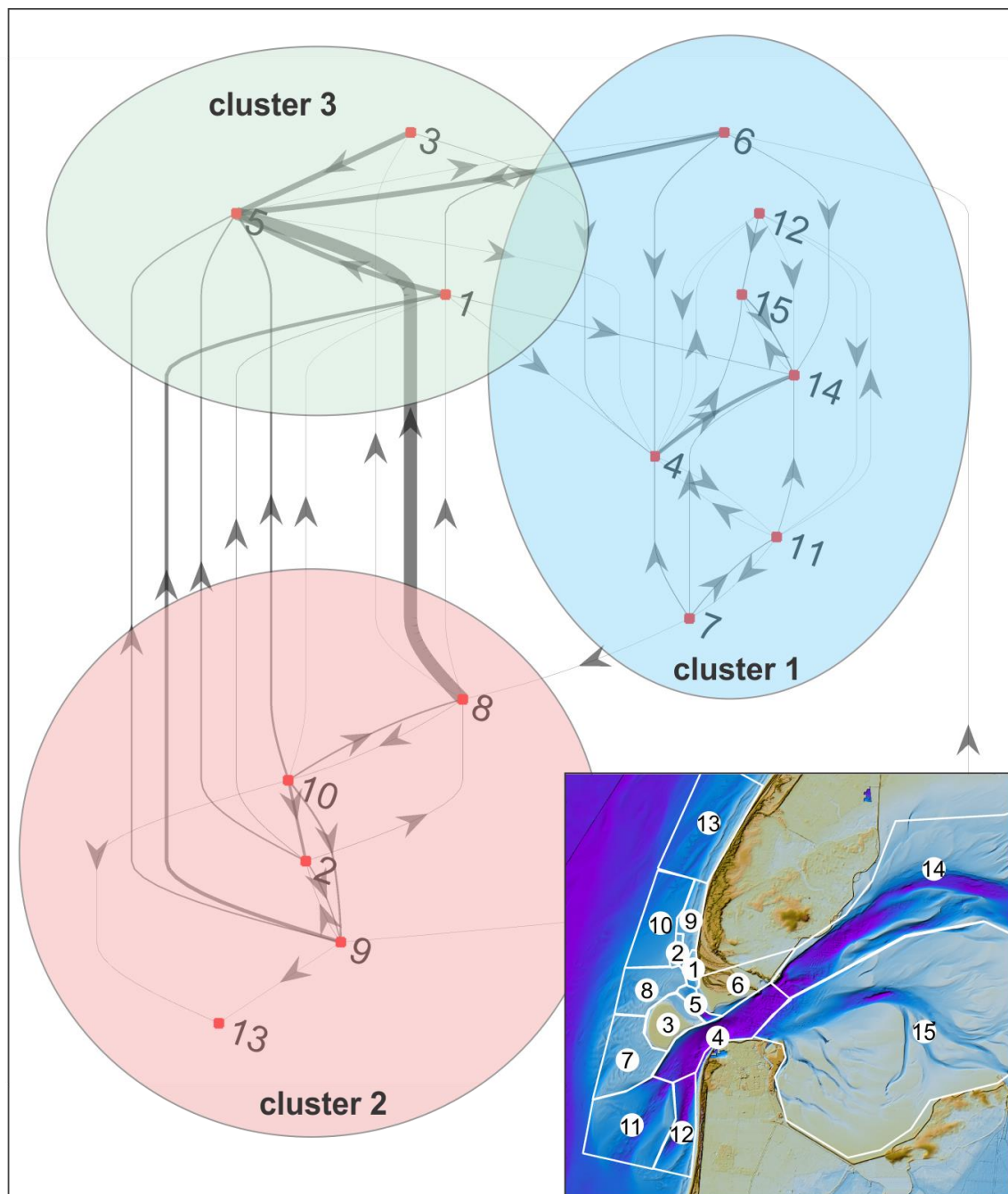
De sterke verbinding tussen De Hors [6] en het Marsdiep [4] laat zien dat een dominant transportpad zich langs de kust bevindt. Ook langs de rand van de Noorderhaaks is er een groot transport [3].



Figuur 6-10: Een overzicht van de samenhang van de verschillende morfologische delen van het zeegat op basis van een connectiviteit analyse. Boven: een samenvatting van de dominante verbindingen weergegeven op de 2019 bodemkaart en onder alle verbindingen weergegeven als cluster plot. De dikte van de lijnen is een maat voor de sterkte/grootte van de uitwisseling.



Figuur 6-11: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de T0 situatie voor de jaarlijks gemiddelde condities voor het gehele zeegat (boven) en voor Texel Zuidwest in detail (onder).



Figuur 6-12: Een overzicht van de samenhang van de verschillende morfologische delen van het zeegat op basis van een connectiviteit analyse op de jaarlijks gemiddelde transporten.

6.5 Modelresultaten voor de suppletievarianten (T1)

6.5.1 Effect van de suppletievarianten op de getijgedreven transporten

De suppletievarianten kunnen golf gedreven transporten, de getij gedreven transporten of waarschijnlijk een combinatie van beide beïnvloeden. In simulaties met getij + golven is het lastig de invloed van getij te isoleren. Het is echter belangrijk om een mogelijke beïnvloeding van het getij te onderkennen. Beïnvloeding van de golven is lokaal belangrijk, maar heeft waarschijnlijk op de schaal van de buitendelta minder effect. Een verandering in het getij kan juist grootschalige veranderingen initiëren.

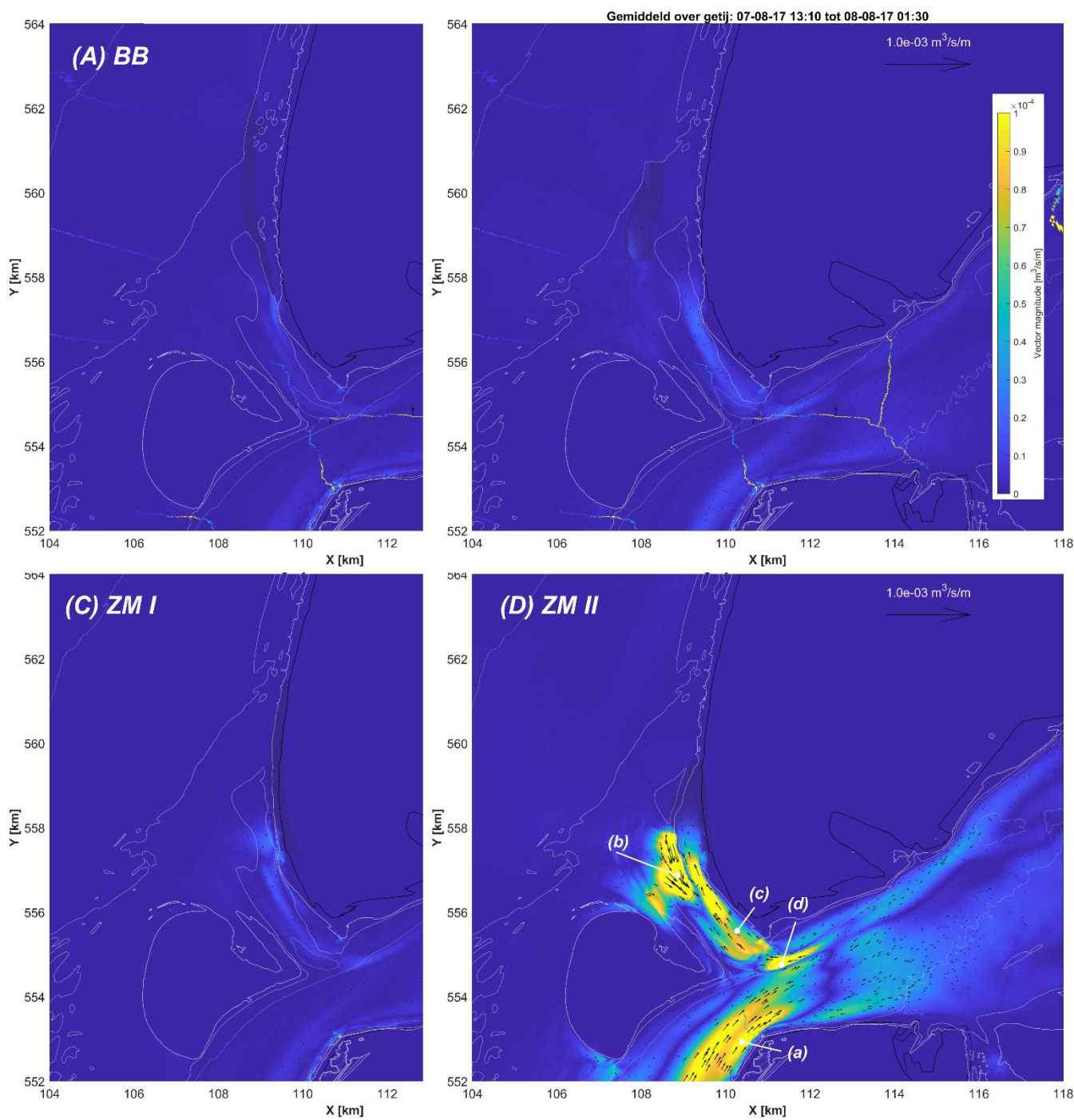
In Figuur 6-13 worden de verschillen in getijgedreven transporten tussen T0 en de verschillende suppletievarianten getoond. Eigenlijk bevestigt deze figuur het beeld dat ook al vanuit de T0 analyse ontstaat. Alleen de Zandmotor II variant is in de directe invloedssfeer van het zeegat aangelegd. Dit introduceert een duidelijke beïnvloeding op zowel de lokale als op schaal van het zeegat. Daarom wordt in deze sectie specifiek ingezoomd gefocust op de ZMII-suppletie. De overige varianten geven slechts kleine veranderingen in de transporten. Er zijn 4 gebieden, aangegeven met a tot d in Figuur 6-13D, te onderscheiden waarbij transporten worden beïnvloed door de Zandmotor II suppletie:

(a) *Transporten in Marsdiep.* Ter plaatse van de Helsdeur zien we een kleine toename van de vloed dominante transporten onder invloed van de Zandmotor II suppletie. Het is niet geheel duidelijk waar deze toename vandaan komt. Mogelijk is dit een respons op het afsluiten van het Molengat. Doordat de stroming hier wordt belemmerd zou er een iets grotere stroming langs de zuidzijde van de Noorderhaaks kunnen ontstaan. Dit zou dan resulteren in iets veranderde transporten in Marsdiep. Gezien de zeer grote getijtransporten die al in het Marsdiep aanwezig zijn, lijkt de toename niet zodanig dat deze een invloed op de processen zal uitoefenen. De natuurlijke processen en dynamiek zijn waarschijnlijk veel groter dan deze gemodelleerde respons.

(b) *Tip van de Zandmotor.* Aan de voorzijde van de Zandmotor II suppletie vindt een grote toename van de transporten plaats. De vloedstroming die normaal door het Molengat propageert wordt om de suppletie heen geleid. De suppletie zorgt voor een contractie van de stroomlijnen, waardoor de stromingen hier flink toenemen. Op het ondiepe ebschild zal er terug een ontgrondingskuil worden gevormd. De stromingen initiëren vooral een zuidwaarts transport. Dit komt door de asymmetrie in het stroomveld tussen de eb- en vloedstroming (Appendix C, Figuur C-15). Tijdens vloed treden er in het Molengat aanzienlijke grotere stromingen en transporten op vergeleken met ebcondities.

(c) *Zuidzijde van het Molengat.* De Zandmotor II suppletie sluit het Molengat af en de vloedstromingen worden om de suppletie heen geleid. Aan de zuidzijde van de suppletie, langs de kust, vindt dan een aanzienlijke reductie van de stromingen en transport plaats. In de verschil vector zien we dit terug in een noordwaartse vector. Door afsluiting van het Molengat zal erosie langs de Hors afnemen, maar erosie van de voorliggende NUN iets toenemen.

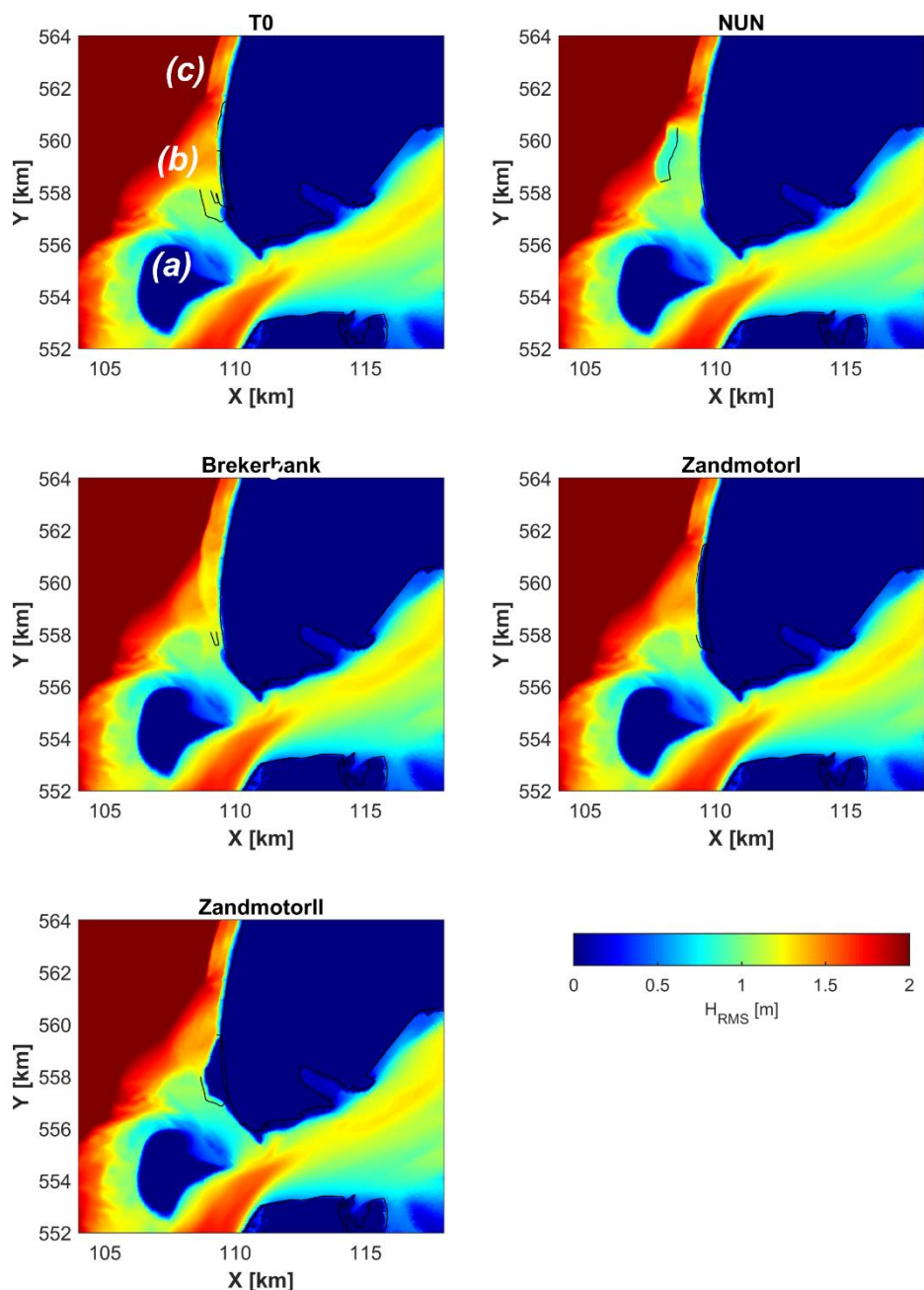
(d) *Overgang Molengat – Marsdiep.* Een vierde gebied met een grotere beïnvloeding is de overgang van Molengat naar Marsdiep. Ook hier treedt een afname van de transporten op. In de T0 bodem vindt een residueel transport van het Molengat naar het Marsdiep plaats. In het Marsdiep is dit transport dan Noordwestelijk gericht. Door de suppletie nemen deze transporten af en ontstaat er een verschil ter plaatse van gebied d.



Figuur 6-13: Verschil in residuele getijgedreven sedimenttransporten ten opzichte van de T0 voor suppletievariant (A) BB, (B) NUN, (C) ZM1 en (D) ZM2.

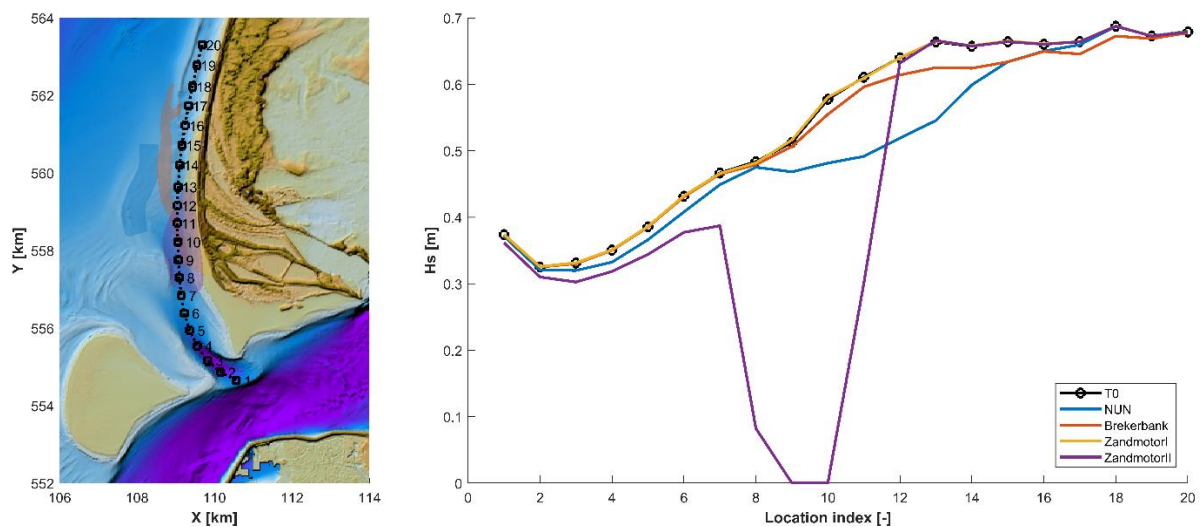
6.5.2 Effect van de suppletievarianten op de golven

Een belangrijke conclusie die op basis van Figuur 6-3 kan worden getrokken is dat de suppletievarianten in het overgangsgebied van de buitendelta richting de kust zijn gelegd. De suppletievarianten hebben geen directe invloed op de dominante zones van golfbreking op de buitendelta. Alleen de ZMII variant ligt eigenlijk nog het meest in de beschutting van de NUN. De suppleties NUN, BB en ZMI liggen iets verder buiten de invloedssfeer van de buitendelta. Wel zijn de golven hier lager dan langs de ongestoorde kust vanwege golfbreking op de NUN en aangrenzende ondiepere vooroever.



Figuur 6-14: Een overzicht van de getijgemiddelde golfhoogte voor golfconditie 16 ($H_{sig} = 3.64$ m) en met een richting van 246° (voor de T0 en de 4 suppletievarianten).

Het is op zich niet verrassend dat de beïnvloeding van de golven door de suppletie sterk bepaald wordt door de vorm en positie van de suppletie. In Figuur 6-14 wordt dit geïllustreerd voor hoge golven uit het West-Zuidwesten (golfconditie 16). In de T0 situatie vindt er een grote reductie van golfenergie plaats op de buitendelta (Figuur 6-14 (a)). Hier verandert de golfhoogte van meer dan 2m (rode kleur) naar gemiddeld 1m (groene/gele kleur). Op de Noorderhaaks breken de golven volledig. Door aanleg van de NUN strekt het gebied van afscherming zich zichtbaar verder noordelijk uit (Figuur 6-14). De NUN suppletie zorgt er dus voor dat eigenlijk de gehele kustlijn van Zuidwest Texel wordt afgeschermd tegen golfaanval onder deze condities. Het valt op dat de overige suppletievarianten eigenlijk veel minder golf afschermende werking hebben. Zelfs de BB variant geeft slechts een geringe reductie onder deze stormcondities. De suppleties ZM I en ZM II geven alleen een lokaal effect. Ter plaatse van de suppletie zal de brandingszone wel lokaal opschuiven, maar op deze schaal geplot, zijn geen waarneembare effecten te onderscheiden. Op zich is dat wel verrassend voor de ZM II variant. Deze suppletie strekt zich ver zeewaarts uit en zou in theorie een luwte zone kunnen genereren. Deze suppletie ligt echter al in het schaduwgebied van de Noorderhaaks, waardoor grote golven al gebroken zijn op de Noorderhaaks voordat ze de achterliggende ZMII-suppletie bereiken.

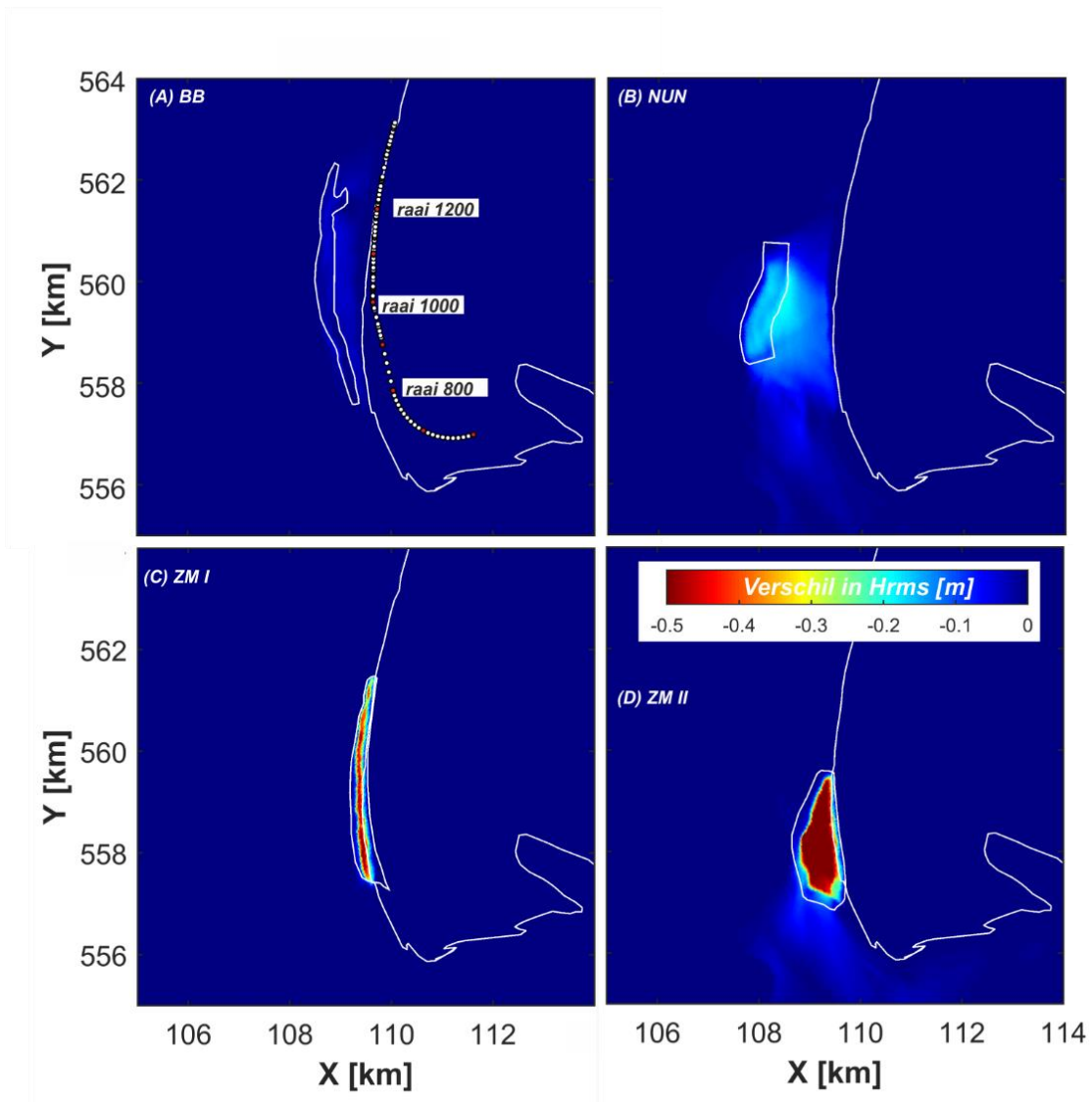


Figuur 6-15: Beïnvloeding van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte door de verschillende suppletievarianten.

Het is evident dat door aanleg van een NUN of BB suppletie er golfbreking ter plaatse van deze suppletie zal plaatsvinden als de golven hoog genoeg zijn (Figuur 6-14). Deze condities komen echter minder vaak voor dan de kalme condities. Een beeld van de invloed van de gemiddelde invloed van de suppletie over alle golfcondities is verkregen door de jaarlijks gemiddelde golfhoogte te bepalen en deze te vergelijken tussen de T0-situatie en de T1-situatie (Figuur 6-15 en Figuur 6-16). Deze jaarlijks gemiddelde golfhoogte is bepaald door de resultaten van de gemiddelde golfhoogte per golfconditie gewogen, met de kans van voorkomen, bij elkaar op te tellen. Deze jaarlijks gemiddelde golfhoogte is vervolgens in Figuur 6-15 uitgezet voor een kustlangse raai. Deze raai volgt de geuligging van het Molengat en strekt zich dan tussen de brekerbank en de kust in noordelijke richting uit. De gemiddelde golfhoogte langs de raai is dan weergegeven als functie van de locatie. Een ruimtelijk beeld van de beïnvloeding van de suppleties is gegeven in Figuur 6-16, waar het verschil in golfhoogte is weergegeven voor de 4 varianten ten opzichte van de T0 situatie. Een overzicht van de golf beïnvloeding per golfconditie wordt in Appendix C.1.2 getoond.

Op basis van deze 2 figuren kan worden geconcludeerd dat de golfafscherming door de BB variant beperkt is. Deze variant laat bij hoge golven wel een effect zien (zie Figuur 6-14), maar deze condities komen eerder beperkt voor. Jaarlijks gemiddeld geeft dit dan over de gehele suppletie slechts een zeer beperkte reductie (< 5%) van de golfhoogte langs de kustlijn. Deze reductie is het grootst tussen raai 1000 en 1200.

De NUN suppletie geeft een aanzienlijk grotere reductie van de golfhoogte vergeleken met de BB suppletie. Tussen raai 800 en raai 1200 is deze afname het grootst met een gemiddelde waarde tussen de 10 en 20%. Ten zuiden van raai 800 vindt een kleine afname plaats. Hier was de golfafscherming door de Noorderhaaks al groot. Feitelijk zorgt de NUN suppletie ervoor dat de golfafschermende werking van de buitendelta in noordelijke richting wordt verlengt. In dit opzicht is deze suppletie dus effectief. Het effect van de aanleg van de ZM1 en ZM2 varianten was niet duidelijk zichtbaar in Figuur 6-14, maar is wel duidelijk zichtbaar in Figuur 6-16. Omdat deze suppleties hoog in het profiel zijn aangelegd reduceert hier de lokale golfenergie tot vrijwel 0. De ZM II suppletie steekt relatief ver zeewaarts uit. Hierdoor zou deze suppletie een golfafschermende werking voor de kustlijn ten zuiden ervan kunnen hebben. Deze golfafscherming is echter vrijwel niet zichtbaar in Figuur 6-16d.



Figuur 6-16: Beïnvloeding van het jaarlijks-gemiddelde golfklimaat door de verschillende suppletievarianten door het verschil tussen $T1 - T0$ golfhoogte weer te geven.

De Noorderhaaks en de voorliggende ondiepten van de NUN schermen de ZM II suppletie al efficiënt af van de golven. Hierdoor zijn de golven al grotendeels gedissipeerd voordat ze de ZM II suppletie bereiken. Het golf afscherpende effect van de ZM II suppletie is dan verder ook beperkt.

6.5.3 Effect van de suppletievarianten op de jaarlijks-gemiddelde stromingen

Eén van de geïdentificeerde risico's is de mogelijke beïnvloeding van de stroming door aanleg van de suppleties. Er is hiervoor gekozen om de eb- en vloedstromingen apart te beschouwen. De invloed op het totale signaal (de reststromingen) zijn van belang voor het sedimenttransport. Voor scheepvaart of recreatie zijn de residuele stromingen minder van belang. Hier zijn de instantane stroombeelden veel belangrijker. Deze zijn samengevat in de vorm van de maximale stroming die tijdens eb- en de vloed plaatsvindt (Figuur 6-17 en Figuur 6-18). Deze stromingen zijn uitgezet voor geselecteerde raaien voor de T0 en de verschillende suppletievarianten. Aanvullende stromingsfiguren zijn weergegeven in Appendix D.3 tot D.6.

In Figuur 6-17 wordt de beïnvloeding tijdens maximale eb stroming weergegeven en Figuur 6-18 de beïnvloeding tijdens maximale vloedstroming. Op basis van deze figuren kan worden geconcludeerd dat:

Brekerbank (figuur linksboven in Fig. 6-17 & 6-18)

De verschillen in maximale stromingen tijdens eb zijn minimaal door aanleg van de BB suppletie. Alleen lokaal in raai 1013 vindt zeewaarts van de suppletie een kleine rotatie van de stroming plaats. De grootte van de snelheid blijft nagenoeg gelijk. Ook tijdens de maximale eb blijven de verschillen beperkt. Alleen in het Molengat, raai 900 neemt de snelheid een fractie af. Op basis van deze stroombeelden kan worden geconcludeerd dat deze suppletie geen effect heeft op de stromingen in het Molengat.

NUN (figuur rechtsboven in Fig. 6-17 & 6-18)

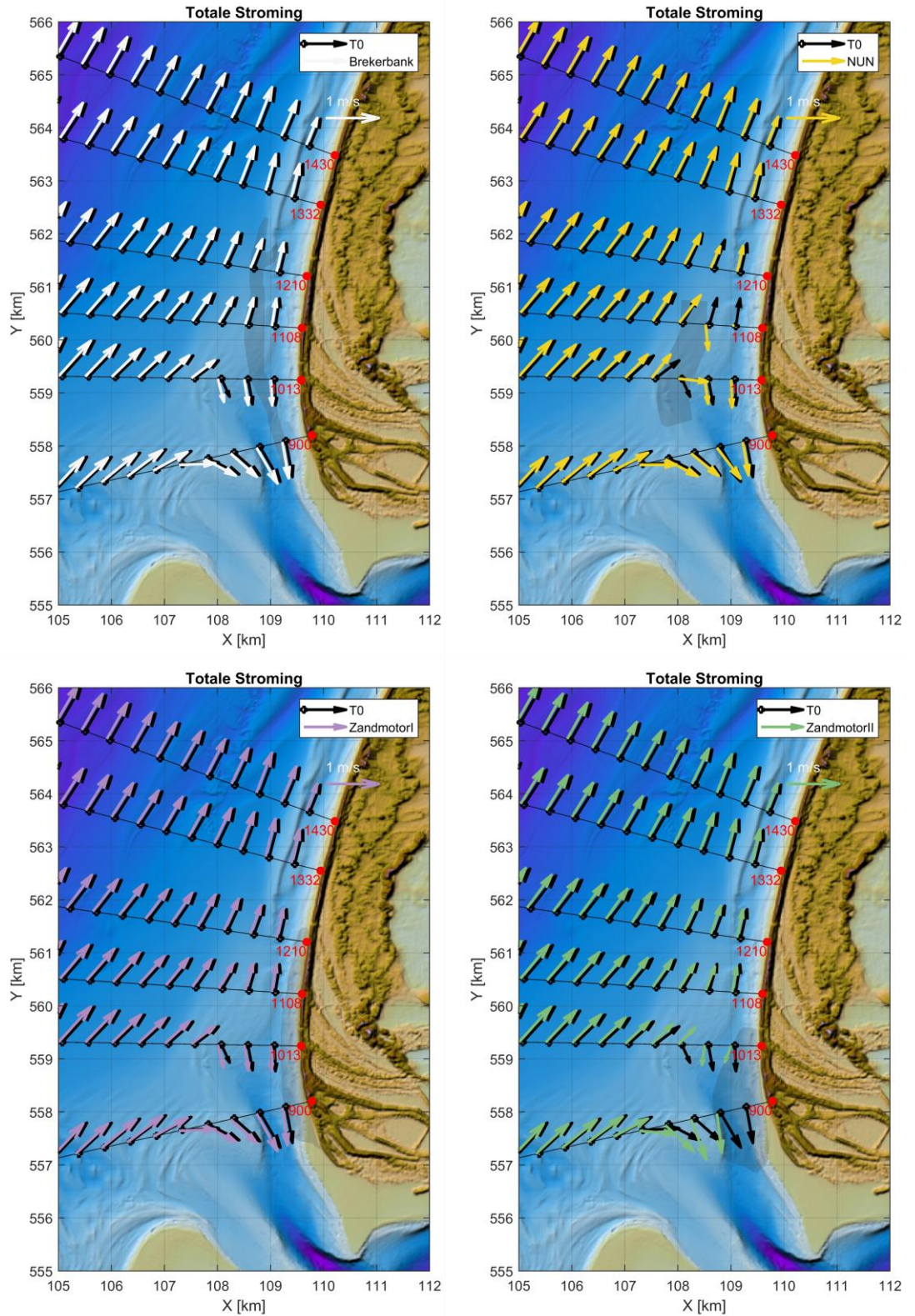
De NUN suppletie vertoont een grotere beïnvloeding van de stroming in vergelijking met de BB suppletie. Deze beïnvloeding vindt echter vooral plaats op de suppletielocatie zelf. Tijdens maximale vloed zijn de vectoren net iets anders geroteerd t.o.v. de T0 waardoor verschillen in richting ontstaan. Op de suppletie zijn de snelheden dan ook iets hoger. In het achterliggende Molengat zijn de verschillen dan weer beperkt. Tijdens maximale eb zijn onder invloed van de suppletie enkele stromingsvectoren iets anders geroteerd. De verschillen zijn echter kleiner dan tijdens vloed. Ook voor deze suppletie geldt dat de stromingen in het Molengat niet wezenlijk beïnvloed worden door aanleg van de suppletie.

Zandmotor I (figuur linksonder in 6-17 & 6-18)

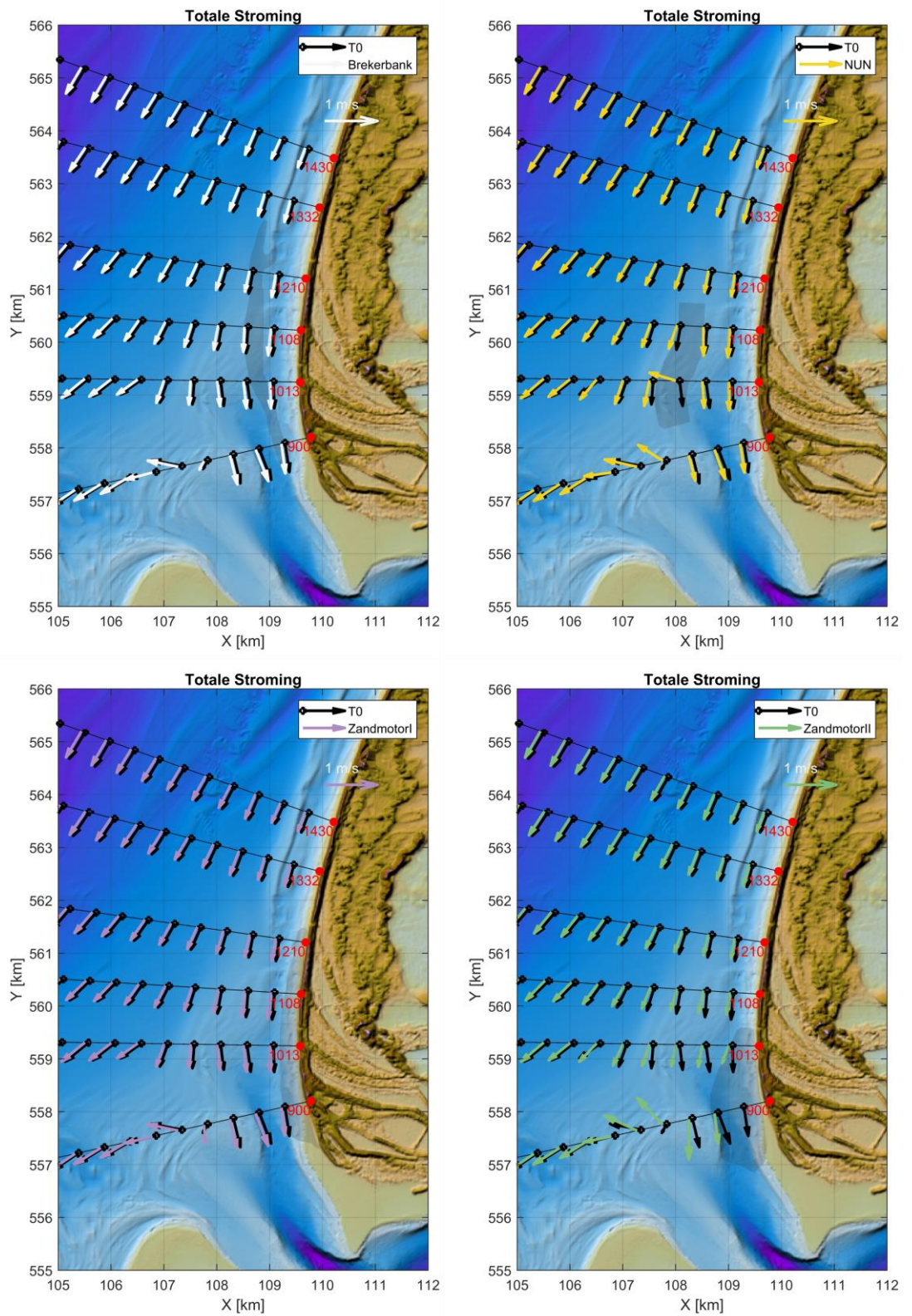
De stroombeelden met en zonder ZMI suppletie zijn vrijwel identiek. Deze suppletie heeft geen aantoonbaar effect op de stromingen in het Molengat.

Zandmotor II (figuur rechtsonder in Fig. 6-17 & 6-18)

De ZMII suppletie sluit het Molengat tussen raai 800 en raai 1000 vrijwel volledig af. Deze suppletie heeft daardoor ook grootste verschillen in de stroomvelden. Tijdens vloed zijn de verschillen zichtbaar ten zuiden van raai 1108. Door aanleg van de suppletie verandert de dominantie van eb naar vloed in deze raai. Ten Noorden van raai 1108 zijn de verschillen dan uitgedempt. Doordat de stromingen om de suppletie heen worden geleid verandert de richting van de vectoren in raai 1013 en raai 900. In raai 900 zijn de stromingen dan ook sterker dan in de T0 situatie. Tijdens eb zijn de verschillen kleiner. De stromingen nemen in raai 1108 en 1013 iets af en de vectoren zijn zeewaarts gedraaid. In raai 900 zijn de stromingen iets toegenomen. Op basis van deze stroombeelden kan worden geconcludeerd dat de ZMII suppletie de stroomsnelheden in het Molengat en in de ebschaar en -schild beïnvloedt. Deze invloed is merkbaar ten zuiden van raai 1210. De stromingen ten noorden van raai 1210 worden niet beïnvloedt.



Figuur 6-17: Een overzicht van het verschil in de maximale ebstrooming voor de T0 (zwarte vector) en de verschillende suppletievarianten (gekleurde vectoren). Onderliggende bodem is van de T0 de suppletievariant is als zwarte arcering aangegeven.



Figuur 6-18: Een overzicht van het verschil in de maximale vloedstrooming voor de T0 en de verschillende supplementvarianten (gekleurde vectoren). Onderliggende bodem is van de T0 de supplementvariant is als zwarte arcering aangegeven.

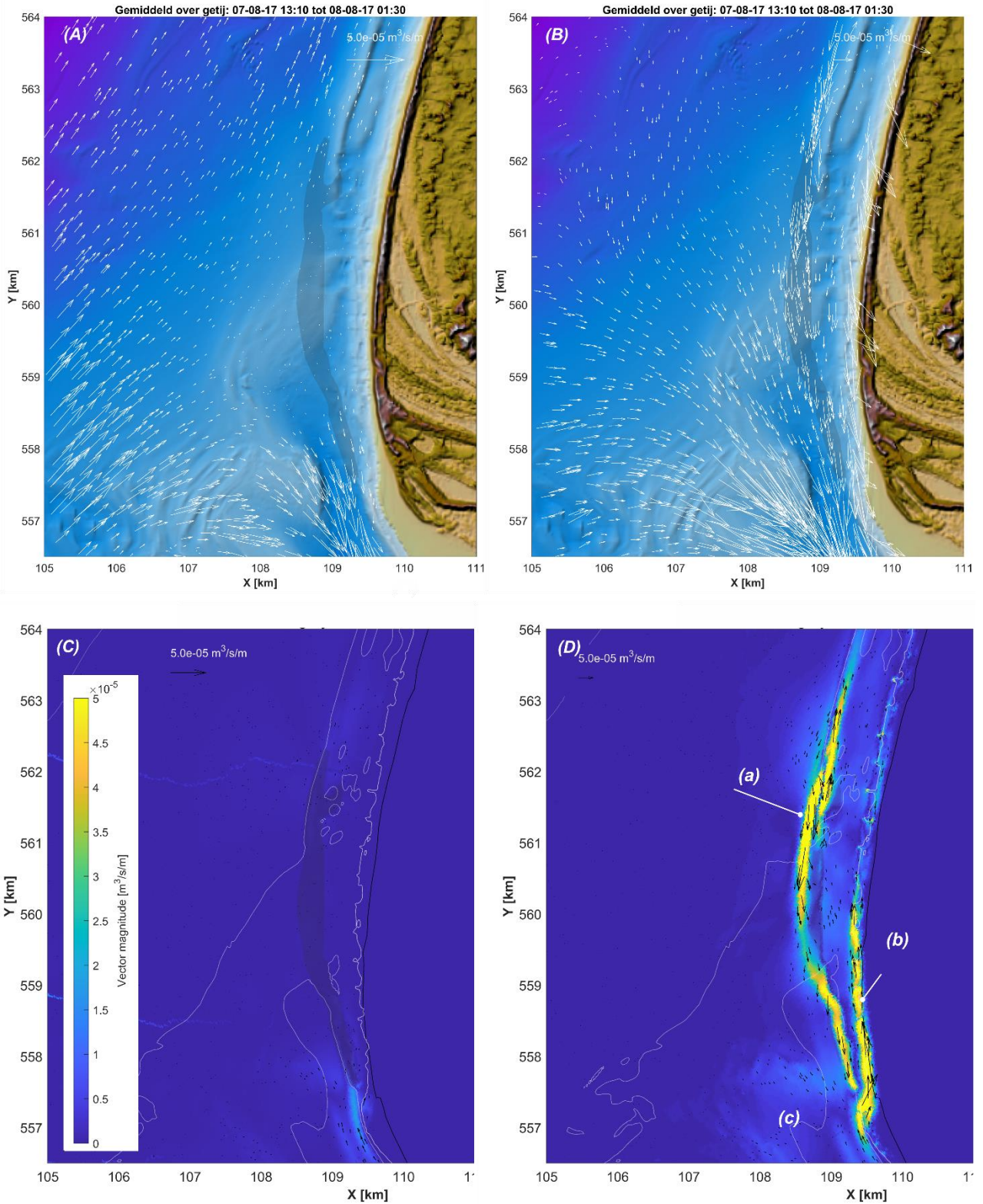
6.5.4 Sediment transporten in detail; Texel – Brekerbank (BB)

De invloed van de BB variant op de sedimenttransporten wordt getoond in Figuur 6-19. De invloed van de suppletie op de getijgedreven transporten is zeer beperkt. Het transportpatroon met suppletie (Figuur 6-19A) is vrijwel gelijk aan de T0 resultaten (Figuur 6-8, links). Ter plaatse van de suppletie is geen directe invloed te onderscheiden (Figuur 6-19C). Deze beperkte invloed wordt met name veroorzaakt doordat de getijstrooming hier door het Noordzeegetij wordt gedomineerd. Het Noordzee getij wordt niet beïnvloed door de suppletie. Net ten zuiden van de suppletie, in het Molengat, zijn hele kleine effecten van de suppletie te onderscheiden. De suppletie vormt een drempel tussen het NUN en de kust. Tijdens vloed geeft dit dan een reductie van de zuidgaande stromingen aan de zuidzijde van deze drempel. Hierdoor nemen de residuele transporten in zuidelijke richting iets af. Deze afname van de transporten is echter zeer klein, het is dan ook zeer de vraag of deze reductie een meetbaar effect op de zandhuishouding heeft.

Door toevoeging van golven worden de sediment transporten en de residuele transporten zowel in de T0 (Figuur 6-8, rechts) en in de BB variant groter. De transportpatronen blijven hierbij vrijwel identiek en op grote schaal tonen de T0 en de BB variant dan ook een overeenkomstig beeld (Figuur 6-13B). De residuele transporten zijn noordwaarts gericht op de vooroever, draaien landwaarts over de ondiepe NUN en zijn richting het zeegat gericht in het Molengat. De suppletie ligt in een gebied waar de residuele transporten klein zijn t.o.v. de transporten in de geulen. Beïnvloeding van de transporten door de suppletie is dan ook niet rechtstreeks waarneembaar.

De verschillen kunnen wel inzichtelijk gemaakt worden door de verschillen in vector en magnitude weer te geven (Figuur 6-19D). Let hierbij op dat de schaalvector voor de verschillende deelfiguren anders is. Op basis van de residuele vectoren kan geconcludeerd worden dat er een lokale beïnvloeding van de sedimenttransporten door aanbrengen van de suppletie optreedt. De grootste verschillen treden op ter plaatse van de suppletie (aangegeven met (a) in Figuur 6-19D). Tijdens stormen breken de golven op de suppletie. Deze golfbreking genereert een zuidelijk gericht transport over de suppletie. In het achterliggende kustvlak nemen dan de golfenergie en ook de residuele sediment transporten iets af: er treedt een kleiner transport op in zuidelijke richting. Het grootste verschil treedt op ten zuiden van km 560 (gebied (b) in Figuur 6-19), omdat de suppletie hier dichterbij de kust ligt en de directe afscherming groter wordt. Hier nemen de kustlangse golfgedreven transporten af (wat ervoor zorgt dat de pijl omkeert).

Op basis van de modelresultaten kan geconcludeerd worden dat de suppletie het achterliggende strand (iets) beschermt tegen golfaanval. Door de diepte van de suppletie treedt dit alleen op tijdens stormen. Op de jaarlijks gemiddelde transporten is het effect dan ook beperkt. De grootste effecten treden lokaal op, direct op of achter de suppletie (a en c). Op de grotere schaal (c) zijn slechts zeer kleine effecten waar te nemen. De beperkte invloed van deze variant wordt mede veroorzaakt doordat de suppletie vrij diep is aangelegd met een kruinhoogte op -4m. Hierdoor breken alleen de hoge golven op de suppletie.

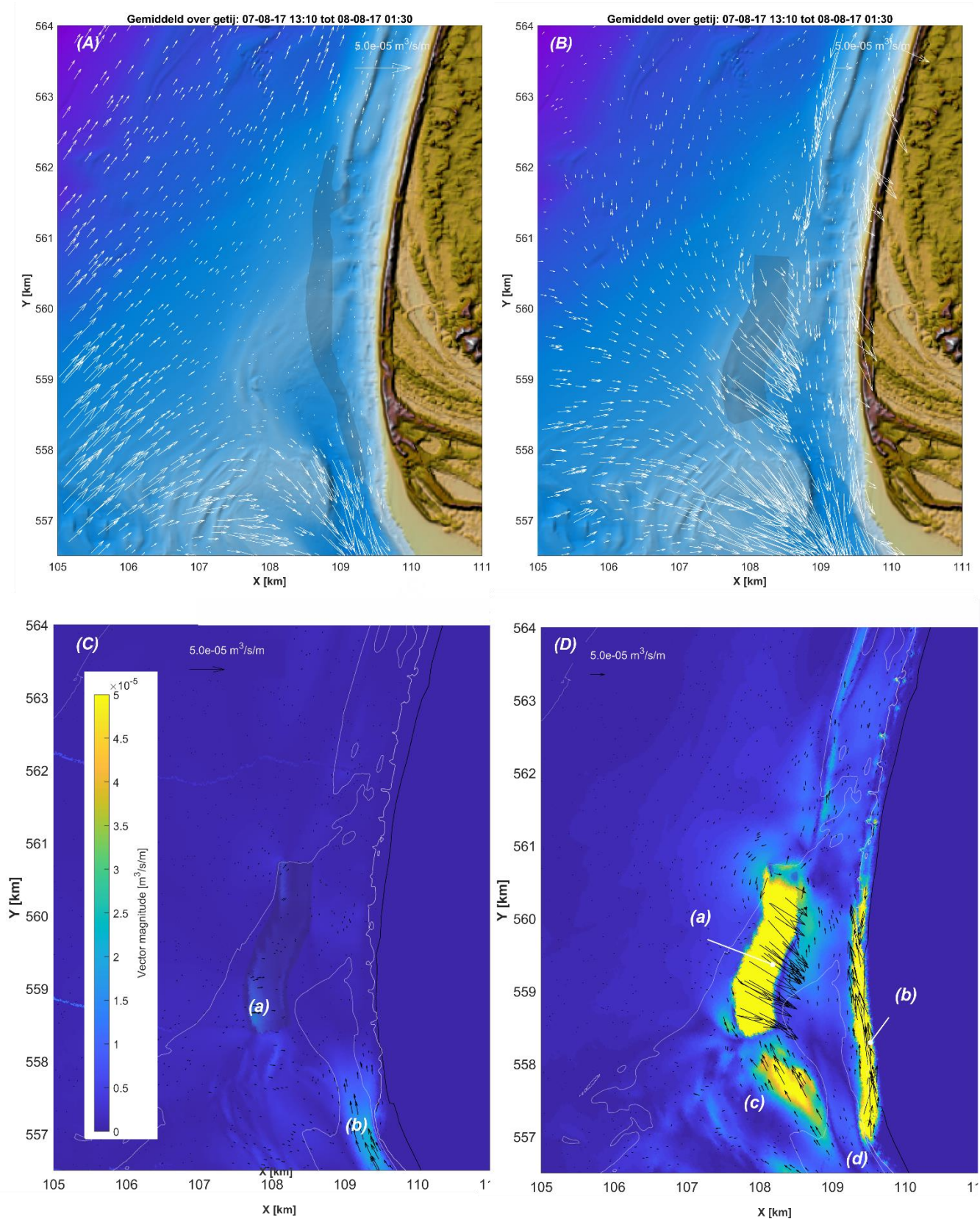


Figuur 6-19: Berekende residuele transporten voor de BB suppletievariant ten gevolge van getij (A) en voor de jaarlijks-gemiddelde condities (B). Verschil in transport ten gevolge van alleen het getij (T1-T0) (C) en het verschil in jaarlijks-gemiddeld transport door getij en golven (T1-T0) (D).

6.5.5 Sediment transporten in detail; Texel – Noordelijke Uitlopers Noorderhaaks (NUN)

De invloed van de NUN variant op de sedimenttransporten wordt getoond in Figuur 6-20. De invloed van de suppletie op de getijgedreven transporten is beperkt. Het transportpatroon met suppletie (Figuur 6-20A) is vrijwel gelijk aan de T0 resultaten (Figuur 6-20, links). Lokaal op de suppletie nemen de transporten iets toe. Deze toename is waarschijnlijk gerelateerd aan de afgenomen diepte. Bij een gelijkwaardig getij geeft een afname van de diepte een toename van de stroomsnelheid. Hierdoor worden de landwaartse residuele transporten op de suppletie iets hoger. Deze toename is echter zeer beperkt en alleen zichtbaar door de verschilvector op een ander schaal te plotten (Figuur 6-20C (a)). De suppletie zorgt er ook voor dat de vloeddominante stroming richting het Molengat iets wordt onderdrukt. De noordelijk gerichte verschilvector in het Molengat (Figuur 6-20C (b)) geeft aan dat de transporten richting het Marsdiep dan ook afnemen. Ook hier geldt dat deze afname zeer klein is en alleen zichtbaar wordt door de verschilvector op een andere schaal weer te geven.

De sedimenttransport verschillen ten gevolge van alleen getij blijken beperkt te zijn, maar de NUN suppletie vertoont wel een duidelijk beïnvloeding van de jaar gemiddelde transporten (Figuur 6-20B en D). Het grootschalige transportbeeld verandert daarbij niet. De transporten aan de zeezijde van de suppletie blijven onveranderd. Ook op de buitendelta blijven de patronen gelijk, met een netto transport dat landwaarts gericht is op de NUN en richting het zeegat is gericht in het Molengat. Golfbreking op de suppletie zorgt ervoor dat er een zichtbare toename van de transporten op de suppletie optreedt. In het residuele transportplaatje resulteert dit in een landwaarts (zuidoost gericht) transport op de suppletie (a). Naast deze veranderingen treden ook andere transporten op langs de achterliggende kustlijn (b) en op de NUN net ten zuiden van de suppletie (c). Langs de kust (gebied b) treedt een reductie op van de transporten. In de T0 zijn hier de transporten zuidwaarts gericht. Door golfbreking op de suppletie wordt de achterliggende kust beschermt. De zuidwaarts gerichte transporten nemen hierbij af (waardoor de vector in (Figuur 6-20D in gebied (b) omkeert). Golfafscherming is waarschijnlijk ook de reden van de afgenomen transporten op het ondiepe deel van de NUN net ten zuiden van de suppletie (gebied c; ook hier keert de vector om in (Figuur 6-20D)). In de getijsimulatie is ook een beperkte afname van de zuidelijke gerichte transporten in het Molengat te observeren (gebied d). Deze afname in transport is echter veel kleiner dan het effect van de golven.

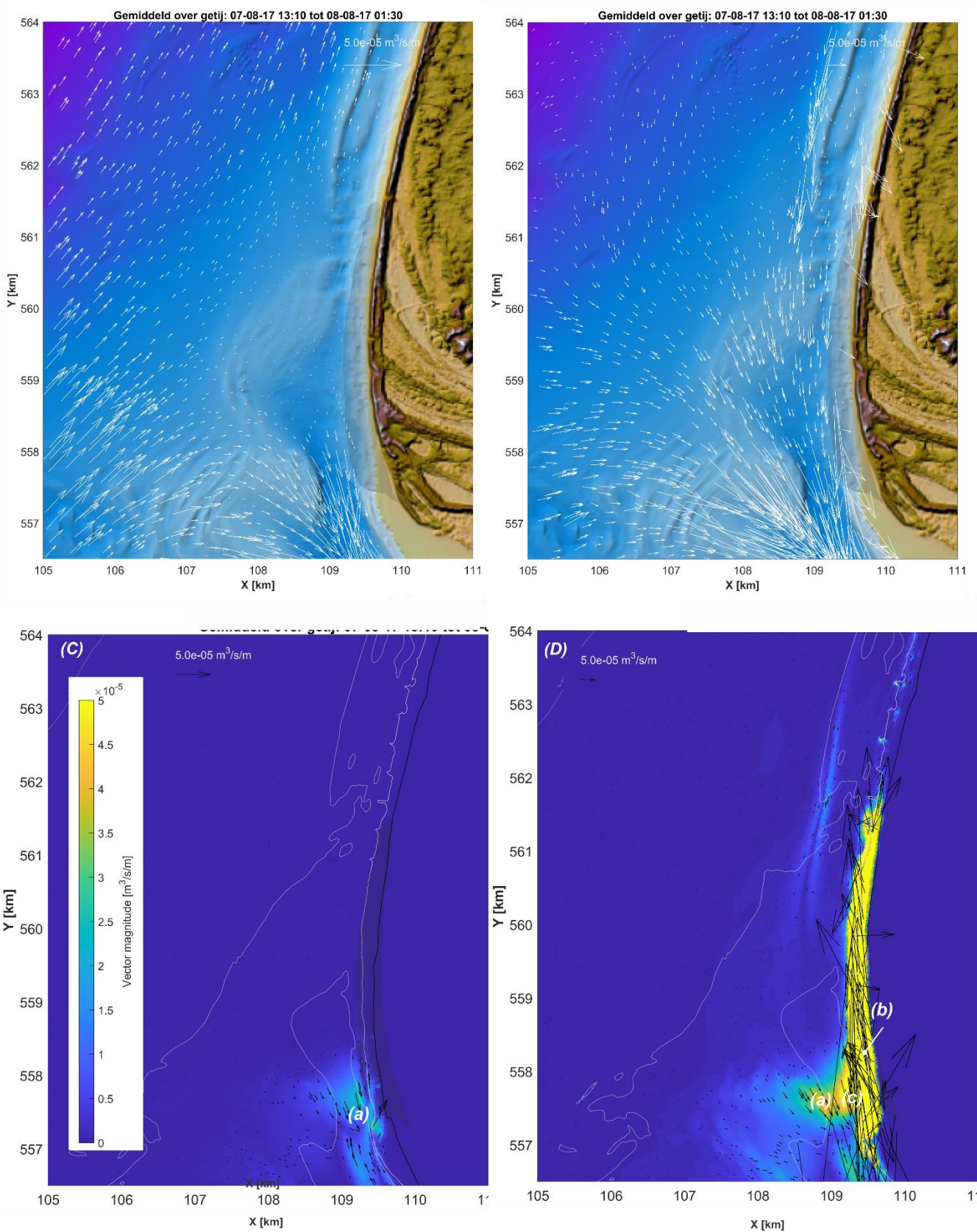


Figuur 6-20: Berekende residuele transporten voor de NUN variant ten gevolge van getij (A) en voor de jaarlijks-gemiddelde condities (B). Verschil in transport ten gevolge van alleen het getij T1-T0 (C) en het verschil in jaarlijks-gemiddeld transport door getij en golven T1-T0 (D).

6.5.6 Sedimenttransporten in detail; Texel – Zandmotor I

De invloed van de ZM I variant op de sedimenttransporten wordt getoond in Figuur 6-21. Ook de deze suppletievariant heeft een beperkt effect op de getijgedreven transporten (Figuur 6-21A en C). Op zich is dit logisch. De suppletie verplaatst de kustlijn wel iets zeewaarts, maar het getij kan hier gewoon omheen stromen. De suppletie zorgt niet voor een grote belemmering van de stroming of het dichtzetten van een geul. Alleen aan de zuidpunt van de suppletie (km.557.5) zijn kleine effecten waar te nemen (Figuur 6-21C (a)). In dit deel van het profiel vormt zich een wat nauwere geul tussen de kust en het voorliggende bankje. De (residuele) stromingen zijn hier al wat groter en door het verder verkleinen van het doorstroomprofiel worden de stromingen nog iets vergroot. Vergelijkbaar met de NUN suppletie zijn de effecten op de getijstroming veel kleiner dan de effecten van de suppletie op het golfveld en de golfgedreven transporten.

De golfgedreven transportverschillen (Figuur 6-21D) vertonen een groot verschil met de T0 variant. Dit verschil is logisch. De suppletie is aangelegd langs het strand. Ter plaatse van de suppletie vinden dan geen transporten meer plaats (b); de vector keert om in Figuur 6-21D. De surfzone verplaatst zeewaarts waardoor de transporten langs de rand dan weer toenemen (c). Beide effecten veroorzaken het grote gele vlak zichtbaar bij (a,b) in Figuur 6-21D. Ook op het voorliggende ebschild van de NUN (a) worden de residuele transporten vergroot. Dit effect was al bij de getijstroming zichtbaar. Door toevoeging van golven wordt het effect dan nog iets groter. Deze 2 effecten zijn vooral lokaal. Ten zuiden van de suppletie, in het Molengat, zijn de verschillen met de T0 nihil.



Figuur 6-21 Berekende residuele transporten voor de ZM I suppletievariant ten gevolge van getij (A) en voor de jaarlijks-gemiddelde condities (B). Verschil in transport ten gevolge van alleen het getij T1-T0 (C) en het verschil in jaarlijks-gemiddeld transport door getij en golven T1-T0 (D).

6.5.7 Sedimenttransporten in detail; Texel – Zandmotor II

De invloed van de ZM II variant op de sedimenttransporten wordt getoond in Figuur 6-22. De ZM II vertoont lokaal een zeer duidelijk effect op de getijgedreven transporten. De ZM II suppletie sluit het Molengat tussen het ebschild en de kust af. Hierdoor vallen deze stromingen hier weg (Figuur 6-22A). Door het afsluiten van de geul nemen de residuele transporten in het Molengat, zuidelijk van de suppletie af (gebied b in Figuur 6-22C). Een belangrijke conclusie is echter wel dat zowel voor als na suppletie het Molengat een vloedgedomineerde geul (transporten richting het zeegat) blijft. De transporten na suppletie zijn echter wel iets lager. Op het ebschild van de NUN nemen de transporten juist toe (gebied b in Figuur 6-22C). Deze toename kan worden gerelateerd aan de hogere stroomsnelheden die zullen optreden door contractie van stroming om de suppletie heen. Aan de noordzijde van de suppletie zijn de effecten beperkt. Dit komt door de zeer kleine getijgedreven transporten die hier plaatsvinden. Van de 4 suppletievarianten heeft de ZM II suppletie de grootste invloed op het zeegat systeem.

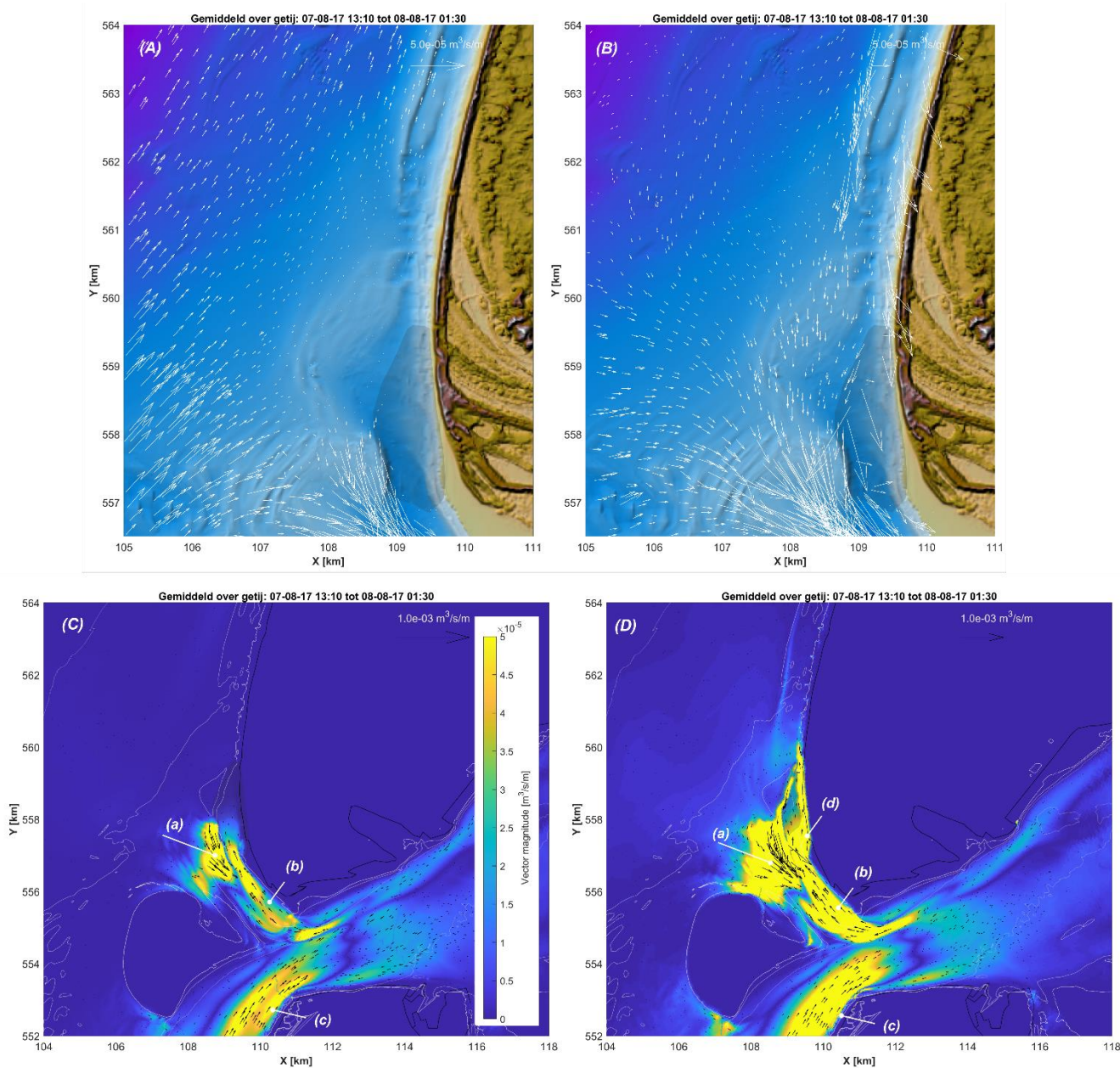
Ook bij deze suppletievariant worden de transporten aanzienlijk verhoogd door de toevoeging van golven (Figuur 6-22 B,D). Op de NUN worden de zuidelijk gerichte transporten aanzienlijk vergroot (a). Golfgegenerateerde transporten langs de rand van de suppletie voeden de getijstroming. Aangezien deze stroming vloedgedomineerd is nemen ook de residuele transporten sterk toe richting het Molengat (a).

De suppletie onderbreekt de stroming in het Molengat. Ten zuiden van de suppletie nemen de stromingen juist af. Hier veroorzaakt de suppletie een luwte gebied waardoor transporten richting het zeegat afnemen. De residuele transporten nemen hier dan ook af (b). Ook aan de noordzijde van de suppletie is zo'n afname van de transporten te onderscheiden alleen is deze veel kleiner (d).

De suppletie zal dus initieel veel zand verliezen aan de kop van de suppletie. Dit zal dan neergelegd worden in het Molengat. Een probleem hierbij is dat het Molengat relatief diep is, dit vormt dan een bezinkput van het sediment waardoor de transporten richting de kust beperkt zullen zijn. Aan de noordzijde van de suppletie zijn de verschillen in transporten eerder beperkt. Dit impliceert dat ook deze suppletie niet **direct** een significante bijdrage gaat leveren aan de kustlijnontwikkeling hier.

De Zandmotor II suppletie geeft de grootste veranderingen in residuele transporten ter plaatse van de suppletie, maar ook op de omliggende buitendelta worden veranderingen waargenomen. De instantane transporten vertonen vrijwel gelijke patronen en groottes. In dat opzicht heeft de suppletie geen groot effect. Wel is te zien dat de kleine veranderingen in stromingen en transporten wel degelijk een effect hebben op de residuele transporten op de schaal van het zeegat.

De invloed in het Marsdiep lijkt hier groot maar komt vooral door een kleine verandering in residuele transport vectoren. Door de aanleg van de suppletie worden de residuele transporten vanuit het Molengat richting het Marsdiep beïnvloedt. Tijdens eb wijzigt de aanvoer vanuit het Molengat het Marsdiep iets. Dit sediment wordt dan tijdens vloed weer in het Marsdiep resultaat. Het eindresultaat is dat er een signaal in de residueel zichtbaar wordt. De vraag hier is of deze verandering een wezenlijk aandeel van de transporten in het Marsdiep geeft. Hiervoor kan naar de instantane transport vectoren worden gekeken. Deze vertonen nauwelijks een verandering in de T0 en T1 situatie. Het is dan ook niet aannemelijk dat de geobserveerde verschillen in de residuele transporten ook in werkelijkheid waargenomen kunnen worden en morfologische veranderingen gaan initiëren die anders niet voorgekomen zouden zijn.



Figuur 6-22 Berekende residuele transporten voor de ZM-II suppletievariant ten gevolge van getij (A) en voor de jaarlijks-gemiddelde condities (B). Verschil in transport ten gevolge van alleen het getij T1-T0 (C) en het verschil in jaarlijks-gemiddeld transport door getij en golven T1-T0 (D).

6.5.8 Een samenvatting van de jaarlijks gemiddelde sedimenttransporten

Een samenvatting van de 4 suppletievarianten op de jaarlijks representatieve sedimenttransporten (dus inclusief getij en golven) wordt weergegeven in Figuur 6-23. De belangrijkste verschillen worden hier per suppletievariant kort doorgenomen.

Brekerbank

De invloed van de Brekerbank op de golven was beperkt. Er vindt geen duidelijk grotere golfbreking of golfenergie-dissipatie op de suppletie plaats. Toch worden de sedimenttransporten er wel iets door beïnvloed. Op de Brekerbank worden relatief kleine transporten gegenereerd die in de T0-simulatie niet aanwezig waren. De grootste verschillen treden op zeewaarts van raai 1200. Deze transporten lijken vooral langs de brekerbank, noordwaarts en zuidwaarts te worden verspreid. Een duidelijke landwaartse component is hier niet te onderscheiden. Naast een directe beïnvloeding op de suppletielocatie zien we ook een kleine verandering in de transporten langs de kust tussen raai 800 en 1100. Hier zorgt de Brekerbank voor een kleine reductie van de zandtransporten. De verschillen richting het zeegat zijn echter beperkt. Door de BB-suppletie zullen de processen in het zeegat dan ook niet rechtstreeks worden beïnvloed. Een reden voor de beperkte effecten van deze suppletie is de diepe ligging. De condities waarbij dan extra golfbreking optreedt zijn beperkt.

Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks

Ook bij de NUN suppletie zien we een gebied met directe en een gebied met indirecte beïnvloeding. Door de ondiepe aanleghoogte vindt hier veel extra golfbreking en dissipatie plaats en dit resulteert in grote residuele transporten. Deze transporten staan netto landwaarts en richting het Molengat. Naast een directe beïnvloeding op de suppletielocatie, zien we ook indirecte effecten op de achterliggende kustlijn. Tussen raai 800 en 900 vindt een reductie van deze transporten plaats. Ook zijn er kleinere effecten zichtbaar op het ebschild net ten zuiden van de suppletie locatie en langs de kustlijn van Texel ten noorden van de suppletie. De uitwisseling tussen Molengat en Marsdiep vertoont een kleine beïnvloeding.

De varianten BB en NUN geven eigenlijk een soortgelijke respons. In beide varianten zien we dat door aanleg van de suppletie de golfdissipatie op de locatie van de suppletie toeneemt. Het grote verschil tussen de 2 varianten is de aanleghoogte. Doordat de NUN veel hoger is aangelegd geeft dit veel meer golfafscherming en beïnvloedt deze het systeem meer dan de BB variant. Een hoog uitgevoerde BB variant zou in principe de achterliggende kustlijn gelijkwaardig aan de NUN beschermen.

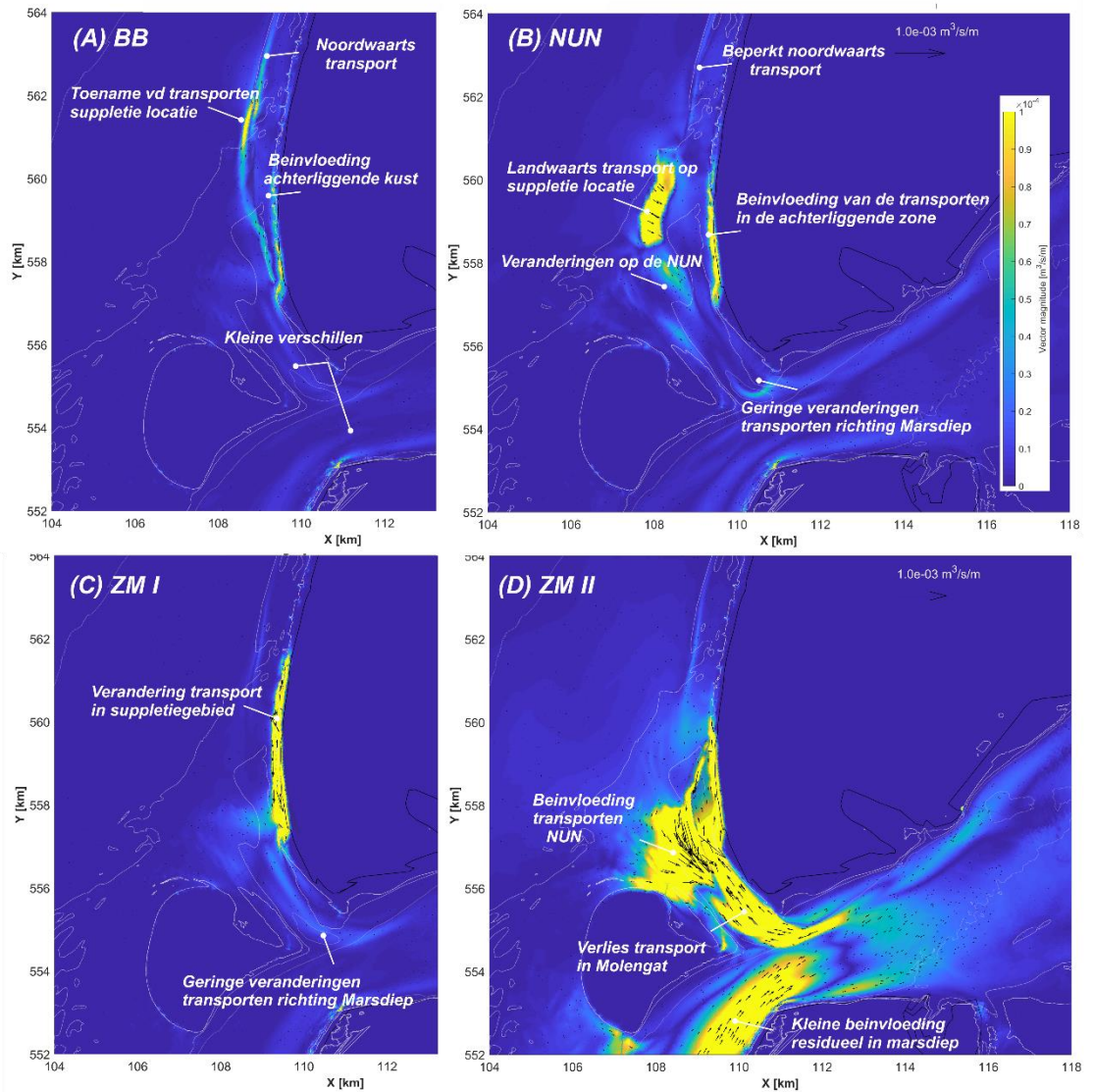
Zandmotor I

Door aanleg van de langgerekte strandsuppletie nemen hier de transporten in zuidelijke richting significant toe. Deze toename beperkt zich vooral tot de suppletie locatie (tussen raai 800 en 1200). Er is een kleine invloed in het Molengat te zien. Eigenlijk beïnvloedt deze suppletie het systeem nauwelijks. Door aanleg wordt de surfzone en dus ook de transporten iets zeewaarts verplaatst, waardoor ook de transporten zeewaarts opschuiven

Zandmotor II

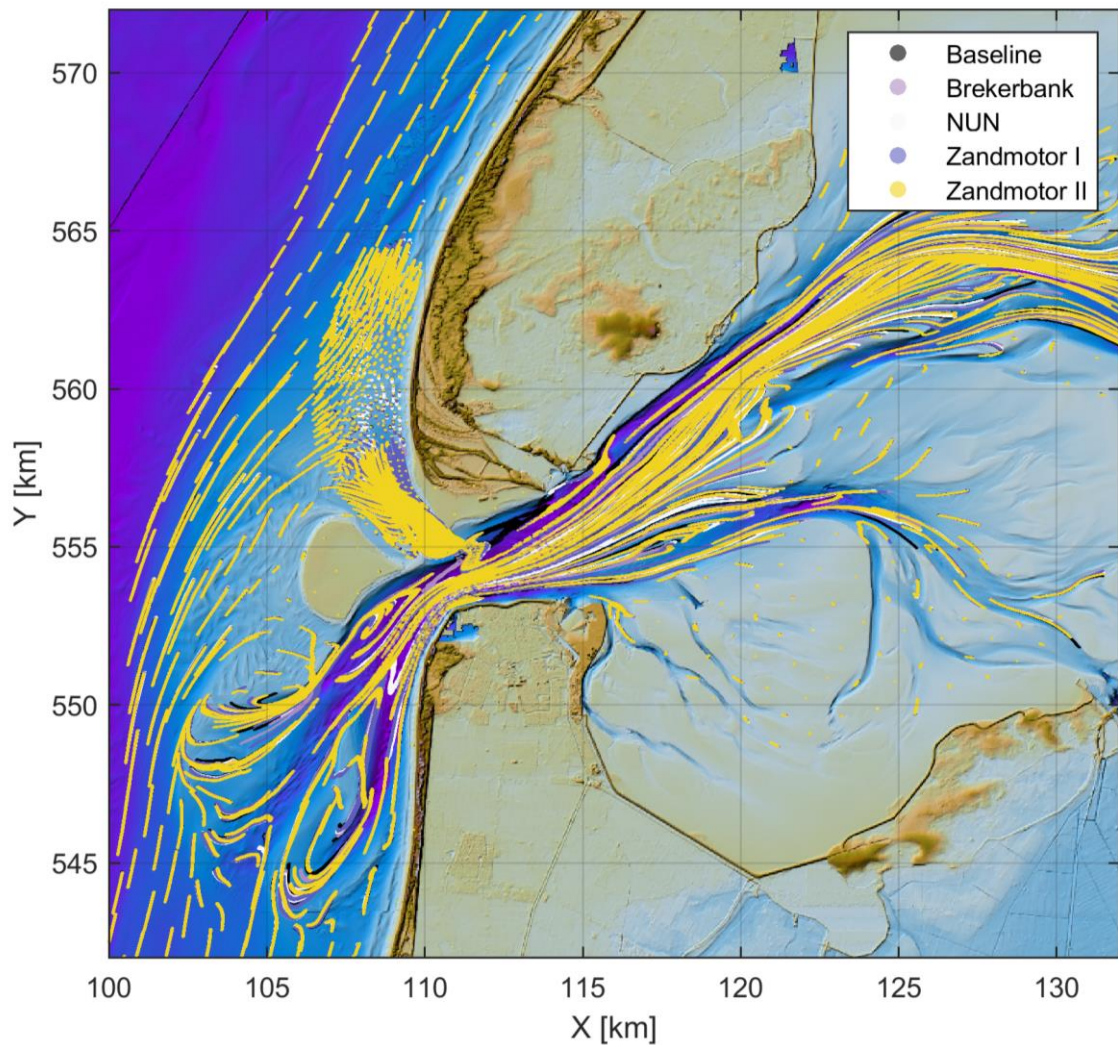
De Zandmotor II suppletie geeft grote veranderingen ter plaatse van de suppletie, maar ook op de omliggende buitendelta. Deze veranderingen zijn voor een groot deel gelijk aan die van de getijsimulatie, alleen is de grootte hier dan fors toegenomen. Ook inclusief golven blijft er een toename van de vloeddominante transporten langs de Helderse Zeewering zichtbaar (a). De grootste beïnvloeding vindt plaats aan de voorkant van de zandmotor. In de getijsimulatie was hier al een toename te zien door contractie van stroming om de suppletie heen. Deze transporten worden aanzienlijk verhoogd door de toevoeging van golven. Er zal dus een verlies vanaf de suppletie ontstaan richting het Molengat. In het Molengat nemen de transporten niet significant toe ten opzichte van de T0 (c). De verschilvector geeft hier juist aan dat er een kleine afname van het noordwaarts transport te zien is.

Dit is gerelateerd aan het afsluiten van het Molengat en de beïnvloeding van het getij. De suppletie zal dus initieel veel zand verliezen aan de kop van de suppletie. Dit zal dan neergelegd worden in het Molengat. Een probleem hierbij is dat het Molengat relatief diep is, dit vormt dan een bezinkput van het sediment waardoor de transporten richting de kust beperkt zullen zijn. Door opvulling van het Molengat zullen de verliezen richting Marsdiep dan ook weer toenemen. Aan de noordzijde van de suppletie zijn de verschillen in transporten eerder beperkt. Dit impliceert dat ook deze suppletie niet direct een significante bijdrage gaat leveren aan de kustlijnontwikkeling hier (raai 900-1000).



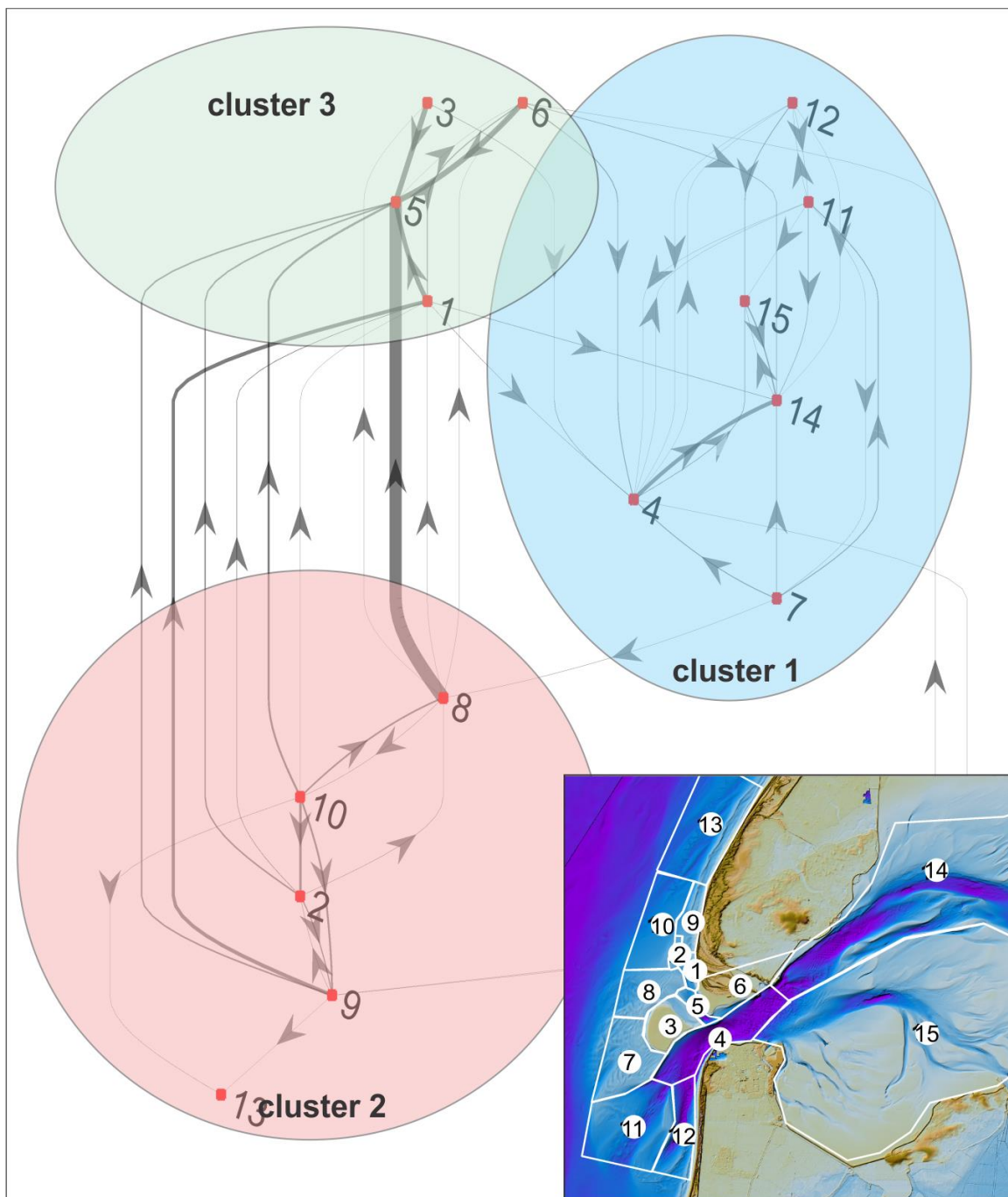
Figuur 6-23: Verschil in residuele sedimenttransporten (jaarlijkse condities) T1 ten opzichte van de T0 voor suppletievariant (A) BB, (B) NUN, (C) ZM1 en (D) ZM2.

6.5.9 Grootschalige effecten van de ZM II variant



Figuur 6-24: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de jaarlijks gemiddelde condities voor het gehele zeegat (boven) en voor Texel Zuidwest in detail (onder)).

De modelresultaten gepresenteerd in voorgaande hoofdstukken laten al zien dat de suppletievarianten de sedimenttransporten niet significant beïnvloeden. Alleen lokaal zijn er effecten te onderscheiden. Op basis van de residuele transporten (Figuur 6-23) kan geconcludeerd worden dat de ZMII suppletie het grootste effect geeft. Voor deze suppletie zijn ook kleine verschillen t.o.v. de T0 te onderscheiden in het Marsdiep. Door middel van de SedTRAILS analyse kan beter geschat worden of deze kleine verschillen een effect op het grootschalige systeem induceren. Figuur 6-24 vat de verschillende patronen samen op basis van de getijgedreven transporten. Deze figuur illustreert dat er geen grootschalige verschillen in de patronen zijn te onderscheiden. De transportpaden voor de verschillende varianten zijn vrijwel identiek. Aanvullende figuren zijn gegeven in Appendix E.



Figuur 6-25: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de jaarlijks gemiddelde condities voor het gehele zeegeat (boven) en voor Texel Zuidwest in detail (onder) op basis van de ZMII suppletie.

De connectiviteitsmatrix weergegeven in Figuur 6-25 bevestigt dat ook voor de jaargemiddelde condities er geen duidelijk beïnvloeding van het systeem plaatsvindt. Ook in het geval van de ZMII zijn de 3 cluster aanwezig. Cluster 1 beschrijft nog steeds de uitwisseling tussen het bekken en het zuidelijke deel van de buitendelta. Een verschil is dat deelpolygoon 6 nu binnen cluster 3 ligt. Deze verandering komt door de toegenomen veranderingen aan de westzijde van deze polygoon, waardoor er meer uitwisseling met polygoon 5 optreedt.

De uitwisseling tussen cluster 1 en 2, en de uitwisseling tussen cluster 2 en 3 veranderen niet. In cluster 3 veranderen wel de onderlinge transportpaden. Zo is er een sterkere uitwisseling tussen polygoon 1 en 5 en vindt er meer uitwisseling plaats tussen 5 en 6. Ook de uitwisseling tussen gebieden 5 en 8 past zich iets aan.

Conclusie: Lokaal zijn er wel veranderingen te onderscheiden. De paden binnen cluster 1 worden iets anders. Binnen dit cluster, het noordelijke deel van de buitendelta, zijn er dus morfologische veranderingen waarschijnlijk. Op grote schaal blijven de paden en clusters intact. Op deze schaal zijn er dan ook geen veranderingen waarschijnlijk.

6.6 Toetsing suppletievarianten, kustindicatoren en kansen en risico's

Op basis van de Kansen & Risico's zijn in hoofdstuk 2 vragen gedefinieerd voor het model. Deze vragen zijn beantwoord in de analyse van de modelresultaten in Hoofdstuk 6.5 en hieronder kort samengevat. In Tabel 6.1 wordt dan een doorvertaling gegeven naar pre-run kustindicatoren en worden de kansen en risico's afgewogen.

Texel - Brekerbank

Wat is het effect van deze suppletie op de getijstroming?

Er is vrijwel geen waarneembare invloed op de getijstroming. Alleen ter plaatse van de verbinding met de kust (tussen raai 800 en 900) is een kleine invloed op de stroming in het Molengat aanwezig.

Wordt de stroming in het Molengat beïnvloed?

Een hele kleine invloed. De suppletie vormt een kleine drempel in het Molengat waar de stromingen dan iets versnellen. Het is de verwachting dat dit vooral een initieel effect is en er zich snel een nieuw evenwicht in zal stellen.

Vindt er significante golfbreking plaats op deze suppletie gegeven de kruinhoogte van -4m?

Nee, golfbreking vindt alleen plaats bij de hoogste golven, maar door de kleine kans van voorkomen worden de jaargemiddelde transporten nauwelijks beïnvloedt. Een duidelijke golfafscherming van de achterliggende kust wordt dan ook niet geobserveerd.

Wat is het effect van deze suppletievariant op de sedimenttransportpatronen?

De transporten worden nauwelijks beïnvloedt. Er is een kleine toename van de langstransporten op suppletie. Dit wijst erop dat suppletiemateriaal in langsrichting wordt afgevoerd.

Vindt er een rechtstreekse beïnvloeding plaats (voeding vanaf de suppletie richting de kust)?

Deze beïnvloeding wordt in de modelresultaten niet geobserveerd. Het merendeel van de suppletie zal in langsrichting worden afgevoerd.

Worden de sedimenttransporten indirect beïnvloedt door bijv. afscherming of invangen van sediment?

Deze invloed is niet zichtbaar. Het zeer geringe effect van de suppletie op het golfklimaat is hiervoor een verklaring.

Texel NUN

Wat is het effect van deze suppletie op de golven?

Deze suppletie heeft een duidelijke invloed op het achterliggende golfklimaat. De suppletie verlengt de golfafschermende werking van de buitendelta in noordelijke richting. Een effect tot raai 1400 is merkbaar in de vorm van 10-20% reductie van de golfhoogte.

Vindt er een duidelijke golfafscherming plaats van de aanliggende kust?

Ja (zie boven)

Hoe verhoudt deze suppletie zich in relatie tot de BB variant.

Het golfafschermende effect werd in de BB variant niet geobserveerd. In dit opzicht is de NUN variant meer geschikt.

Wat is het effect van deze suppletievariant op de sedimenttransportpatronen?

Worden de getij gedreven transporten beïnvloed?

Voor beide vragen geldt dat initieel de suppletie alleen een vergroting van de transporten geeft ter plaatse van de suppletie. Deze transporten worden vooral door golven opgewekt. Als de suppletie zich als bank landwaarts verplaatst dan is een grote invloed op de getijgedreven transporten te verwachten. Tussen de suppletie en de kust zal het Molengat dan kunnen verdiepen en er zullen hier dan grotere transporten optreden. Tijdelijke, tot de bank verheelt met de kustlijn kan er dan vergrote erosie van de kustlijn optreden.

Wat is het effect van golfafscherming op de sedimenttransporten?

Worden de sedimenttransporten bij de kustlijn indirect beïnvloed door bijv. afscherming of invangen van sediment?

De suppletie zorgt voor een reductie van de golfhoogte langs de achterliggende kust. Deze reductie zorgt voor een verkleining van de erosieve processen. Een verkleining van de kusterosie is dan te verwachten. Het is lastig te voorspellen of er extra sediment ingevangen wordt.

Is er een kans op verheling van de NUN met de kust van Texel Zuidwest?

Die kans is aanwezig. Als de suppletie zich kan handhaven als bank kan deze landwaarts verplaatsen en verhelen met de kust. De huidige NUN is wel verheelt met de kust, maar deze verheling treedt niet als een bankaanlanding op. De NUN gaat eigenlijk via een ondiepe zone over in het kustprofiel. het zand van de NUN wordt dan kustlangs afgevoerd. In de kustlijn zelf is dit dan eigenlijk niet terug te zien. Een verheling in de vorm van een bankaanlanding geeft een grote toename van het zandvolume in de kustzone. De verspreiding hiervan draagt veel meer direct bij aan de kustlijn. Als voorbeeld kan hier naar de verheling en verspreiding van het Bornrif Bankje worden gekeken.

Texel ZM I

Is er een effect van deze suppletie op de stromingen in het Molengat?

Er is geen aantoonbaar effect van deze suppletie op de stromingen. Het voorliggende Molengat is hier een brede geul. Het aanleggen van de suppletie geeft niet een dusdanige verandering in het kustprofiel dat de stroming erdoor aangepast wordt.

Is er een verstoring van de processen in de surfzone te onderscheiden? Ontstaat er een bredere of smallere surfzone na aanleg en Zijn de transporten in de surfzone meer complex na aanleg?

In de modellering zijn deze effecten niet waarneembaar. De surfzone verplaatst iets zeewaarts maar blijft in de T0 en T1 vrijwel identiek.

Worden de sedimenttransporten en transportpatronen beïnvloed?

Er worden geen waarneembare veranderingen in de transportvelden geconstateerd. De transporten handhaven zich zeewaarts van de suppletie.

Texel ZM II

Hoe beïnvloedt deze suppletie de stroming in het Molengat en op de voorliggende NUN?

De ZMII suppletie sluit het Molengat af ter hoogte van raai 900. Aan weerszijden van de suppletie reduceren nu de stromingen. De grootste effecten zijn zichtbaar aan de zuidzijde. Ook aan de kop van de suppletie nemen de stromingen sterk toe over de voorliggende NUN.

Worden de stromingen in het Zeegat beïnvloed door afsluiting van het Molengat?

De beïnvloeding door de ZMII suppletie is vooral een lokaal effect. De stromingen in het zeegat worden nauwelijks beïnvloedt.

Worden de stromingen zodanig beïnvloed dat er veranderingen in het kustprofiel zijn te verwachten (uitzakking)?

Uitzakking van het kustprofiel treedt nu al op tussen raai 800 en 1000. Dit proces lijkt gerelateerd te zijn aan het verlies van stroming in het Molengat. Een verdere reductie van de stromingen door de ZMII suppletie zou dit proces kunnen versnellen. Het risico op een toename van uitzakking lijkt vooral aanwezig tussen raai 800-1200. Dit proces is wel tijdelijk. Er zal zich op termijn een nieuw evenwicht vormen. De ZM II suppletie versnelt dit proces, waardoor dit evenwicht zich sneller zal bereiken.

Wat is de invloed op het golfklimaat?

Vindt er afscherming van golven plaats aan de zuidzijde van de suppletie?

Vindt er geconcentreerde golfbreking plaats op de punt van de suppletie?

Er is geen grootschalige beïnvloeding van het golfklimaat. Omdat de suppletie in het golfafschermde gebied van de Noorderhaaks bevindt zijn de golven hier al beperkt. Een golfafscherming door het creëren van een luwtegebied lijkt niet aanwezig. Het enige effect dat aanwezig zal is dat de lokale surfzone zich met de suppletie zeewaarts verplaatst. Geconcentreerde golfbreking op de kop van de suppletie zal beperkt zijn vanwege de beperkte golfdoordringing.

Vindt er een significante beïnvloeding plaats van de sedimenttransporten zoals: (1) de transporten op de voorliggende NUN, (2) de transporten in het Molengat richting de kust van Texel (noordwaarts), (3) de uitwisseling met het Marsdiep?

Van de 4 suppletievarianten heeft de ZMII suppletie het grootste effect op de sediment transporten. Lokaal vinden hier relatief grote veranderingen plaats. In de afgesloten delen van het Molengat reduceren de transporten en zal er sedimentatie optreden. Op de kop van de suppletie vinden er grote transporten plaats. Hier zal de voorliggende ondiepte van de NUN waarschijnlijk eroderen. Deze effecten hebben initieel vooral lokaal een effect. Op langere termijn kan er wel een nieuw Molengat gevormd worden en zal dan ook de NUN mogelijk van vorm veranderen.

Zijn er op de schaal van de buitendelta verschillen?

De verschillen zijn op de schaal van de buitendelta beperkt. De geringe uitwisseling tussen Marsdiep en Molengat wijst erop dat veranderingen in het Molengat of op de NUN niet direct het Marsdiep beïnvloeden. Het Marsdiep verbindt het zuidelijke deel van de buitendelta met het bekken. De sedimentuitwisseling met het bekken vindt dan ook vooral vanuit het Schulpengat en Nieuwe Schulpengat plaats. Het Molengat heeft hier vrijwel geen bijdrage in.

Vanaf de zuidelijke heft van de buitendelta vindt noordwaarts transport plaats richting de NUN. De Noorderhaaks bank vormt hierbij een belangrijke scheiding. Zolang de Noorderhaaks bank onveranderd blijft zullen veranderingen op de NUN geen grootschalige effecten te weeg brengen.

Tabel 6.1: Een uitwerking van de post-run kustindicatoren, kansen en risico's aan de hand van de modellering.

<i>Post-run kustindicatoren</i>	<i>BB</i>	<i>NUN</i>	<i>ZMI</i>	<i>ZMII</i>
<i>Erosie trends</i>	Geen invloed	Initieel geen invloed. Met verplaatsing van de suppletie kan de erosietrend vergroot worden.	Geen invloed	Vergroting van erosie aan de kop van de suppletie.
<i>Golfbelasting</i>	Beperkte invloed.	Reductie golfbelasting	Geen invloed	Geen invloed
<i>Korte levensduur</i>	Mogelijk	Mogelijk	Niet waarschijnlijk	Mogelijk
<i>Stroomsnelheid</i>	Vrijwel geen beïnvloeding	Initieel kleine beïnvloeding. Mogelijke beïnvloeding als suppletie landwaarts verplaatst.	Geen beïnvloeding	Grote lokale beïnvloeding in Molengat en aan de kop van de suppletie.
<i>Efficiëntie suppletie</i>	Twijfelachtig. Langs verliezen zijn te verwachten. Weinig effect op de kustlijn.	Mogelijk positieve beïnvloeding door reductie erosie kustlijn en op termijn verhelming met de kust.	Gedrag vergelijkbaar met huidige strandsuppleties. Mogelijk minder 'hot-spot' overschrijding.	Mogelijk gunstig door dichtzetten Molengat. Tevens risico op grote verliezen naar het Molengat.
<i>Kansen</i>	<i>BB</i>	<i>NUN</i>	<i>ZMI</i>	<i>ZMII</i>
<i>Vergroting zandvolumes kustzone (MKL zone); effect op kustlijn.</i>	Beperkt effect. Alleen tussen raai 980-1100 invloed.	Geen invloed	Groot effect in het gebied tussen raaien 800-1250.	Groot effect in het gebied tussen raaien 800-1050.
<i>Uit de kust drukken van de stroming in de voorliggende geul.</i>	Geen invloed	Geen invloed.	Kleine effect.	Groot effect. De stroming wordt hier ver zeewaarts verlegt.
<i>Reductie van golfbelasting op de kust.</i>	Zeer beperkt. Tussen raai 1000-1200	Aanwezig. 10-20% reductie tussen raai 800-1200.	Geen effect	Geen effect
<i>Langere levensduur dan traditionele strandsuppletie</i>	niet van toepassing	niet van toepassing	Mogelijk. Door schaalvergroting vermindering lokale erosie.	Mogelijk, maar meer onderzoek is nodig.
<i>Bevorderen van duingroei</i>	niet van toepassing	niet van toepassing	Mogelijk	Mogelijk
<i>Risico's</i>	<i>BB</i>	<i>NUN</i>	<i>ZMI</i>	<i>ZMII</i>
<i>Dichtzetten geul / vaarroute recreatievaart</i>	Beperkt aanwezig. Tussen raai 800-900 ontstaat een drempel.	Aanwezig. Dichtdrukken Molengat bij landwaartse verplaatsing.	Niet aanwezig.	De suppletie zet het Molengat dicht ter hoogte van raai 900.
<i>Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegeagsysteem</i>	Niet aanwezig	Niet aanwezig	Niet aanwezig	Beperkt aanwezig. Vooral een effect op het noordelijke deel van de buitendelta.
<i>Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem)</i>	Waarschijnlijk.	Aanwezig.	Niet aanwezig. Zal zich uitwerken als een grote strandsuppletie met ongeveer gelijke erosietrend.	Aanwezig. Zeer grote transporten worden geobserveerd. Grote verliezen zijn waarschijnlijk.
<i>Vergroten geul gedreven erosie (in de kust drukken van het Molengat of Oostgat)</i>	Niet waarschijnlijk	Aanwezig. Bij landwaartse verplaatsing van de suppletie kan het Molengat de kust in gedrukt worden (raai 1000-1200)	Niet aanwezig	Niet waarschijnlijk.
<i>Beperkt effect m.b.t. kustlijnhandhaving</i>	Waarschijnlijk. De suppletie zal kustlans afgevoerd worden. Er is geen vermindering van de erosieve processen zichtbaar.	Aanwezig. Er zijn echter wel indicaties van golfafscherming. Dus vermindering erosieve processen.	Niet aanwezig. Deze suppletie werkt als een grote strandsuppletie.	Aanwezig. Als de afgesloten delen van het Molengat kunnen als zandvang fungeren.
<i>Beïnvloeding van de omliggende banken.</i>	Niet aanwezig	Aanwezig. De NUN suppletie kan de NUN zelf beïnvloeden.	Niet aanwezig	Aanwezig. De NUN zal zich aanpassen. Met name op de kop van de suppletie.
<i>Gevaar voor recreanten (complexe intergetijde morfologie)</i>	Niet aanwezig	Niet aanwezig. Alleen bij aanlanding een gevaar	Niet aanwezig	Aanwezig. Groot intergetijde gebied en vergroting stromingen aan de kop van de suppletie.
<i>Duur in uitvoering / inefficiënt</i>	Aanwezig. Geen duidelijk bijdrage aan kustlijnhandhaving	Beperkt aanwezig. Succes is afhankelijk van toekomstige ontwikkeling.	Beperkt. Suppletie zal zich als strandsuppletie gedragen, mogelijk voordeel van schaalvergroting.	Aanwezig als het Molengat als zandput gaat fungeren.

7 Conclusies & Aanbevelingen

In deze studie is een evaluatie uitgevoerd naar de effecten van suppletievarianten in het Zeegat van Ameland en het Zeegat van Texel. Met Delft3D modellering zijn de effecten van de suppletievarianten op het getij, de golven en de sedimenttransporten inzichtelijk gemaakt.

7.1 Conclusies

7.1.1 Een Zandmotor voor Ameland Noordwest

De Noordwest kust van Ameland kenmerkt zich door kustlangse erosie, welke gedreven wordt door vloeddominante transporten vanuit het Oostgat richting het Borndiep. De modellering laat zien dat deze erosie het resultaat is van versnelling van de stroming om de Noordwest punt van Ameland. Golven veroorzaken enkel een toename in transportgrootte ten opzichte van de getijgedreven transporten ter hoogte van de Noordwest kust van Ameland.

De zandmotorsuppletie verandert de processen op de buitendelta en langs de kust van Ameland niet, want het Oostgat is geen getijvoerende geul binnen het zeegatsysteem. Tijdens eb is er weinig directe uitwisseling tussen het Borndiep en het Oostgat. Het merendeel van de ebstroming en transporten gaat het westelijk deel van de buitendelta op. Tijdens vloed propageert het getij over het gehele platform richting het Borndiep. Door contractie van de stroming om de Noordwestpunt van Ameland heen worden de stroomsnelheden hoger en treedt er erosie op. Deze erosie zorgt voor kustlijninterugtrekking en heeft ook het Oostgat gevormd. Het Oostgat is dan ook meer een langgerekte ontgrondingskuil dan een getijvoerende geul. Het dichtzetten van deze ontgrondingskuil door de aanleg van de Zandmotor suppletie heeft geen invloed op de processen. Het getij propageert nog steeds over het Bornrif platform heen, maar de contractie vindt nu plaats om de kop van de Zandmotor. Er zal zich hier een nieuwe ontgrondingskuil gaan vormen. De kustzone is door de zandmotor iets zeewaarts verlegd maar de processen blijven onveranderd. Dit betekent dat de kusterosie zoals deze in het verleden is opgetreden zich ook na aanleg van de Zandmotor zal voortzetten. De modellering laat ook zien dat initieel de stromingen aan de kop van de suppletie waarschijnlijk groter zijn dan in de huidige situatie. Dit wordt veroorzaakt doordat de bodem hier ondieper wordt. Grote zandverliezen richting het Borndiep worden verwacht door de vorming van een nieuwe ontgrondingskuil in de vooroever. Deze grote stromingen zullen ook grote verliezen aan de kop van de suppletie veroorzaken. De suppletie zal naar verwachting weinig bijdragen aan het kustvak ten oosten van de suppletie. Het netto zandtransport in oostwaartse richting naar de Bornrif strandhaak lijkt beperkt.

Deze suppletie draagt wel rechtstreeks bij aan kustlijnhandhaving. Er wordt immers 9 miljoen m³ zand op de kustlijn aangebracht. Met behulp van de modelinformatie en de in het verleden geobserveerde trends wordt de levensduur van de suppletie geschat op 5 tot 6 jaar. Dit betekent niet dat de gehele suppletie na 5 jaar verdwenen is, maar dat tussen raai 100-200 de MKL weer terug op de oorspronkelijke positie ligt. Er vindt, zie hierboven, nauwelijks beïnvloeding van de processen plaats. Het extra aanbod aan zand blijft klein ten opzichte van de natuurlijke ontwikkelingen.

7.1.2 Suppletievarianten voor Texel Zuidwest

Op basis van de modellering kan worden geconcludeerd dat de rol van het Molengat in het Zeegat van Texel beperkt is. Het Marsdiep zorgt vooral voor een uitwisseling tussen het zuidelijke deel van de buitendelta met het bekken. Tijdens vloed vindt wel stroming en transport vanuit het Molengat het Marsdiep in plaats, maar tijdens eb is deze uitwisseling beperkt. De invloed van het getij in het zeegat strekt zich niet ver noordwaarts uit.

Tussen raai 900 en 1200 ligt zelfs een luwtegebied waarin de getijgedreven residuele transporten nihil zijn. De suppletievarianten BB, NUN en ZM I zijn allen in dit luwtegebied aangelegd en hebben dan ook vrijwel geen invloed op getijgedreven stromingen en transporten.

De ZM II suppletie is wel in de getijgedomineerde stroming van het zeegat aangelegd. Van de vier varianten heeft deze suppletie de grootste effecten op de stromingen en transporten. Deze grotere effecten mochten verwacht worden. Met bijna 9 miljoen m³ is deze suppletie veel groter dan de overige varianten en dit is de enige suppletie die het Molengat volledig dichtzet. Toch leert de modellering dat de beïnvloeding vooral lokaal, ter hoogte van de suppletie, is. Grootschalig lijkt het zeegatsysteem (in ieder geval initieel) niet significant beïnvloed te worden. Een belangrijke verklaring hiervoor is de beperkte rol van het Molengat binnen het zeegat.

Door de ondiepe kruinhoogte van de NUN suppletie heeft deze een groter effect op het golfklimaat dan de overige suppleties. De NUN suppletie zorgt ervoor dat tussen raaien 800-1400 een afscherming van golfenergie plaatsvindt. Langs de achterliggende kustlijn reduceren dan de (golfgedreven) sediment transporten. Deze suppletie is de enige suppletie waarbij de erosieve processen langs de eilandkust duidelijk afnemen. Golfbreking op de NUN suppletie genereert hier een netto landwaarts transport. Het is waarschijnlijk dat deze suppletie landwaarts verplaatst en zo gaat bijdragen aan de volumes in de kustzone.

Er zijn twee scenario's van toekomstige ontwikkeling mogelijk. De eerste is dat de suppletie landwaarts verplaatst en dissipeert, waardoor deze langzaam opgaat in de onderliggende NUN. Het verhelingsproces met Texel zal dan plaatsvinden zoals het nu al optreedt bij de NUN, via een ondiepe verbinding (rond de -5m met de kust). Het zand zal dan in langsricting worden afgevoerd, waarbij geen duidelijke respons in de kustlijnen zichtbaar is. Het tweede scenario is dat de NUN suppletie zich kan handhaven in hoogte en volume. De gehele NUN suppletie verplaatst dan landwaarts en verheelt als bank met de kustlijn. Dit proces lijkt op de aanlanding van het Bornrif Bankje. Na verhelings wordt de bank kustlangs verspreid waardoor voor lange tijd de aanliggende kust gevoed wordt. Op dit moment is onze kennis van de onderliggende processen onvoldoende om te voorspellen welk scenario het meest waarschijnlijk is.

Ook de BB suppletie wordt op de vooroever aangelegd als een langgerekte vooroeversuppletie met een kruinhoogte van -4m NAP. De suppletie trekt de al langs de centrale eilandkust van Texel aanwezig brekerbank door en sluit aan op De Hors. Het laatste deel van de suppletie doorsnijdt dan het Molengat. De modellering leert dat deze suppletie de natuurlijke processen weinig beïnvloedt. De stromingen in het Molengat blijven ongewijzigd en ook de invloed op de golven is beperkt. Golfbreking vindt alleen plaats bij de hoogste golven, maar door de kleine kans van voorkomen worden de jaargemiddelde transporten nauwelijks beïnvloed. Er zijn wel kleine verschillen in transporten, maar een duidelijke golfafscherming van de achterliggende kust wordt niet berekend. Om dit effect te bereiken zou de suppletie veel hoger moeten worden aangelegd, zoals de NUN suppletie. Een nadeel van de BB suppletie is dat er een brekerbank gecreëerd wordt op een locatie waar deze van nature niet aanwezig is. Er is een groot risico dat deze bank snel zal opbreken en verdwijnen.

De ZM I suppletie is een groot uitgevoerde strandsuppletie en zodoende efficiënt in het direct vergroten van de zandvolumes en het zeewaarts verplaatsen van de strandlijnen en MKL. Vanuit kustlijnhandhaving is dit daarom een veilige keuze. Deze suppletie beïnvloedt de grootschalige processen niet. De conclusie is daarom dat de huidige erosie zich ook bij deze suppletie zal doorzetten en dat de suppletie zich ongeveer zal gedragen als de huidige suppleties. Het is echter wel mogelijk dat door schaalvergroting aanvullende voordelen ontstaan. Er is immers over een lang kustvak veel zand beschikbaar. Dit extra zand aanbod kan lokale "hot-spot" erosie onderdrukken.

De ZM II suppletie verandert ook grootschalig het systeem niet, maar heeft wel de potentie om lokaal het Molengat, de voorliggende NUN en de kustlijn van Texel op korte en lange termijn te beïnvloeden. De grootste beïnvloeding vindt plaats aan op de kop van de suppletie. In de getijsimulatie was hier al een toename van de stroming en transporten te zien door contractie van stroming om de suppletie heen. Deze transporten worden aanzienlijk verhoogd door de toevoeging van golven. Er zal erosie van de voorliggende NUN en een zandverlies van de suppletie optreden. Door afsluiting van het Molengat nemen de stromingen in deze geul aan weerszijden van de suppletie af. Hierdoor zullen de twee afgesloten delen zich gaan gedragen als een bezinkput van het sediment. Doordat het Molengat nog diep is zal er initieel veel verlies richting deze geul zijn, waardoor de transporten richting de kust beperkt zijn. Wel vult dit de zandvoorraad van de kustzone voor lange tijd aan.

7.1.3 Algemene conclusies

Op basis van de uitgevoerde analyses kan geconcludeerd worden, dat alleen de Texel NUN suppletie en de Texel ZMII suppletie zich als systeemsuppletie gedragen. Deze twee suppleties reduceren de erosieve processen onderliggend aan de kustlijnerosie van Zuidwest Texel.

Voor alle suppletievarianten geldt dat een beïnvloeding van de processen op de schaal van het zeegat niet waarschijnlijk is. De suppleties zijn allen aangelegd buiten de hoofdcirculatie van het Zeegat. De beïnvloeding van de stromingen en transporten is vooral lokaal. De ZM II suppletie geeft lokaal de grootste veranderingen.

De NUN suppletie zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kustlijn en draagt zo rechtstreeks bij tot een reductie van de erosie aan de kustlijn. Het is dan ook de verwachting dat de kust dan in de toekomst minder frequent gesuppleerd moet worden. Naast golfafscherming is er een extra zandaanbod op de NUN waardoor er meer transport richting de kust kan optreden.

Het opstellen van rekenontwerpen met daarbij een overzicht van de kansen en risico's geeft een goed uitgangspunt voor de analyses van de verschillende ontwerpen. De kansen en risico's kunnen worden omgezet naar vragen die met behulp van de modellering kunnen worden beantwoord. Met behulp van deze antwoorden en expert judgement kunnen de kansen en risico's dan worden getoetst.

7.2 Aanbevelingen

Naast systeemsuppleties kan ook schaalvergroting van reguliere suppleties een oplossing zijn voor efficiënter kustlijnbeheer. De Ameland Zandmotor en Texel ZM I suppletie vallen onder deze categorie. Aanvullend onderzoek naar de werking van deze varianten wordt geadviseerd. Als eerste stap zou hierin de grote vooroever/strand suppletie aangelegd in 2019 in detail geanalyseerd kunnen worden. Data van deze suppletie was nog niet voldoende beschikbaar voor dit onderzoek. De ontwikkeling van de 2019 suppletie is waarschijnlijk een goede maatstaaf voor de ontwikkeling van de Ameland Zandmotor suppletie.

De ZMII suppletie geeft een ingrijpende verandering in de processen in het noordelijke deel van de buitendelta. Deze suppletievariant heeft in potentie grote voordelen, maar hoe de morfologische ontwikkeling zich na aanleg precies gaat uitwerken is op basis van deze studie nog niet te voorspellen. Gezien de grote verwachte effecten is het te adviseren dit soort ingrijpende suppleties niet zo uit te voeren maar verder te onderzoeken.

Bij aanvang van de studie was de intentie om de evaluatie van de suppletievarianten aan te laten sluiten bij de kustlijnindicatoren die ook binnen kustlijn­zorg gehanteerd worden. Het scoren van kustindicatoren bleek niet goed haalbaar. De kustindicatoren kunnen wel bepaald worden voor de T0 en T1 maar de huidige modellen zijn (nog) niet in staat de ontwikkeling van de indicator te voorspellen. Het dwarsprofiel wordt in de huidige modellen daarvoor niet goed opgelost. Om deze analyses mogelijk te maken zal hier modelontwikkeling/verbetering moeten plaatsvinden.

De werking van de zeegatsystemen van Texel en Ameland en de grootschalige ontwikkeling van de eilanden is wel bekend en gedocumenteerd. Gedetailleerde beschrijvingen van de kustontwikkelingen op het niveau van de raaien en in termen van de kustindicatoren is echter slechts beperkt uitgevoerd. Ook ontbreekt het aan gedetailleerde evaluaties van de reeds uitgevoerde suppleties. Deze analyses dienen in de toekomst wel te worden uitgevoerd. Deze aanbeveling geldt niet alleen voor deze twee zeegaten, maar is geldig voor alle kustvakken waar structurele erosieproblematiek speelt.

8 Referenties

Cleveringa, J. Zand voor Zuidwest Texel : Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. Technical report, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag, 2001.

de Graaff, R.F., 2009. SBW Wadden Sea, water level modelling; Calibration hydrodynamic model. Technical report, Deltares, Delft.

Elias, E.P.L. 2006. Morphodynamics of Texel Inlet, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands, 261 pp.

Elias, E.P.L., 2020a. Workshop Kustfundamentsuppleties bij eilandkoppen. Memo, Deltares Delft, 17p.

Elias, E.P.L., 2020b. Kustfundamentsuppleties op eilandkoppen. Een inventarisatie van 4 mogelijke locaties. Rapport 11205236-005-ZKS-0003, Deltares Delft, 43p.

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., Roelvink, F, and Pearson, S., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Synthese. Report, 1205236-005, Deltares, Delft, 37 p.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2017. Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. Netherlands Journal of Geosciences 96 (4), p. 293–317.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Pearson, S.G., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. Marine Geology, 415.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S, 2020. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet. Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research. Report 1220339-008-ZKS-0008, Deltares, Delft, 82 p.

Laan, S.C., 2019. Understanding coastal dynamics at an ebb-tidal delta in the Wadden Sea. A case study of Schiermonnikoog NW with Delft3D Flexible Mesh. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 105 pp.

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

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

Nederhoff, C.M., Elias, E, Vermaas, T. (2016a) Erosie op Ameland Noordwest. Modelstudie: simulaties met Delft3D en XBeach. Rapport 1503-0080, Deltares, Delft, 85 p.

Nederhoff, C.M., Schrijvershof, R., Tonnon, P.K., van der Werf, J.J., 2016. The Coastal Genesis II Terschelling - Ameland inlet (CGII-TA) model. Model setup, calibration and validation of a hydrodynamic-wave model. Report 1220339-008-ZKS-0004, Deltares, Delft, 88 p.

Steijn, R.C. en C. Jeuken, (2000), Vier mogelijke beheersingrepen in het Zeegat van Texel - morfodynamische modelberekeningen, rapport samenwerkingsverband Alkyon/WL|Delft Hydraulics A514/Z2742, 68 pag., 15 tab., 146 fig.

Zijl, F., Verlaan, M., & Gerritsen, H. (2013). Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. *Ocean Dynamics*, 63(7), 823–847. <http://doi.org/10.1007/s10236-013-0624-2>.

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.

A Overzicht rekenontwerp suppletievarianten

In deze Appendix zijn de rekenontwerpen zoals aangeleverd door WVL samengevat.

A.1 Ameland; Suppletievariant Zandmotor

Omschrijving:

Het ontwerp van deze suppletie omvat een zandmotor in de vorm van een grote strand-vooreversuppletie. Deze suppletie is daarmee een vergrote versie van de suppletie Ameland Westkop die in 2019 is uitgevoerd en is bedoeld om het Oostgat langs het meest erosieve gedeelte van de kust dicht te zetten.

Eigenschappen suppletie

Eigenschap	Waarde
Locatie	Ameland NW
Strand/voorever	Strand-voorever
Totale in situ volume suppletie	9.100.000 m ³ (afgerond)
Van/Tot	100 – 420
Lengte suppletiegebied	3200 m
Toetsjaar	2020

* In werkelijkheid zal het in situ volume hoger zijn. Dit komt omdat de suppletie Ameland Westkop al gedeeltelijk zichtbaar is in de JARKUS 2019, waardoor er op basis van de berekeningen met de JARKUS 2019 effectief minder volume in situ past dan in werkelijkheid zal passen.

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte bedraagt 2 m+ NAP.
- Verloop eerst vlak (platberm), vervolgens:
 - Tussen raaien 100 – 204 is een talud van 1:30 gehanteerd, aangezien het Borndiep hier nabij de kust ligt en het kustprofiel daardoor steil is.
 - Tussen raaien 220 – 420 is een talud van 1:50 gehanteerd, aangezien het lokale kustprofiel hier flauwer is en geleidelijk afloopt in het Oostgat.
- Indicatieve volumes zijn het grootst tussen raaien 200 – 280 (4000 m³/m) om het Oostgat volledig dicht te zetten. De zone met BKL-overschrijdingen (beoordeling 1-1-2020) is gelegen tussen raaien 200-420.

Kansen & Risico's van het ontwerp

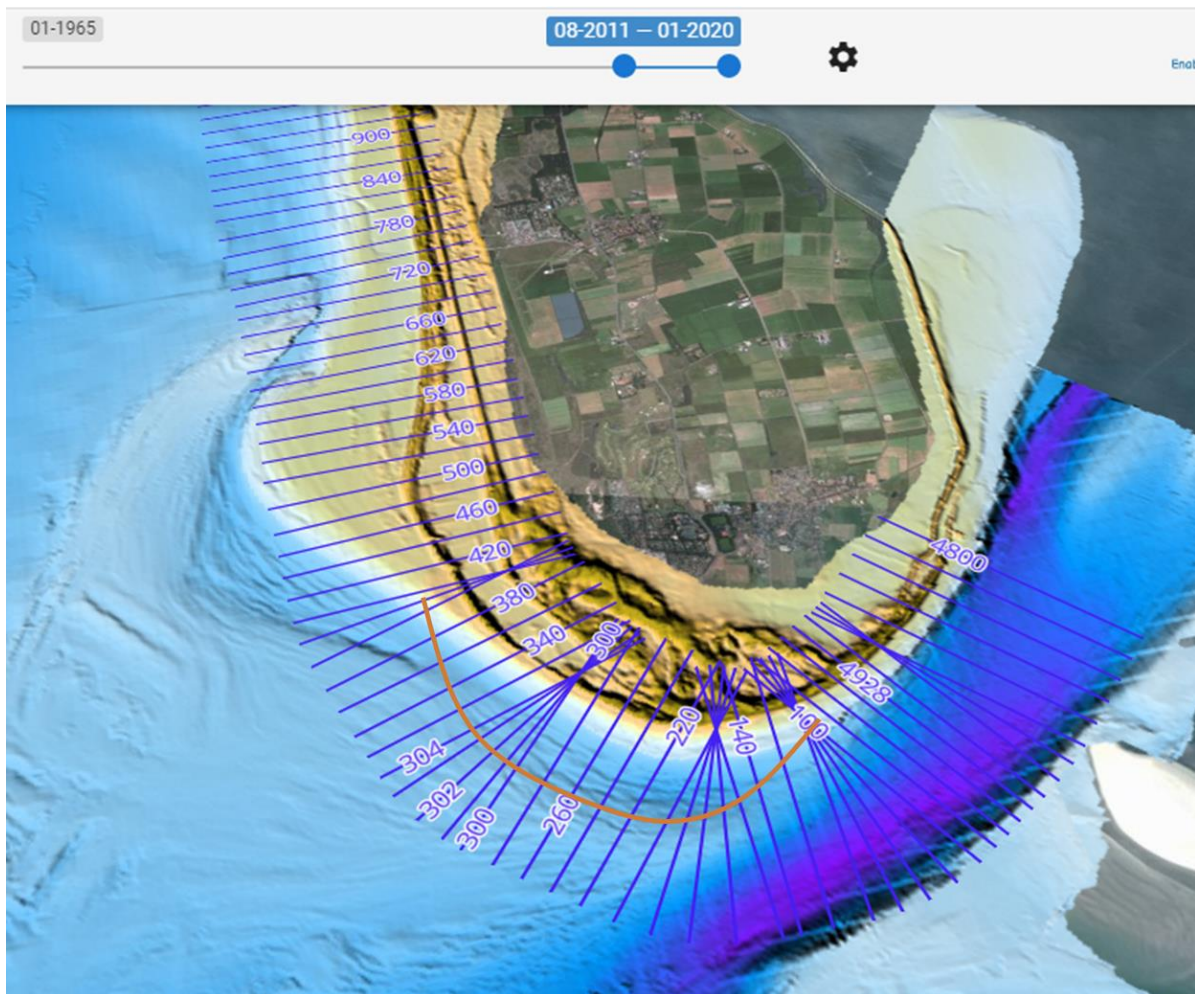
Kansen:

- Directe voeding kust
- Vergroten zandvolumes kustzone
- Reduceren van kustlangse getij-erosieprocessen
- Bevorderen van duingroei

Risico's:

- Kan de vloedstroming omgeleid worden door deze ingreep?
- Wat is de effectiviteit van de suppleties op gebieden I+II
- Is het uitvoerbaar?
- Opmerking: uitvoeringstechnisch is het mogelijk. Opletten bij Westgat; doorvaarroute.
- Kunnen onverwachte (getij)stromingen rondom de zandmotor ontstaan?
- Leidt deze ingreep tot onverwachte effecten in het zeegatsysteem?
 - Onverwachte effecten t.g.v. dichtzetten Oostgat

Locatie suppletie volumes



Figuur A-1: Overzicht ligging suppletievariant zandmotor Ameland.

Indicatieve volumes voor suppleties

In de onderstaande tabel zijn de indicatieve volumes per raaiwak weergegeven.

Raaiwak	Raaiwaktbreedte (m)	Indicatief volume (m ³ /m)	Aanleghoogte (m NAP)	Helling
420	190	1000	+2	1:50
402	95	1000	+2	1:50
401	10	1000	+2	1:50
400	105	1000	+2	1:50
380	200	1500	+2	1:50
360	200	1500	+2	1:50
340	200	2000	+2	1:50
320	180	2000	+2	1:50
*304	85	3000	+2	1:50
*303	10	3000	+2	1:50
*302	10	3000	+2	1:50
*301	10	3000	+2	1:50
*300	105	3000	+2	1:50
280	200	4000	+2	1:50
260	200	4000	+2	1:50
240	200	4000	+2	1:50
220	180	4000	+2	1:50
*204	85	4000	+2	1:30
*203	10	4000	+2	1:30
*202	10	4000	+2	1:30
*201	10	4000	+2	1:30
*200	305	4000	+2	1:30
140	400	2500	+2	1:30
120	180	2500	+2	1:30
*104	85	1500	+2	1:30
*103	10	1500	+2	1:30
*102	10	1500	+2	1:30
*101	10	1500	+2	1:30
*100	200	1500	+2	1:30

* sterraaien- raaiwaktbreedte is een indicatie

A.2 Texel

A.2.1 Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Brekerbank

Omschrijving:

Het ontwerp van deze suppletie heeft de vorm van een vooroeversuppletie waarbij de brekerbank wordt doorgetrokken tot De Hors . Deze suppletie sluit dan het meest ondiepe, noordelijke deel van het Molengat af.

Eigenschappen suppletie

Eigenschap	Waarde
Locatie	Texel ZW
Strand/vooroever	Vooroever
Totale in situ volume suppletie	1.550.000 (Afgerond)
Van/Tot	860-1249
Lengte suppletiegebied	4300 meter
Toetsjaar	2020

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte is -4 m +NAP

Verloop circa 1:20, vervolgens vlak en daarna aflopend circa 1:20

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte bedraagt 2 m+NAP.
- Verloop eerst vlak (platberm), vervolgens:
 - Tussen raaien 100 – 204 is een talud van 1:30 gehanteerd, aangezien het Borndiep hier nabij de kust ligt en het kustprofiel daardoor steil is.
 - Tussen raaien 220 – 420 is een talud van 1:50 gehanteerd, aangezien het lokale kustprofiel hier flauwer is en geleidelijk afloopt in het Oostgat.
- Indicatieve volumes zijn het grootst tussen raaien 200 – 280 (4000 m³/m) om het Oostgat volledig dicht te zetten. De zone met BKL-overschrijdingen (beoordeling 1-1-2020) is gelegen tussen raaien 200-420.

Kansen & Risico's van het ontwerp

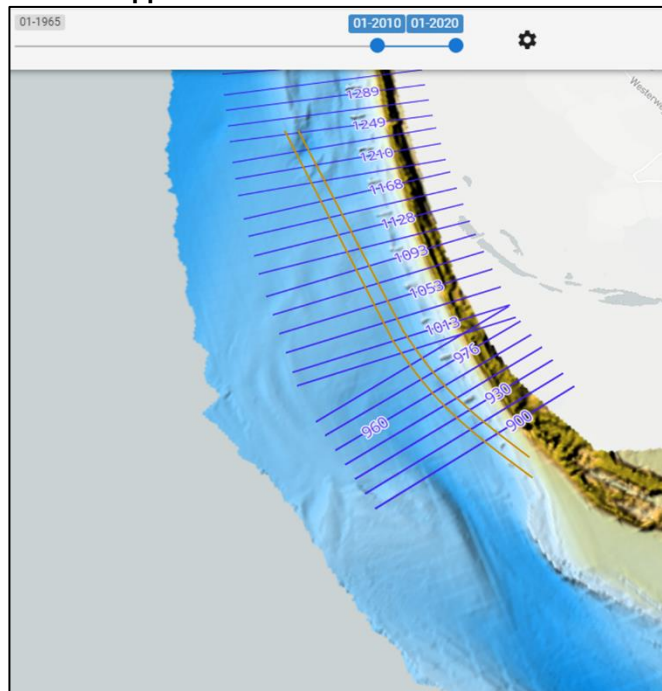
Kansen

- Voeding kust d.m.v. nieuwe brekerbank
- Golfbreking a.g.v. nieuwe brekerbank
- Verdringen stroming Molengat

Risico's

- Bij het huidige ontwerp wordt het Molengat dicht gesuppleerd bij raai 1000/1013. Momenteel ligt er nog gele betonning in het Molengat waardoor hier nog wel gevaren kan worden voornamelijk door de visserij. Op dit moment nog niet bekend waar deze betonning precies ligt en of hier rekening mee gehouden kan worden in het ontwerp. Voordat er daadwerkelijk wordt besloten tot uitvoer eerste afstemmen met nautisch beheer –RWS NN.
- Mogelijk onverwachte effecten als gevolg van ingrijpen in de dynamiek van een vloedgeul (Molengat). Molengat is op dit moment stabiel; mogelijk effect op andere geulen.
- Mogelijk is een brekerbank aanleggen niet heel effectief. In de huidige situatie is er namelijk ook geen brekerbank. Waarschijnlijk zal een brekerbank hier zeer snel verdwijnen.
- Uitvoerbaarheid: Is uitvoerbaar met sproei-ponton.

Locatie suppletie volumes



Figuur A-2: Overzicht ligging suppletievariant Texel Brekerbank.

Indicatieve volumes voor suppleties

In de onderstaande tabel zijn de indicatieve volumes per raaiwak weergegeven.

Raaiwak	Raaiwaktbreedte (m)	Indicatief volume (m ³ /m)	hoogte (m NAP)	Helling
1249	195	400	-4	1:20
1230	195	450	-4	1:20
1210	200	450	-4	1:20
1190	210	450	-4	1:20
1168	210	450	-4	1:20
1148	200	450	-4	1:20
1128	200	350	-4	1:20
1108	175	350	-4	1:20
1093	175	250	-4	1:20
1073	200	250	-4	1:20
1053	200	250	-4	1:20
1033	200	350	-4	1:20
1013	160	500	-4	1:20
1001	65*	500	-4	1:20
1000	125	500	-4	1:20
976	200	500	-4	1:20
960	155	450	-4	1:20
945	150	450	-4	1:20
930	150	350	-4	1:20
915	150	350	-4	1:20
900	200	300	-4	1:20
880	200	250	-4	1:20
860	200	200	-4	1:20

* sterraaien- raaiwaktbreedte is een indicatie

A.2.2 Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Verondieping NUN (Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks)

Omschrijving:

Het ontwerp van deze suppletie is een vooroeversuppletie in de vorm van een bank op de ondiepte NUN. Deze suppletie beïnvloedt de stromingen door het Molengat niet, maar geeft een extra voeding van de NUN.

Eigenschappen suppletie

Eigenschap	Waarde
Locatie	Texel ZW
Strand/vooroever	Vooroever
Totale in situ volume suppletie	2.280.000 m ³ (afgerond)
Van/Tot	960-1148
Lengte suppletiegebied	1880 m
Toetsjaar	2020

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte is -2,5 m NAP een loopt af aan de uiteindes
- Verloop eerst vlak, vervolgens aflopend circa 1:20.

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte bedraagt 2 m+NAP.
- Verloop eerst vlak (platberm), vervolgens:
 - Tussen raaien 100 – 204 is een talud van 1:30 gehanteerd, aangezien het Borndiep hier nabij de kust ligt en het kustprofiel daardoor steil is.
 - Tussen raaien 220 – 420 is een talud van 1:50 gehanteerd, aangezien het lokale kustprofiel hier flauwer is en geleidelijk afloopt in het Oostgat.
- Indicatieve volumes zijn het grootst tussen raaien 200 – 280 (4000 m³/m) om het Oostgat volledig dicht te zetten. De zone met BKL-overschrijdingen (beoordeling 1-1-2020) is gelegen tussen raaien 200-420.

Kansen & Risico's van het ontwerp

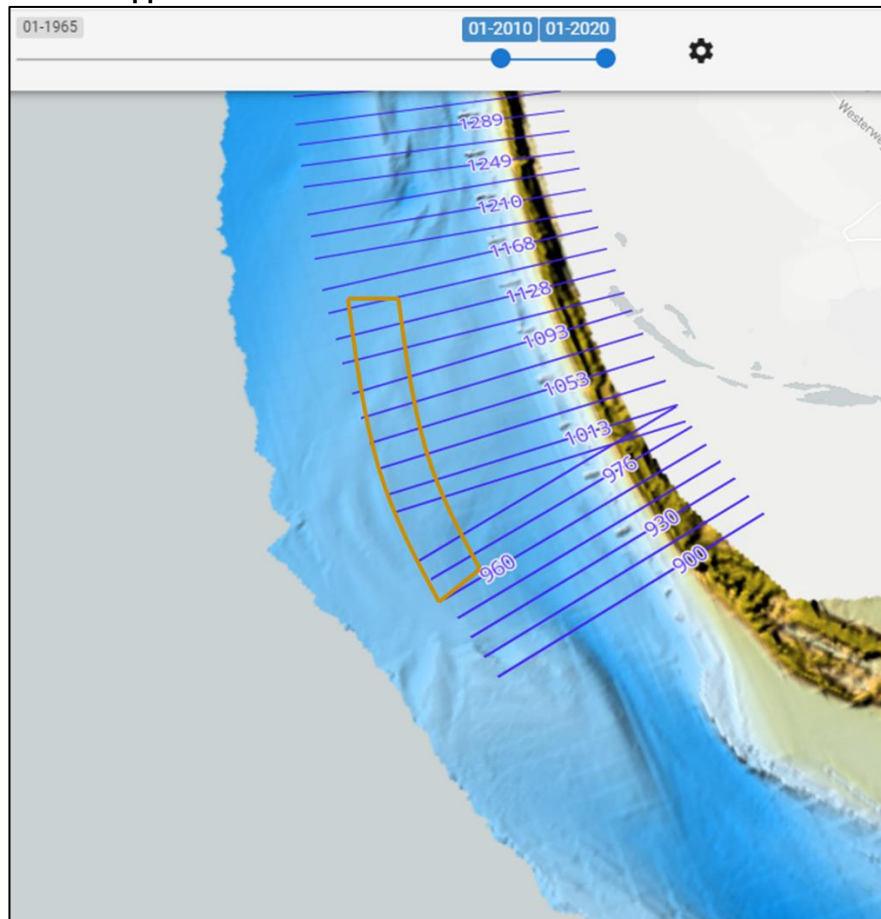
Kansen

- Voeding kust d.m.v. nieuwe brekerbank
- Golfbreking a.g.v. nieuwe brekerbank
- Verdringen stroming Molengat

Risico's

- Bij het huidige ontwerp wordt het molengat dicht gesuppleerd bij raai 1000/1013. Momenteel ligt er nog gele betonning in het Molengat waardoor hier nog wel gevaren kan worden voornamelijk door de visserij. Op dit moment nog niet bekend waar deze betonning precies ligt en of hier rekening mee gehouden kan worden in het ontwerp. Voordat er daadwerkelijk wordt besloten tot uitvoer eerste afstemmen met nautisch beheer – RWS Noord Nederland.
- Mogelijk onverwachte effecten als gevolg van ingrijpen in de dynamiek van een vloedgeul (Molengat). Molengat is op dit moment stabiel; mogelijk effect op andere geulen.
- Mogelijk is een brekerbank aanleggen niet heel effectief. In de huidige situatie is er namelijk ook geen brekerbank. Waarschijnlijk zal een brekerbank hier zeer snel verdwijnen.
- Uitvoerbaarheid: Is uitvoerbaar met sproei-ponton.

Locatie suppletie volumes



Figuur A-3: Overzicht ligging suppletievariant Texel Verondieping NUN.

Indicatieve volumes voor suppleties

In de onderstaande tabel zijn de indicatieve volumes per raaiwak weergegeven.

Raaiwak	Raaiwaktbreedte (m)	Indicatief volume (m ³ /m)	Aanleghoogte (m NAP)	Helling
1148	200	800	-4,5	1:20
1128	200	1000	-3,5	1:20
1108	175	1300	-2,5	1:20
1093	175	1300	-2,5	1:20
1073	200	1300	-2,5	1:20
1053	200	1300	-2,5	1:20
1033	200	1300	-2,5	1:20
1013	160	1300	-2,5	1:20
1001	65	1300	-2,5	1:20
1000*	125	900	-2,5	1:20
976	200	1000	-2,5	1:20
960	155	500	-3,5	1:20

* sterraaien- raaiwaktbreedte is een indicatie

A.2.3 Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Zandmotor I

Omschrijving:

Het idee achter deze suppletie is een kustlangse zandmotor; een grote strand-geulwandsuppletie (groter dan Ameland NW). Deze suppletie wordt niet ontworpen in combinatie met morfologisch baggeren

Eigenschappen suppletie

Eigenschap	Waarde
Locatie	Texel ZW
Strand/vooroever	Strand-geulwand
Totale in situ volume suppletie	3.800.000 m ³ (afgerond)
Van/Tot	840 – 1230
Lengte suppletiegebied	3900 m
Toetsjaar	2020

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte bedraagt 3 m+NAP
- Indicatieve aanleghoogte (teen van de suppletie):
 - Raaien 1168 – 1230: Suppletie doortrekken tot -2 m NAP
 - Raaien 1148 – 840: Suppleties doortrekken tot -4 / -5 m NAP
- Verloop eerst vlak (platberm), vervolgens aflopend circa 1:30.
- Indicatieve volumes nemen toe naar het zuiden (raai 840) om de kust hier dikker in het zand te zetten.

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte bedraagt 2 m+NAP.
- Verloop eerst vlak (platberm), vervolgens:
 - Tussen raaien 100 – 204 is een talud van 1:30 gehanteerd, aangezien het Borndiep hier nabij de kust ligt en het kustprofiel daardoor steil is.
 - Tussen raaien 220 – 420 is een talud van 1:50 gehanteerd, aangezien het lokale kustprofiel hier flauwer is en geleidelijk afloopt in het Oostgat.
- Indicatieve volumes zijn het grootst tussen raaien 200 – 280 (4000 m³/m) om het Oostgat volledig dicht te zetten. De zone met BKL-overschrijdingen (beoordeling 1-1-2020) is gelegen tussen raaien 200-420.

Kansen & Risico's van het ontwerp

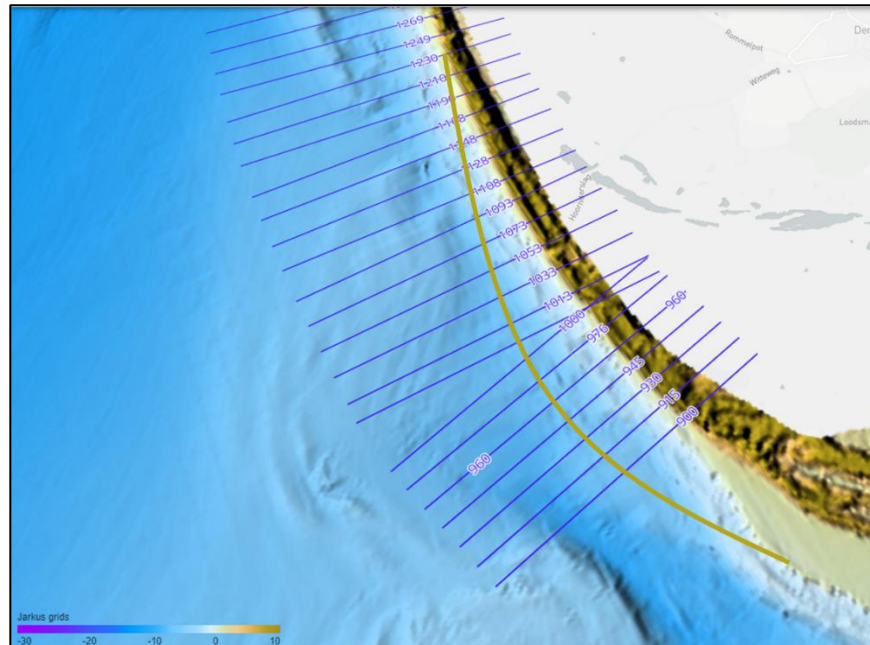
Kansen

- Directe voeding van de kust
- Vergroten zandvolumes kustzone
- Reduceren van de kustlangse getij-erosieprocessen (uit de kust drukken van getijstroming)
 - Gekoppeld aan het uit de kust drukken van het Molengat
- Bevorderen van duingroei

Risico's

- Korte levensduur
- Is deze suppletie wel mogelijk zonder morfologisch baggeren?
- Onverwachte effecten in het zeegatsysteem en met betrekking tot kustlijnhandhaving door het uit de kust drukken van het Molengat

Locatie suppletie volumes



Figuur A-4: Overzicht ligging suppletievariant Texel Zandmotor I.

Indicatieve volumes voor suppleties

In de onderstaande tabel zijn de indicatieve volumes per raai vak weergegeven.

Raai vak	Raai vakbreedte (m)	Indicatief volume (m ³ /m)	Aanleg hoogte (m NAP)	Helling
1230	195	400	+3	1:30
1210	200	500	+3	1:30
1190	210	500	+3	1:30
1168	210	500	+3	1:30
1148	200	800	+3	1:30
1128	200	800	+3	1:30
1108	175	800	+3	1:30
1093	175	800	+3	1:30
1073	200	800	+3	1:30
1053	200	900	+3	1:30
1033	200	900	+3	1:30
1013	160	900	+3	1:30
*1001	65	1000	+3	1:30
*1000	125	1000	+3	1:30
976	200	1000	+3	1:30
960	155	1000	+3	1:30
945	150	1000	+3	1:30
930	150	1300	+3	1:30
915	150	1400	+3	1:30
900	200	1400	+3	1:30
880	200	1400	+3	1:30
860	200	1400	+3	1:30
840	200	1000	+3	1:30

* stertraaien- raai vakbreedte is een indicatie

NB: Indicatieve volumes hoger nabij de vernauwing van het Molengat tussen de kust van Texel ZW en het eb-schild (raaien 860 – 1310) om zo de stroming uit de kust te drukken.

A.2.4 Rekenontwerp voor de suppletie Texel – Zandmotor II

Omschrijving:

Het idee achter deze suppletie is een kustlangse zandmotor, waarbij het Molengat hydraulisch gezien dicht wordt gezet om zo de stroming uit de kust te drukken. Deze suppletie wordt niet ontworpen in combinatie met morfologisch baggeren.

Eigenschappen suppletie

Eigenschap	Waarde
Locatie	Texel ZW
Strand/vooroever	Strand / Vooroever
Totale in situ volume suppletie	8.900.000 m ³ (afgerond)
Van/Tot	820 – 1033
Lengte suppletiegebied	2000 m
Toetsjaar	2020

Ontwerpparameters

- Indicatieve aanleghoogte bedraagt 1 m+NAP
- Indicatieve aanleghoogte (teen van de suppletie) varieert tussen de -3 m NAP en -6 m NAP, afhankelijk van het lokale kustprofiel.
- Verloop eerst vlak (platberm), vervolgens aflopend circa 1:30.
- Indicatieve volumes nemen toe naar het zuiden om zo het Molengat (hydraulisch) dicht te zetten.

Kansen & Risico's van het ontwerp

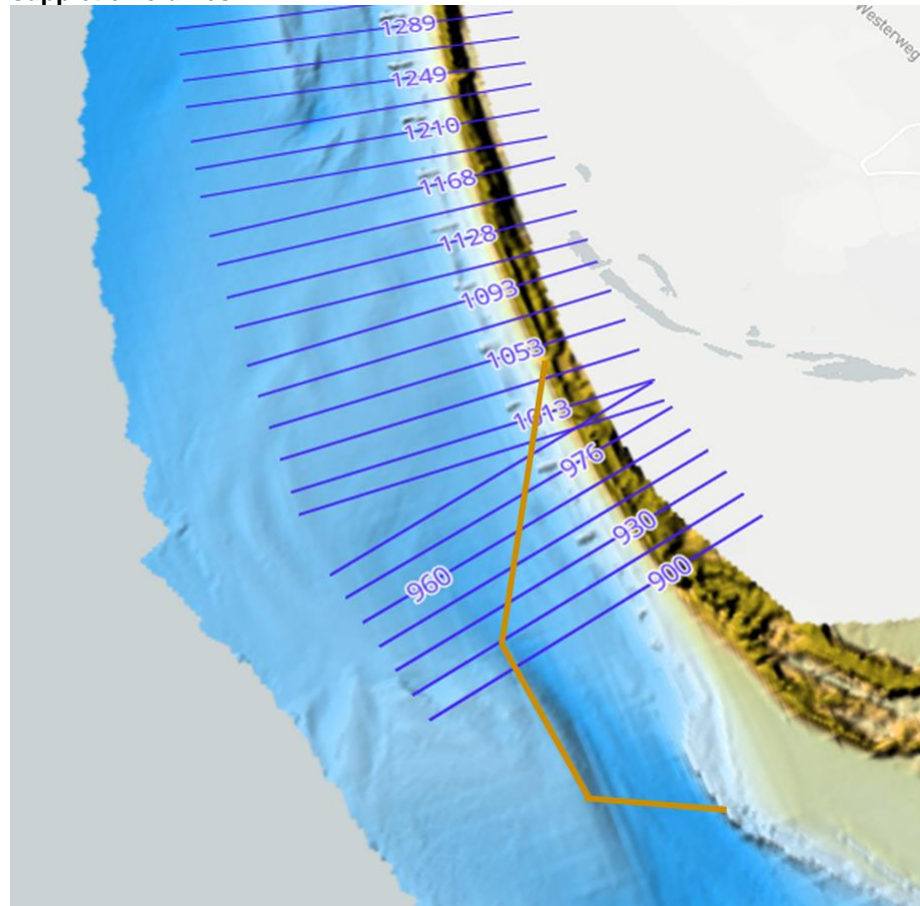
Kansen

- Directe voeding van de kust
- Vergroten zandvolumes kustzone
- Reduceren van de kustlangse getij-erosieprocessen (uit de kust drukken van getijstroming)
 - Gekoppeld aan het uit de kust drukken van het Molengat
- Bevorderen van duingroei
- Lange levensduur

Risico's

- Korte levensduur
- Is deze suppletie wel mogelijk zonder morfologisch baggeren?
- Onverwachte effecten in het zeegatsysteem en met betrekking tot kustlijnhandhaving door het uit de kust drukken van het Molengat
- Getijstroming gaat achterlangs / Vorming kortsluitgeul over het strand. Leidt dit tot negatieve effecten op kustlijnhandhaving?
- Insluiting recreanten
- Aanpassing vaarroutes
- Diepe gaten aan weerszijden van de zandmotor.
 - Vangen deze gaten sediment in? (zandvang)
 - Mogelijke negatieve effecten op kustlijnhandhaving?
 - i.v.m. verflauwen oevers / kan het strand verzakken i.v.m. reductie getijstroming?
- Zijn er onverwachte effecten in de rest van het zeegatsysteem? En wat is de impact hiervan op kustlijnhandhaving?

Locatie suppletie volumes



Figuur A-5: Overzicht ligging suppletievariant Texel Zandmotor I.

Indicatieve volumes voor suppleties

In de onderstaande tabel zijn de indicatieve volumes per raaiwak weergegeven.

Raaiwak	Raaiwaktbreedte (m)	Indicatief (m ³ /m)	Aanleghoogte (m NAP)	Helling
1033	200	1000	+1	1:30
1013	160	1000	+1	1:30
*1001	65	2000	+1	1:30
*1000	125	2000	+1	1:30
976	200	3000	+1	1:30
960	155	3000	+1	1:30
945	150	4000	+1	1:30
930	150	5300	+1	1:30
915	150	5300	+1	1:30
900	200	5300	+1	1:30
880	200	5300	+1	1:30
860	200	4600	+1	1:30
840	200	4600	+1	1:30
820	200	4600	+1	1:30

* sterraaien- raaiwaktbreedte is een indicatie

B Aanvullend onderzoek indicatoren

B.1 Ameland Noordwest

B.1.1 T0 analyse

Voor dit kustvak bestaat er een informele afspraak met RWS NN ligt om het kustprofiel van 2010 in stand te houden. Handhaven kustlijn met BKL als referentie is hier moeilijk. In het suppletieprogramma 2016-2019 is dit kustvak als volgt onderhouden:

'Ameland West (raaien 120-420)

Motivatie: Door het migreren van een strandhaak langs de kust treedt op Noordwest Ameland sinds begin jaren 90 structurele erosie op. De basiskustlijn is hier overschreden en herstel zal als gevolg van de structurele erosie niet optreden. Voor het gebied tussen km 1-7 zijn in het Provinciaal Overleg Kust Fryslân in 1997 afspraken gemaakt over het beheer van de basiskustlijn en de zeereep. Overschrijding van de basiskustlijn is hier in bepaalde mate acceptabel. In 2015 is een strandsuppletie (1.300.000 m³) uitgevoerd, waardoor onder meer aanvullende bescherming voor de duinen wordt geboden. Gezien de ervaringen uit het verleden en de doorgaande erosie is nieuw onderhoud nodig rond 2018-2019 om de afslag van de zeereep tussen paal 3 en 5 te beperken. Het volume van de suppletie in 2018-2019 is groter om een langere levensduur en werking van de suppletie te realiseren.

Naam: 1920_AmelandWest_S1619

Ontwerp: Strandsuppletie, 2.400.000 m³

Raaien: 120-420

Uitvoeringsperiode: 2018-2019

Ecologie: N2000-gebied Noordzeekustzone & duinen Ameland'

MKL

Een overzicht van het verloop van de MKL sinds 1965 wordt gegeven in Figuren B-1 en B-2 voor een aantal geselecteerde raaien (100, 200, 300 en 400). Deze raaien laten een duidelijk verschil in gedrag zien tussen de huidige periode en de wat oudere metingen. In de periode 1965 tot een 1995 vindt een uitbouw plaats door het aanlanden van de Strandhaak. Vanaf 1995 is er dan een afname van de MKL door het verhalen (opruimen) van de Strandhaak. Deze laatste periode wordt in meer detail beschouwd.

Tabel B-1: Overzicht van de uitgevoerde suppleties op Ameland NW.

	Jaar van uitvoering	Locatie (RSP of raaien)	Type	Volume [m³]
1	1979	1.6-2.2	Strand	300.000
2	1994	binnenkant	Strand	190.000
3	1997	1.2-3.0	Strand	510.000
4	2000	1.00-2.60	Strand	400.000
5	2004	2.00-3.20	Strand	400.000
6	2007	2.0-3.20	Strand	300.000
7	2007	1.95-3.02	Onderwater	1.200.000
8	2011	2.00-4.00	Strand	1.890.000
9	2015	1.00-2.60	Strand	1.300.000
10	2019	1.20 -4.00	Strand	2.760.000
			Totaal	9.250.000

Tussen 1995 en 2019 zijn er een aantal suppleties uitgevoerd (Tabel B-1). De verandering in MKL is daarom bepaald over de gehele periode (1995-2019) en voor de deelperiodes 2000-2010 en 2011-2019. Door te splitsen in deze deelperiodes kan de grote invloed van de 2011 suppletie beter in kaart worden gebracht.

De analyse van de kustlijnen richt zich op het gebied tussen raaien 100 en 400. In Figuur B-1 en Figuur B-2 zijn representatieve tijdseries van de MKL ligging voor dit kustvak weergegeven. Deze data vormt de basis van de hier uitgevoerde analyses. Voor de raaien gelegen tussen km100 en 400 is de MKL ligging en het verschil in ligging bepaald over de 3 periodes (1995-2019, 1995-2010, 2010-2019). Het verschil in ligging is gebaseerd op de lineaire trend over de periode. In Tabel B-2 zijn de resultaten samengevat. Het gebied is hierbij ingedeeld in 3 deelgebieden: Raai 100-200, raai 200-300, raai 300-400.

Het gebied tussen raai 100 tot 200 is gelegen aan de westzijde van de eilandkop. Hier gaat het strand vrijwel direct over in het Borndiep. In raai 100 (Figuur B-1, boven) ligt de huidige MKL positie sinds 2000 75 m zeewaarts t.o.v. de situatie van voor 1990. De sedimentpuls van de Bornrif Strandhaak geeft tijdelijk, tussen 1990 en 2000, een grote sprong zeewaarts. Sindsdien blijft de MKL eigenlijk redelijk stabiel. Raai 200 (Figuur B-1, onder) vertoont 2 periodes met sterke daling tussen 1992 en 2010. Sinds de grote strandsuppletie in 2010 blijft de MKL hier goed behouden en lijkt in deze raai zelfs iets toe te nemen. Een kleinere suppletie uitgevoerd in 2014 zal hier aan bijgedragen hebben.

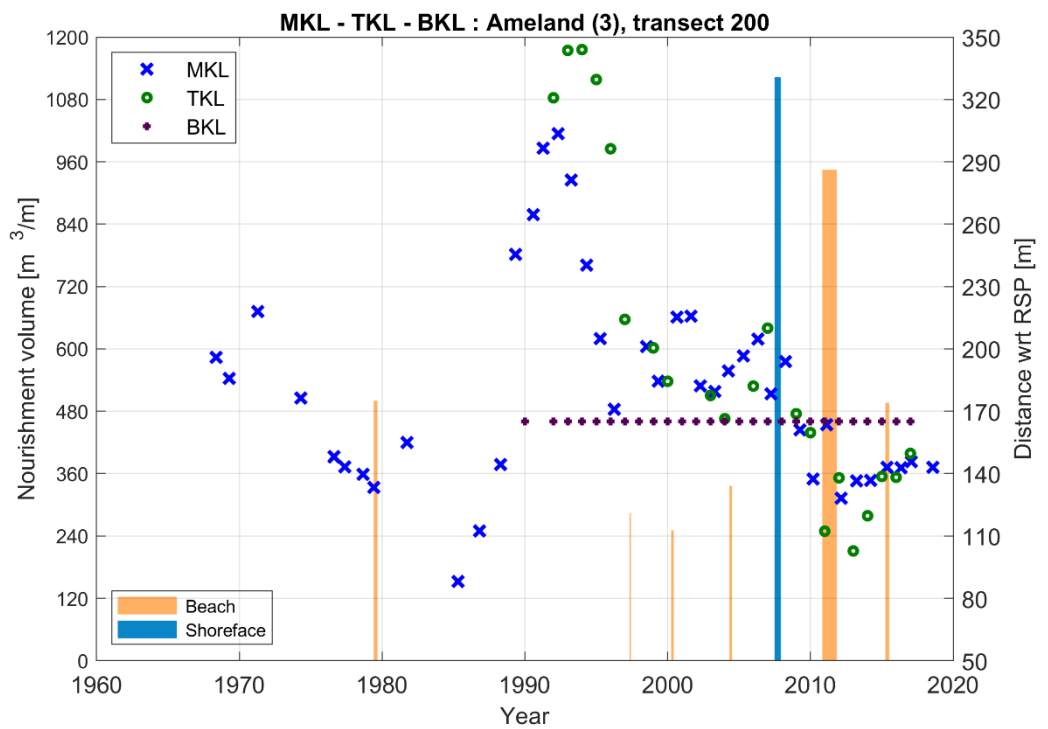
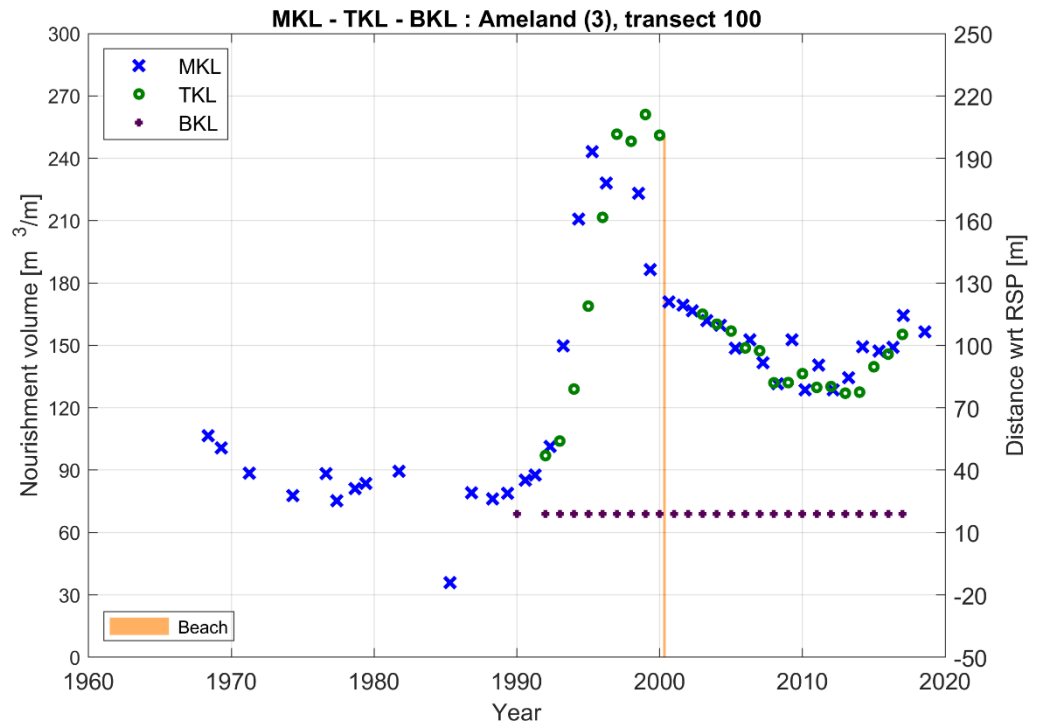
Gemiddeld over het kustvak tussen raai 100 en 200 neemt de MKL hier sinds 1995 met -75 m af, ofwel een gemiddelde landwaartse verplaatsing van -3,2 m/j. Het verloop van de MKL ligging vertoont initieel een sterke daling tussen 1995-2000 en een kleinere terugtrekking van -2,2 m/j over de periode 2000-2010. Na de grote suppletie in 2010 neemt de MKL dan gemiddeld met 0,2 m/j toe. Na suppletie zijn de verliezen veel hoger dan het gemiddelde. De maximale terugtrekking is hier --79 m/j.

Ook in raai 300 zien we een sterke afname van de MKL ligging sinds 1993. Deze afname is vrijwel lineair tot de suppletie in 2010. De suppletie verplaatst de MKL tijdelijk terug zeewaarts maar sindsdien volgt weer een sterke terugtrekking. De terugtrekkingsnelheid tussen 2010 en 2015 is vrijwel gelijk aan die over de periode 1992-2010. Ook in de jaren 2015-2018 trekt de kustlijn sterk terug. Gemiddeld over het kustvak (raai 200-300) geeft dit een totale afname van -85 m sinds 1995 (-3,5 m/j). De terugtrekking over de periode 2000-2010 ligt met -4,1 m/j hoger. De meest recente periode, 2011-2019, vertoont een veel kleinere waarde van -1,6 m/j. Deze kleinere waarde komt mede door de suppletie in 2015, die het gemiddelde duidelijk beïnvloedt.

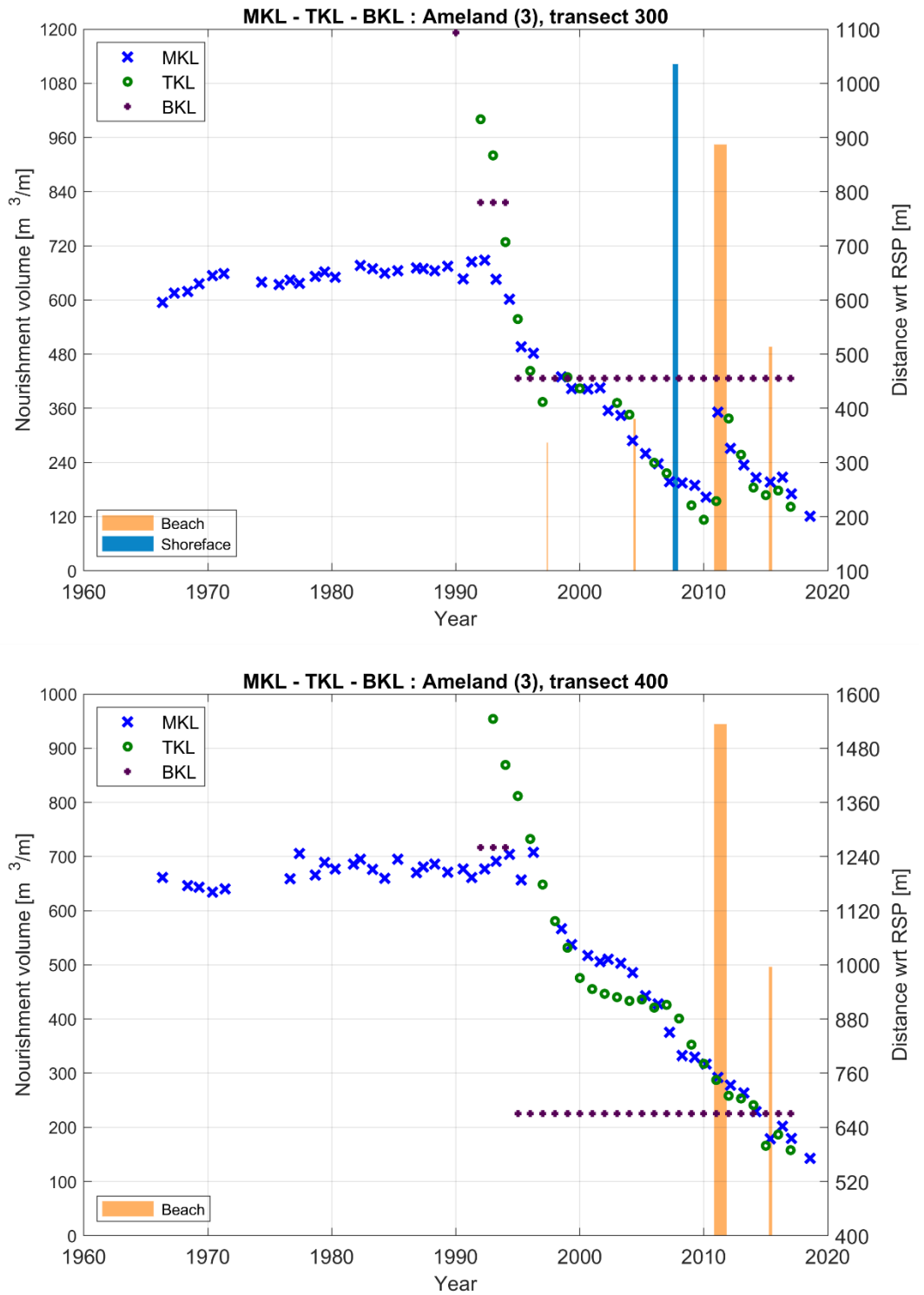
Raai 400 vertoont een overeenkomstig verloop in MKL ligging aan raai 300 alleen de waarden zijn hier hoger. Tot 1996 blijft de MKL ver zeewaarts liggen door de aanwezigheid van een grote strandvlakte (de Strandhaak). Sinds 1996 zien we hier een sterke afname van de MKL door het opruimen (verplaatsen) van deze strandvlakte. Suppleties hebben in dit profiel vrijwel geen invloed op de afname van de MKL. Gemiddeld over raai 300-400 zien we een afname van 407 m (-17 m/j). Na opruimen van de bulk van het platform nemen de snelheden wel sterk af. In de periode 2011-2019 is deze afname nog -4,1 m/j. De maximaal geobserveerde terugtrekking is -43 m/j.

De hierboven gepresenteerde resultaten kunnen als volgt geïnterpreteerd worden. Na suppletie is het kustprofiel sterk uit evenwicht. Er treedt dan een grote terugtrekking op. In het gebied tussen raaien 200 en 400 ligt de erosiesnelheid rond de 40 m/j. Nabij de eilandkop zijn de verliezen nog veel groter (tot 79 m/j). Na deze initiële respons nemen de verliezen af. Gemiddeld ligt de terugtrekking dan tussen de 2 en 4 m/j.

Een tweede observatie die uit deze data volgt is dat de grootste verandering van de MKL plaats vindt tussen raai 300 en 400 (4 m/j) en de verandering neemt af richting raai 100 (0-2m/j). In termen van maximale verandering (snelheid) zien we juist een tegenovergesteld beeld. In het vak 100-200 is de maximaal geobserveerde terugtrekking met -79 m/j het dubbele van de terugtrekking in raai 300-400. Dit verschil laat zien dat in raai 300-400 er een structurele erosie plaatsvindt. Dus jaarlijks trekt de kust zich terug. De terugtrekking bij raai 100 is juist incidenteel. Als er zand in het profiel aanwezig is, dan wordt dit met grote snelheid afgevoerd. Zodra dit afgevoerd is, nemen de snelheden weer af. Deze inzichten zijn belangrijk voor de interpretatie van de levensduur van de suppletie.



Figuur B-1: Tijdsree van de MKL en BKL ligging en de uitgevoerde suppleties voor raaien 100 en 200.

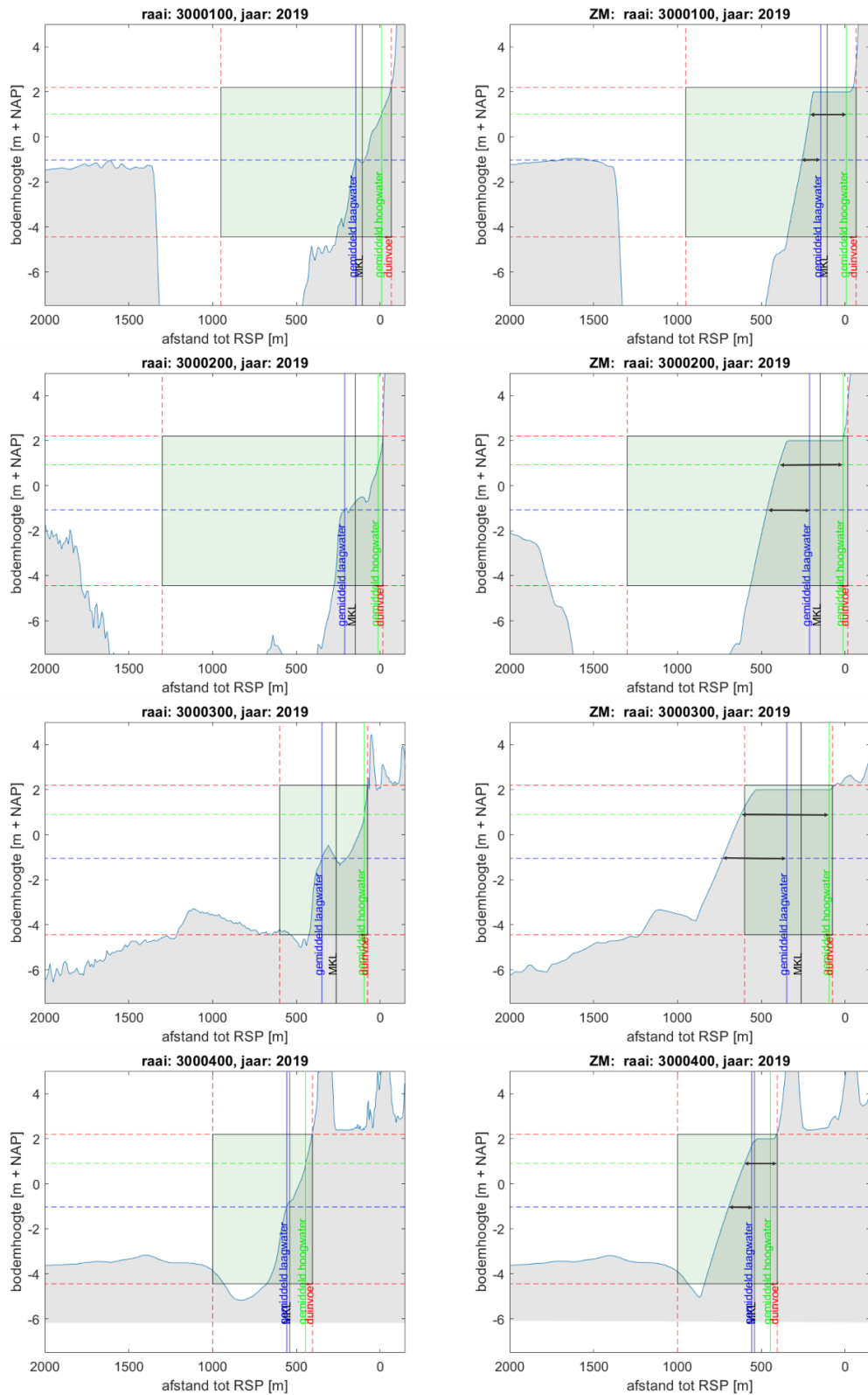


Figuur B-2: Tijdsree van de MKL en BKL ligging en de uitgevoerde suppleties voor raaien 300 en 400.

Tabel B-2: Een overzicht van de gemiddelde MKL ligging en de verandering in ligging (m/j) voor het gebied tussen raaien 100 en 400 over de periodes 1995-2019, 2000-2010 en 2011, 2019.

	MKL	1995 - 2019		2000 - 2010		2011 - 2019		Maximale verandering
		Positie	Verandering	Positie	Verandering	Positie	Verandering	
↑ 400	Erosie van de Bornrif Strandhaak	<i>in 1995</i>	<i>2019-1995</i>	<i>in 2000</i>	<i>2010-2000</i>	<i>in 2019</i>	<i>2019-2011</i>	
		<i>in 2019</i>	<i>in m/j</i>	<i>in 2010</i>	<i>in m/j</i>	<i>in 2011</i>	<i>in m/j</i>	
300	Overgang naar Bornrif Strandhaak. Eroderend	225 m	-407 m	122 m	-264 m	-83 m	-99 m	
		-182 m	-17,0 m/j	-143 m	-11,0 m/j	-182 m	-4,1 m/j	-37 m/j
200	Smalle kustzone. Centrale deel vd eilandkop	1 m	-85 m	-2 m	-98 m	-46 m	-37 m	
		-84 m	-3,5 m/j	-101 m	-4,1 m/j	-84 m	-1,6 m/j	-43 m/j
100	Eilandkop overgang naar Borndiep	137 m	-75 m	93 m	-52 m	56 m	6 m	
		62 m	-3,2 m/j	41 m	-2.2 m/j	62 m	0,2 m/j	-79 m/j
↓	Geulwand langs Borndiep							

B.1.2 Invloed Zandmotor suppletie op het dwarsprofiel (T1)



Figuur B-3: Een overzicht van de T0 (links) en ZM (rechts) bodem voor 4 geselecteerde raaien. In zowel de linker als rechterkolom geven de lijnen de ligging van de GLW (blauw), GHW (groen) en rekenschild van de MKL (groene vlak) voor de T0 situatie. Deze lijnen zijn gebruikt om de ligging van indicatoren voor de ZM te bepalen.

B.2 Zuidwest Texel

B.2.1 T0 analyse

MKL

De MKL analyse kunnen we alleen uitvoeren op de profielen noordwaarts van raai 900, ten zuiden hiervan is geen BKL gedefinieerd. We kunnen hier wel een MKL berekenen, maar die wijkt sterk af van de noordelijke waarden door de aanwezigheid van de strandvlakte van de Hors.

Tabel B-3: Overzicht zandsuppleties Zuidwest Texel ten zuiden van raai 1200.

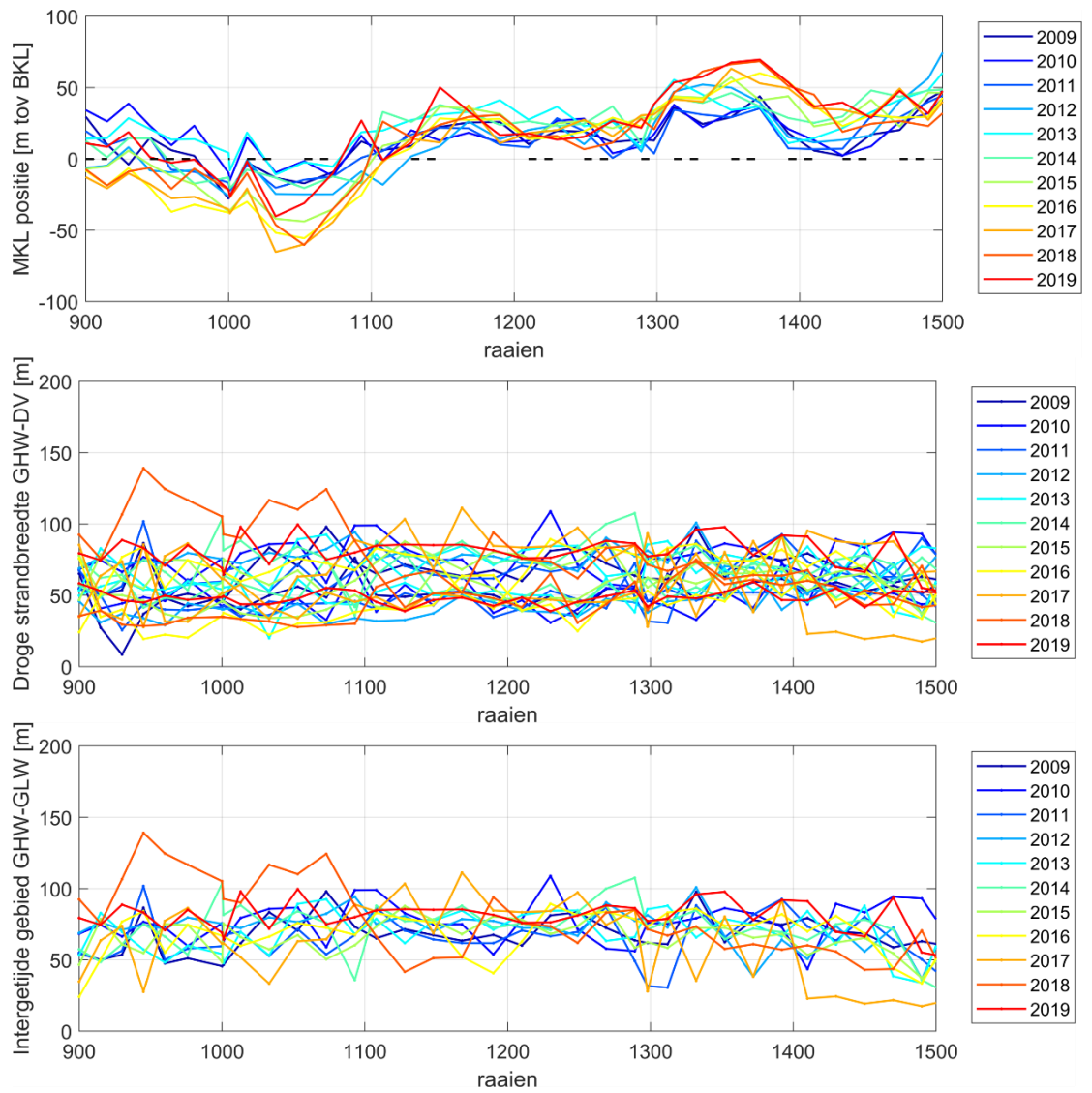
Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ) [m3]	Volume [m3/m]
Texel-Zuidwest	1994	930	1210	strand	762.000	272
Zuidwest	1997	1038	1143	strand	340.000	324
Eierland	1999	2600	2860	strand	1.219.000	469
West	2000	1703	1833	strand	246.000	189
Zuid	2000	1001	1190	strand	357.000	189
Zuidwest / Den Hoorn	2003	900	1148	vooroever	972.000	392
Zuidwest	2005	880	1063	strand	302.000	165
Zuidwest	2007	900	1350	vooroever	2.003.000	445
Zuidwest	2009	900	1070	strand	400.000	235
Zuidwest	2012	900	1200	strand	753.000	251
Zuidwest	2017	900	1190	strand	895.000	309

In Figuur B-4 worden de liggingen van de MKL, de droge strandbreedte (afstand GHW – DV) en de breedte van het intergetijdegebied (afstand GHW-GLW) weergegeven. De MKL is hierbij bepaald volgens de 2020 rekenschijf.

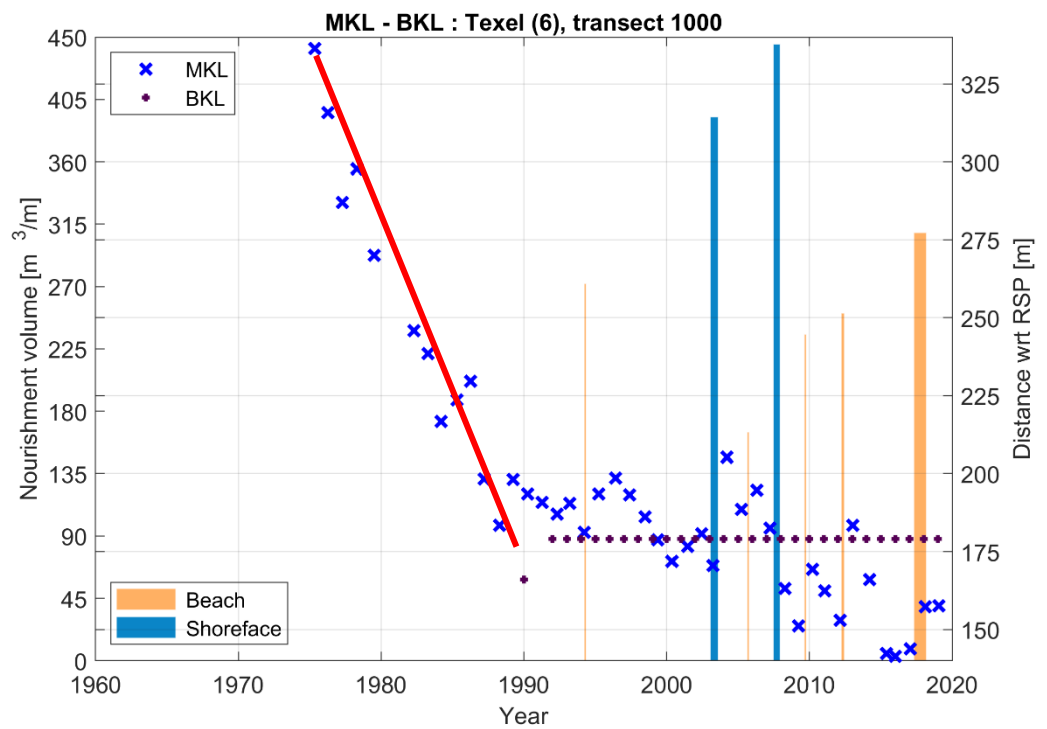
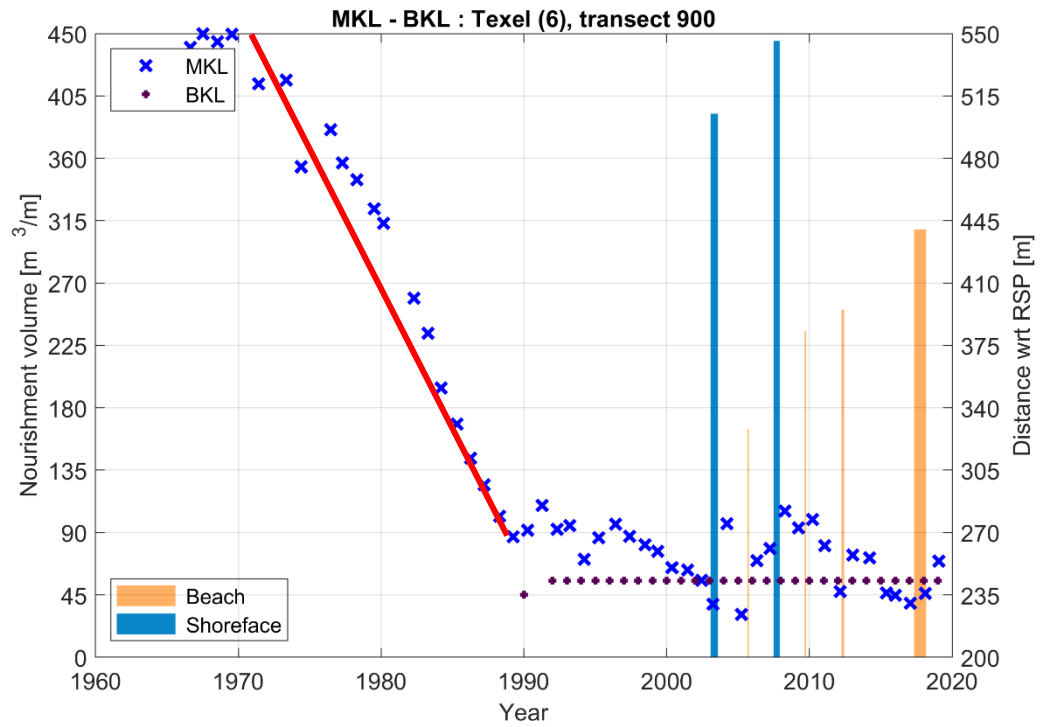
De MKL vertoont over het algemeen een grillig verloop door de tijd. De lijnen variëren binnen een bandbreedte van zo'n 40 tot 50m. Tussen raaien 1100 en 1500 ligt de MKL zeewaarts van de BKL, ten zuiden van raai 1100 ligt de MKL rond of landwaarts van de BKL. In de periode 2009-2017 is de MKL hier structureel afgenomen met zo'n 50m. Het grillige verloop van de MKL posities is gerelateerd aan de vele suppleties die hier uitgevoerd zijn. In Figuur B-5 en Figuur B-6 wordt dit geïllustreerd aan de hand van de tijdseries voor 4 geselecteerde raaien. Deze tijdseries laten goed zien dat voor 1990 er een structurele erosie van de kustlijn plaats vond. Deze erosie lag zo rond de 20-25m/jaar. Lokaal worden nog hogere erosiesnelheden geobserveerd. Zo is raai 1090 met bijna 40m/j teruggetrokken tussen 1980 en 1990.

Door veelvuldig suppleren wordt de kustlijnligging sinds 1990 redelijk op positie gehouden. In raai 900 blijft de MKL ligging sinds 1990 rond de BKL slingeren. Na suppletie gaat de MKL vooruit (zo'n 50m) en in de volgende jaren trekt de MKL weer terug tot de volgende suppletie. Er ontstaat zo een soort zaagtandbeweging in de MKL ligging. Raai 1093 laat zien dat ondanks de suppletie inspanning de MKL zich toch langere tijd landwaarts van de BKL kan bevinden.

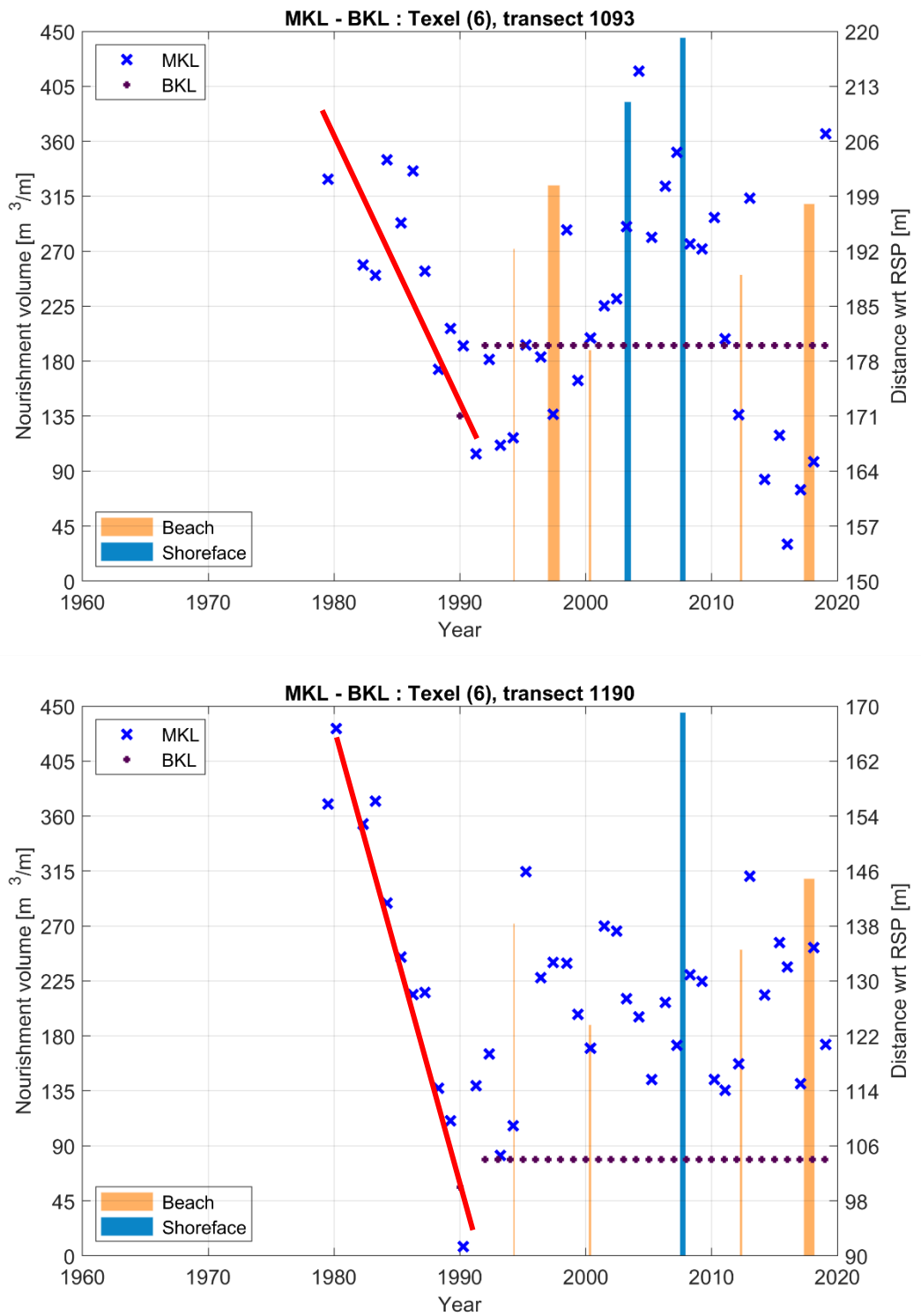
Ook in de ligging van de GLW en GHW is een dergelijke variatie te zien. Deze variaties worden weergegeven in Figuur B-4 middels de strandbreedte en de breedte van het intergetijdegebied. De droge strandbreedte (gedefinieert als het de afstand tussen GHW en DV) varieert over het algemeen tussen de 40 en 100m met een enkele uitschieter naar boven en onder. Ook het intergetijdegebied varieert zo tussen de 50 en 100m. Een conclusie die we hier kunnen trekken is dat met het huidige suppletie beleid een minimum strandbreedte gehandhaafd wordt van rond de 40m tot de RSP.



Figuur B-4: Overzicht van de ligging van de MKL, de droge strandbreedte en de breedte van het intergetijdegebied tussen 2009 en 2019.

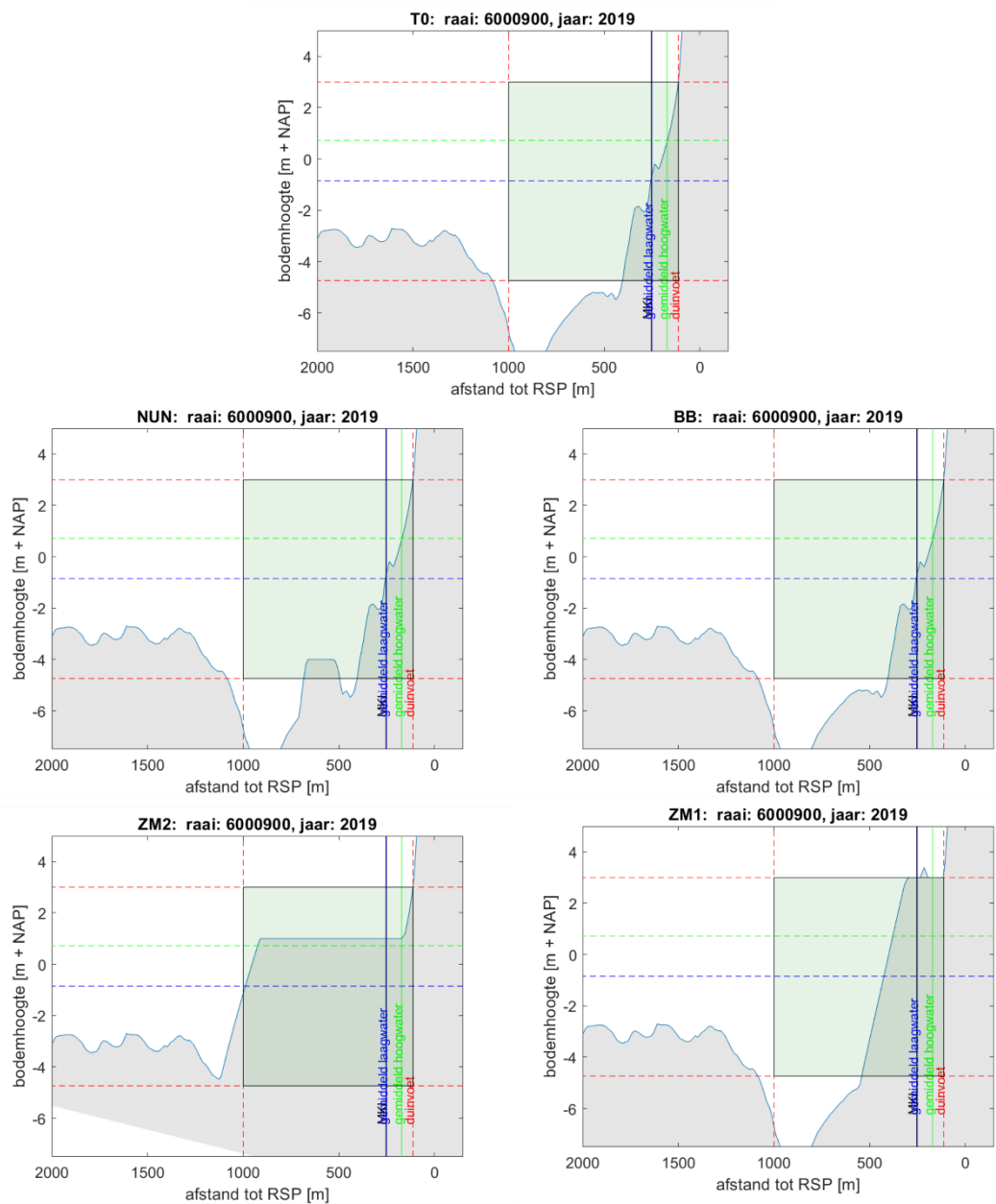


Figuur B-5: Tijdsree van de MKL en BKL ligging en de uitgevoerde suppleties voor raaien 900 en 1000. Rode lijn geeft een schatting van de natuurlijke trend in kustlijnertugtrekking.

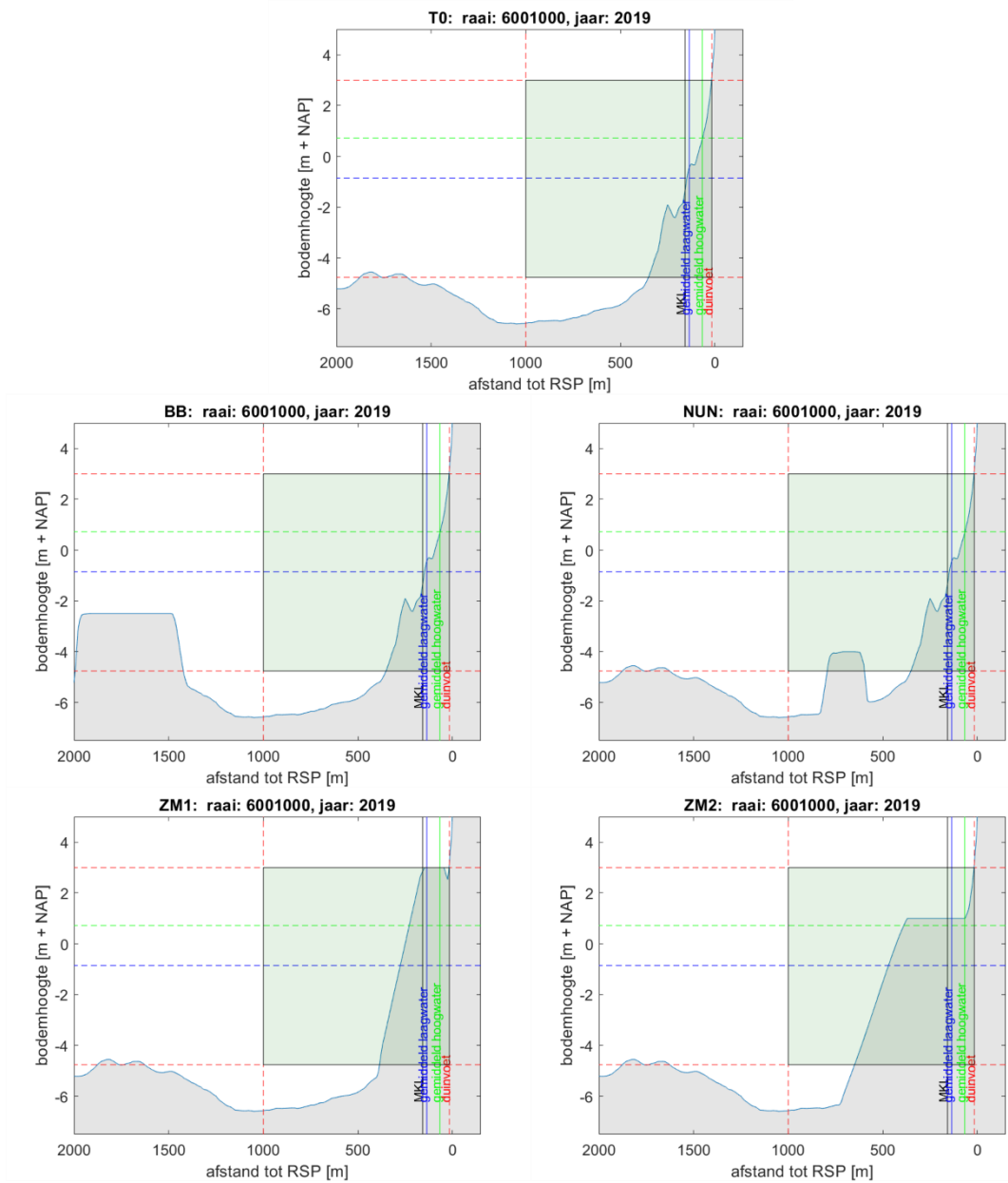


Figuur B-6: Tijdsree van de MKL en BKL ligging en de uitgevoerde suppleties voor raaien 1093 en 1190. Rode lijn geeft een schatting van de natuurlijke trend in kustlijnertugtrekking.

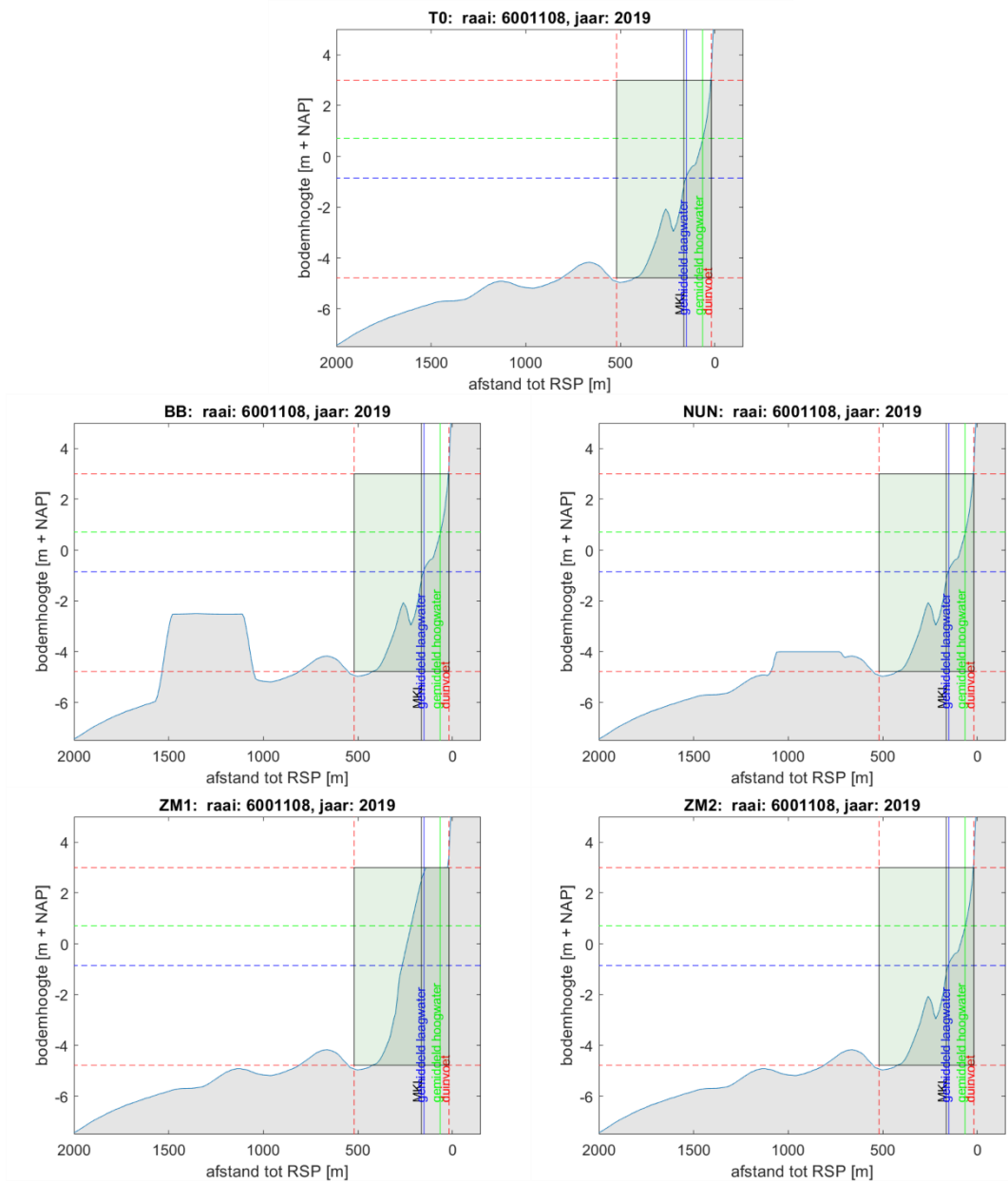
B.2.2 Dwarsprofielen voor de verschillende suppletievarianten.



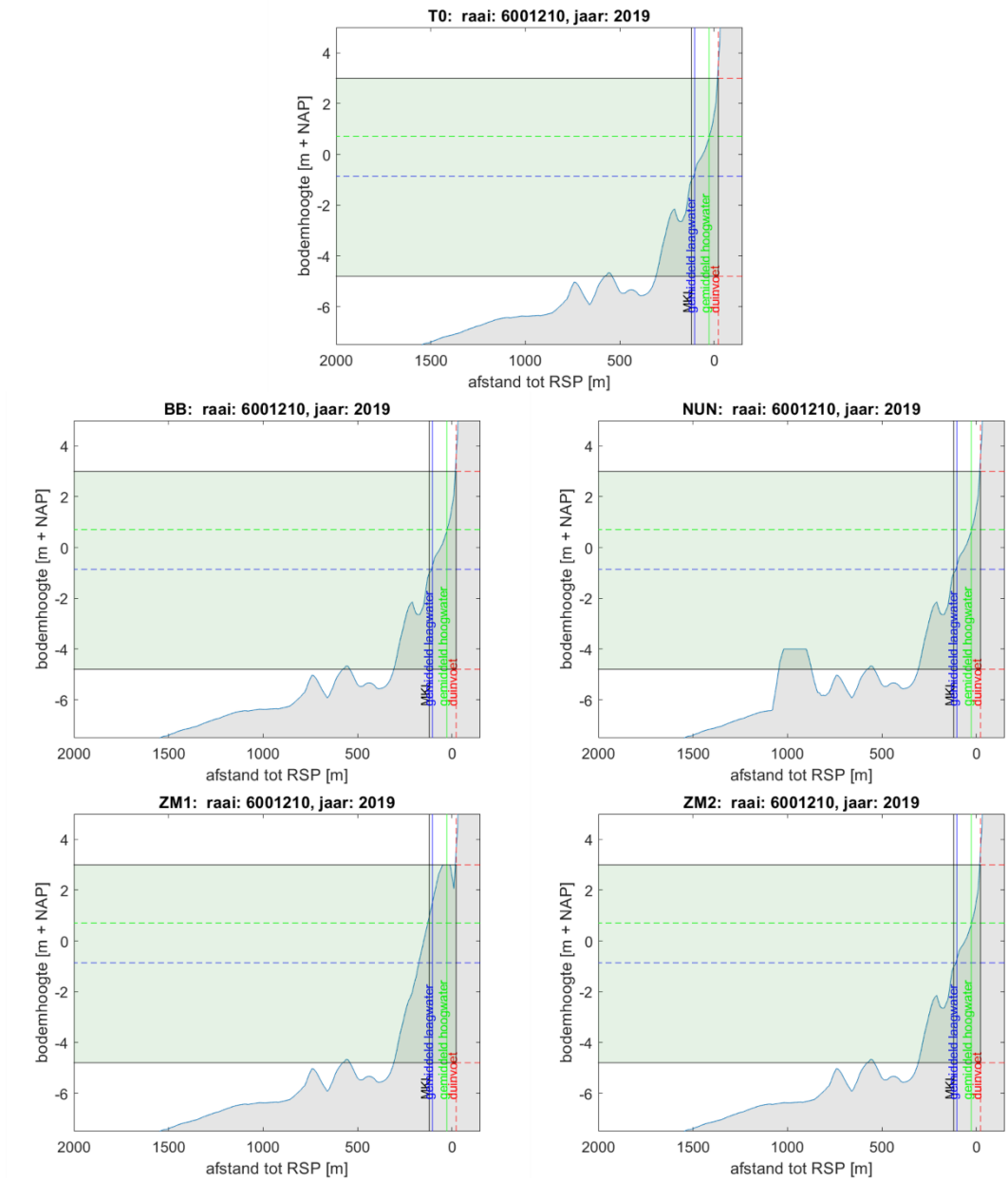
Figuur B-7: Een dwarsprofiel van raai 900 van (boven) de T0 bodem met ligging van de GLW (blauw), GHW (groen) en rekenschijf van de MKL (groene vlak) op basis van de 2020 toetsing. Deze lijnen zijn gebruikt om de ligging van indicatoren voor de suppletievarianten te bepalen (onderste 4 deelfiguren).



Figuur B-8: Een dwarsprofiel van raai 1000 van (boven) de T0 bodem met ligging van de GLW (blauw), GHW (groen) en rekenschijf van de MKL (groene vlak) op basis van de 2020 toetsing. Deze lijnen zijn gebruikt om de ligging van indicatoren voor de suppletievarianten te bepalen (onderste 4 deelfiguren).



Figuur B-9: Een dwarsprofiel van raai 1106 van (boven) de T0 bodem met ligging van de GLW (blauw), GHW (groen) en rekenschijf van de MKL (groene vlak) op basis van de 2020 toetsing. Deze lijnen zijn gebruikt om de ligging van indicatoren voor de suppletievarianten te bepalen (onderste 4 deelfiguren).



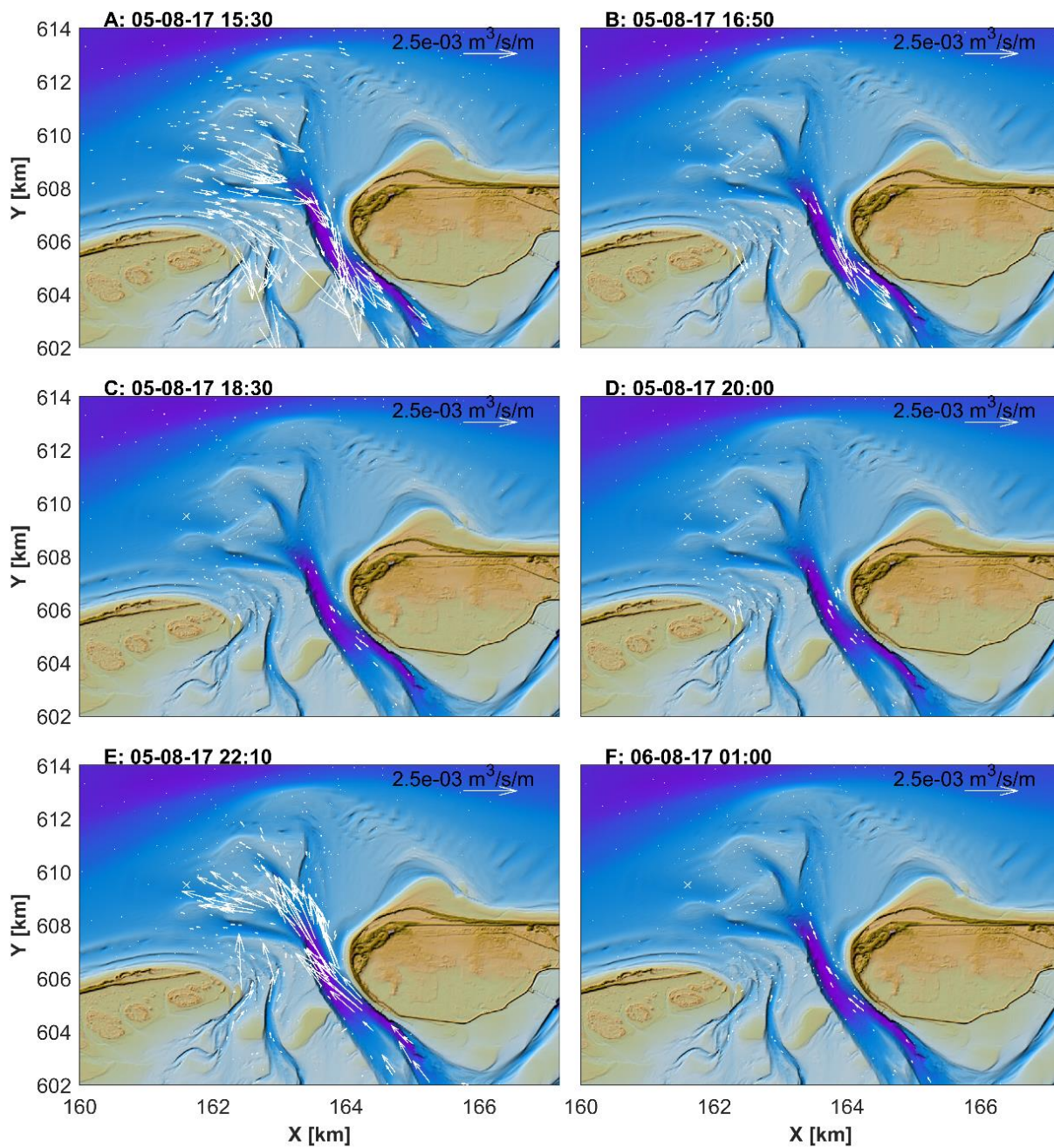
Figuur B-10: Een dwarsprofiel van raai 1210 van (boven) de T0 bodem met ligging van de GLW (blauw), GHW (groen) en rekenschijf van de MKL (groene vlak) op basis van de 2020 toetsing. Deze lijnen zijn gebruikt om de ligging van indicatoren voor de suppletievarianten te bepalen (onderste 4 deelfiguren).

Tabel B-4: Een overzicht van de ligging van Gemiddeld Laag Water (GLW), Gemiddeld Hoog Water (GHW), DuinVoet (DV), StrandBreedte (SB) en breedte intergetijdezone (IG)

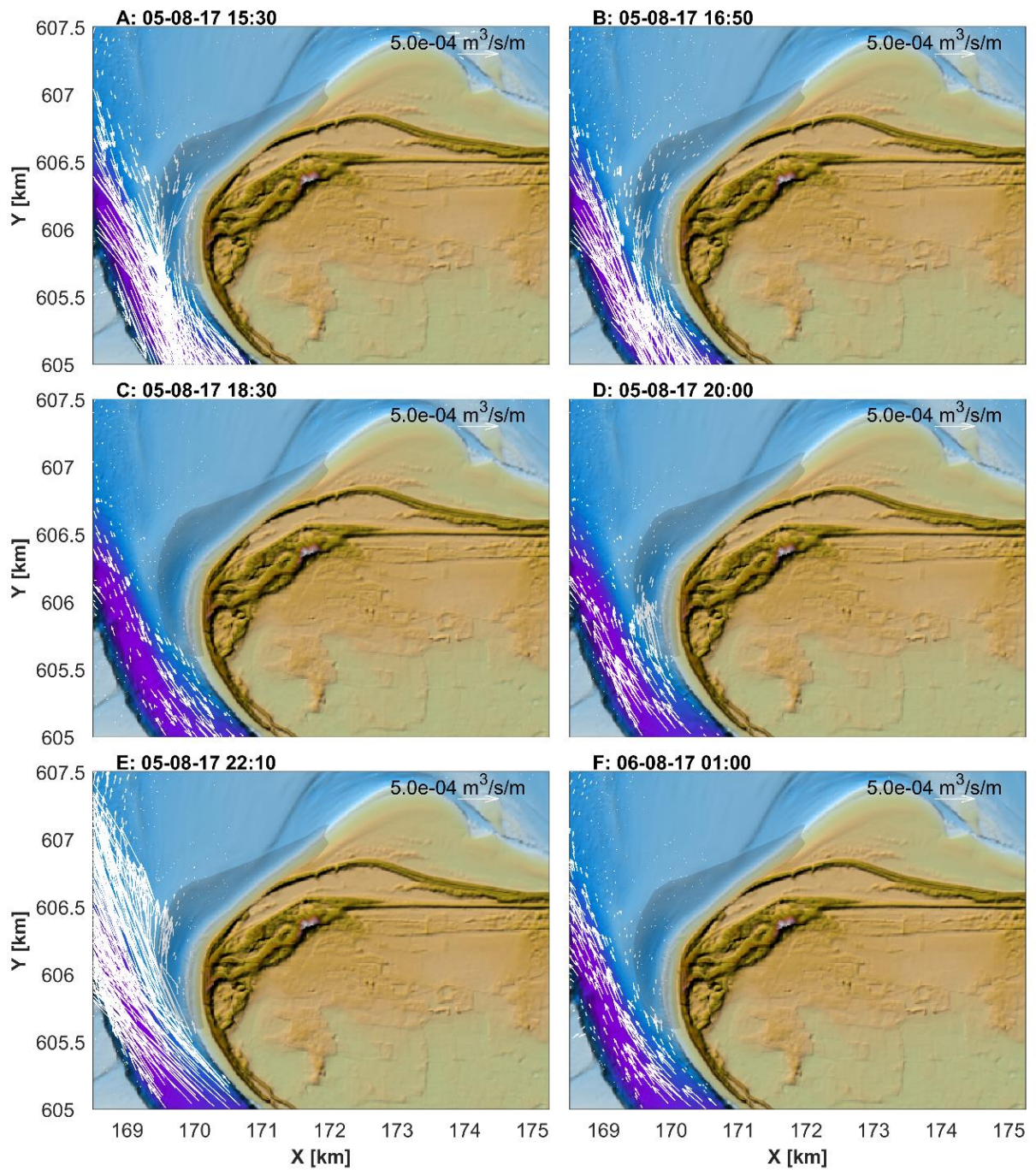
Raai	Variant	GLW [m]	GHW [m]	DV [m]	SB [m]	IG [m]
900	T0	250	170	114	56	80
	BB	250	170	114	56	80
	NUN	250	170	114	56	80
	ZM1	430	290	114	176	140
	ZM2	980	924	114	810	56
945	T0	222	132	88	44	90
	BB	222	132	88	44	90
	NUN	222	132	88	44	90
	ZM1	356	310	95	215	46
	ZM2	754	680	134	546	74
1000	T0	150	65	19	46	85
	BB	150	65	19	46	85
	NUN	150	65	19	46	85
	ZM1	275	230	19	211	45
	ZM2	469	389	64	325	80
1053	T0	174	78	32	46	96
	BB	174	78	32	46	96
	NUN	174	78	32	46	96
	ZM1	287	240	32	208	47
	ZM2	174	78	32	46	96
1108	T0	155	64	22	42	91
	BB	155	64	22	42	91
	NUN	155	64	22	42	91
	ZM1	267	230	140	90	37
	ZM2	155	64	22	42	91
1148	T0	132	46	-1	47	86
	BB	132	46	-1	47	86
	NUN	132	46	-1	47	86
	ZM1	255	220	-1	221	35
	ZM2	132	46	-1	47	86
1210	T0	109	27	-17	44	82
	BB	109	27	-17	44	82
	NUN	109	27	-17	44	82
	ZM1	175	128	-17	145	47
	ZM2	109	27	-17	44	82

C Modelresultaten Ameland

C.1 T0 modelresultaten

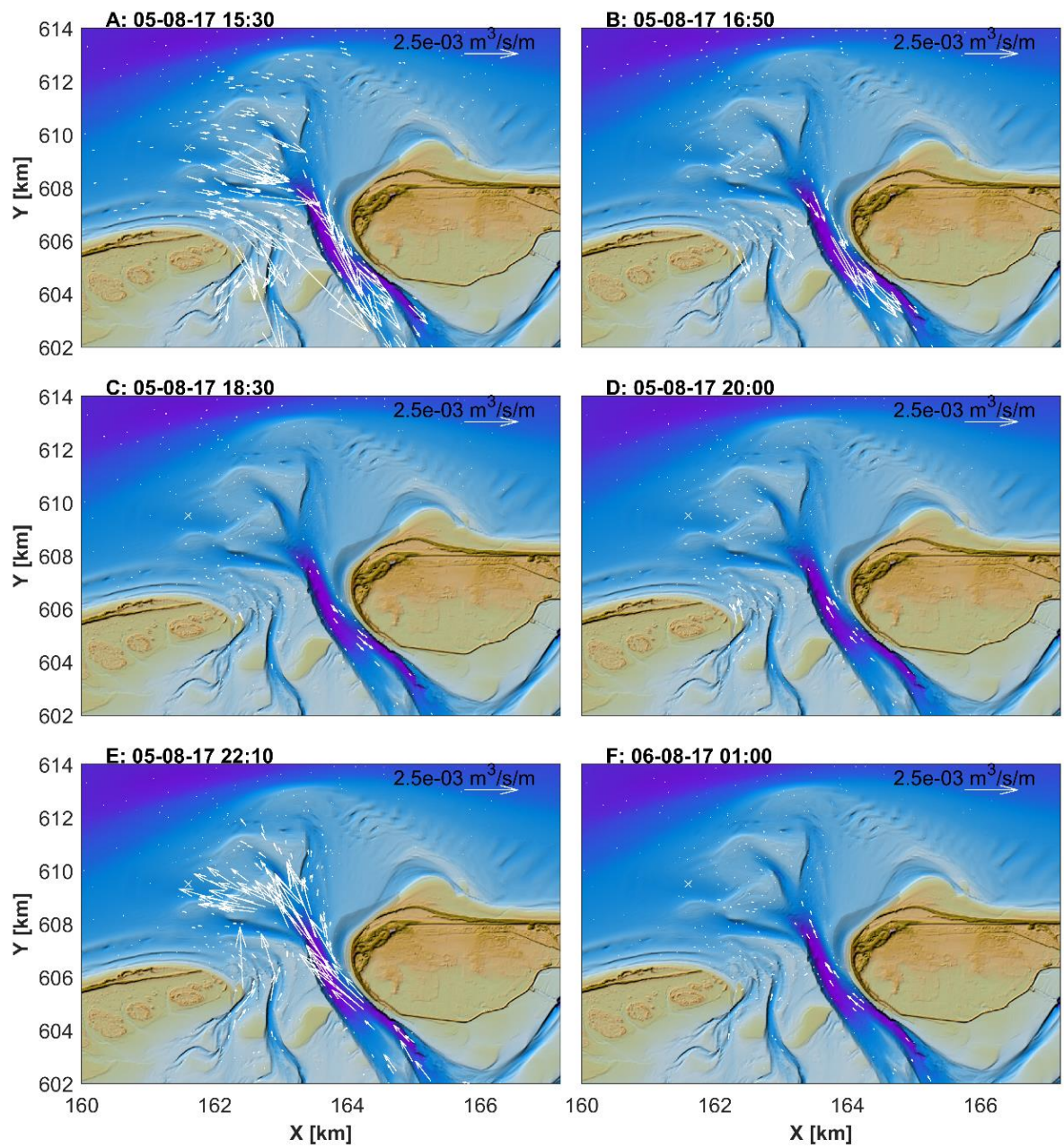


Figuur C-1: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten in het zeegat van Ameland op basis van de T0 getijsimulatie.

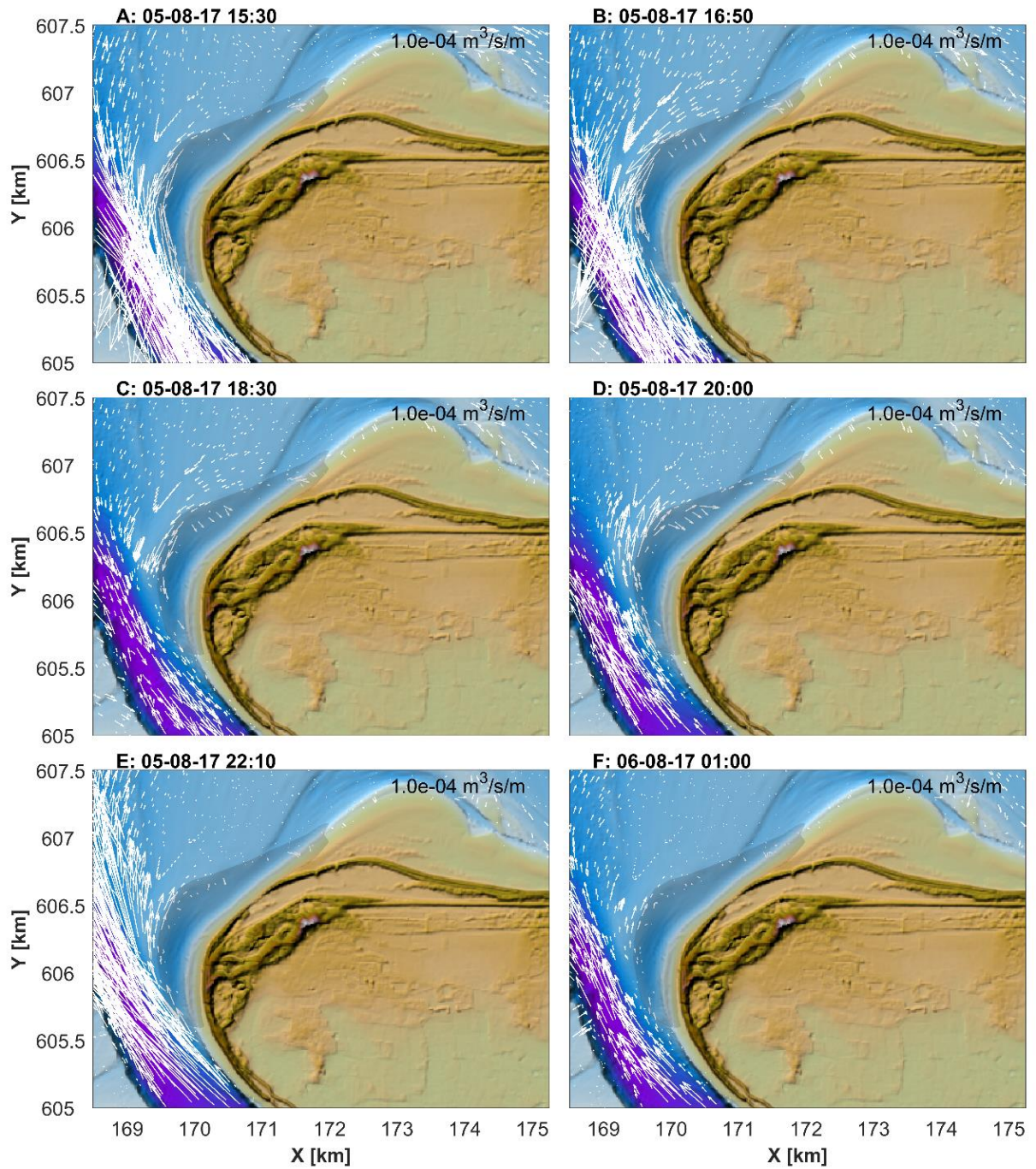


Figuur C-2: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten rond Ameland Noordwest op basis van de T0 getijsimulatie.

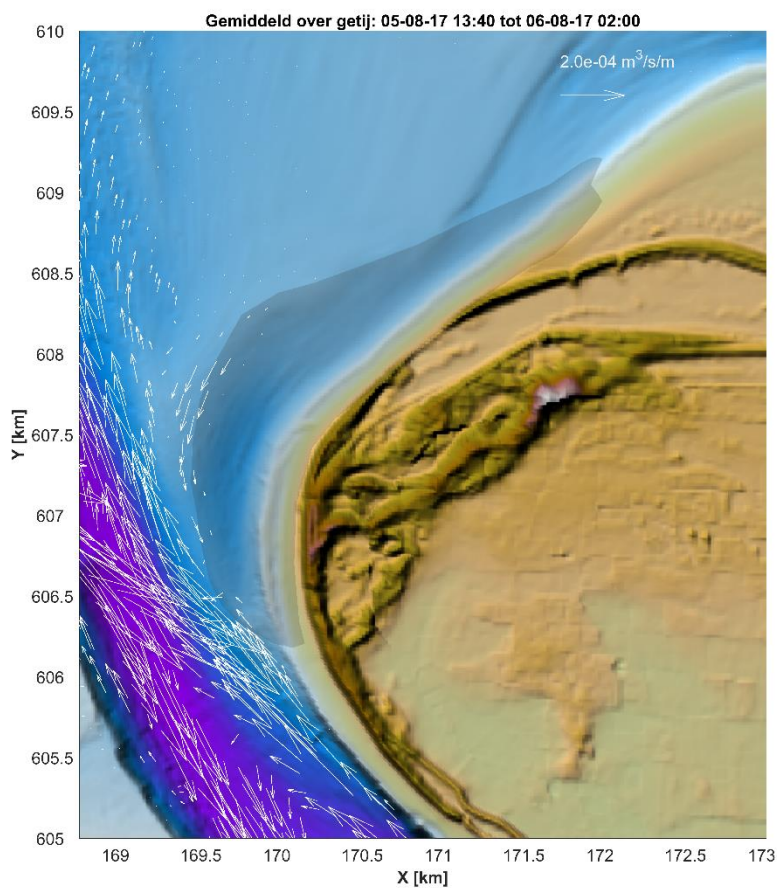
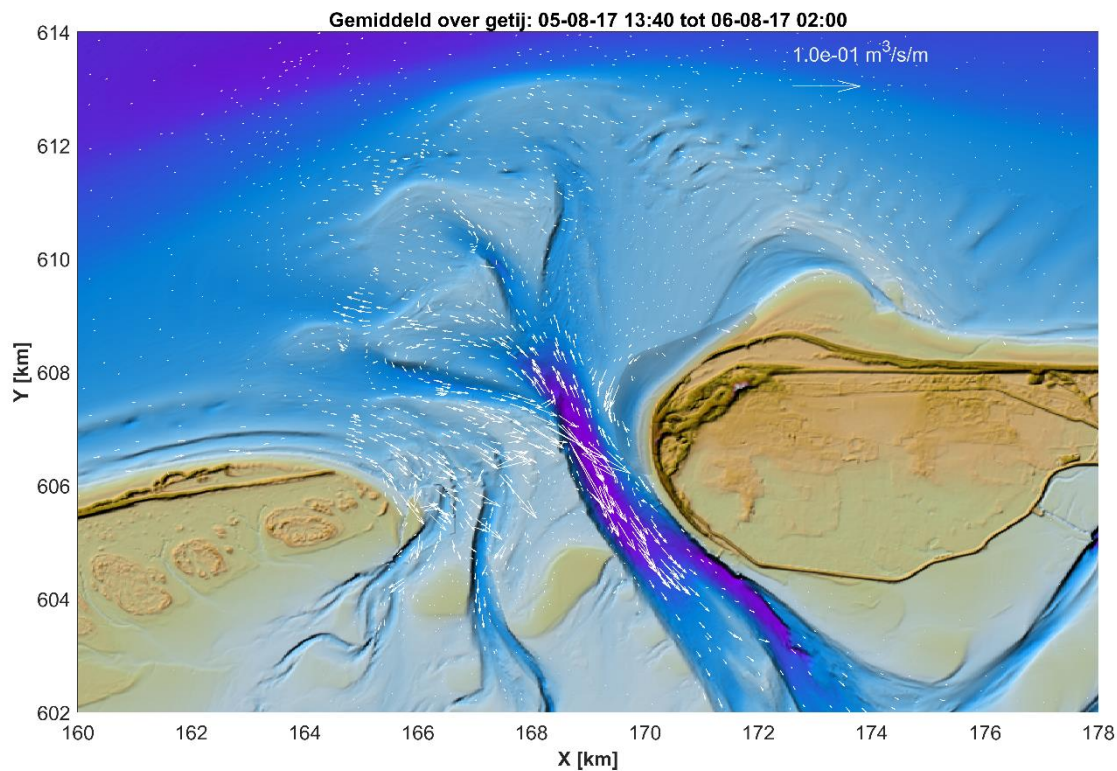
C.2 ZM variant



Figuur C-3: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané representatieve jaarlijkse transporten in het zeevat van Ameland op basis van de ZM variant.

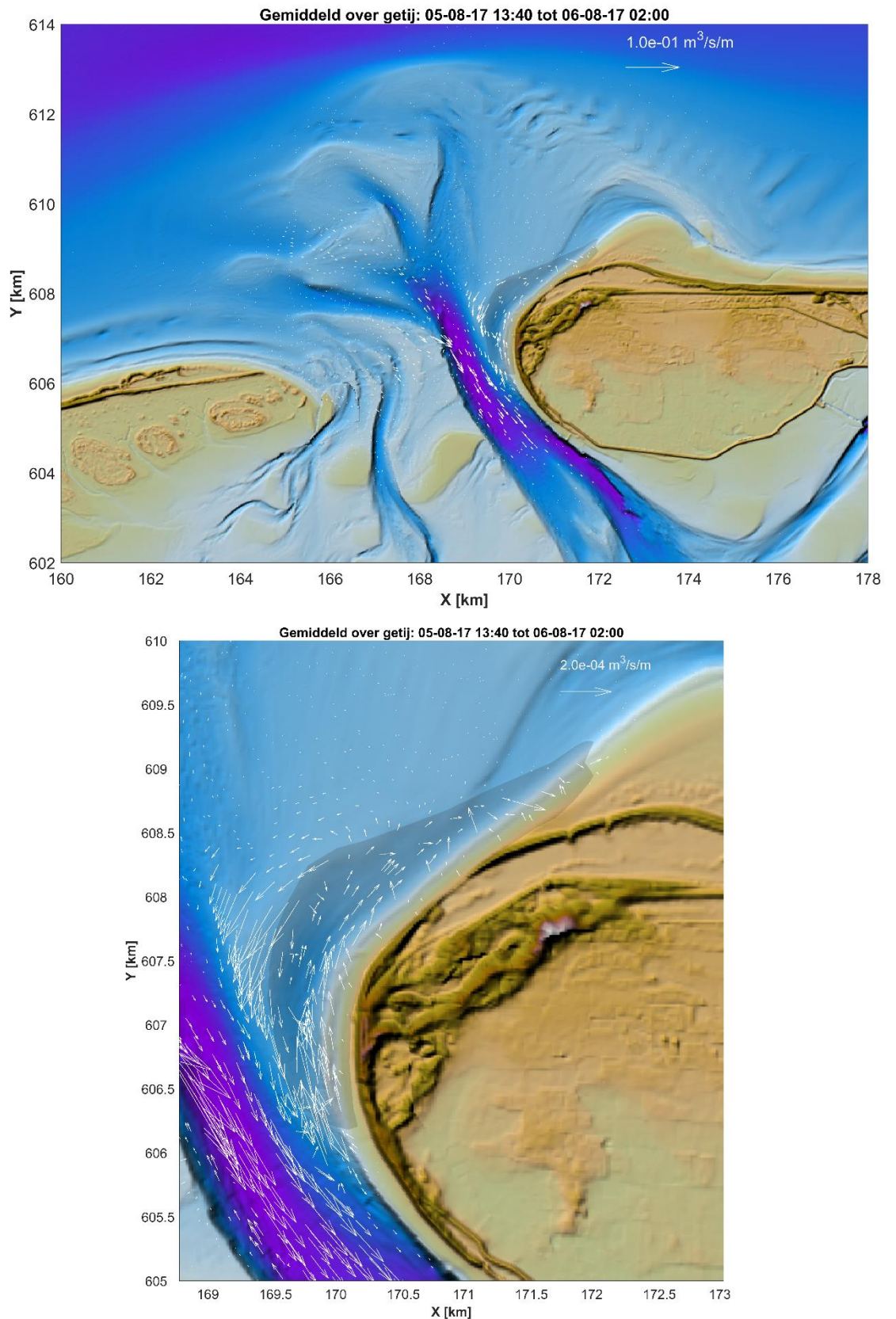


Figuur C-4: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané representatieve jaarlijkse transporten rond Ameland NW op basis van de ZM variant.



Figuur C-5: Residuele getij-gemiddeld sedimenttransport (alleen getij) in het Zeegat van Ameland (boven) en ter hoogte van Ameland NW (midden).

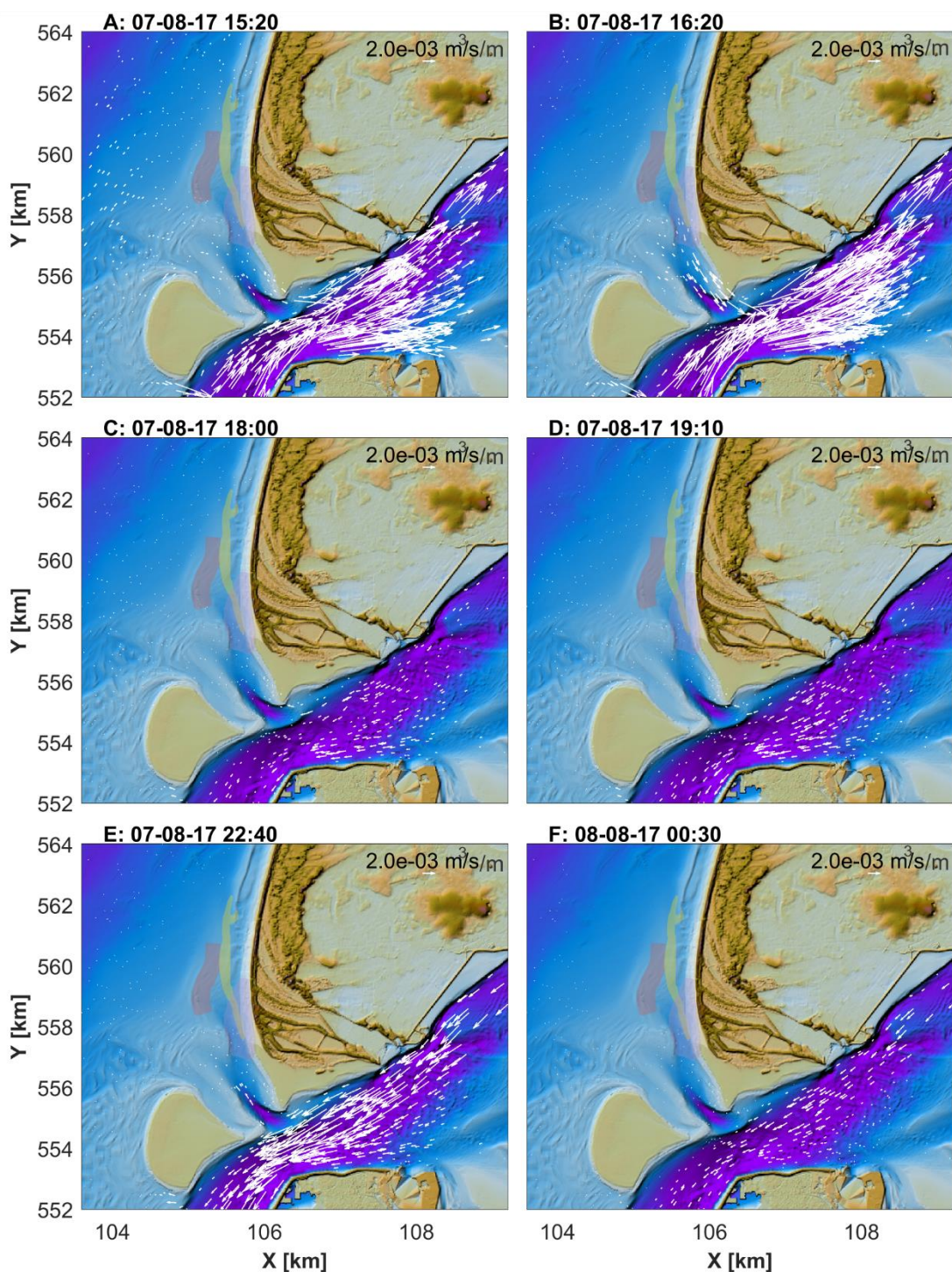
C.3 Verschil tussen T0 en de ZM variant



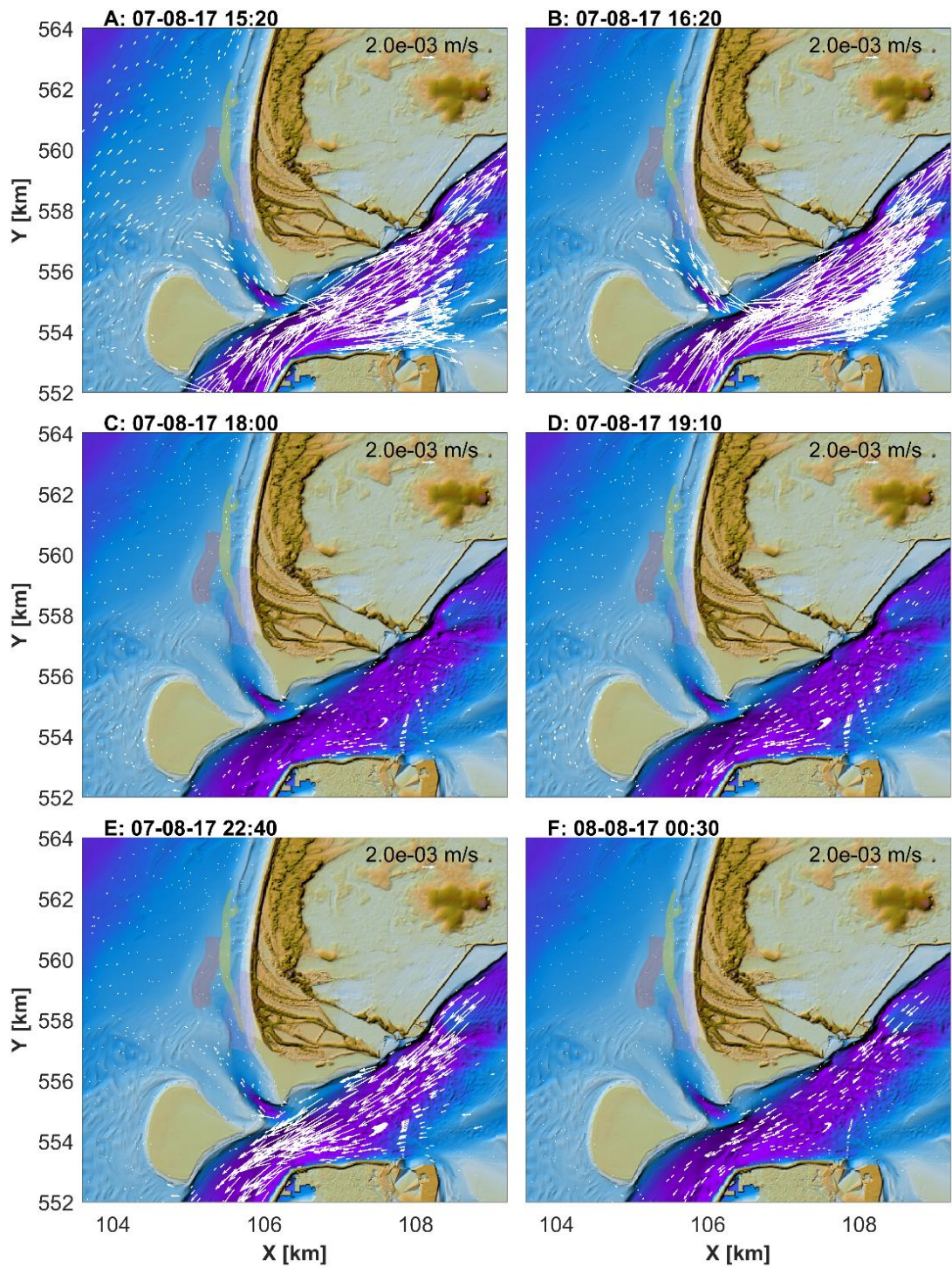
Figuur C-6: Verschil in residuele getij-gemiddeld sedimenttransport (representatief voor de jaarlijkse condities) in het Zeegat van Ameland (boven) en ter hoogte van Ameland NW (midden).

D Resultaten Texel

D.1 T0 analyse

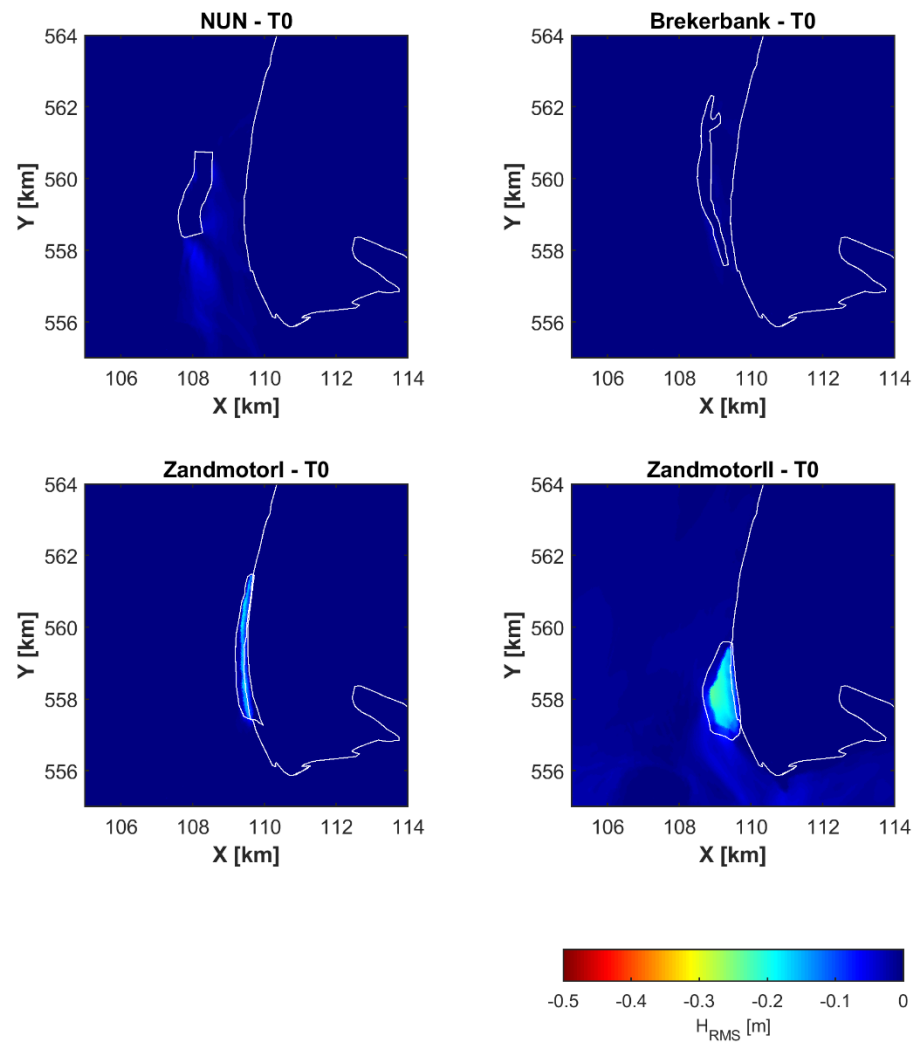


Figuur D-1: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané getij-gedreven transporten in het zeegat van Texel op basis van de T0 getijsimulatie.

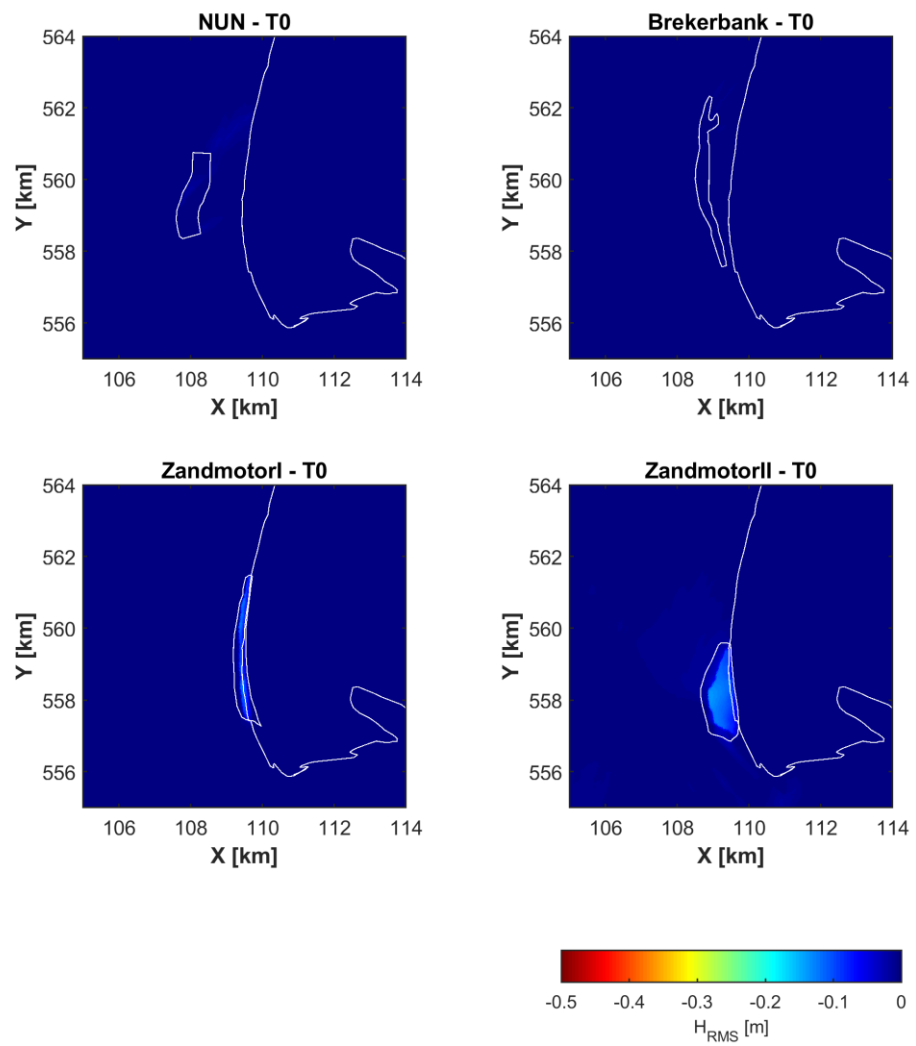


Figuur D-2: Enkele karakteristieke snapshots van de instantané transporten in het zeegat van Texel op basis van de T0 simulatie voor jaarlijks gemiddelde condities (getij+golven).

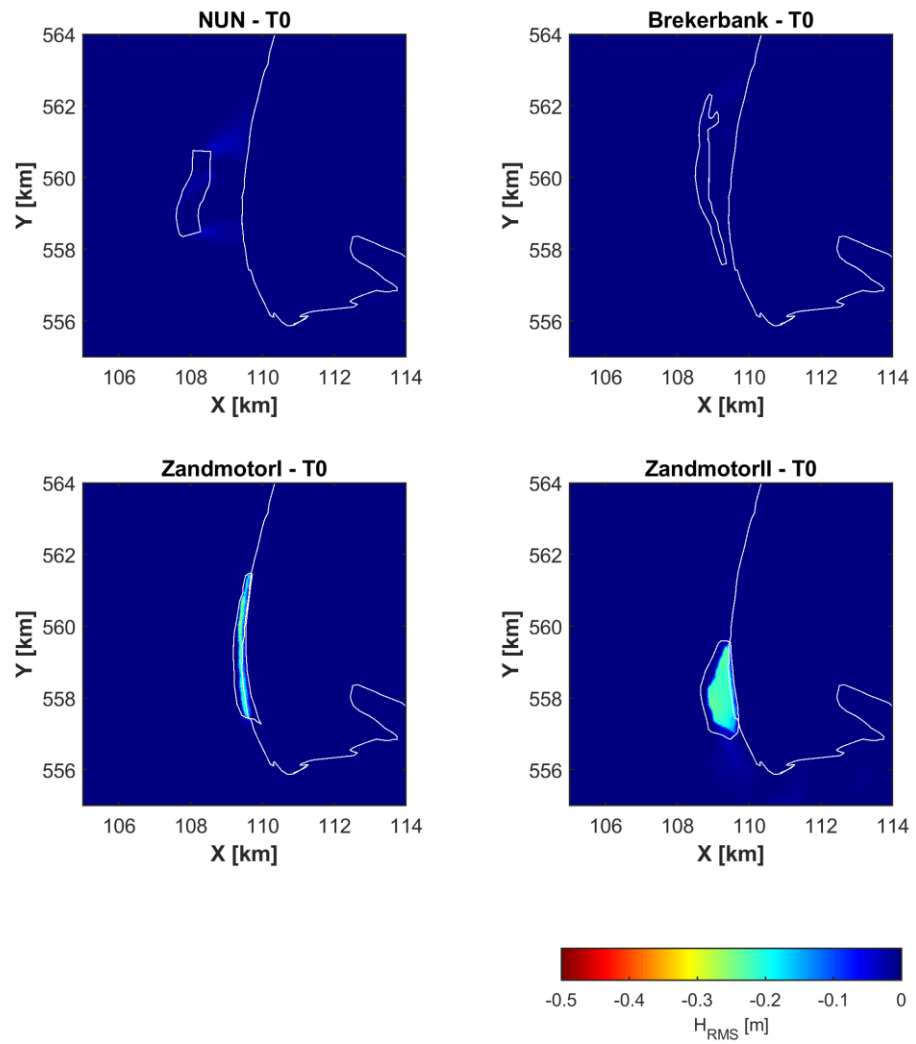
D.2 Golfresultaten



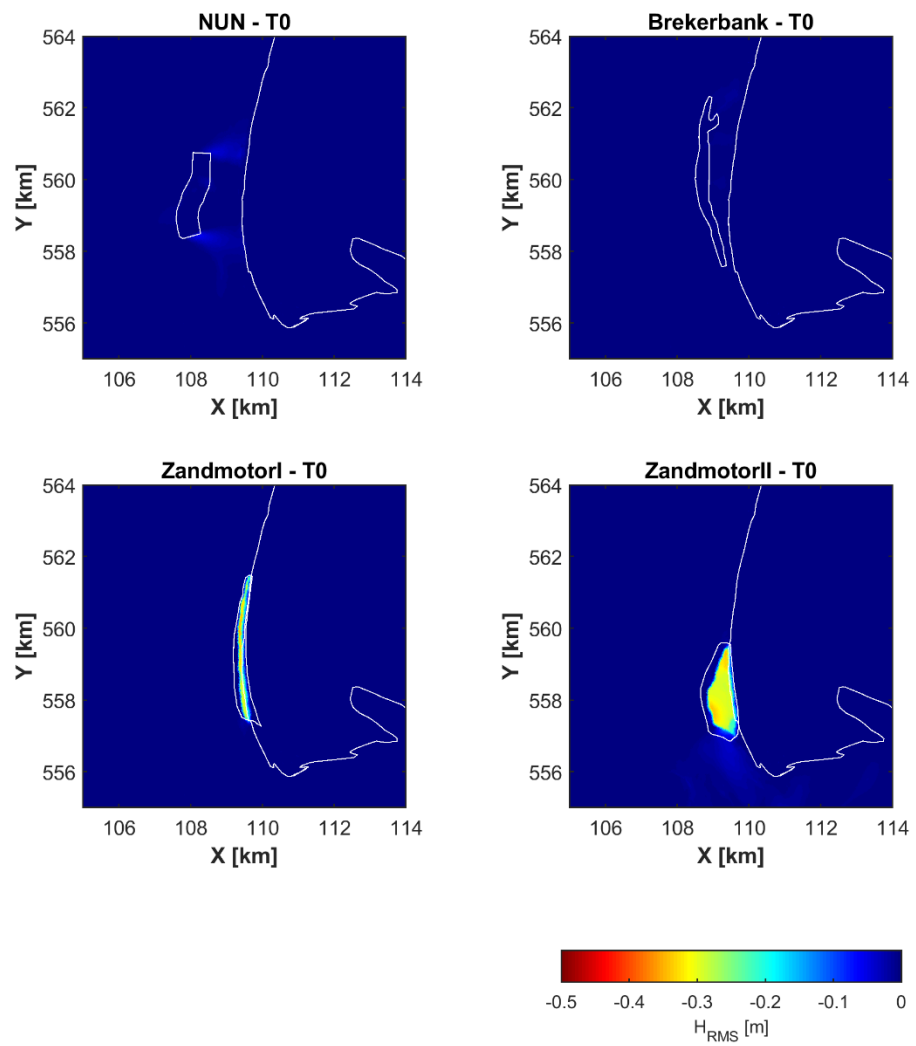
Figuur D-3: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 1 ($H_{sig} = 0.69$ m uit het $H_{dir} = 26^\circ$).



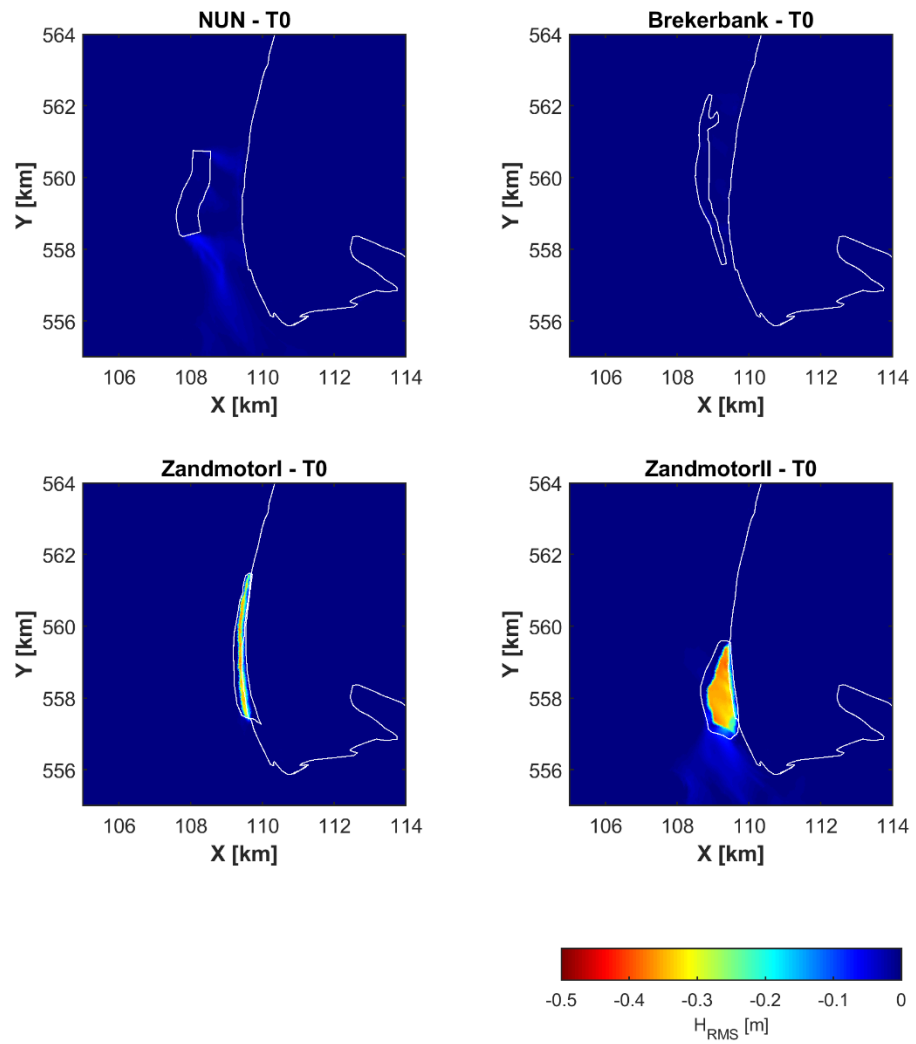
Figuur D-4: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 2 ($H_{sig} = 0.70$ m uit het $H_{dir} = 103^\circ$).



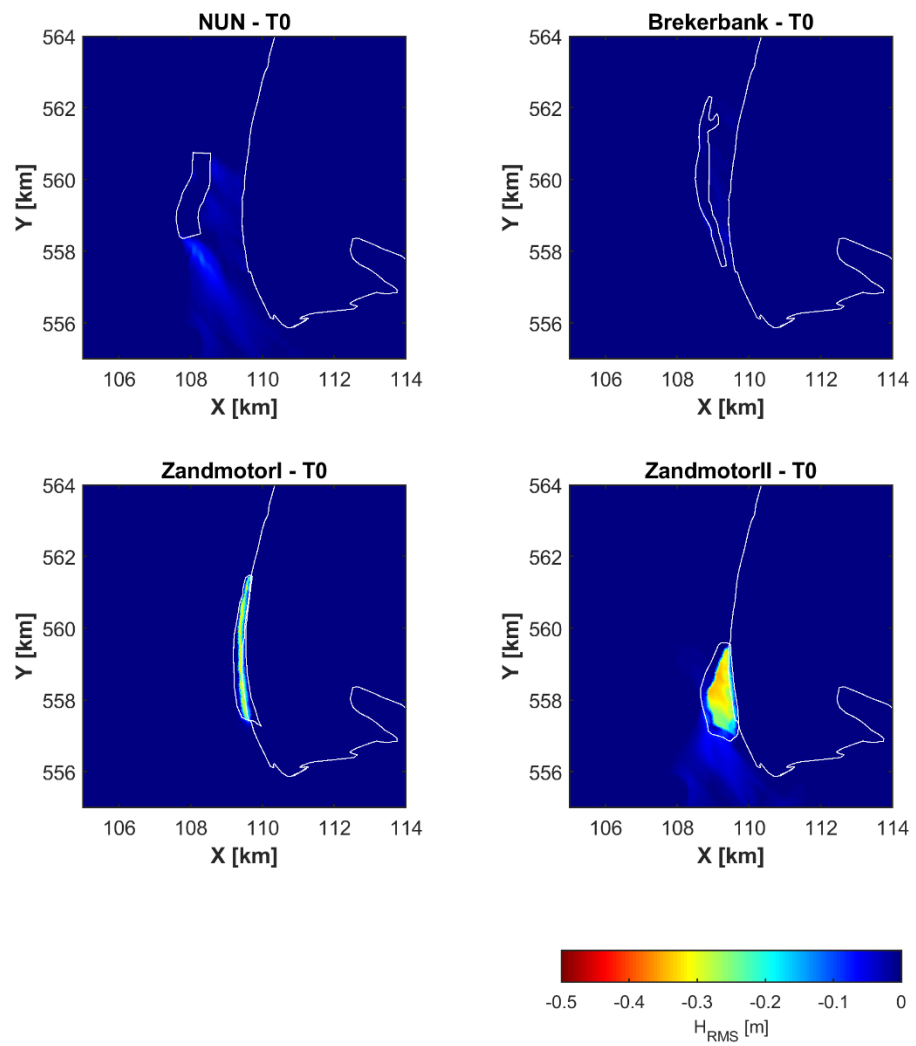
Figuur D-5: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 3 ($H_{sig} = 0.74$ m uit het $H_{dir} = 212^\circ$).



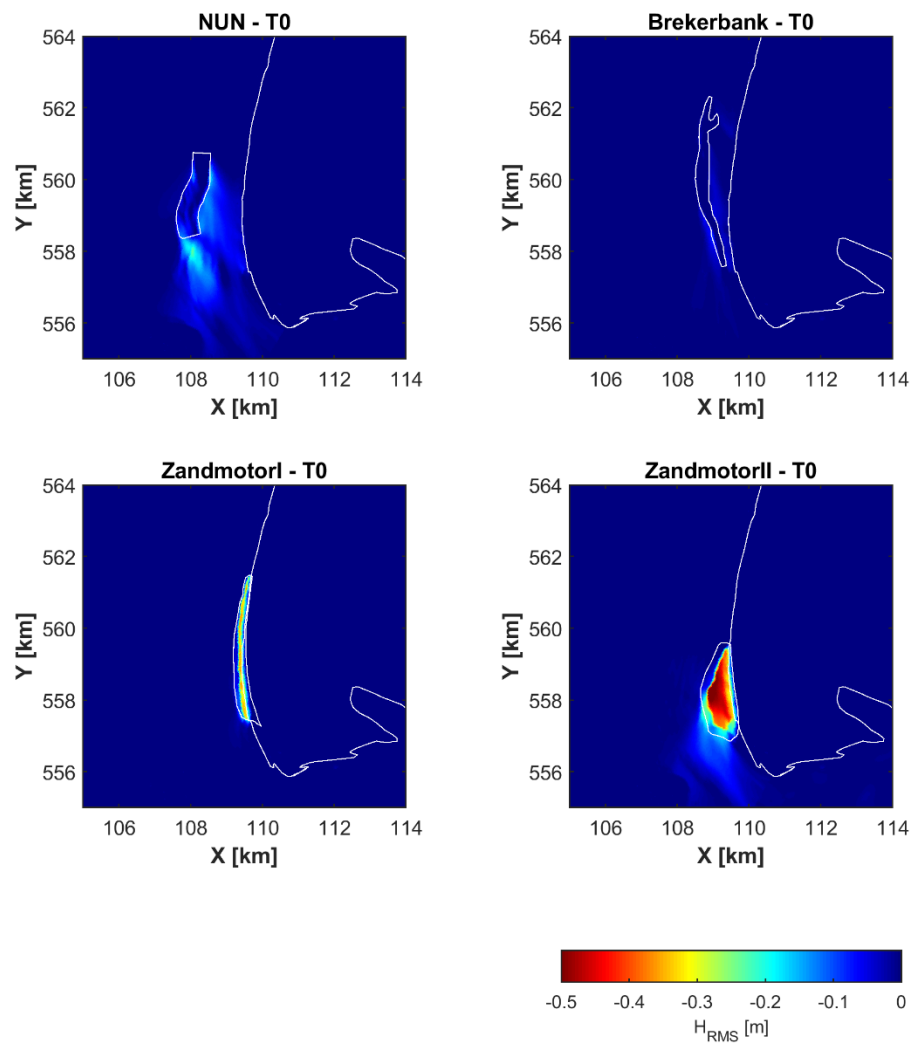
Figuur D-6: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 4 ($H_{sig} = 0.70$ m uit het $H_{dir} = 243^\circ$).



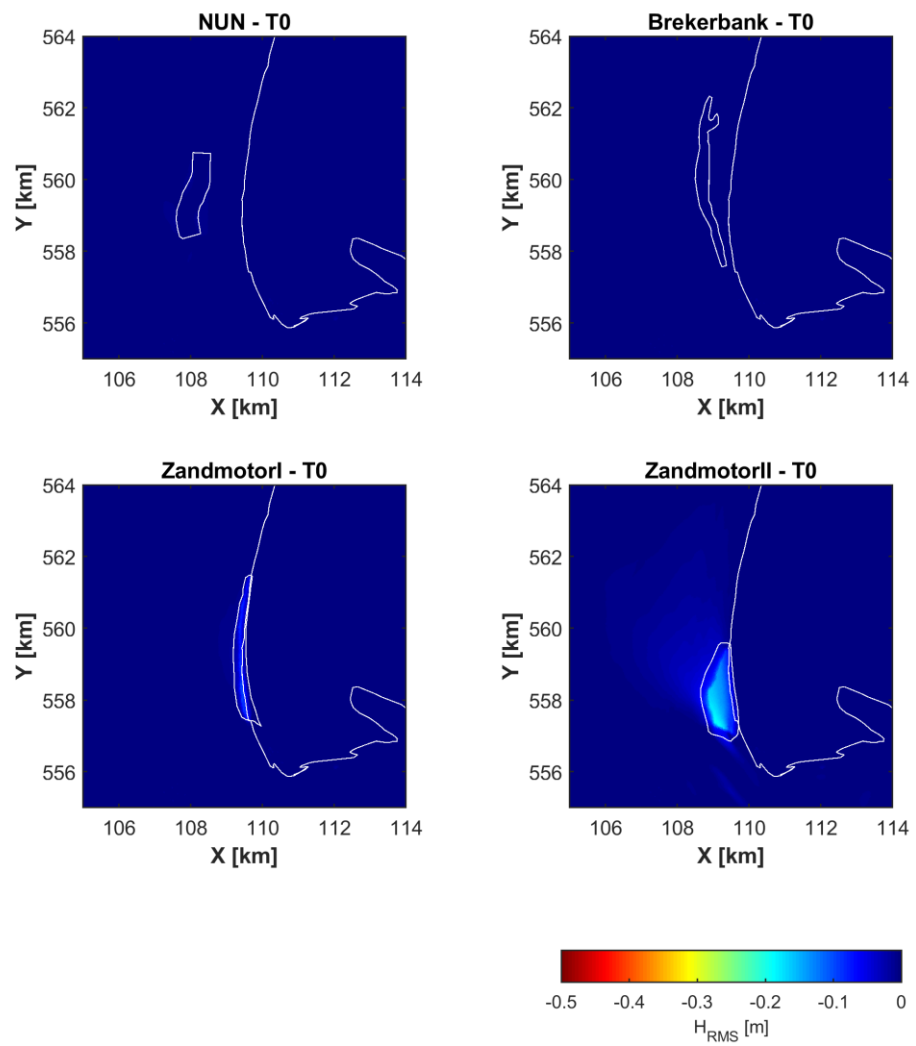
Figuur D-7: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 5 ($H_{sig} = 0.65$ m uit het $H_{dir} = 293^\circ$).



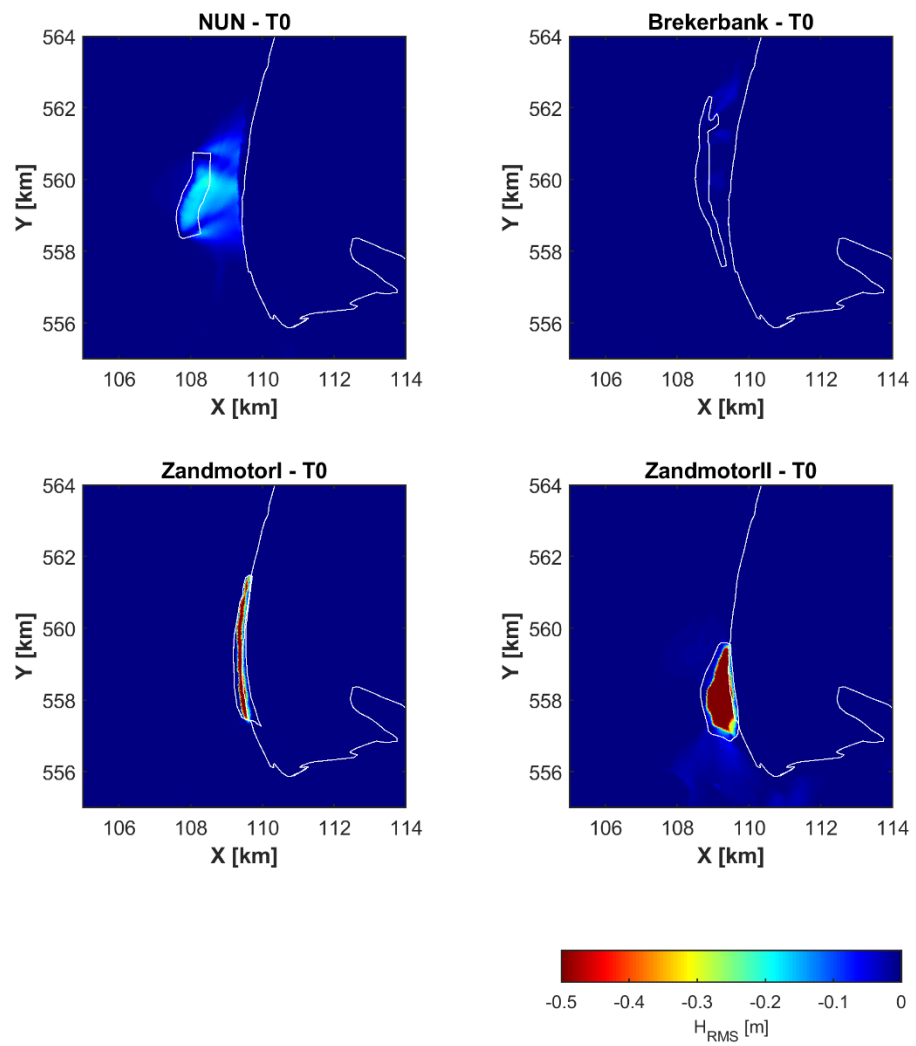
Figuur D-8: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 6 ($H_{sig} = 0.68$ m uit het $H_{dir} = 340^\circ$).



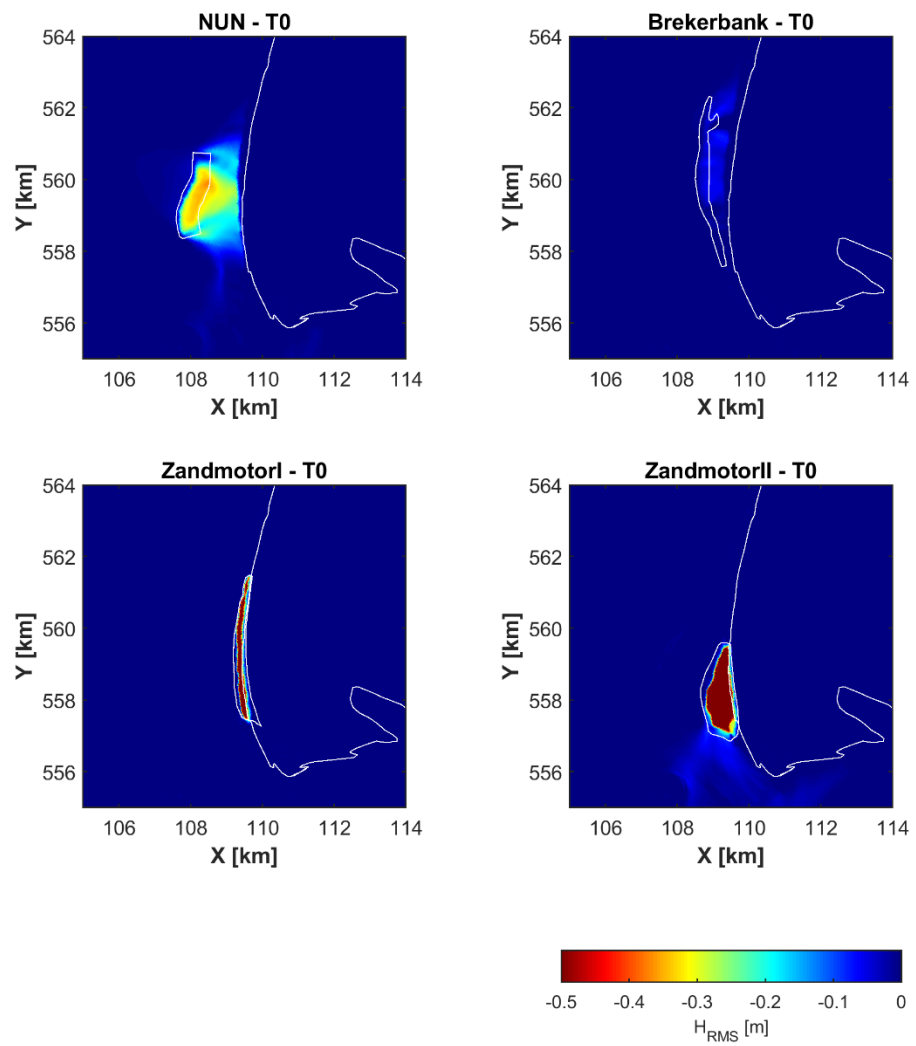
Figuur D-9: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 7 ($H_{sig} = 1.61$ m uit het $H_{dir} = 28^\circ$).



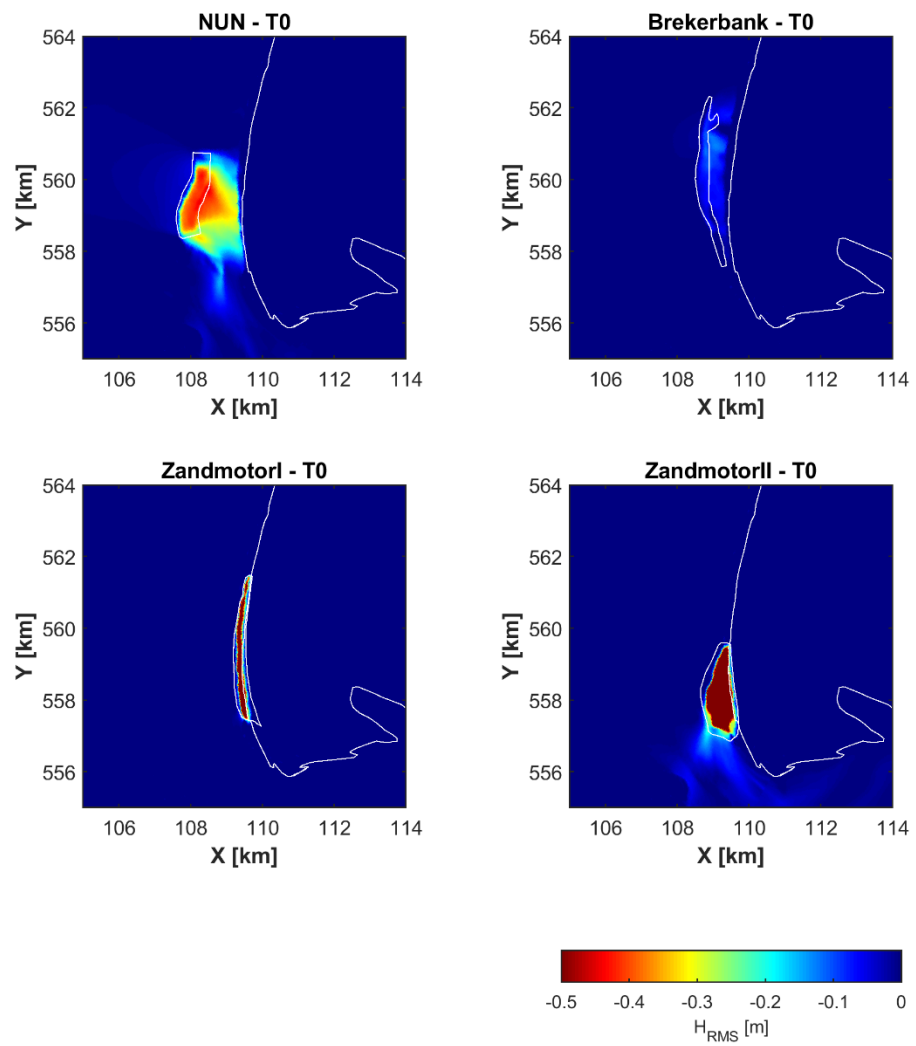
Figuur D-10: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 8 ($H_{sig} = 1.40$ m uit het $H_{dir} = 100^\circ$).



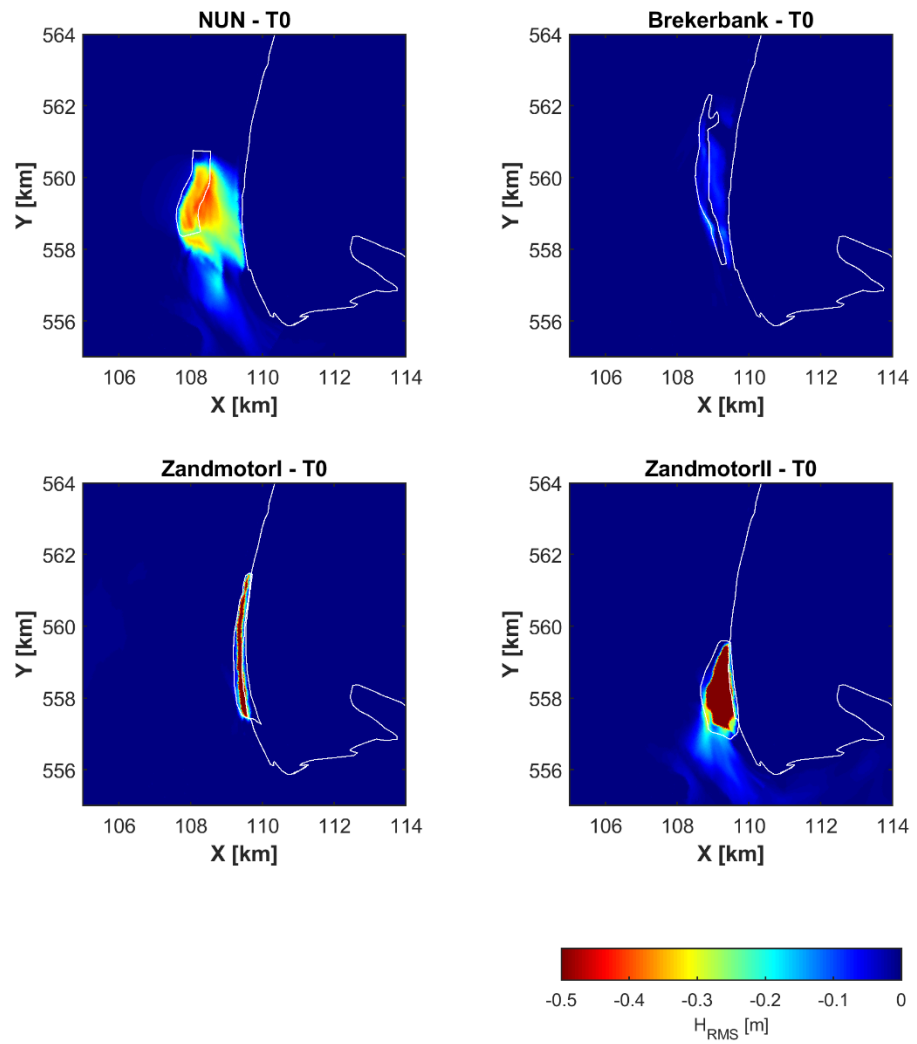
Figuur D-11: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 9 ($H_{sig} = 1.80$ m uit het $H_{dir} = 217^\circ$).



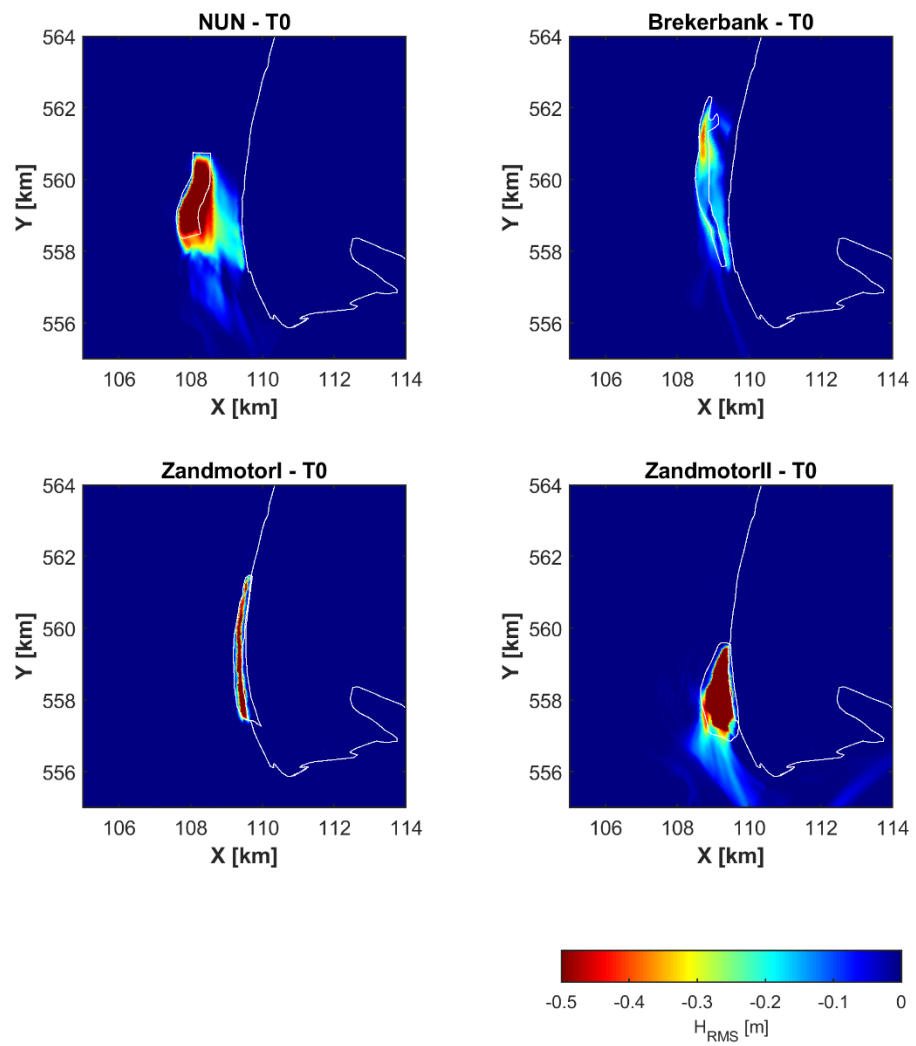
Figuur D-12: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 10 ($H_{sig} = 1.87$ m uit het $H_{dir} = 243^\circ$).



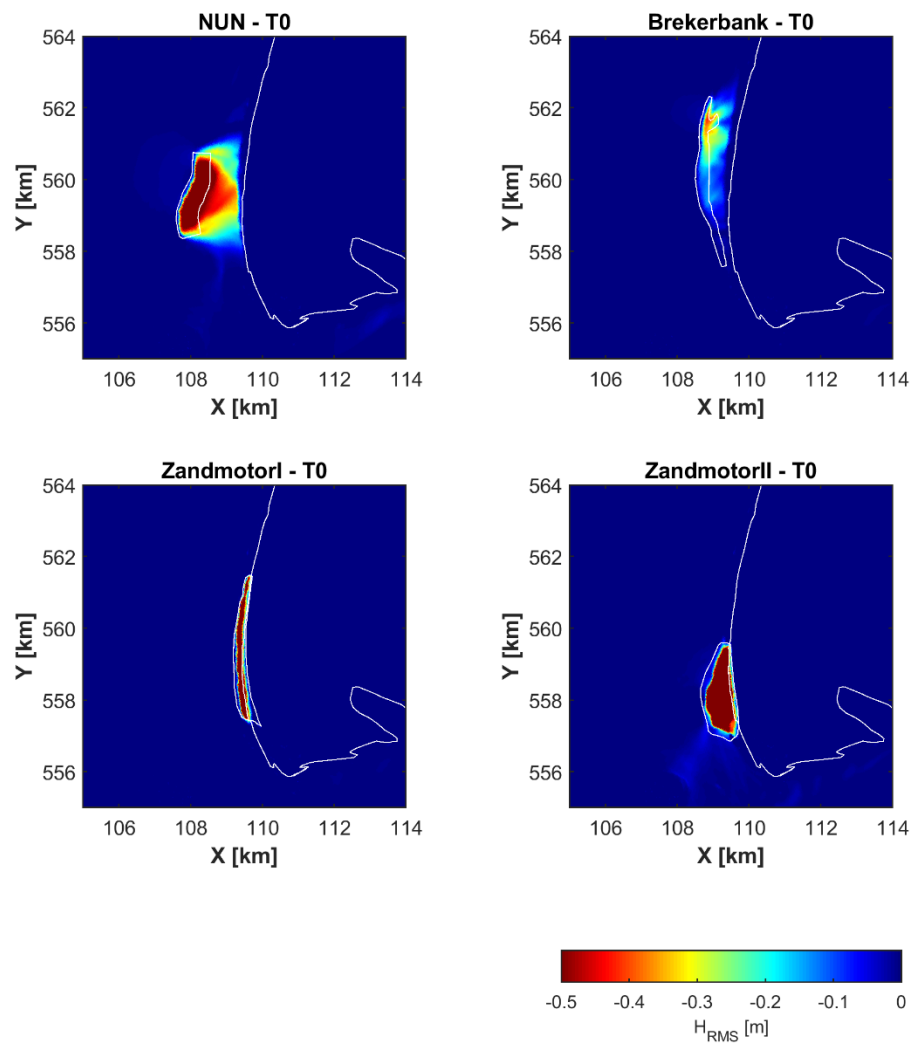
Figuur D-13: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 11 ($H_{sig} = 1.85$ m uit het $H_{dir} = 292^\circ$).



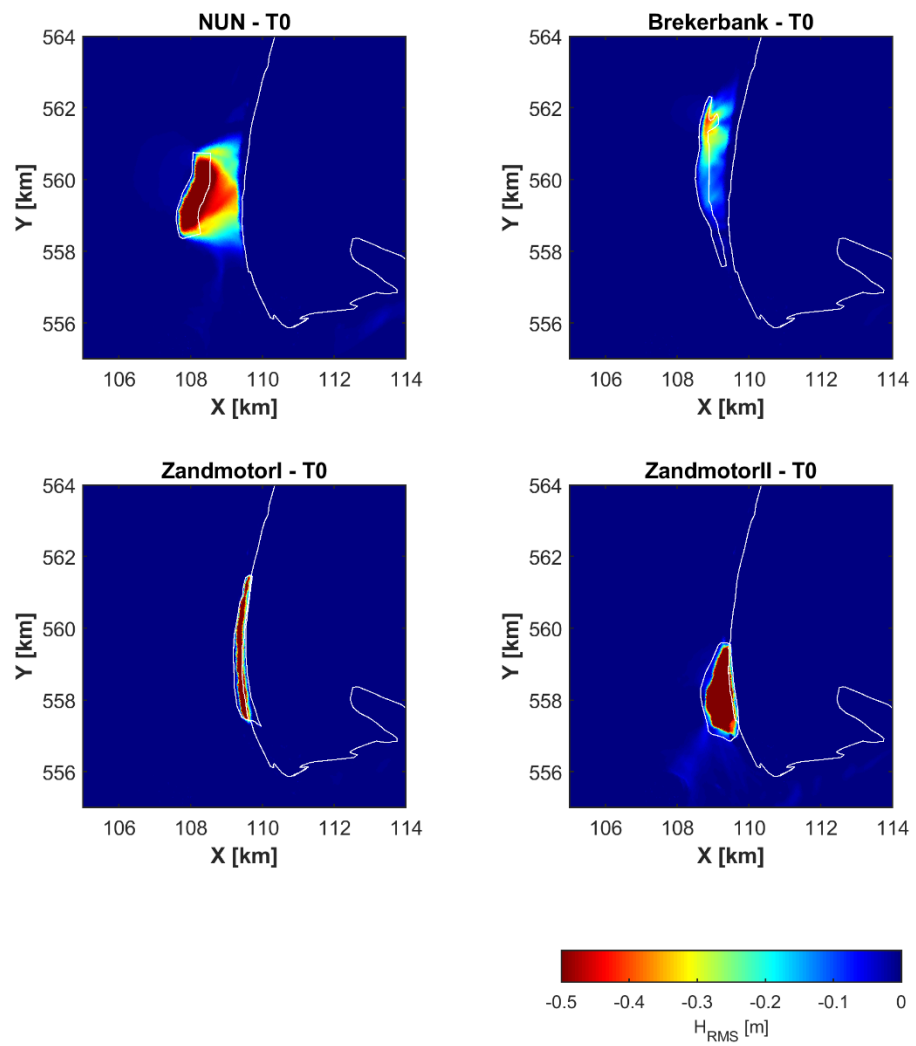
Figuur D-14: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 12 ($H_{sig} = 1.78$ m uit het $H_{dir} = 338^\circ$).



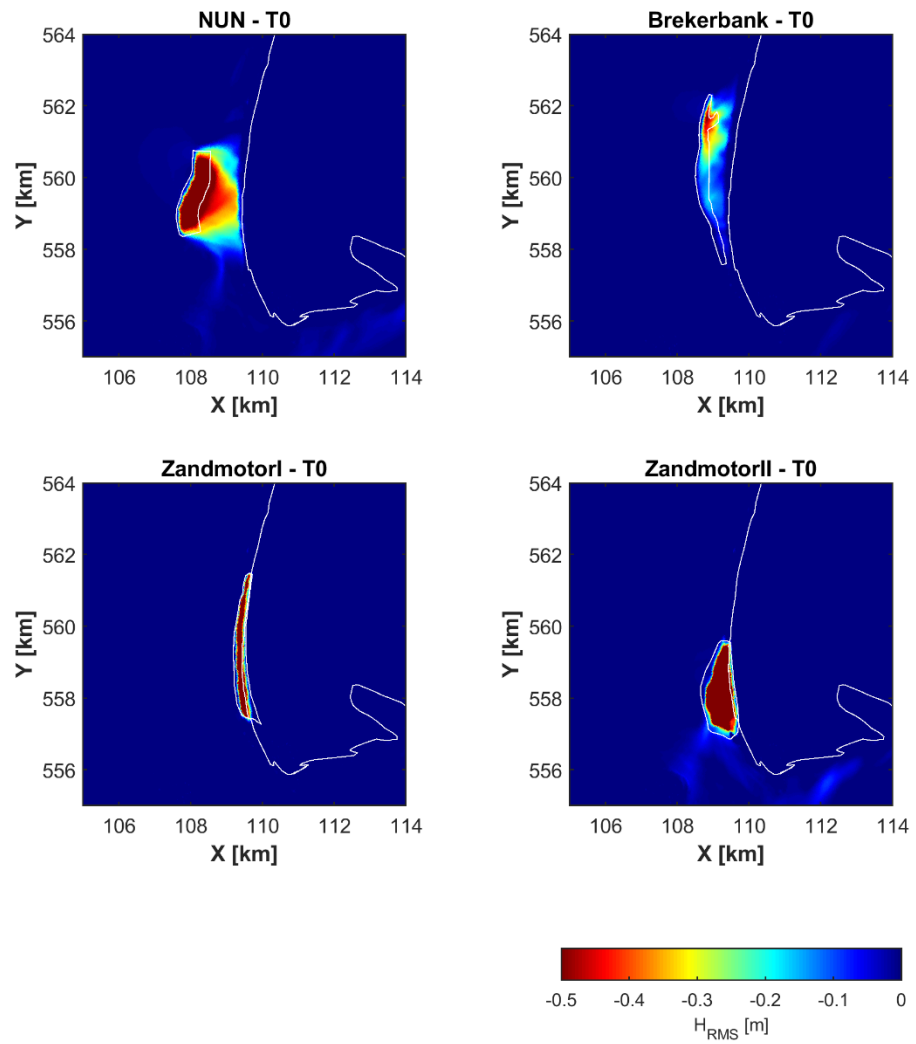
Figuur D-15: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 13 ($H_{sig} = 3.34$ m uit het $H_{dir} = 28^\circ$).



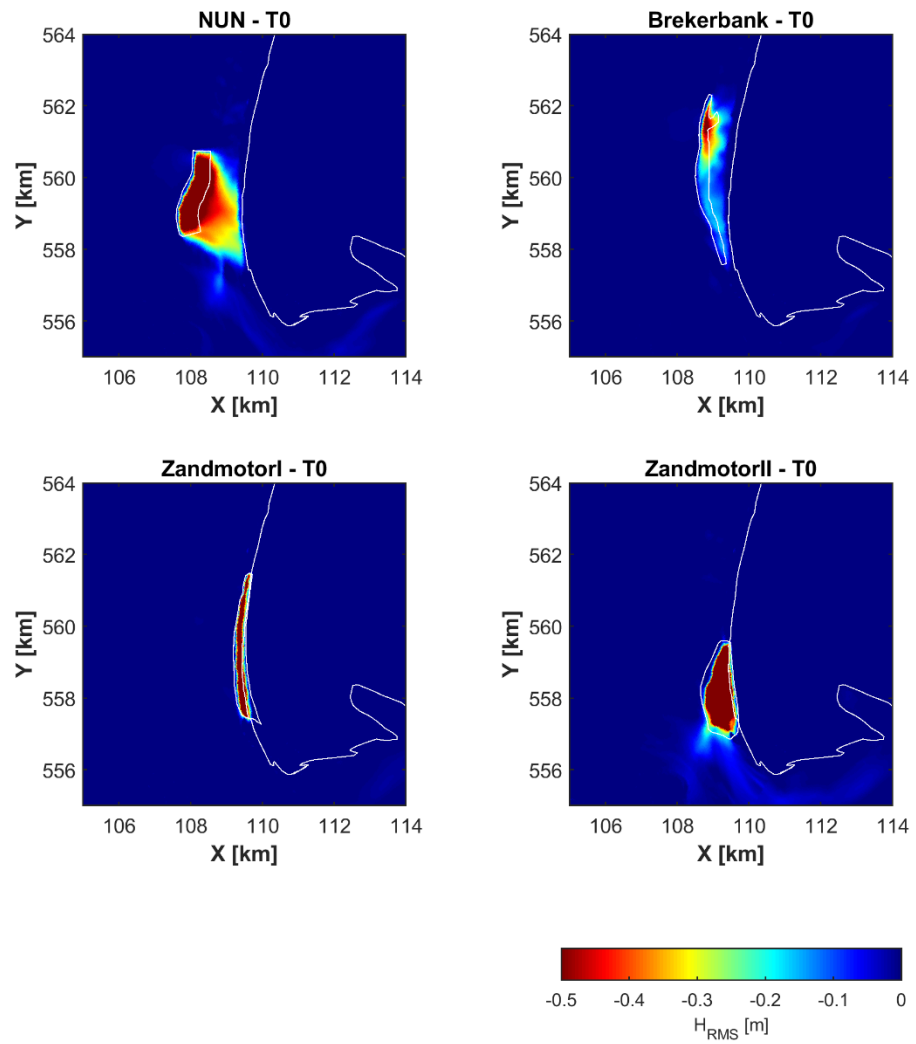
Figuur D-16: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 14 ($H_{sig} = 3.18$ m uit het $H_{dir} = 141^\circ$).



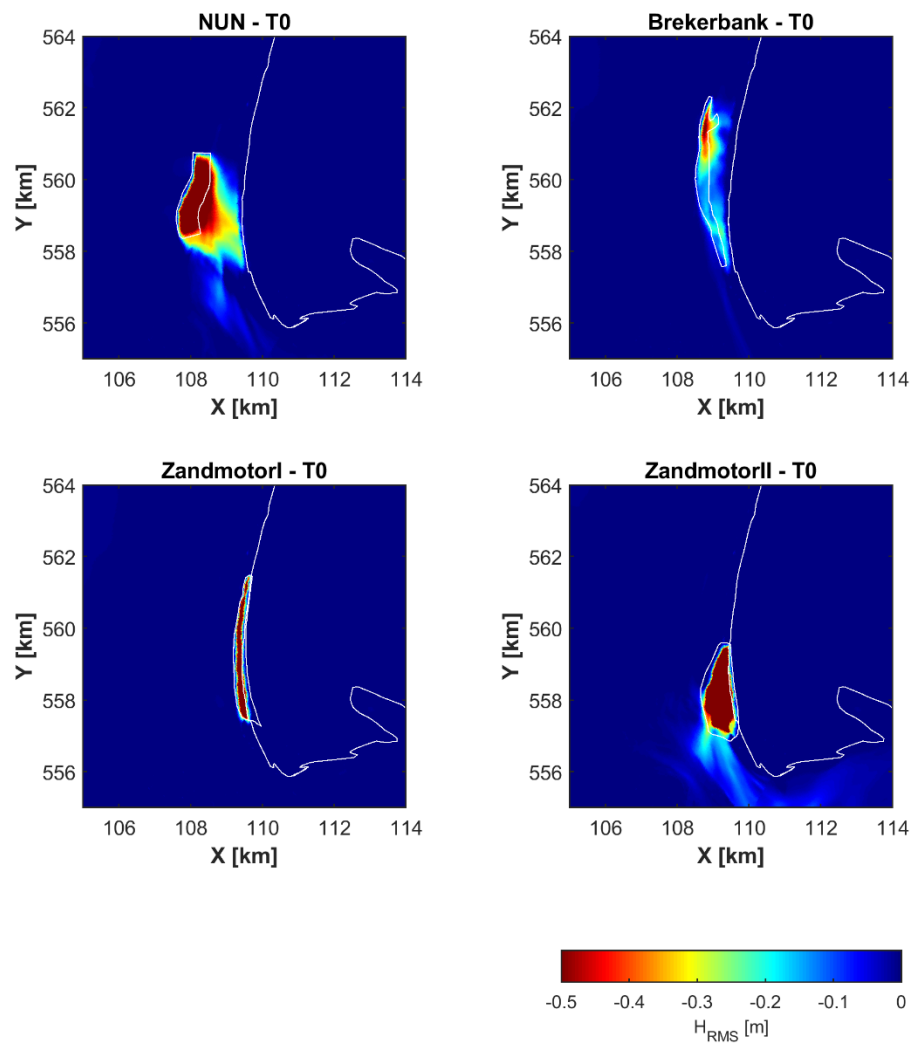
Figuur D-17: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 15 ($H_{sig} = 3.43$ m uit het $H_{dir} = 219^\circ$).



Figuur D-18: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 16 ($H_{sig} = 3.64$ m uit het $H_{dir} = 246^\circ$).

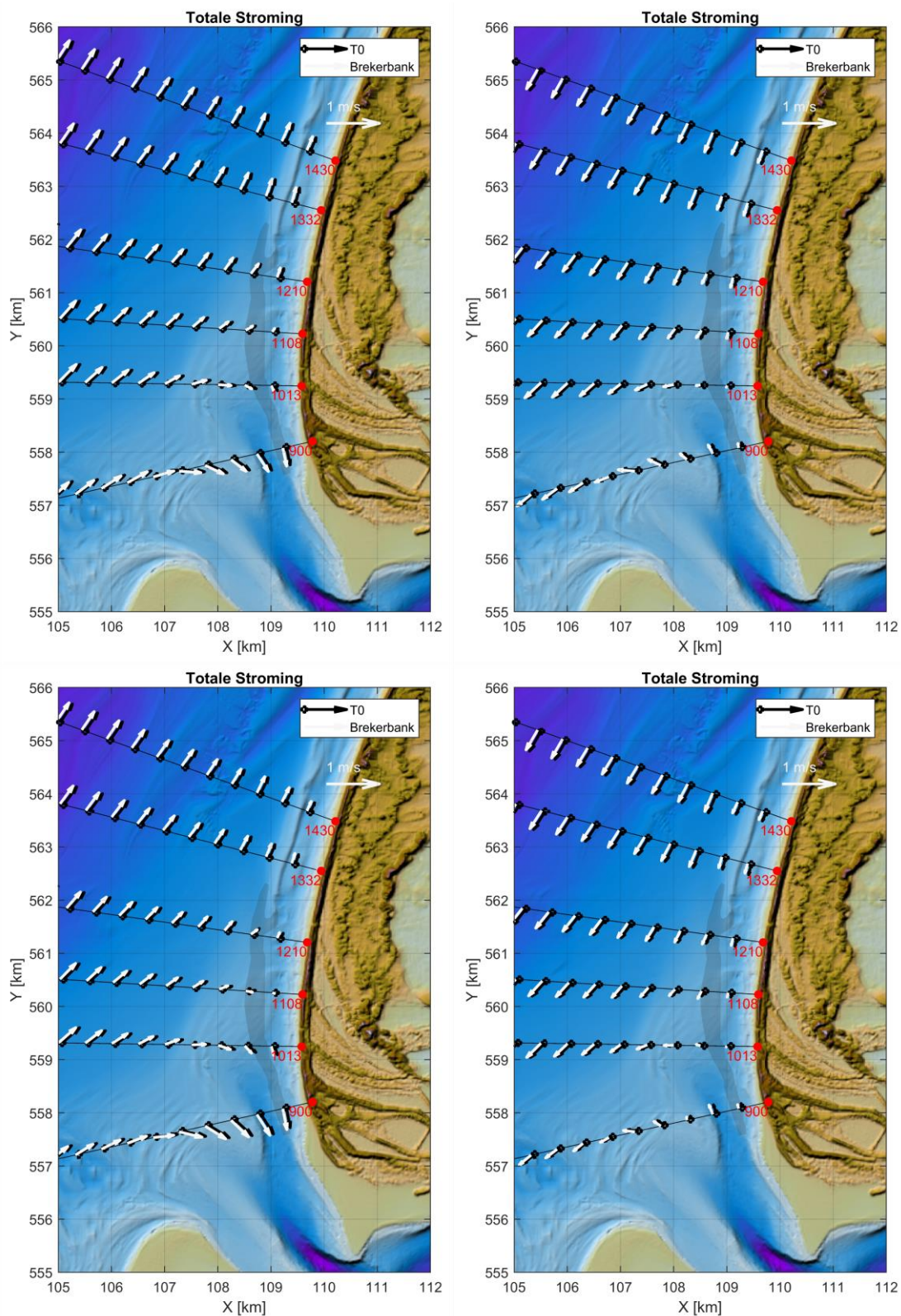


Figuur D-19: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 17 ($H_{sig} = 3.92$ m uit het $H_{dir} = 291^\circ$).

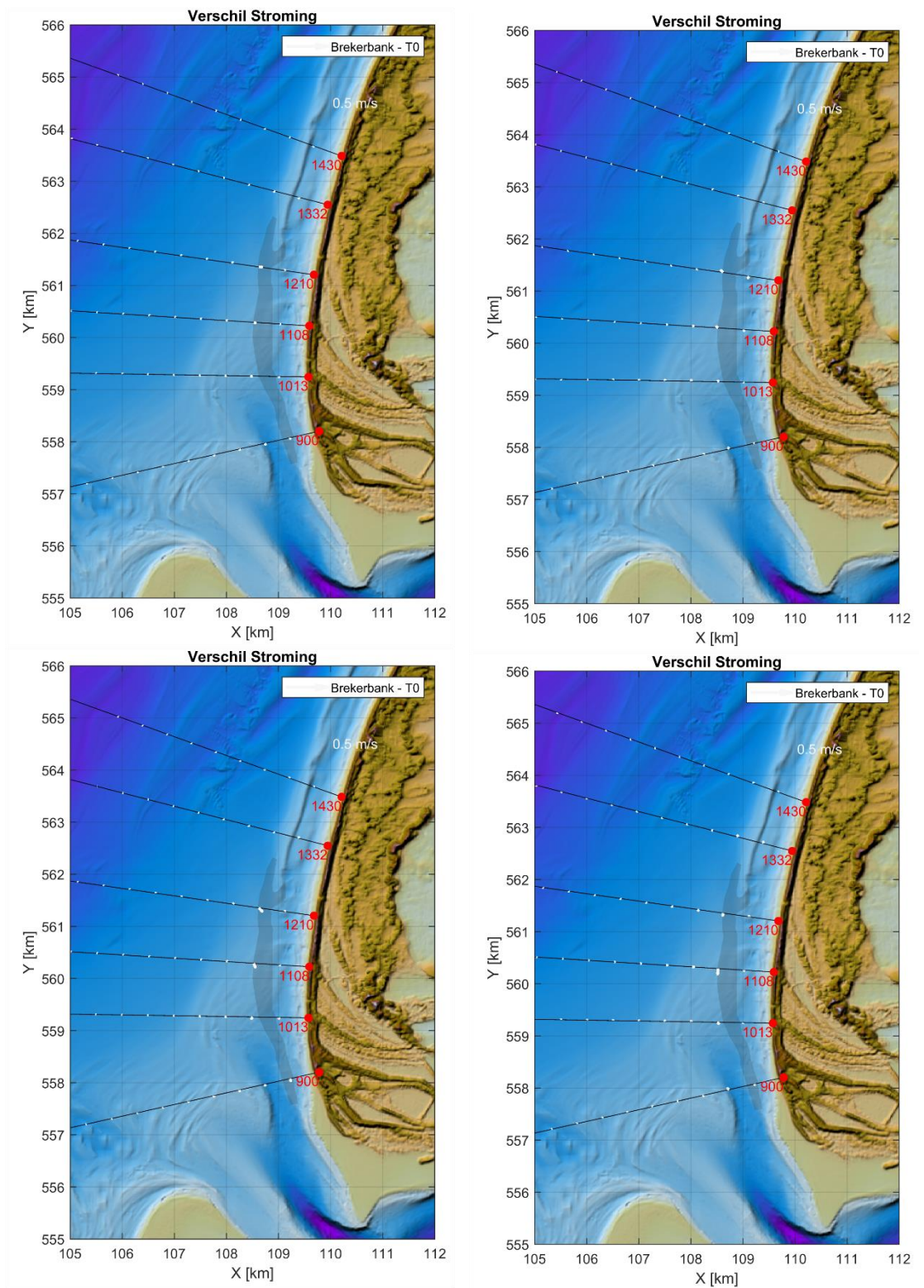


Figuur D-20: Invloed suppletievarianten op de golfhoogte voor conditie 18 ($H_{sig} = 3.96$ m uit het $H_{dir} = 333^\circ$).

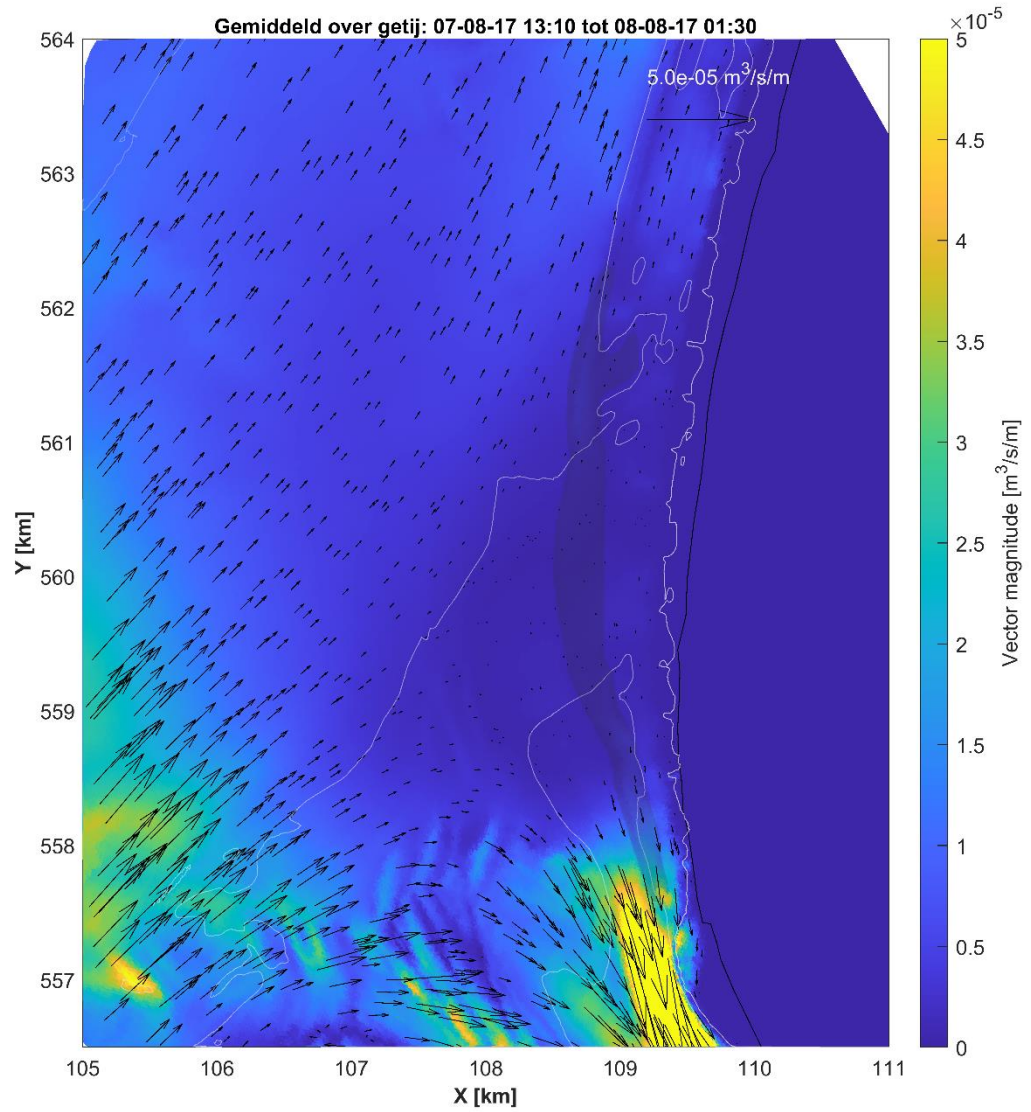
D.3 BrekerBank variant



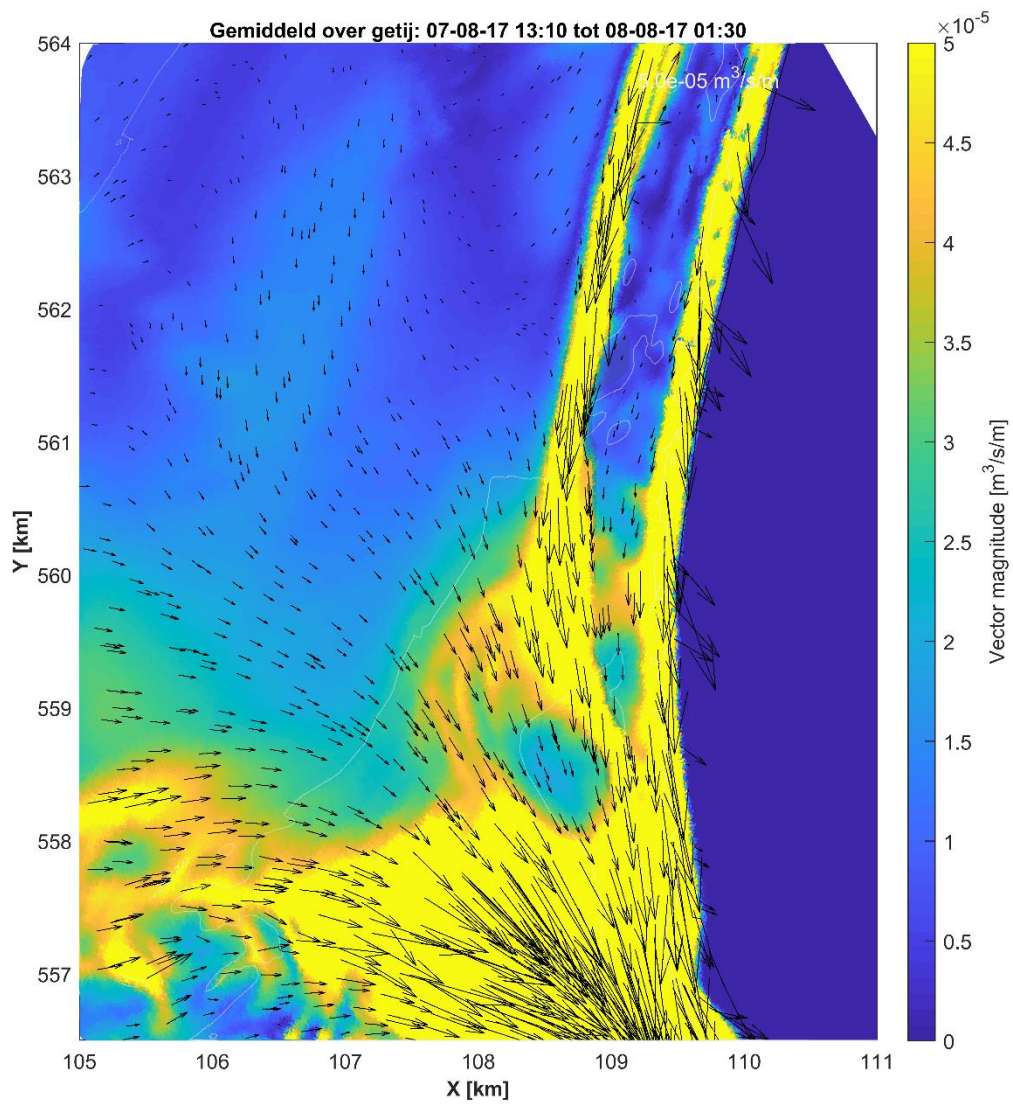
Figuur D-21: Berekende gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en BB suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



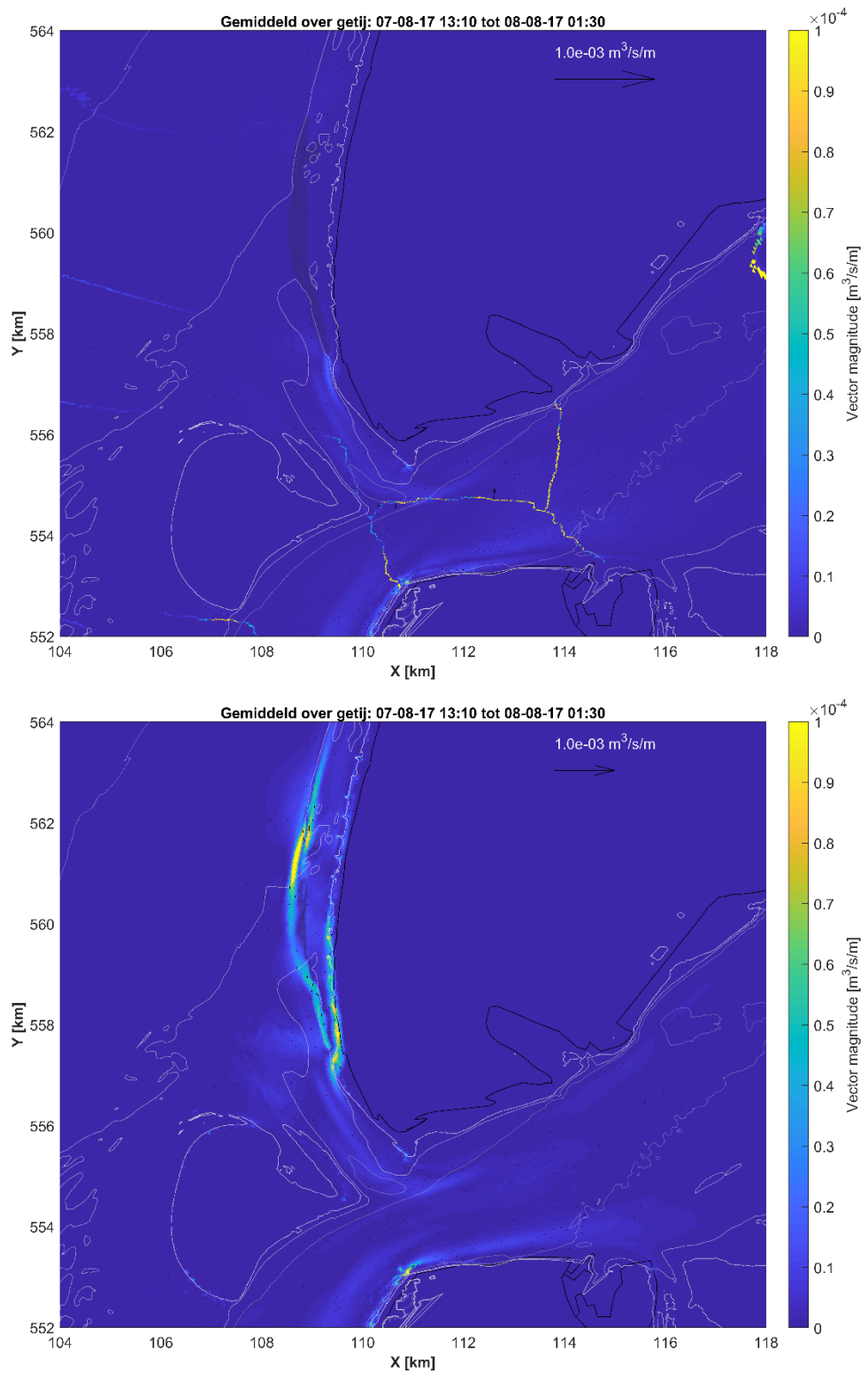
Figuur D-22: Verschil in gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en BB suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



Figuur D-23: Berekende transporten voor de BB suppletievariant ten gevolge van getij op Texel Zuidwest.

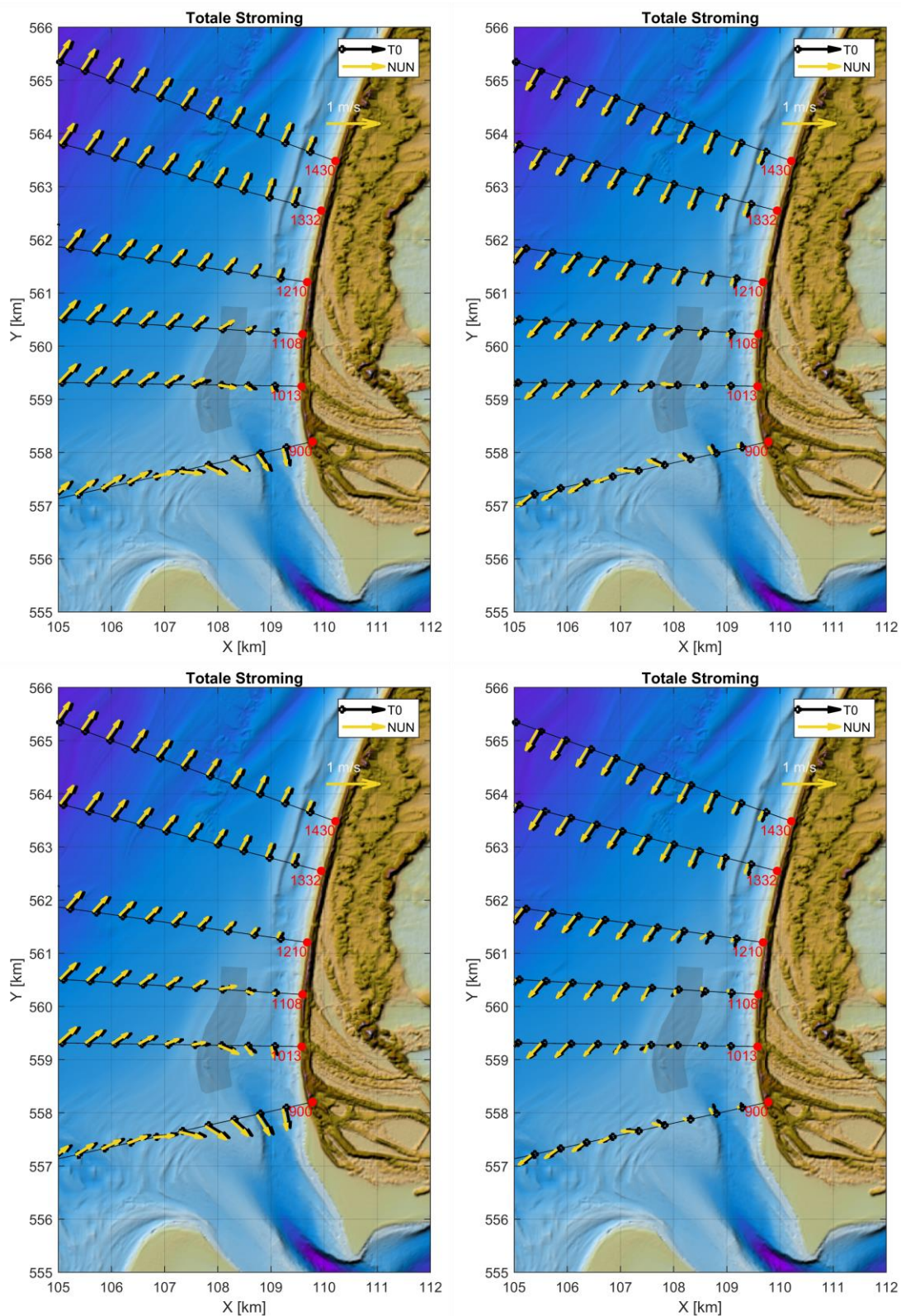


Figuur D-24: Berekende transporten voor de BB suppletievariant ten gevolge van jaargemiddelde condities op Texel Zuidwest.

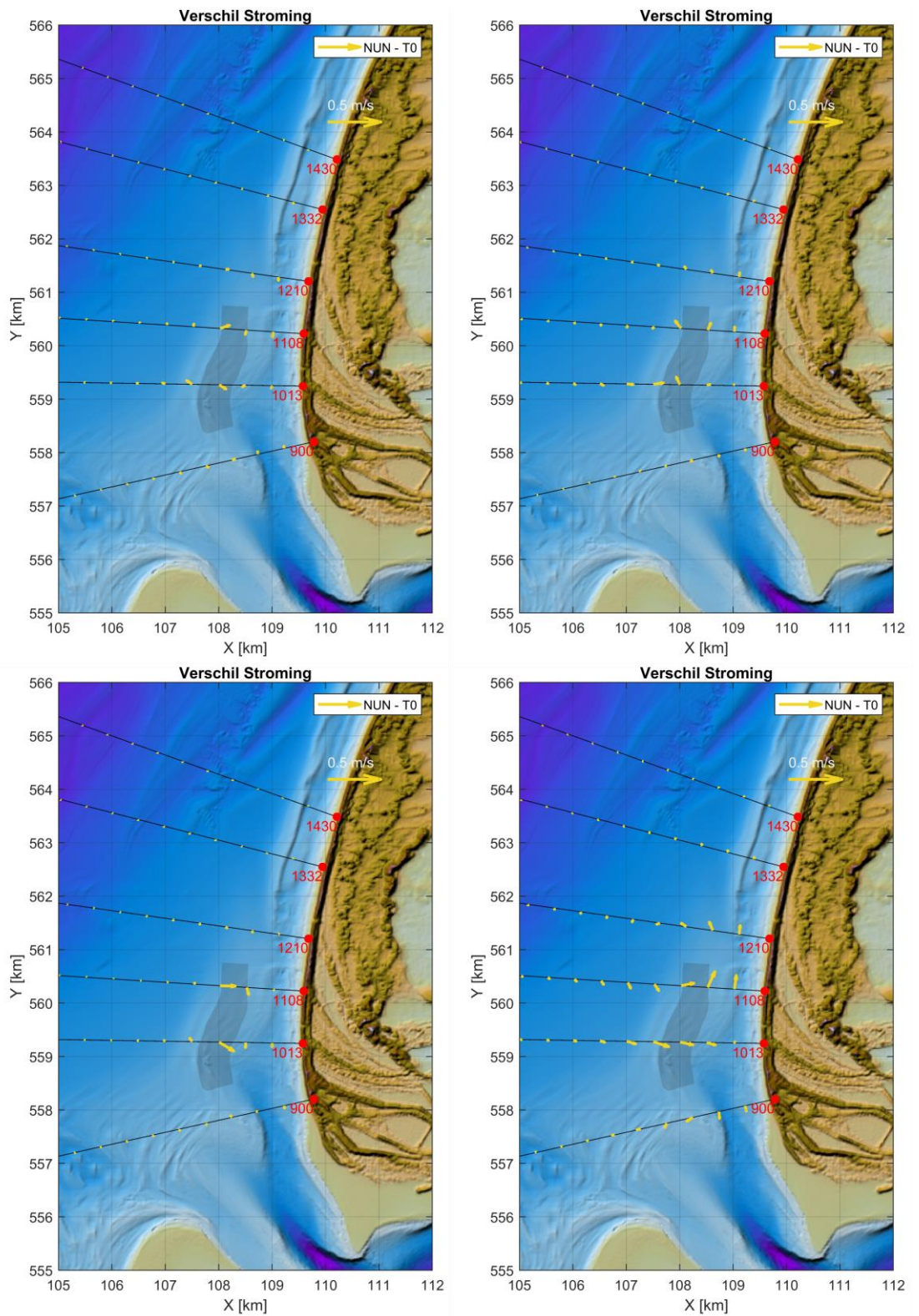


Figuur D-25: Berekende verschillen in het sedimenttransport tussen de T0 en de BB suppletievariant ten gevolge van getij (boven) en voor de jaarlijks gemiddelde condities (onder) op het zeegat.

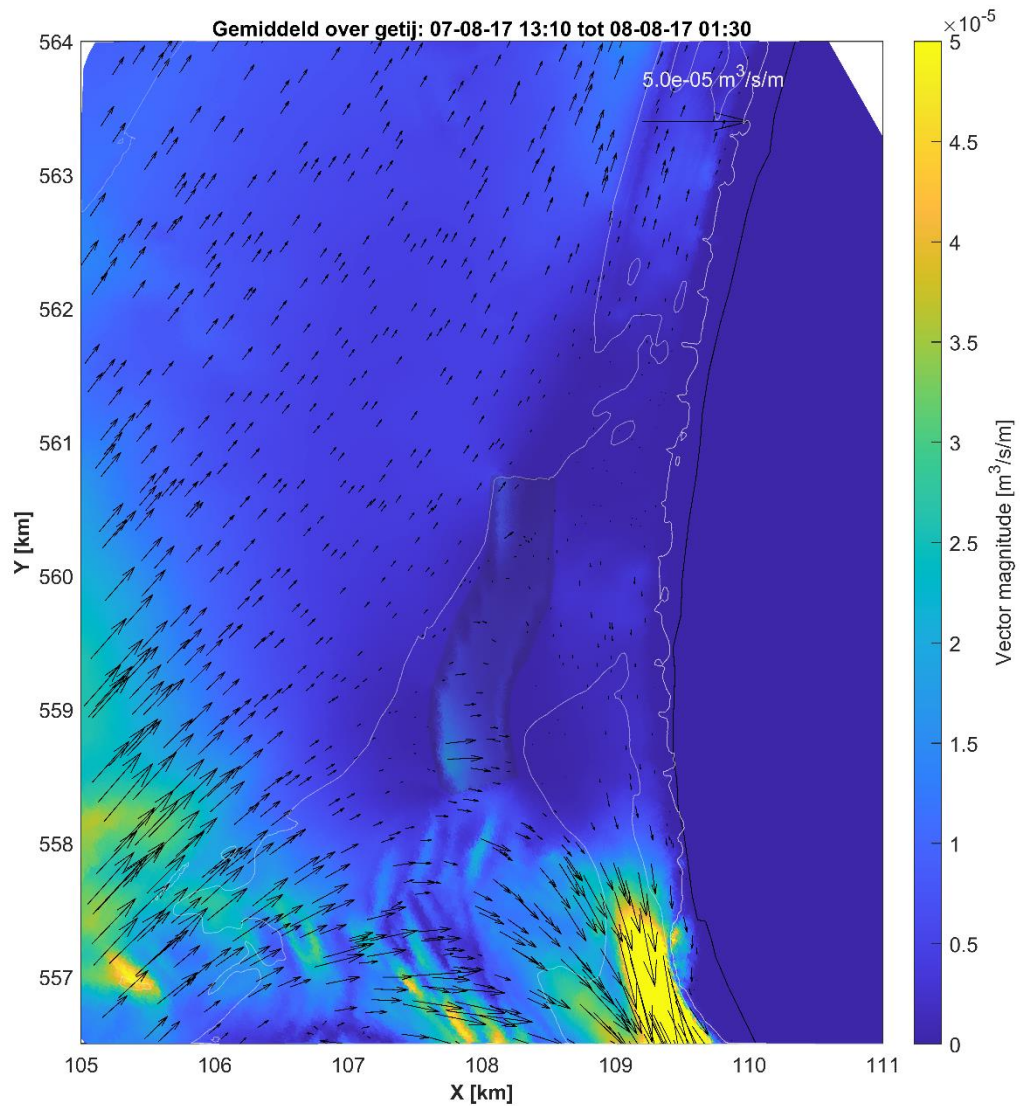
D.4 Noordelijke Uitlopers vd Noorderhaaks variant



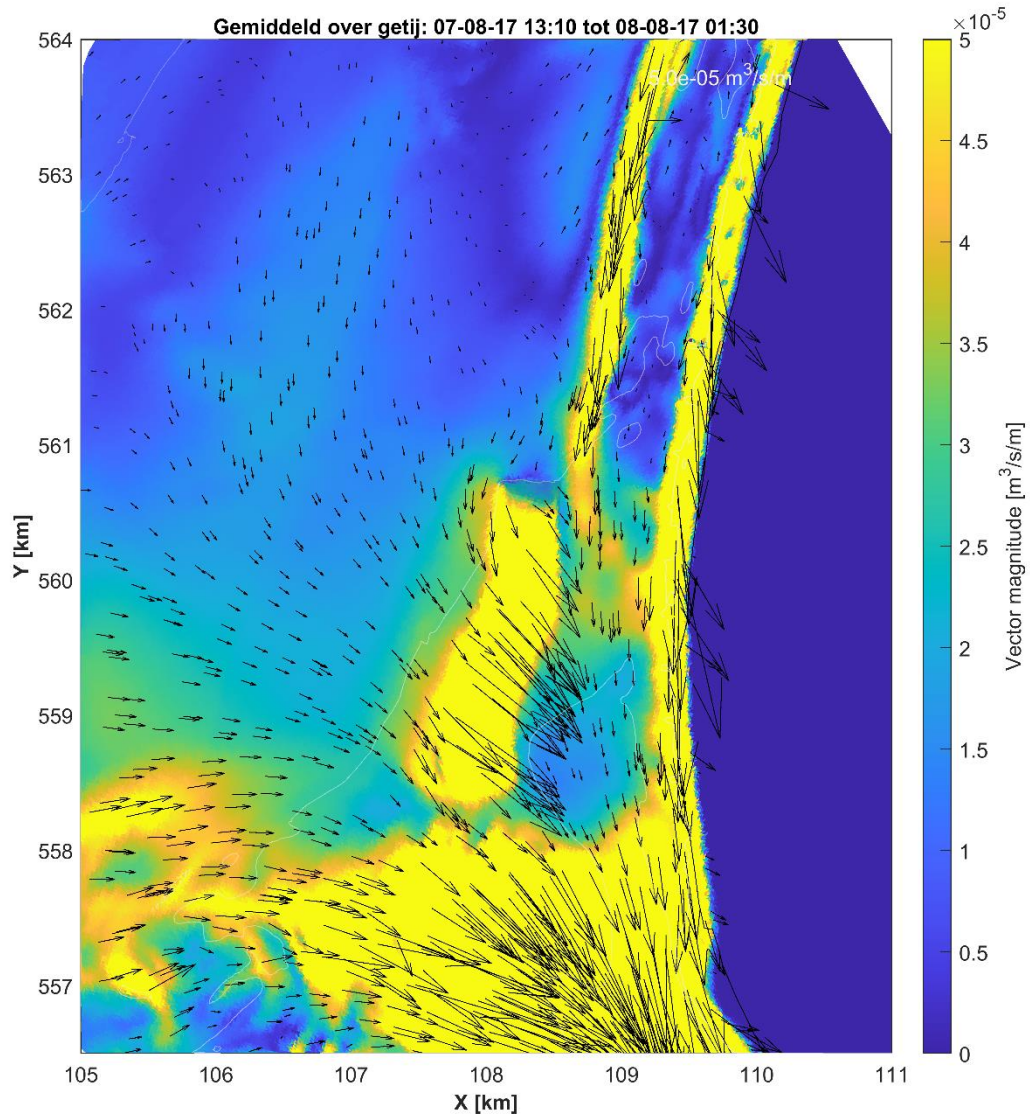
Figuur D-26: Berekende gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en NUN suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



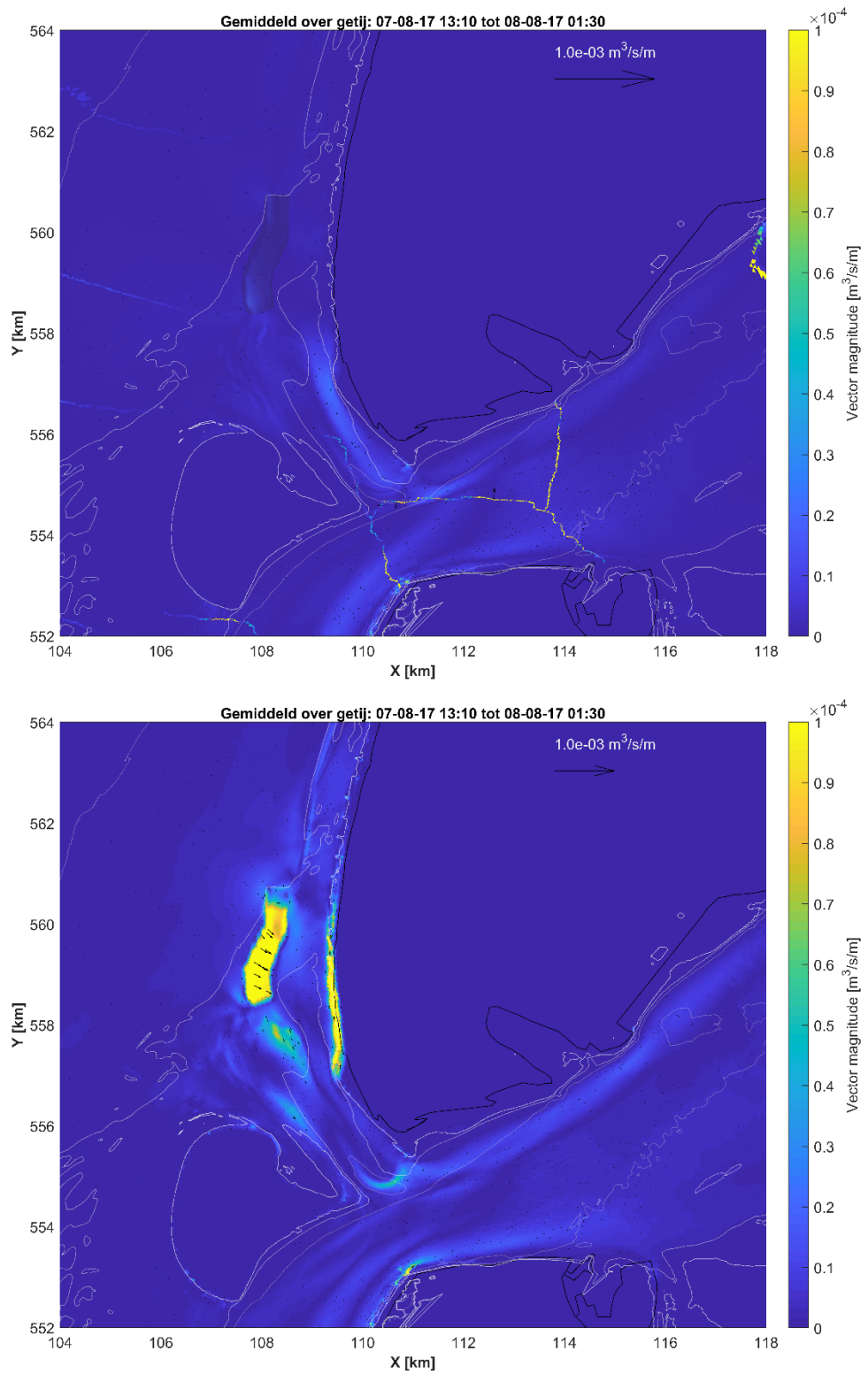
Figuur D-27: Vershil in gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en NUN suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



Figuur D-28: Berekende getijgemiddelde transporten voor de NUN suppletievariant ten gevolge van getij op Texel Zuidwest.

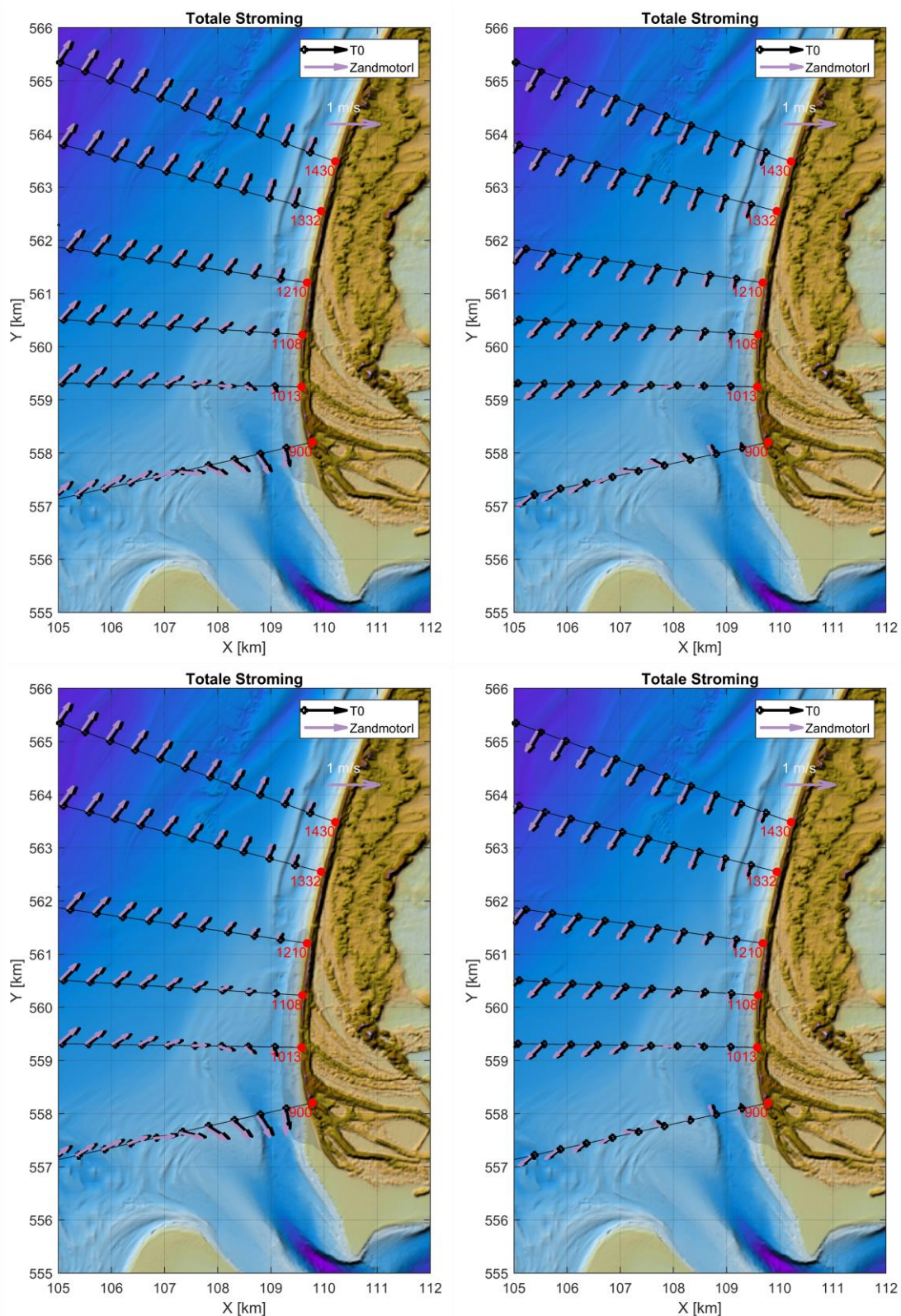


Figuur D-29: Berekende getijgemiddelde transporten voor de NUN suppletievariant ten gevolge van jaargemiddelde condities op Texel Zuidwest.

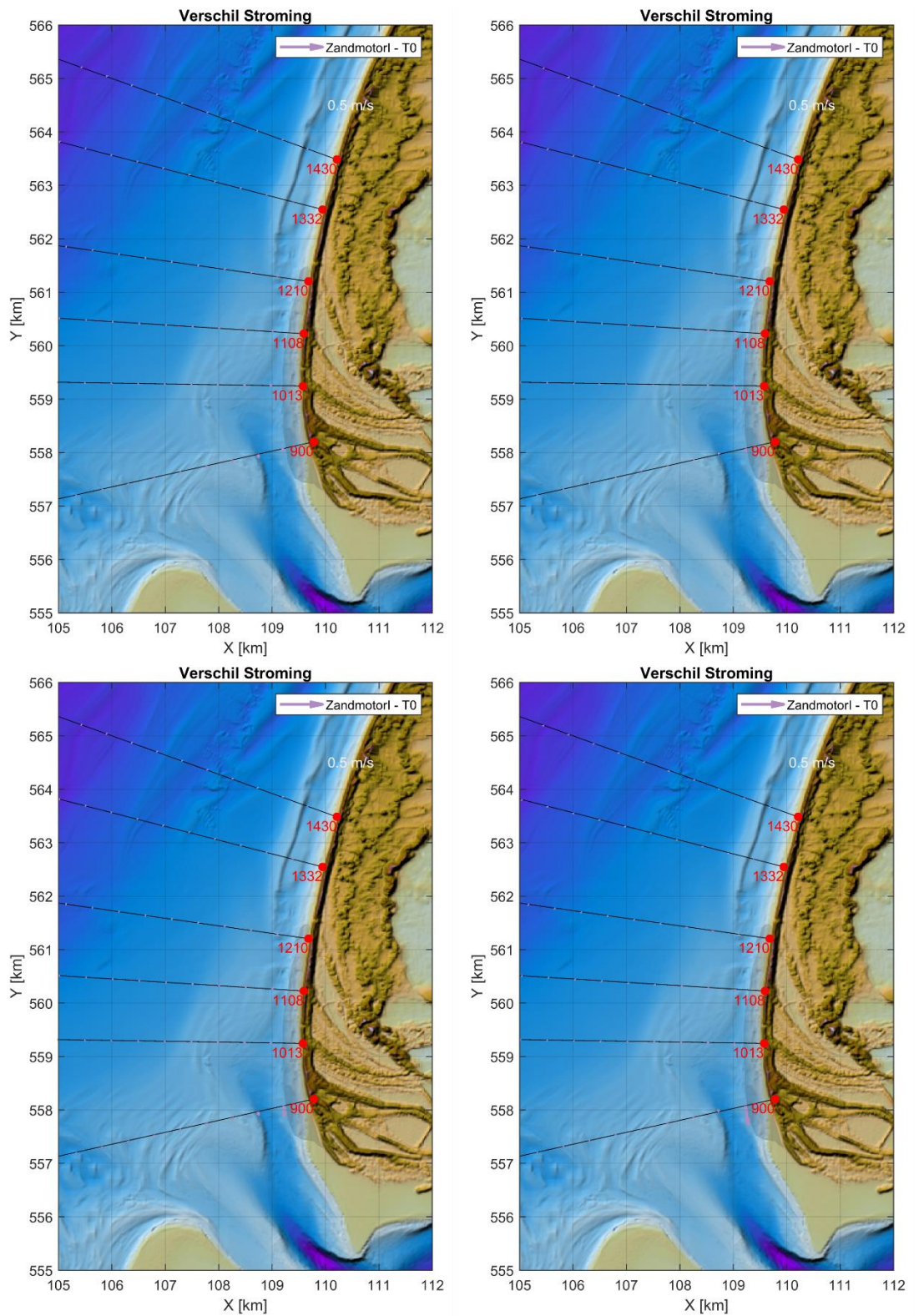


Figuur D-30: Berekende verschillen in het sedimenttransport tussen de T0 en de NUN suppletievariant ten gevolge van getij (boven) en voor de jaarlijks gemiddelde condities (onder) op het zeegat.

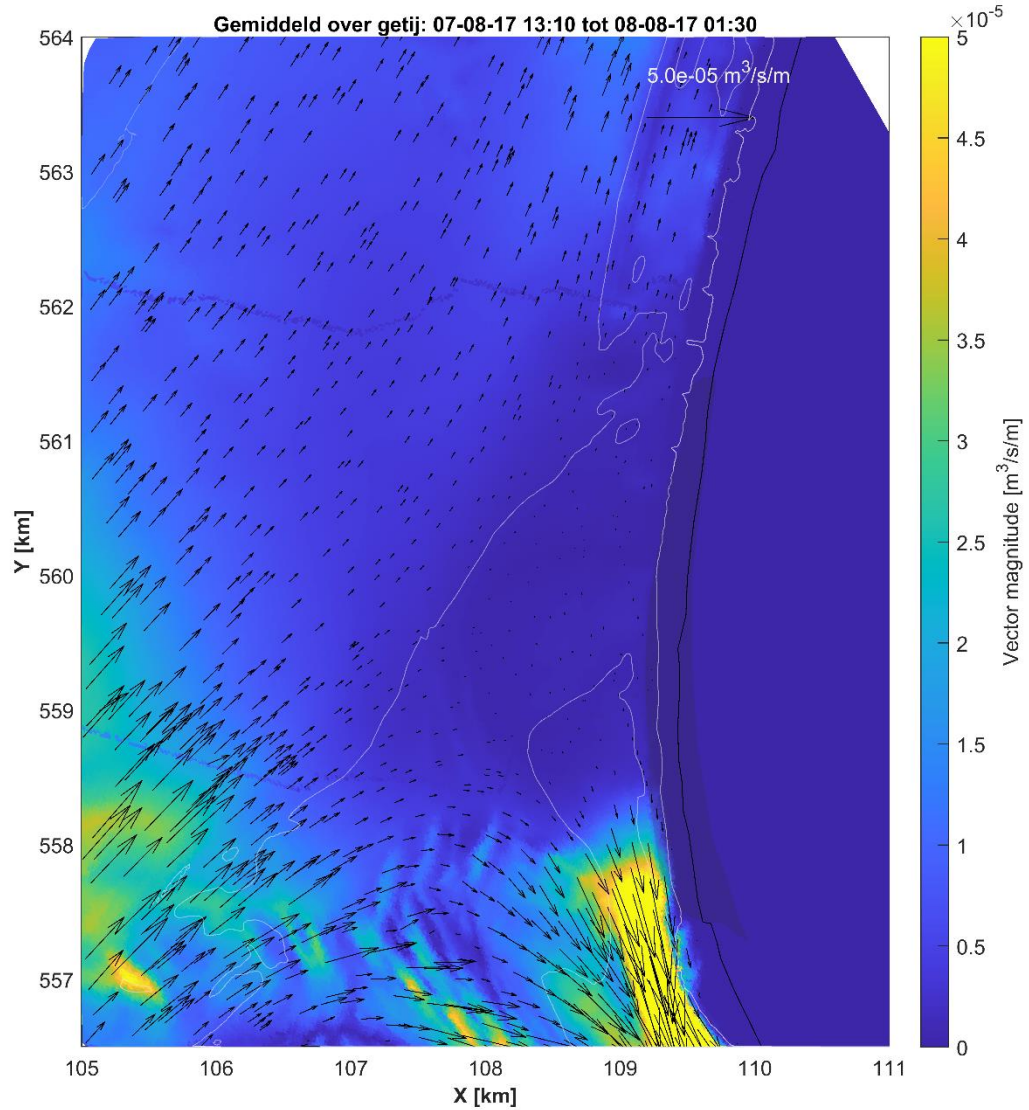
D.5 Zandmotor I variant



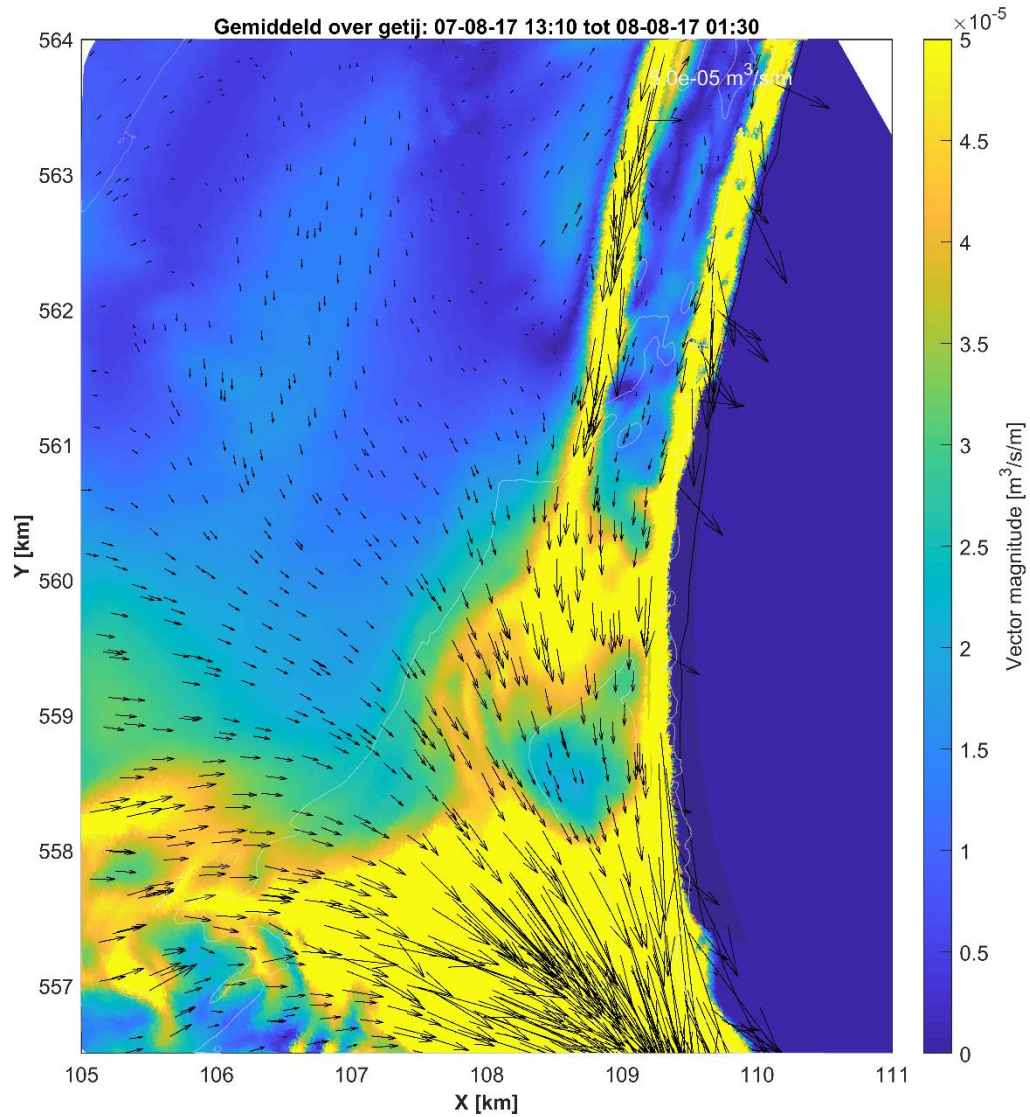
Figuur D-31: Berekende gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en ZMI suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



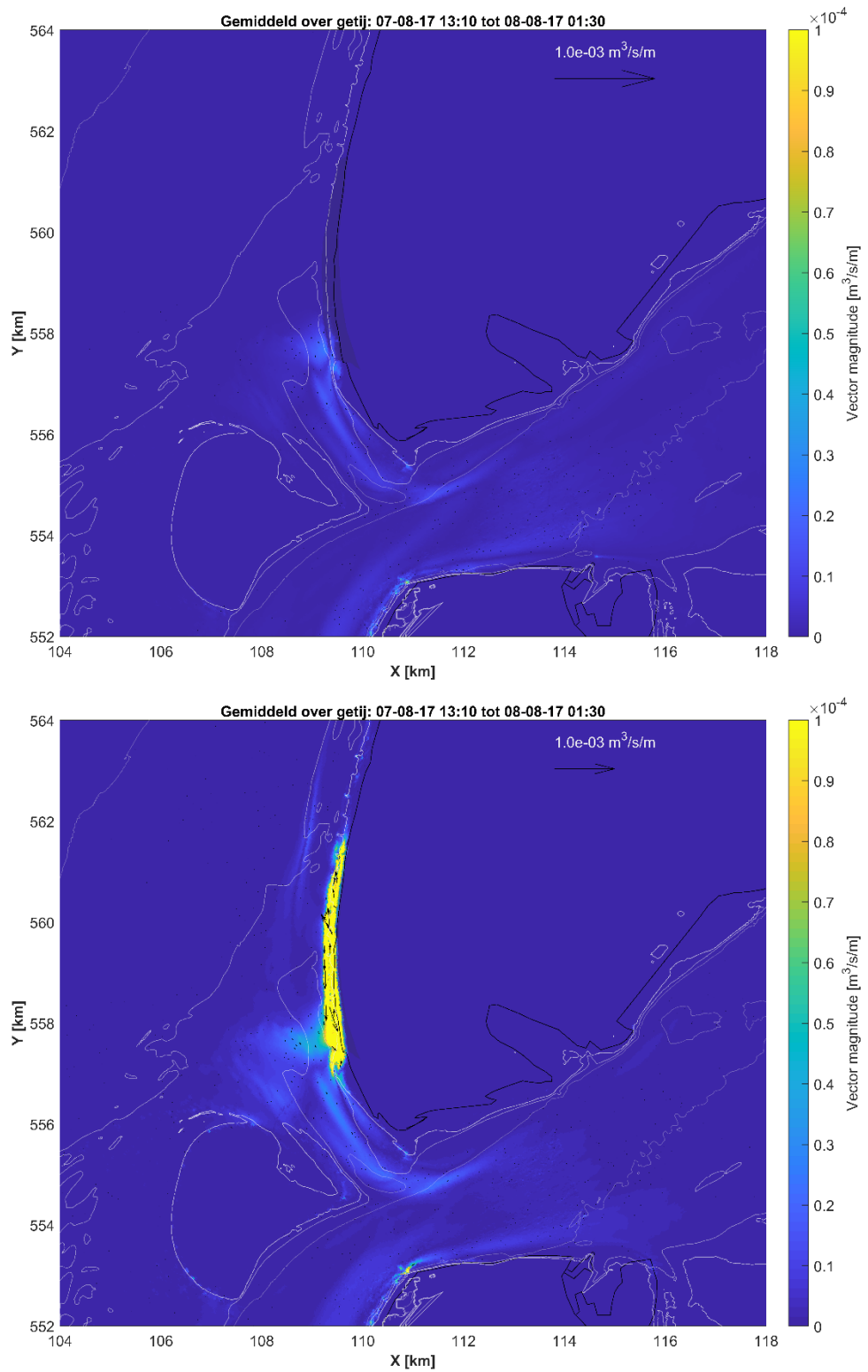
Figuur D-32: Verschil in gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en ZMI suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



Figuur D-33: Berekende getijgemiddelde transporten voor de ZMI suppletievariant ten gevolge van getij op Texel Zuidwest.

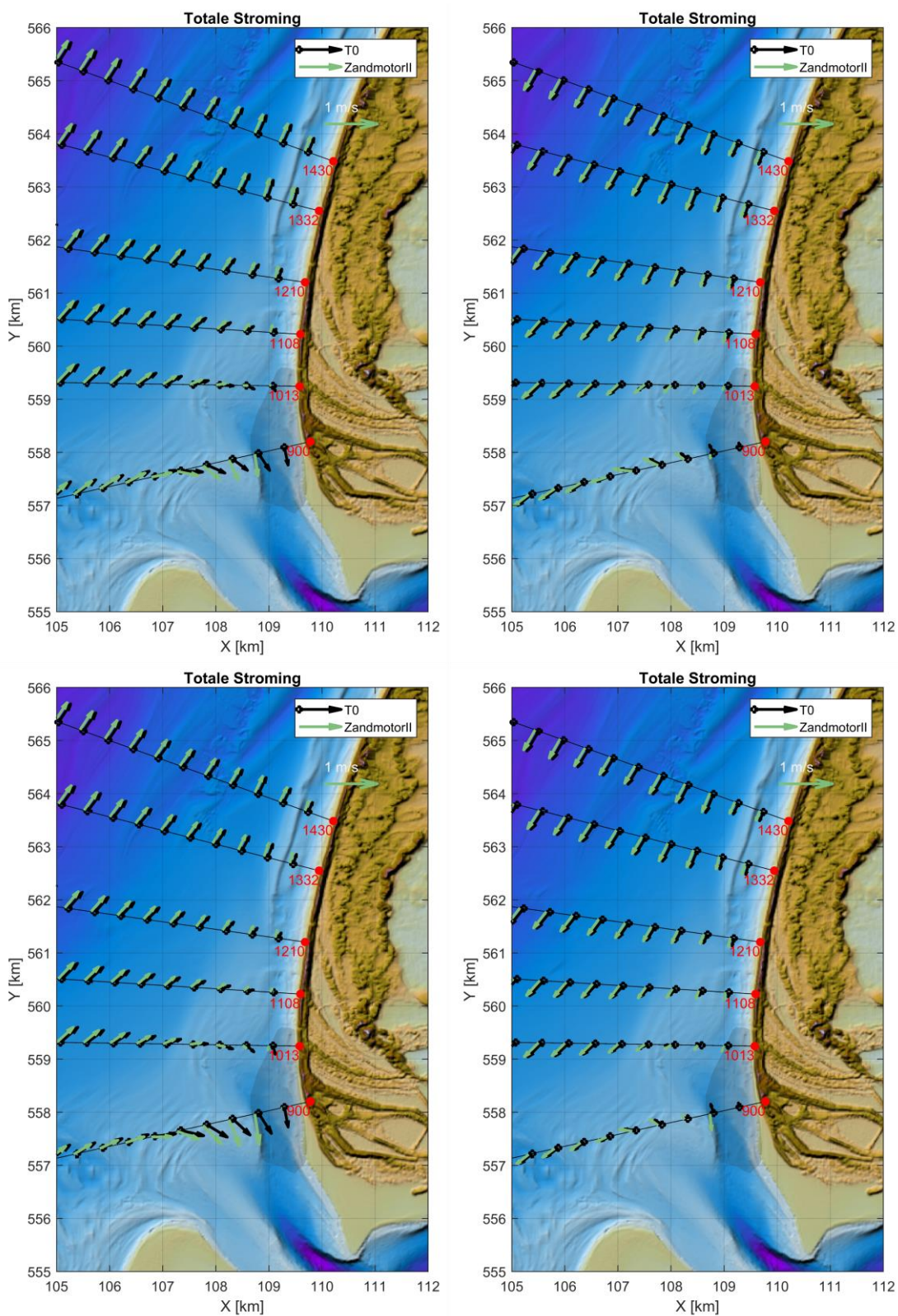


Figuur D-34: Berekende getijgemiddelde transporten voor de ZMI suppletievariant ten gevolge van getij op Texel Zuidwest.

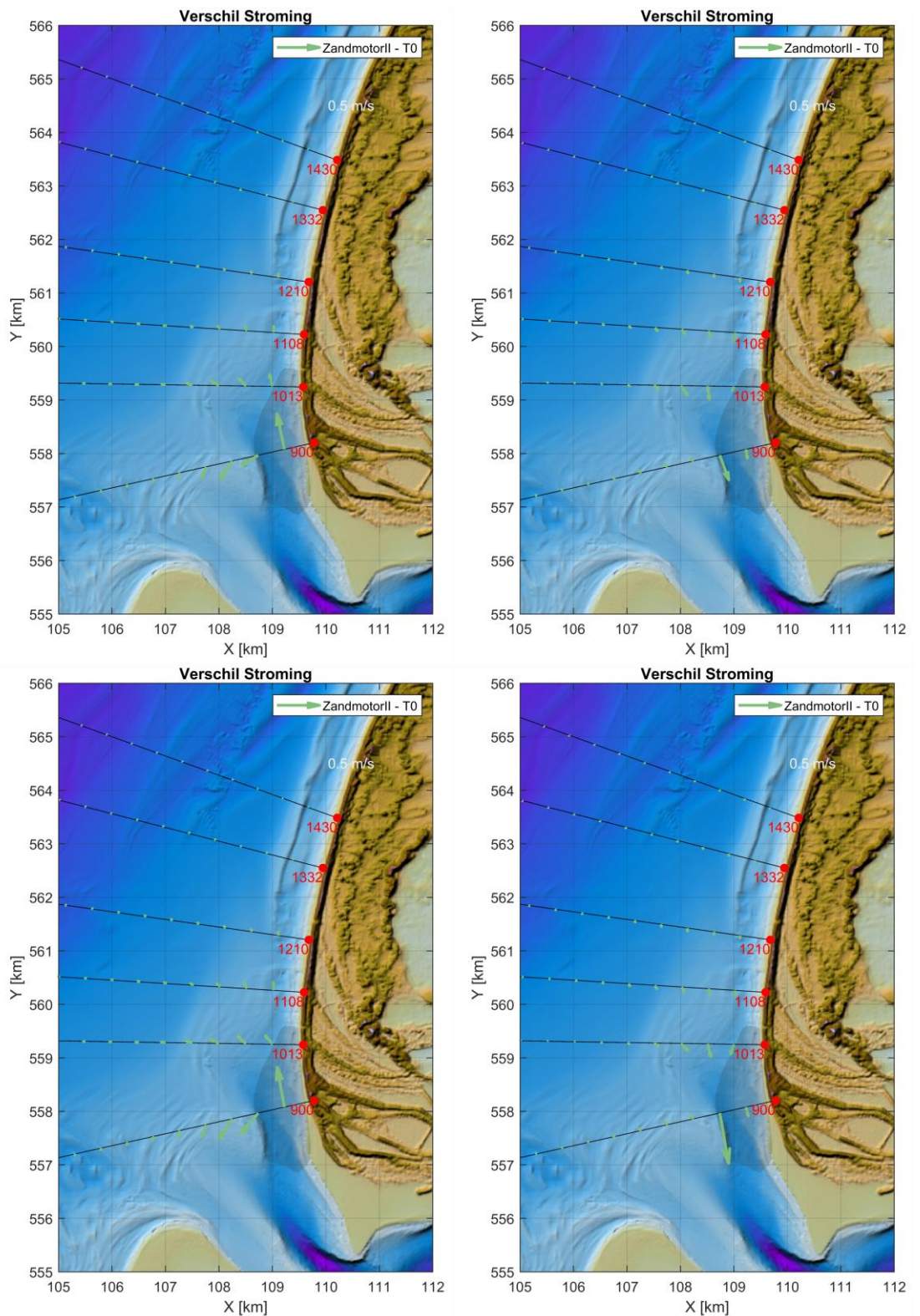


Figuur D-35: Berekende verschillen in het sedimenttransport tussen de T0 en de ZMI suppletievariant ten gevolge van getij (boven) en voor de jaarlijks gemiddelde condities (onder) op het zeegat.

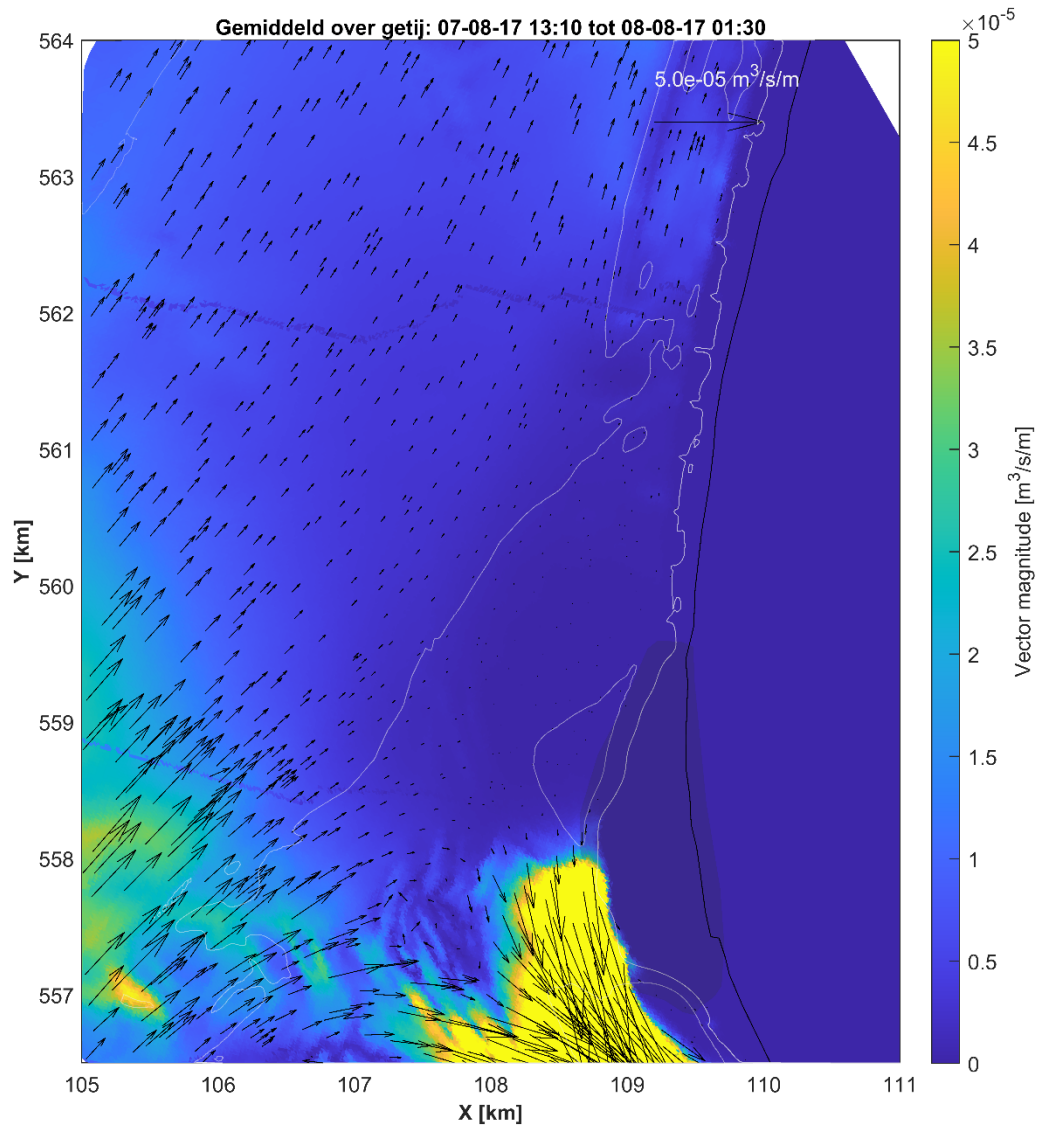
D.6 Zandmotor II variant



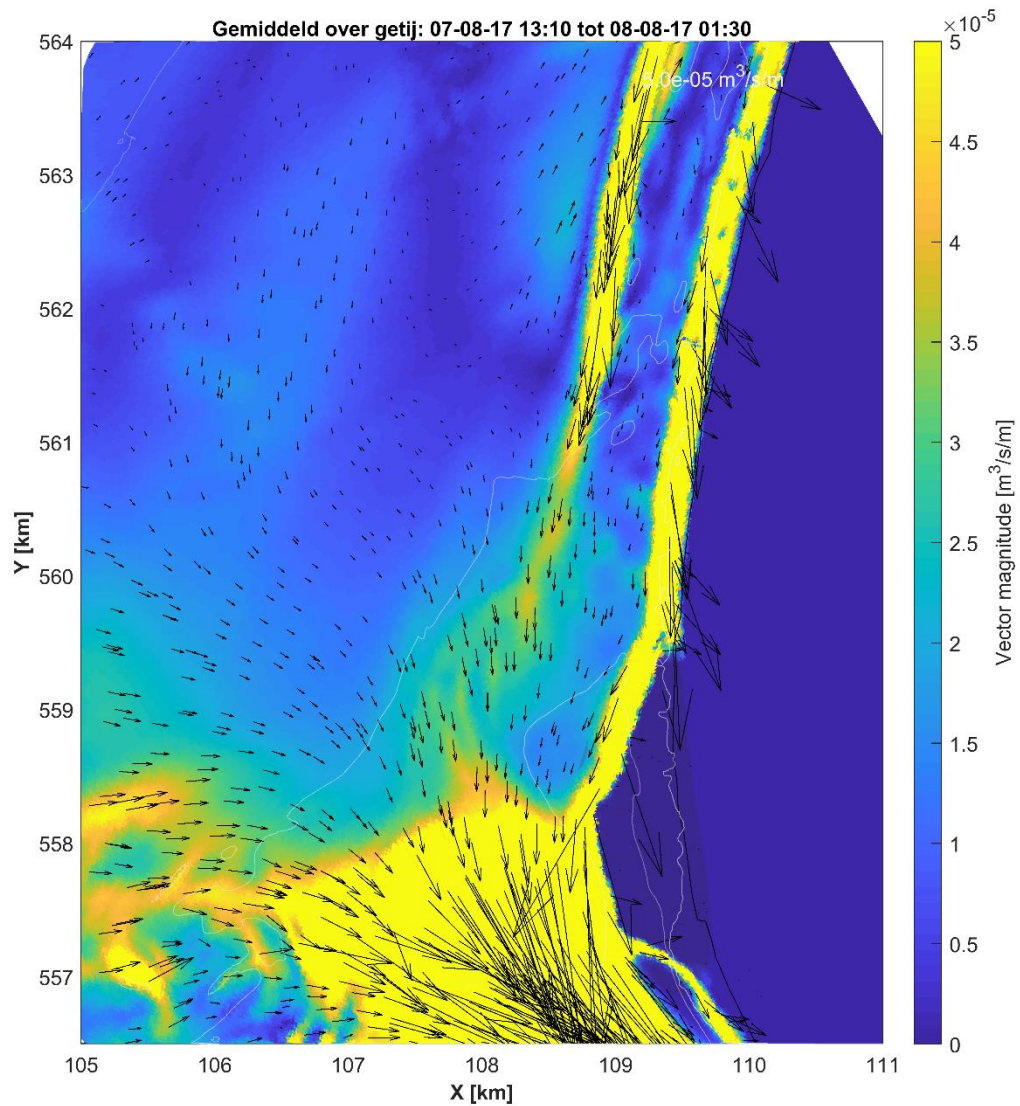
Figuur D-36: Berekende gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en ZMII suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



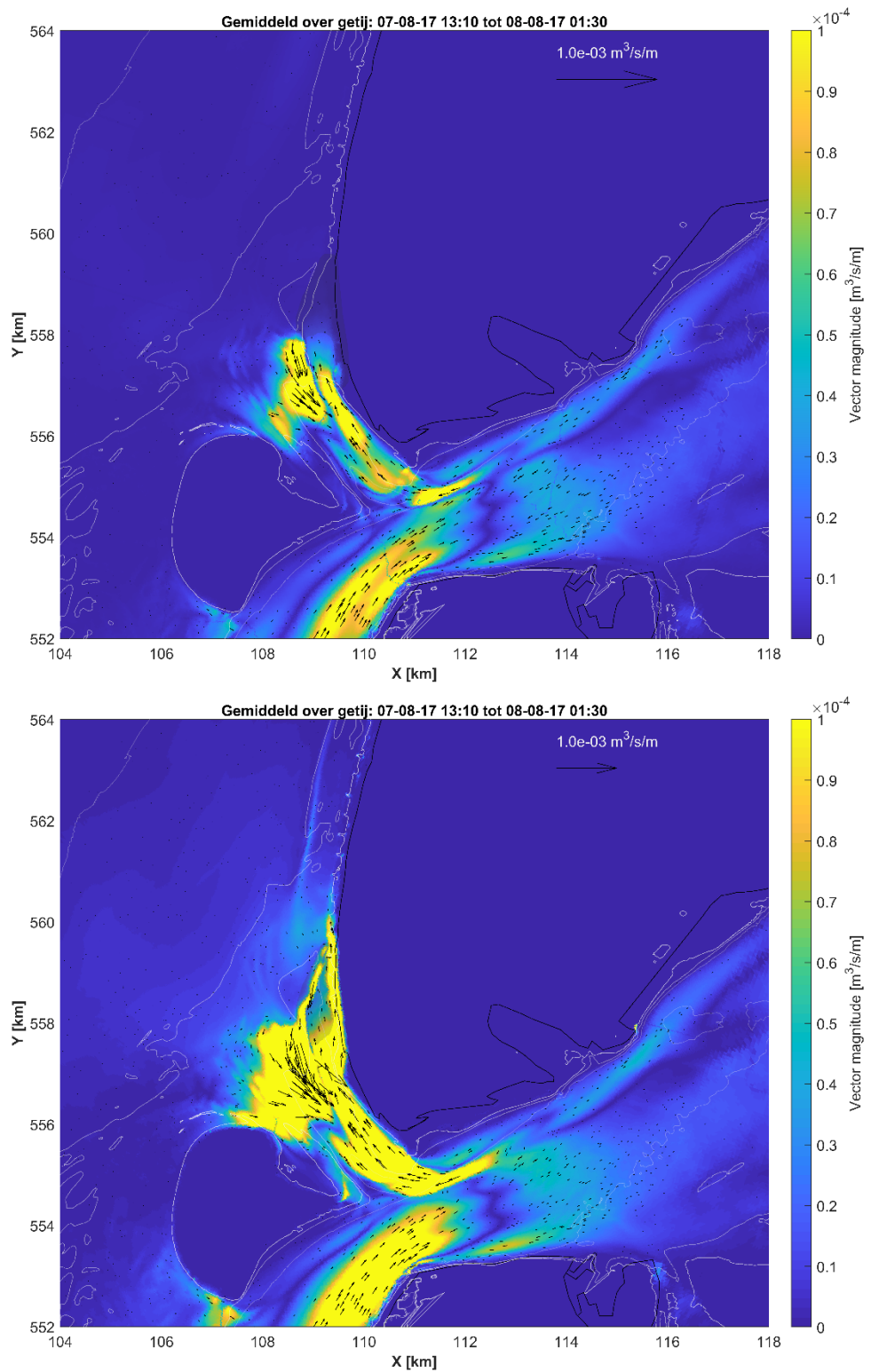
Figuur D-37: Verschil in gemiddelde strooming tijdens eb en vloed voor de T0 en ZMII suppletievariant ten gevolge van alleen het getij (boven) en voor de jaargemiddelde condities (onder).



Figuur D-38: Berekende getijgemiddelde transporten voor de ZMII suppletievariant ten gevolge van getij op Texel Zuidwest.

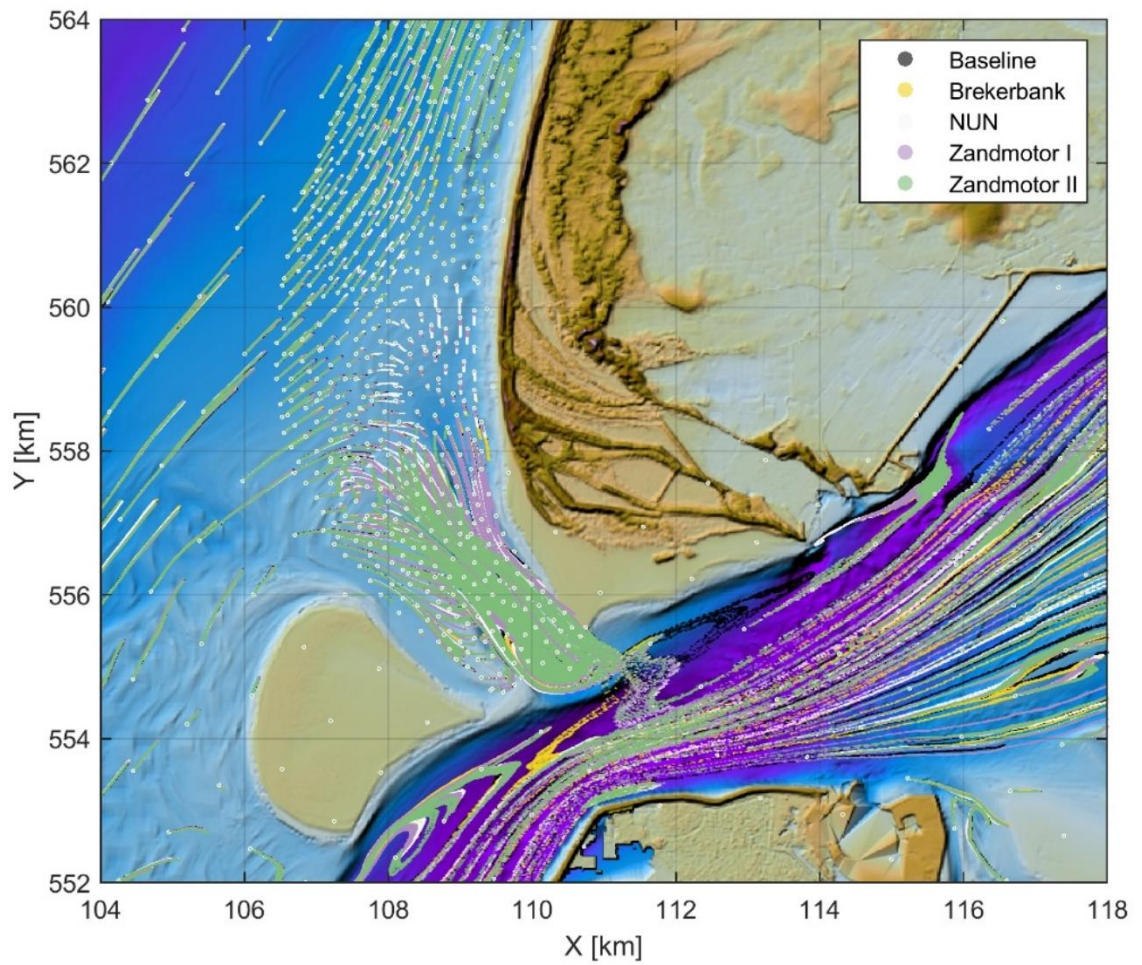


Figuur D-39: Berekende getijgemiddelde transporten voor de ZMII suppletievariant ten gevolge van getij op Texel Zuidwest.

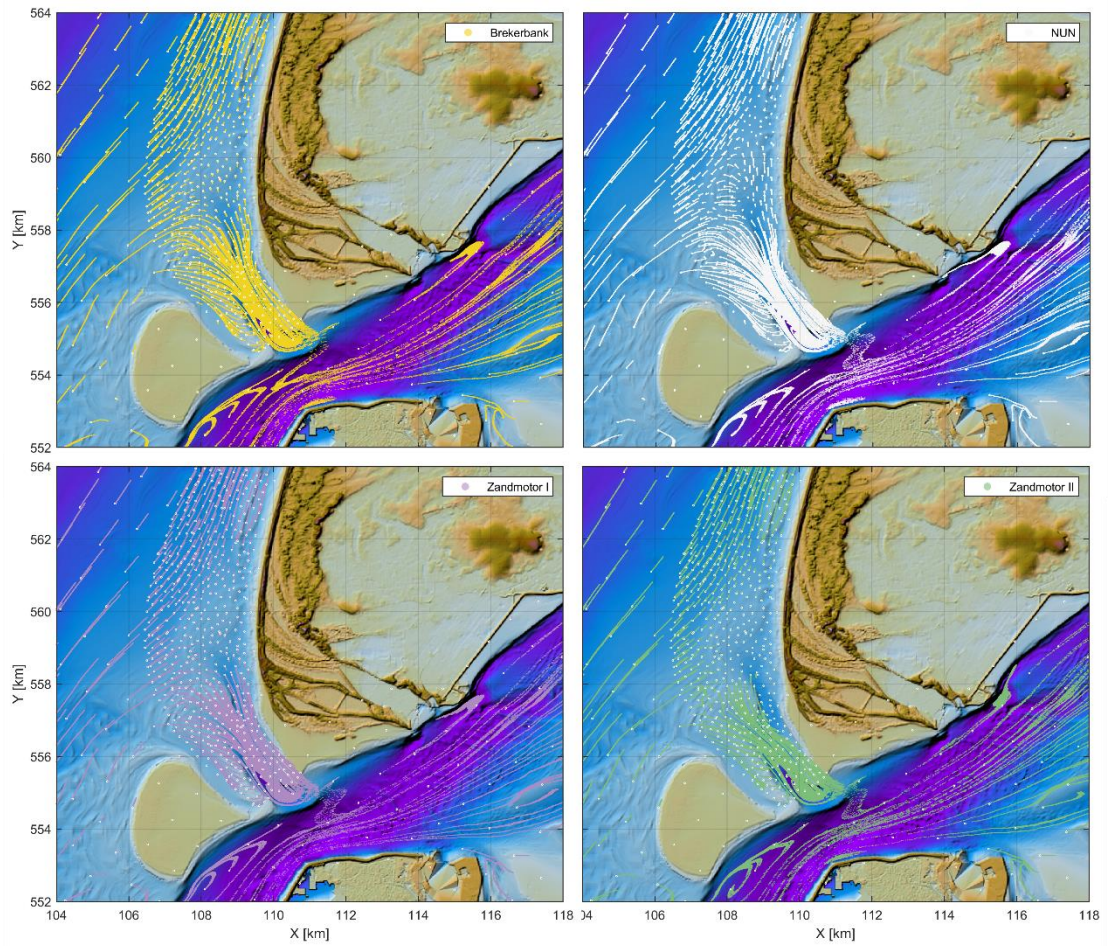


Figuur D-40: Berekende verschillen in het sedimenttransport tussen de T0 en de ZMII suppletievariant ten gevolge van getij (boven) en voor de jaarlijks gemiddelde condities (onder) op het zeegat.

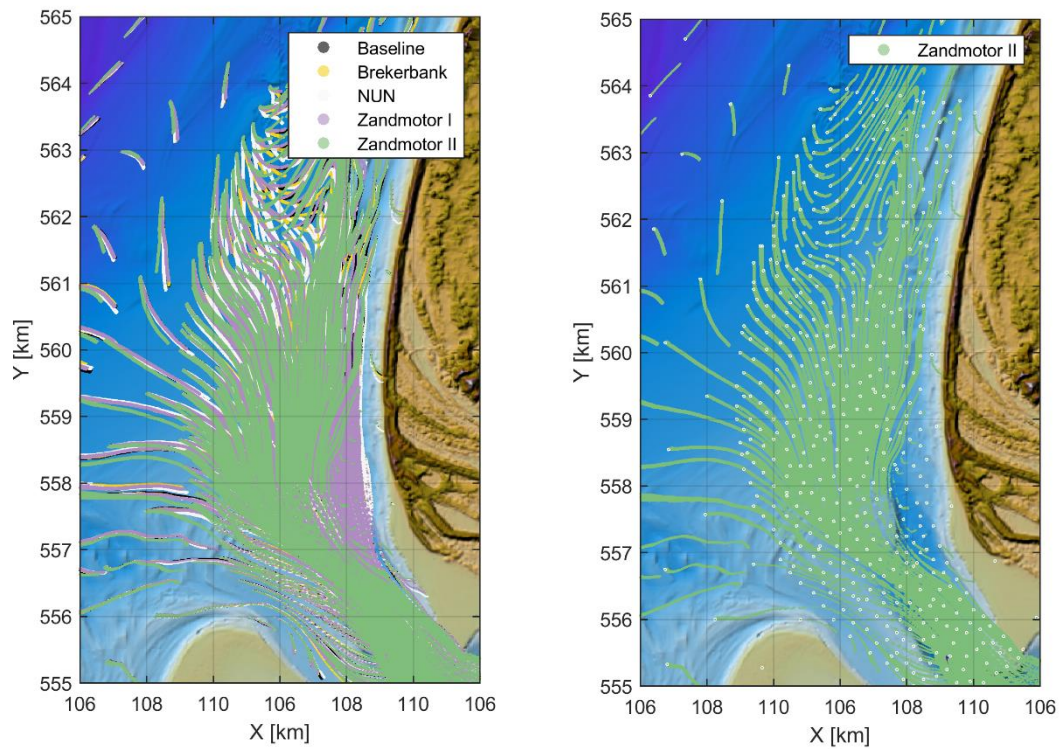
E SedTRAILS resultaten



Figuur E-1: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de 4 suppletievarianten op basis van de getijgemiddelde condities.



Figuur E-2: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de 4 suppletievarianten op basis van de getijgemiddelde condities.



Figuur E-3: Een overzicht van de sedimenttransportpaden voor de 4 suppletievarianten op basis van de jaarmiddelde condities (links) en de ZMII variant (rechts).

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