

## Morfologische analyse vooroeversuppletie Callantsoog



## Morfologische analyse vooroeversuppletie Callantsoog

### Auteur(s)

Edwin Elias

Ellen Quataert

Stuart Pearson

## Morfologische analyse vooroeversuppletie Callantsoog




<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	De heer S. Pluis
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Vooroeversuppletie, Delft3D, Callantsoog

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	10-06-2021
<b>Projectnummer</b>	11206794-004
<b>Document ID</b>	11206794-004-ZKS-0001
<b>Pagina's</b>	90
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Edwin Elias	
	Ellen Quataert	
	Stuart Pearson	

<b>Doc. Versie</b>	<b>Auteur</b>	<b>Controle</b>	<b>Akkoord</b>	<b>Publicatie</b>
1.0	Edwin Elias 	Marcel Taal 	Bob Hoogendoorn 	
	Ellen Quataert			
	Stuart Pearson			

# Samenvatting

Rijkswaterstaat en Deltares onderzoeken samen de impact van suppleties op het morfologische gedrag van de kust en de onderhoudsbehoefte. Bij Callantsoog, gelegen tussen Den Helder en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ), is de kust onderhevig aan structurele erosie. Frequent suppleren door Rijkswaterstaat is nodig om de kustlijn in stand te houden. Bij Callantsoog, tussen raai 1320 en 1421, treedt relatief veel erosie op en de BasisKustLijn wordt hier (na de laatste strandsuppletie in 2019) in 2022 alweer overschreden. Een voorliggend geultje, gelegen tussen de brekerbank en de kust met een zeewaartse uitstroom gelegen tussen raaien 1600 – 1700, is een mogelijke oorzaak van de zandverliezen. Door Rijkswaterstaat wordt daarom overwogen een suppletie toe te passen, waarbij de rechtstreekse verbinding van de geul met de vooroever wordt dichtgezet.

Deze studie beoogt antwoord te geven op de vraag *“Wat is de rol van het geultje gelegen tussen de brekerbank en de kust en kunnen verliezen in de strandzone tussen raai 1320-1421 worden beperkt door het aanleggen van de vooroeversuppletie?”*. Dit is gedaan door het systeem in 4 stappen te analyseren: (1) grootschalige analyse van het gehele kustvak tussen Den Helder en de HPZ, (2) kleinschalige analyse van het vak tussen raai 1000-2009, (3 en 4) morfostatische modellering van de situatie vóór en ná suppletie. Deze analyses vormen de basis voor de beschrijving van de morfologische veranderingen en de sedimenttransportstromen in het kustvak.

Op basis van de modellering vóór en ná de suppletie kan geconcludeerd worden dat de residuele transporten noordwaarts gericht zijn en vooral optreden op de voorliggende brekerbank en in de brandingszone langs de kust. Het geultje, gelegen tussen de brekerbank en de kust, speelt geen primaire rol in de geobserveerde erosie. Er is geen dominante sedimenttransportstroom door het geultje, noch een zeewaartse uitstroom via het geultje, te zien. Daarom wordt verwacht dat dichtzetten van het geultje geen effect heeft op de sedimentverliezen.

Op basis van de modellering wordt geconcludeerd dat de suppletie zal werken als een reguliere vooroeversuppletie. Golfbreking op de suppletie tijdens stormcondities zorgt ervoor dat de achterliggende kust wordt beschermt tegen golfaanval. Het golfbrekende effect is het sterkst ter plaatse van het geultje, omdat hier vóór de suppletie geen of een lagere brekerbank aanwezig was. Op deze wijze kan de vooroeversuppletie wel bijdragen aan een reductie van de erosie van de achterliggende kust (rond raai 1606). Op basis van de eerder uitgevoerde suppleties is het waarschijnlijk dat de vooroeversuppletie verheelt met de al aanwezige brekerbank. Deze bank zal dan langzaam richting de kust migreren en voor lange tijd aanwezig blijven in het profiel. Of deze bank zich ook ter plaatse van het geultje handhaaft, is op basis van de uitgevoerde analyses niet te voorspellen.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>7</b>
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Aanpak	8
1.4	Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Grootschalige analyse</b>	<b>9</b>
2.1	Een overzicht van het kustvak tussen Petten en Den Helder	9
2.2	Suppleties en Ingrepen	12
2.2.1	Strandhoofden	12
2.2.2	Hondsbossche en Pettemer zeewering (HPZ)	13
2.2.3	Een overzicht van de uitgevoerde suppleties	14
2.2.4	BKL herziening	15
2.2.5	Een beknopte evaluatie van de diepe vooroeversuppletie	15
<b>3</b>	<b>Kustontwikkeling nabij Callantsoog</b>	<b>17</b>
3.1	Overzicht	17
3.2	Zandvolume in de kustzone	18
3.3	Detailanalyse van de indicatoren en kustlijnprofielen	21
3.3.1	Indicatoren	21
3.3.2	Raai 1288	24
3.3.3	Raai 1320	26
3.3.4	Raai 1606	29
3.3.5	Raai 1808	31
3.4	Ontwikkeling van de 2013 vooroeversuppletie	33
3.5	Kustlijnontwikkeling nabij de HPZ	36
3.5.1	Ontwikkeling van het droogvallende strand	36
<b>4</b>	<b>Modellering van de vooroeversuppletie</b>	<b>41</b>
4.1	Het Delft3D model	41
4.1.1	Rekenrooster	41
4.1.2	Randvoorwaarden	45
4.1.3	Golven	46
4.1.4	Sedimenttransport en SedTRAILS	48
4.2	Een overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten	51
4.3	Modelresultaten voor de T0 situatie	52
4.3.1	Getijgedreven stromingen en -transporten	52
4.3.2	Invloed van golven	56
4.3.3	Golfgedreven stromingen en transporten	57
4.4	Invloed van de vooroeversuppletie (T1)	61

4.4.1	Golven	61
4.4.2	Sedimenttransport	62
4.4.3	Beïnvloeding van de bemonsteringslocaties	63
4.4.4	Discussie van de modelresultaten	64
<b>5</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>65</b>
5.1	Conclusies	65
5.2	Aanbevelingen	66
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Meetdata</b>	<b>69</b>
A.1	Jarkusgrids	69
<b>B</b>	<b>Modellering</b>	<b>72</b>
B.1	Golven (T0)	72
B.2	Vershil in golfhoogte tussen de T0-T1	74
B.3	Sedimenttransport per golfconditie (T0)	76
B.4	Sedimenttransport per golfconditie (T1)	79
B.5	SedTRAILS	82

# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond

Het onderzoeksprogramma Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. Binnen dit programma beantwoordt vragen die voortkomen uit het programma Kustlijnzorg omtrent autonome kustontwikkeling en de impact van suppleties hierop.

Een van de locaties langs de Nederlandse kust waar door Kustlijnzorg een vooroeversuppletie wordt overwogen ligt in het kustvak bij Callantsoog, gelegen tussen Den Helder en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ). De waterkering bij Callantsoog is tijdens (tussentijdse) toetsing van 2003 en 2011 negatief beoordeeld. Callantsoog behoorde daarmee tot de 'zwakke schakels' langs de kust. De kust bij Callantsoog is om die reden uitgebouwd door middel van extra zandsuppleties op het strand en de onderwateroever. Daardoor zijn het strand en het duin nu hoger en breder en voldoet de waterkering nu aan de norm. In 2017 is een nieuwe ligging van de Basiskustlijn vastgesteld, om te zorgen dat het zandvolume behouden blijft. Het handhaven van de kustlijn heeft hier dan ook een directe relatie met het waarborgen van de veiligheid van de waterkering en is essentieel. Hierom worden regelmatig suppleties uitgevoerd.

Tussen raai 1320 en 1421 treedt relatief veel erosie op (ten opzichte van het deel ten noorden hiervan). Met name raai 1360 is hierin bepalend. De BKL zal in 2022 (snel na de laatste strandsuppletie in 2019) alweer overschreden worden. Rijkswaterstaat stelt de vraag of het geultje tussen raai 1600-1700 verantwoordelijk is voor deze lokale erosie. De hypothese is dat er een stroming tussen de brekerbank en het strand gecreëerd wordt, waardoor het zand vanaf het strand naar het noorden wordt afgevoerd.

Rijkswaterstaat overweegt een vooroeversuppletie toe te passen langs de kustlijn bij Callantsoog, tussen raai 1213 en raai 1808. Doel is het compenseren van de sedimentverliezen langs het gehele kustvak en, net als een reguliere vooroeversuppletie, het verminderen van de golfbelasting op de kust. Daarnaast heeft deze suppletie ook als doel de zandverliezen te verminderen in de geul, ter hoogte van raaien 1600 – 1700 tussen de brekerbank en het strand. Hierom is de suppletie verlengd tot raai 1808, zodat ze de rechtstreekse verbinding van de geul met de vooroever doorbreekt.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van de studie is het in kaart brengen van de sedimenttransportstromen in het kustvak bij Callantsoog en de veranderingen hierin door het aanbrengen van een suppletie. De primaire onderzoeksvraag is: *Wat is de rol van het geultje gelegen tussen de brekerbank en de kust en kunnen verliezen in de strandzone tussen raai 1320-1421 worden beperkt door het aanleggen van de vooroeversuppletie?*

Behalve naar het effect van de vooroeversuppletie is op verzoek van Rijkswaterstaat ook gekeken naar:

1. de invloed van de aanleg van de Hondsbossche Duinen op het kustvak Callantsoog en
2. eventuele beïnvloeding en bedekking van bemonsteringslocaties die onderdeel zijn van het ecologische meetprogramma rond de 2017 diepe vooroeversuppletie.

## 1.3 Aanpak

Het onderzoek bestaat uit 2 delen. Ten eerste, een onderzoek van de morfologische ontwikkelingen en processen die spelen in de autonome situatie (T0). Dit onderzoek wordt uitgevoerd door een analyse van meetdata en morfostatische modellering m.b.v. Delft3D. De T0 data-analyse bestaat uit 3 onderdelen:

- (1) Grootschalige analyse  
Met behulp van de Vaklodingen en Jarkusgrids wordt een beknopte beschrijving gegeven van de grootschalige ontwikkeling van het kustvak tussen Den Helder (raai 0) en de HPZ. Deze analyse bestaat uit het actualiseren van de bestaande inzichten (o.a. Elias en van der Spek, 2017) met de nieuwste Vaklodingen.
- (2) Analyse van het kustvak Callantsoog (raai 1000-2009).  
Met behulp van de Jarkus metingen wordt de kust nabije zone tussen raai 1000 en de HPZ geanalyseerd. Deze analyse richt zicht op het bankgedrag, de vorming en werking van “de geul” tussen brekerbank en de kust. De kustindicatoren (zoals MKL, Duinvoet, GLW, GHW, droge Strandbreedte) worden ook in kaart gebracht.
- (3) Kleinschalige analyse van het lokale kustgedrag.  
De kustlijnprofielen worden gebruikt om de veranderingen in de kustzone in detail te analyseren en de effecten van de uitgevoerde suppleties in kaart te brengen. Er wordt extra aandacht besteed aan de 2013 vooroeversuppletie, omdat deze een deel van het onderzoeksgebied bestrijkt. Ook de effecten van de diepe vooroeversuppletie uit 2017 worden nader bekeken.

Naast een analyse van de meetdata worden de maatgevende processen geanalyseerd voor de T0-situatie met het Delft3D model. Er wordt een morfostatische aanpak gevolgd, waarbij zowel getij als golfsimulaties gedraaid. Het doel van deze modellering is het in kaart brengen van de rol van het geultje tussen brekerbank en strand op het kuststelsel.

Ten tweede worden de effecten van de voorgestelde vooroeversuppletie (T1 situatie) in kaart gebracht via morfostatische modellering. Het verschil tussen de T0 en T1 geeft een direct antwoord op de vraag of afsluiting van het geultje een effect heeft op de zandverliezen uit het kuststelsel.

## 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden de resultaten van de grootschalige analyse van het kustvak tussen Den Helder en de HPZ gepresenteerd. Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de grootschalige kenmerken en de uitgevoerde ingrepen. In Hoofdstuk 3 wordt de kustontwikkeling van het strandvak Callantsoog (raai 1000-2009) beschouwd. Deze analyses bestaan uit een beschrijving van het bankensysteem en analyses van zandvolumes en indicatoren. In dit hoofdstuk worden ook de diepe vooroeversuppletie aangelegd in 2017, de 2013 vooroeversuppletie en de invloed van de HPZ geanalyseerd. Hoofdstuk 4 vat de resultaten van de modellering samen. In dit hoofdstuk wordt het model en de modelaanpak beknopt beschreven (H.4.1) en een overzicht van de suppletievarianten (H.4.2). Hoofdstuk 4.3 geeft de resultaten voor de T0 simulaties weer en in Hoofdstuk 4.4. worden de resultaten van de T1 simulaties beschreven. Hoofdstuk 5 geeft een samenvatting van de resultaten en conclusies van dit onderzoek.



## 2 Grootschalige analyse

### 2.1 Een overzicht van het kustvak tussen Petten en Den Helder

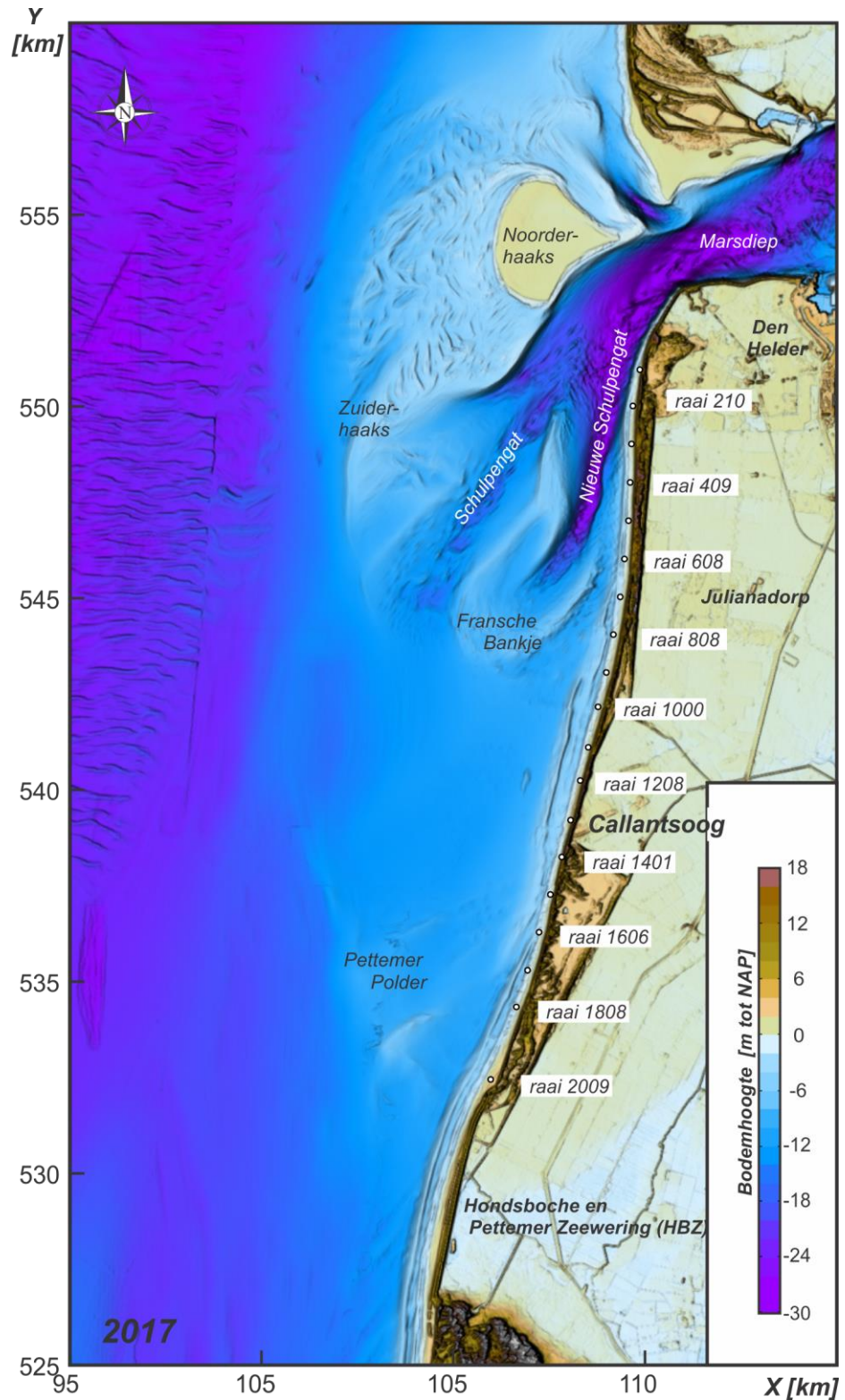
Een recent overzicht van de bathymetrie van het kustvak gelegen tussen de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ) en Den Helder staat in Figuur 2-1. Callantsoog ligt hierin centraal, net ten zuiden van de buitendelta van het Zeegat van Texel. De buitendelta strekt zich ongeveer 10 km zeewaarts en naar het zuiden uit. De ongeveer 4 km<sup>2</sup> grote ondiepte Noorderhaaks vormt het middelpunt van de buitendelta en is de scheiding tussen het noordelijke en zuidelijke gedeelte. Op de zuidelijke helft van de buitendelta bevinden zich de twee grote geulen, Schulpengat en Nieuwe Schulpengat, die worden gescheiden door de kleine, langgerekte ondiepte Bollen van Kijkduin. Het zuidelijke en landwaartse deel van het ebschild heet het Fransche Bankje. De vorming en aanwezigheid van het Nieuwe Schulpengat dicht langs de kust veroorzaakt lokaal veel zandverliezen in dit kustvak (Elias en Cleveringa, 2003; Elias en van der Spek, 2017).

De geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Texel zijn al lange tijd stabiel. Grote morfologische veranderingen hebben zich voorgedaan in de periode na afsluiting van de Zuiderzee (voltooid in 1932) tot ongeveer 1975. Sinds 1975 lijkt de configuratie van geulen en platen stabiel, wel vindt er nog steeds een afname van het buitendelta volume en erosie van de kustlijn plaats. Deze erosie is groot tussen 1975 en 2001 (6 miljoen m<sup>3</sup>/jaar), maar neemt sindsdien sterk af tot 2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Elias en van der Spek (2017) concluderen dat deze afname samenhangt met de stabilisatie van de morfologie in het zuidelijk deel van de buitendelta. Alleen lokaal (raaien 409-1000), waar geul-bank interacties dominant zijn, gaat de erosie van het Nieuwe Schulpengat en de aanliggende kustlijnen door. De landwaartse en zuidelijke migratie van de Bollen van Kijkduin veroorzaakt een gelijke, landwaartse en iets zuidelijke, migratie van de geul Nieuwe Schulpengat, met als gevolg landwaartse migratie van het daarnaast gelegen Fransche Bankje en lokale kustlijnerosie.

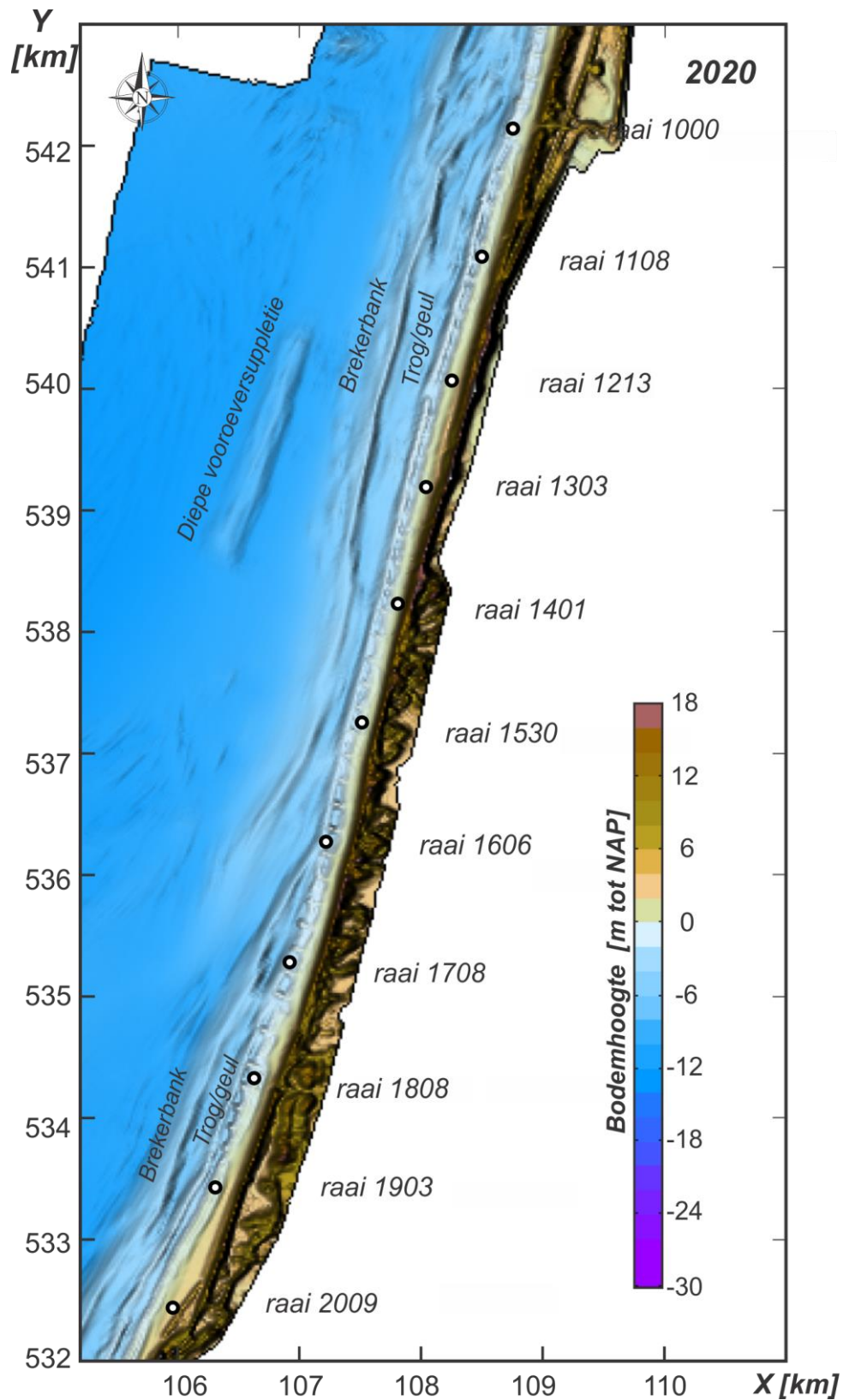
Ten zuiden van de buitendelta (raai 1000-2009; tussen Callantsoog en het noordelijke uiteinde van de HPZ) is de directe invloed van het zeegat beperkt. Toch is dit deel van de kust niet geheel te vergelijken met de ongestoorde Hollandse kust zoals die bijvoorbeeld ten zuiden van de HPZ voorkomt. De vooroever is hier relatief ondiep door de voorliggende Pettemer Polder. De Pettemer Polder is een plaats waar de Pleistocene ondergrond boven komt (De Mulder, 1983). Daarnaast wordt dit kustvak beschermd door strandhoofden die om de 250 m op het strand liggen en ongeveer 200 m in de zee steken. Het kustprofiel bestaat uit een enkele bank, evenwijdig langs de kust en stabiel in positie (Figuur 2-2). Deze bank is tussen raai 1606-1708 doorbroken. De trog of geul die zich tussen de bank en het strand bevindt stroomt hier zeewaarts uit. Tussen raai 1213 en 1401 is zeewaarts van de bank nog een kleine, tweede bank zichtbaar. Dit is de vooroeversuppletie die in 2017 op de diepe vooroever is uitgevoerd. Een bankencyclus met zeewaarts migrerende, uitdempende banken en de vorming van nieuwe banken landwaarts, zoals waargenomen langs het merendeel van de Hollandse kust is hier niet aanwezig.

In het gehele deelgebied is de benodigde onderhoudsinspanning groot, met een piek rond Callantsoog. Deze piek wordt mede veroorzaakt omdat hier de kust middels de suppleties zeewaarts wordt uitgebouwd en de BKL zeewaarts is verlegd. De negatieve zandbalans kan verklaard worden door een netto relatief groot noordwaarts transport. Er is nog wel invloed van het Zeegat van Texel omdat de ondiepten van de buitendelta zich ver zeewaarts uitstrekken. Deze ondiepten blokkeren golven uit een noordelijke richting.

Hierdoor worden de zuidelijke golven relatief belangrijker en neemt het noordwaarts transport toe. De buitendelta (en zeegat) fungeren als een put ('sink') voor het aangevoerde sediment.



Figuur 2-1: Overzicht bodemligging tussen de HPZ en Den Helder

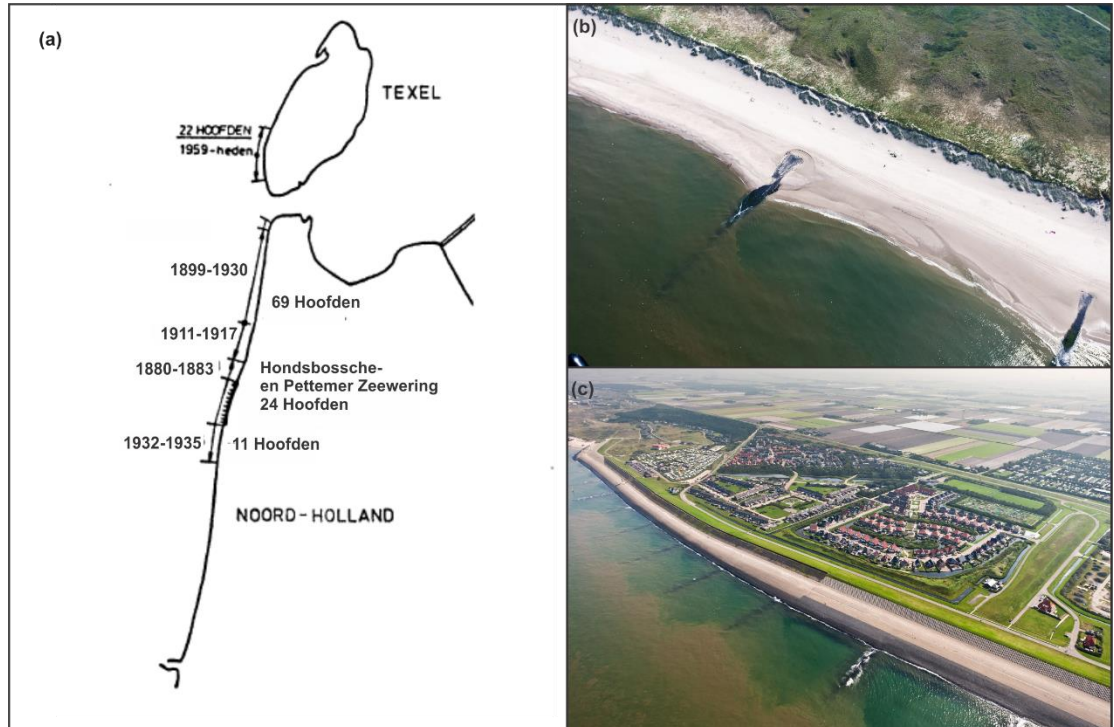


Figuur 2-2: Details van de 2020 Jarkusgrids bij Callantssoog.

## 2.2 Suppleties en Ingrepen

### 2.2.1 Strandhoofden

In het verleden zijn talrijke harde verdedigingswerken aangelegd langs de Noord-Hollandse kust (Figuur 2-3). Tussen de HPZ en de Helderse Zeewering bevinden zich 69 strandhoofden. Met de aanleg van de eerste hoofden bij Callantsoog werd al in 1880 begonnen. In 1930 lagen ze in het gehele kustvak tot de Helderse Zeewering.



Figuur 2-3: Overzicht van 'harde' constructies in het Noord-Hollandse kustvak. (a) Overzicht aanleg strandhoofden uit Verhagen en van Rossum (1990), (b) hoofden tussen Helderse en Hondsbossche zeewering, (c) overgang van Pettemer naar Hondsbossche Zeewering in 2011. Foto's zijn afkomstig van: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat.

Uitgebreide analyses naar het functioneren van de strandhoofden zijn sinds de studie van Verhagen en van Rossum (1990) niet meer uitgevoerd. Uit analyse van de strandhoofden (en palenschermen) langs de gehele kust wordt in de studie van Verhagen en Rossum geconcludeerd dat strandhoofden op twee verschillende manieren invloed kunnen hebben op het kustgedrag. Ten eerste via beïnvloeding van het door golven aangedreven brandingsstroomtransport en ten tweede door beïnvloeding van de getijstrooming. Op locaties waar strandhoofden de getijstroom van de kust afhouden lijken deze over het algemeen succesvol te functioneren. Op plaatsen waar strandhoofden de golfgedreven stroming beïnvloeden, zoals op de meeste locaties in Noord-Holland, is de effectiviteit minder duidelijk aan te tonen. Verhagen en van Rossum (1990) concluderen op basis van regressieanalyse dat de erosiesnelheid na aanleg van de hoofden tussen raai 200 en 900 juist toenam. Tussen raai 1000 en 1300 is er een afname van de erosiesnelheid en tussen raai 1300 en 2000 varieert de ontwikkeling. Door het wisselende succes van de al bestaande strandhoofden en de grote kosten voor aanleg en onderhoud, worden ze tegenwoordig, sinds de keuze voor dynamisch kustbeheer, niet meer aangelegd.

Bij de HPZ wordt door Verhagen en van Rossum geconstateerd dat de doorgaande kusterosie aan weerszijden van de dijk nauwelijks beïnvloed wordt door de strandhoofden. Deze erosie gaat in het normale tempo door, waardoor de dijk als een bolwerk in zee ligt en daarmee een gedeeltelijke scheiding tussen de kust ten noorden en zuiden ervan vormt. De studie van Allersma (1988) geeft als mogelijke oorzaken voor de kop- en staarterosie; (1) de algemene recessie van de kust, (2) toenemende contractie van de stroming rond de vooruitstekende zeewering, (3) versterking van het bewegingspatroon van de brekerbanken voor de kust, (4) het doorbreken van een erosie-resistente laag zodat een zachter materiaal is blootgesteld.

### 2.2.2 Hondsbossche en Pettemer zeewering (HPZ)

De oorsprong van de Hondsbossche zeewering ligt in de 16<sup>de</sup> eeuw toen paalwerken en strandhoofden langs de kustlijn werden geplaatst om zo de erosie van de duinreep te stoppen. De zeewering is verschillende keren landwaarts verplaatst door de erosie aan de noord -en zuidzijde hiervan. Rond 1880, met de versterking van het aanwezige zandlichaam met basaltblokken, kreeg de zeewering meer zijn huidige vorm. Strandhoofden aan weerszijden werden gebouwd om de kop- en staart-erosie te beperken. In 1981 werd de basaltdijk op Deltahoogte (11.5 m boven NAP) gebracht. De Hondsbossche Zeewering vormt één geheel met de Pettemer Zeewering die zich aan het noordelijke gedeelte bevindt. Het Pettemer deel is hoger en steiler aangelegd.



Figuur 2-4: Versterking Hondsbossche- en Pettemer Zeewering (foto Elsevier)

In 2004 bleek dat deze Zeeweringen niet aan de wettelijke eisen voldoen en zijn er noodmaatregelen getroffen om de veiligheid van het achterliggende land te waarborgen. Eind 2004 is er stalen damwand geplaatst in de kruin van de Pettemer Zeewering die 70 cm boven de dijk uitsteekt. In 2005 werd ook de Hondsbossche Zeewering aan de buitenkant verstevigd met een blokkenpatroon van beton. In 2014-2015 is de zeewering ingepakt met 35 miljoen m<sup>3</sup> zand. Er is een nieuwe primaire waterkering aangelegd van strand en duinen over de bestaande harde kering, waardoor de kustlijn 300 m zeewaarts verschoof. Het gebied wordt nu ook wel Hondsbossche Duinen genoemd.

### 2.2.3 Een overzicht van de uitgevoerde suppleties

Naast de aanleg van de Hondsbossche duinen (30.4 miljoen m<sup>3</sup>) zijn er ook vele reguliere strand-, vooroever en duinsuppleties uitgevoerd (Tabel 2-1). Zo is sinds 1976 ruim 46 miljoen aan zand gesuppleerd in het gebied tussen Den Helder en de HPZ (Suppletiedatabase RWS, 2021). Hiervan is 23.4 miljoen in het kustvak tussen raai 1000 en 2058 (tussen Callantsoog en de noordelijke aansluiting op de HPZ) aangebracht. Een klein deel (1 miljoen m<sup>3</sup>) is als duinverzwaring uitgevoerd. Het merendeel bestond echter uit strand- en vooroeversuppleties (respectievelijk 8.2 en 13.2 miljoen m<sup>3</sup>). Een bijzondere vooroeversuppletie is uitgevoerd in 2017. Deze suppletie van 1 miljoen m<sup>3</sup> is verder zeewaarts uitgevoerd in de vorm van een diepe vooroeversuppletie.

Tabel 2-1: Een overzicht van de uitgevoerde suppleties tussen Den Helder en de HPZ (bron Suppletiedatabase 2021, Rijkswaterstaat).

Locatie	Start jaar	Beginraai	Eindraai	Lengte	Type	Volume [m <sup>3</sup> ]
Callantsoog	1976	12.98	13.75	775	duinverzwaring	342,000
Callantsoog	1979	11.15	12.80	1650	duinverzwaring	470,000
Callantsoog	1986	10.83	13.73	2900	strandsuppletie	1,242,434
Callantsoog	1986	11.75	12.05	300	duinverzwaring	77,913
Zwanenwater	1987	13.76	18.10	4345	strandsuppletie	1,695,000
Zwanenwater	1987	14.70	17.84	3140	duinverzwaring	155,000
Callantsoog	1991	11.00	14.00	3000	strandsuppletie	538,404
Petten	1991	18.00	20.18	2180	strandsuppletie	371,418
Den Helder	1992	1.00	7.50	6500	strandsuppletie	615,527
Den Helder	1993	3.28	5.68	2400	strandsuppletie	280,000
Zwanenwater	1995	16.24	17.60	1360	strandsuppletie	306,840
Petten	1995	18.80	20.40	1600	strandsuppletie	361,740
Den Helder	1996	1.50	7.50	6000	strandsuppletie	400,000
Zijpe	1996	10.01	14.10	4090	strandsuppletie	459,000
Zijpe	1998	19.25	20.50	1250	strandsuppletie	228,901
Julianadorp	1999	3.95	6.28	2330	strandsuppletie	287,480
Callantsoog	1999	13.20	14.00	800	strandsuppletie	144,000
Zwanenwater	2000	16.26	16.88	620	strandsuppletie	120,000
Den Helder	2001	1.50	5.68	4180	strandsuppletie	1,290,240
Zijpe	2001	11.08	14.01	2930	vooroeversuppletie	1,499,940
Petten	2002	18.27	20.35	2080	strandsuppletie	500,561
Den Helder-Julianadorp	2003	1.50	5.88	4380	strandsuppletie	1,305,458
Groote Keeten	2003	9.13	9.43	300	vooroeversuppletie	12,243
Callantsoog-Zwanenwater	2003	10.00	16.00	6000	vooroeversuppletie	2,315,360
Callantsoog	2003	11.10	13.75	2650	strandsuppletie	438,155
Petten	2003	19.83	20.58	750	strandsuppletie	230,577
Callantsoog	2004	11.10	13.74	2640	strandsuppletie	263,972
Aansluitconstructie Petten	2004	19.83	20.58	750	strandsuppletie	133,783
Callantsoog - Zwanenwater	2006	10.00	15.20	5200	vooroeversuppletie	1,651,965
Den Helder	2007	0.00	2.00	2000	geulwandsuppletie	1,782,263
Den Helder-Julianadorp	2007	1.50	5.90	4400	strandsuppletie	1,350,448
Den Helder-Julianadorp	2007	2.00	7.10	5100	vooroeversuppletie	3,239,103
HPZ	2008	15.00	29.50	14500	vooroeversuppletie	5,700,348
Den Helder - Julianadorp	2009	7.00	10.00	3000	vooroeversuppletie	1,301,565
Julianadorp	2011	2.89	6.28	3390	strandsuppletie	652,020
Den Helder	2013	0.20	2.30	2100	geulwandsuppletie	3,500,000
Callantsoog	2013	10.00	14.21	4210	vooroeversuppletie	2,000,000
Petten	2013	19.40	20.41	1010	strandsuppletie	360,000
HPZ	2014	19.25	27.82	8570	strand-duinsuppl.	30,435,000
Julianadorp	2015	1.50	6.28	4780	strandsuppletie	1,000,000
Callantsoog	2017	12.13	14.21	2080	strandsuppletie	400,000
Callantsoog	2017	12.13	14.01	1880	diepe vooroever	1,000,000
Julianadorp	2019	3.28	7.08	3800	vooroeversuppletie	1,800,000
Callantsoog	2019	12.13	14.21	2080	strandsuppletie	400,000
Den Helder	2020	0.20	3.08	2880	geulwandsuppletie	3,500,000
Julianadorp	2020	1.50	6.48	4980	strandsuppletie	8,939
Petten	2020	21.10	22.80	1700	vooroeversuppletie	632,045
<b>Totaal</b>						<b>76,799,642</b>

## 2.2.4 BKL herziening

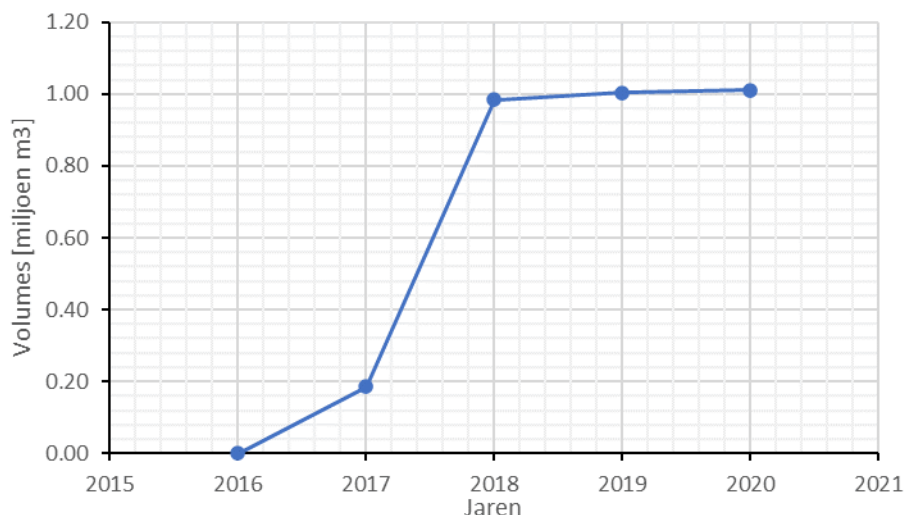
Eén van de redenen voor de hoge suppletievolumes nabij Callantssoog is de herziening van de Basiskustlijn die hier plaatsvond (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2018): De zeereep is relatief smal, terwijl zee en wind er een relatief grote belasting op uitoefenen. Daarom werd de veiligheid van de waterkering tijdens (tussentijdse) toetsingen van 2003 en 2011 negatief beoordeeld. Callantssoog behoorde daarmee tot de 'zwakke schakels' langs de kust. Er werden allerlei varianten voor versterking besproken. Uiteindelijk is ervoor gekozen om herhaaldelijk zand te suppleren op het strand en de onderwateroever. Inmiddels is het strand en het duin daardoor hoger en breder geworden en voldoet de waterkering nu aan de norm. Om de vereiste veiligheid van de waterkering te behouden, moet het volume zand behouden blijven.

In 2012 hebben Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Provincie Noord-Holland en Rijkswaterstaat in een overeenkomst vastgelegd dat de BKL zeewaarts werd verlegd. Sindsdien wordt de kustlijn op basis van de nieuwe BKL onderhouden. De afspraak was om de nieuwe ligging uiterlijk in 2017 te formaliseren. Dat betekent dat de BKL voor de raaien 1123 tot 1381 zeewaarts wordt verplaatst met 2 tot 37 meter t.o.v. de Rijkstrandpalenlijn. Het handhaven van de BKL heeft hier een directe relatie met het waarborgen van de veiligheid van de waterkering.

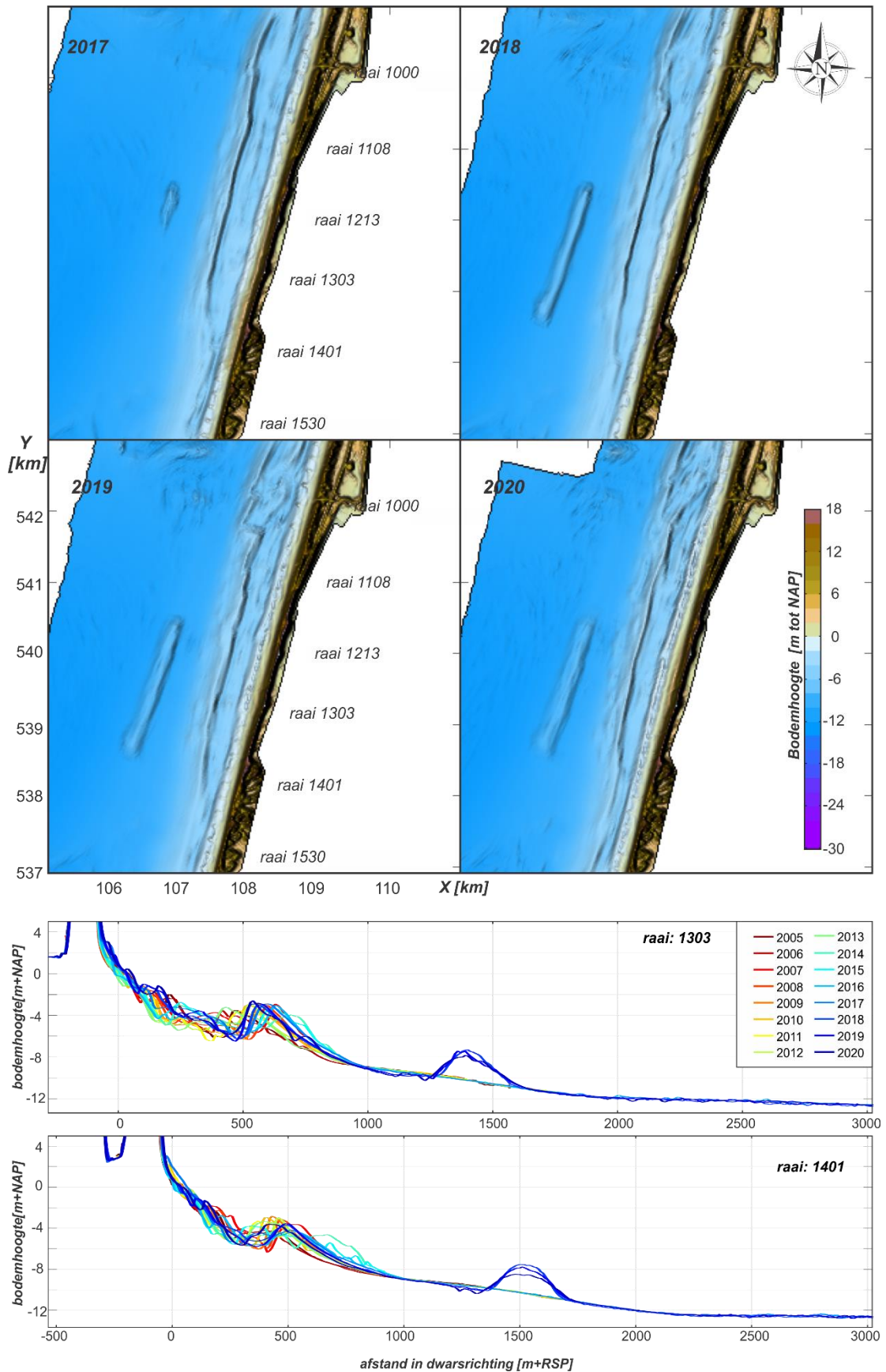
## 2.2.5 Een beknopte evaluatie van de diepe vooroeverssuppletie

De ontwikkeling van de diepe vooroeverssuppletie is weergegeven in Figuur 2-5 en Figuur 2-6. De suppletie blijft na aanleg nog duidelijk zichtbaar in de daaropvolgende metingen (Figuur 2-6). Een dwarsdoorsnede over de suppletie heen laat zien dat de hoogte van de suppletie iets afneemt, maar de breedte juist iets toe. De grootste afname in hoogte treedt op in het zuidelijke deel (-1 m). Het centrale deel van de suppletie neemt ongeveer -0.40 m in hoogte af. Doordat de breedte van de suppletie toeneemt, blijft het totale volume van de suppletie vrijwel gelijk.

De suppletie resulteert niet in duidelijke veranderingen in de omliggende kustzone. De landwaarts gelegen brekerbank blijft ook na aanleg van de suppletie behouden en de landwaartse verplaatsing zet zich verder door. Een uitgebreide analyse van het gedrag van de diepe vooroeverssuppletie volgt in 2022 (5 jaar na aanleg)



Figuur 2-5: Volumeontwikkeling van de diepe Vooroeverssuppletie (zie Figuur 3-2 voor de ligging van de polygoon waarin de volumes zijn bepaald).



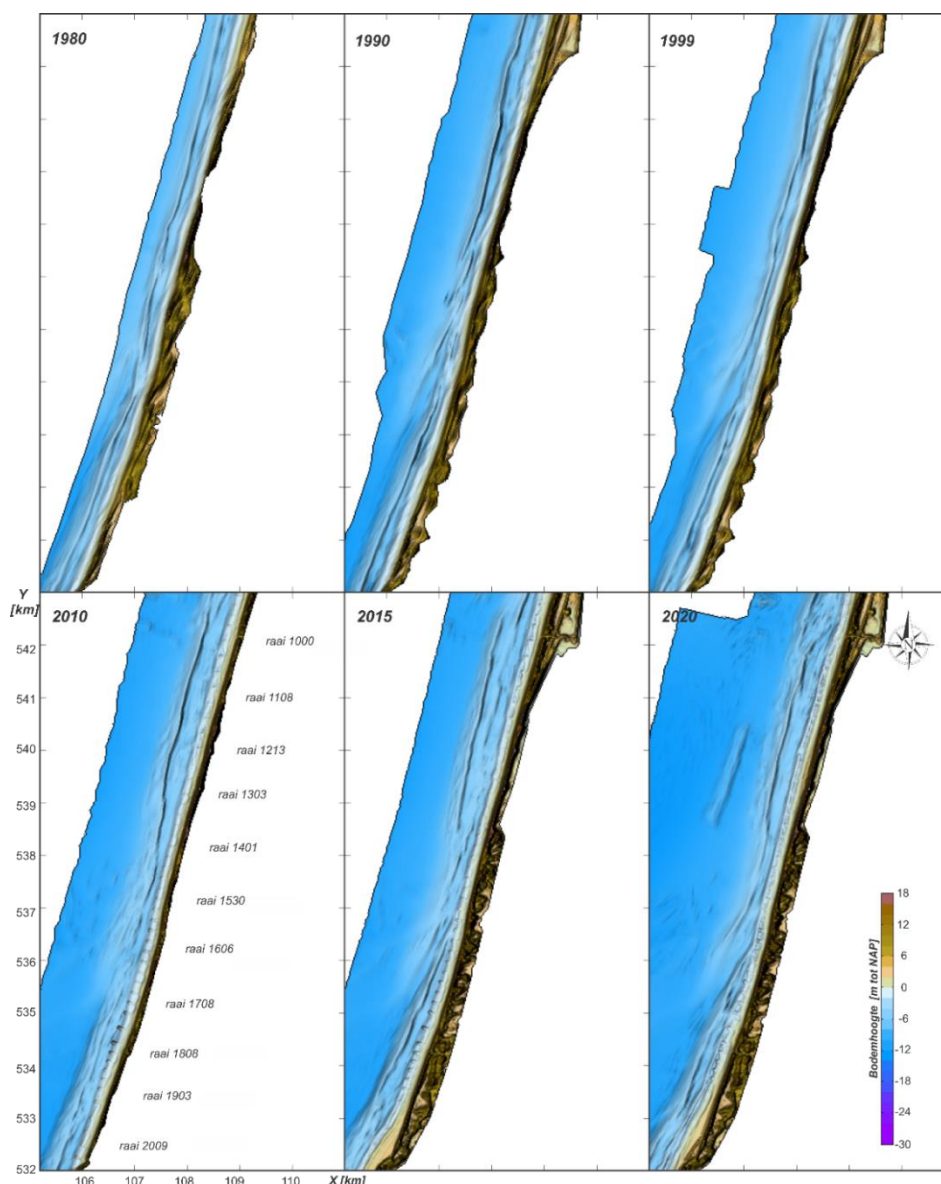
Figuur 2-6: Een overzicht van de ontwikkeling van de diepte vooroeversuppletie aan de hand van de Jarkusgrids (boven) en twee geselecteerde Jarkus raaien (onder).



## 3 Kustontwikkeling nabij Callantsoog

### 3.1 Overzicht

Figuur 2-2 geeft een gedetailleerd beeld van de morfologische kenmerken van de kustzone rond Callantsoog. Langs het strand zijn duidelijk de strandhoofden te onderscheiden. Deze hebben een tussenafstand van ongeveer 250m en een lengte van 200m. Een overzicht van de morfologische ontwikkelingen rond Callantsoog, de kust tussen raai 1000 en 2009, wordt weergegeven in Figuur 3-1. Langs de kust is gedurende vrijwel de gehele periode een enkele brekerbank te onderscheiden. Deze is continue tussen raai 1000 en 1401. Ten zuiden hiervan breekt de raai periodiek op. Rond raai 1503 ontstaat dan een ontsluiting van de achterliggende trog (of geul). Ook ten zuiden van 1606 is er een enkele brekerbank aanwezig. Deze bank ligt over het algemeen dichterbij de kust dan de noordelijke bank en is al sinds 1965 aanwezig.



Figuur 3-1: Ontwikkeling van de kustzone tussen raai 1000 en 2009 aan de hand van de Jarkusgrids voor de jaren 1980, 1990, 1999, 2010, 2015 en 2020. Zie Appendix A, A-1 voor de overige jaren.

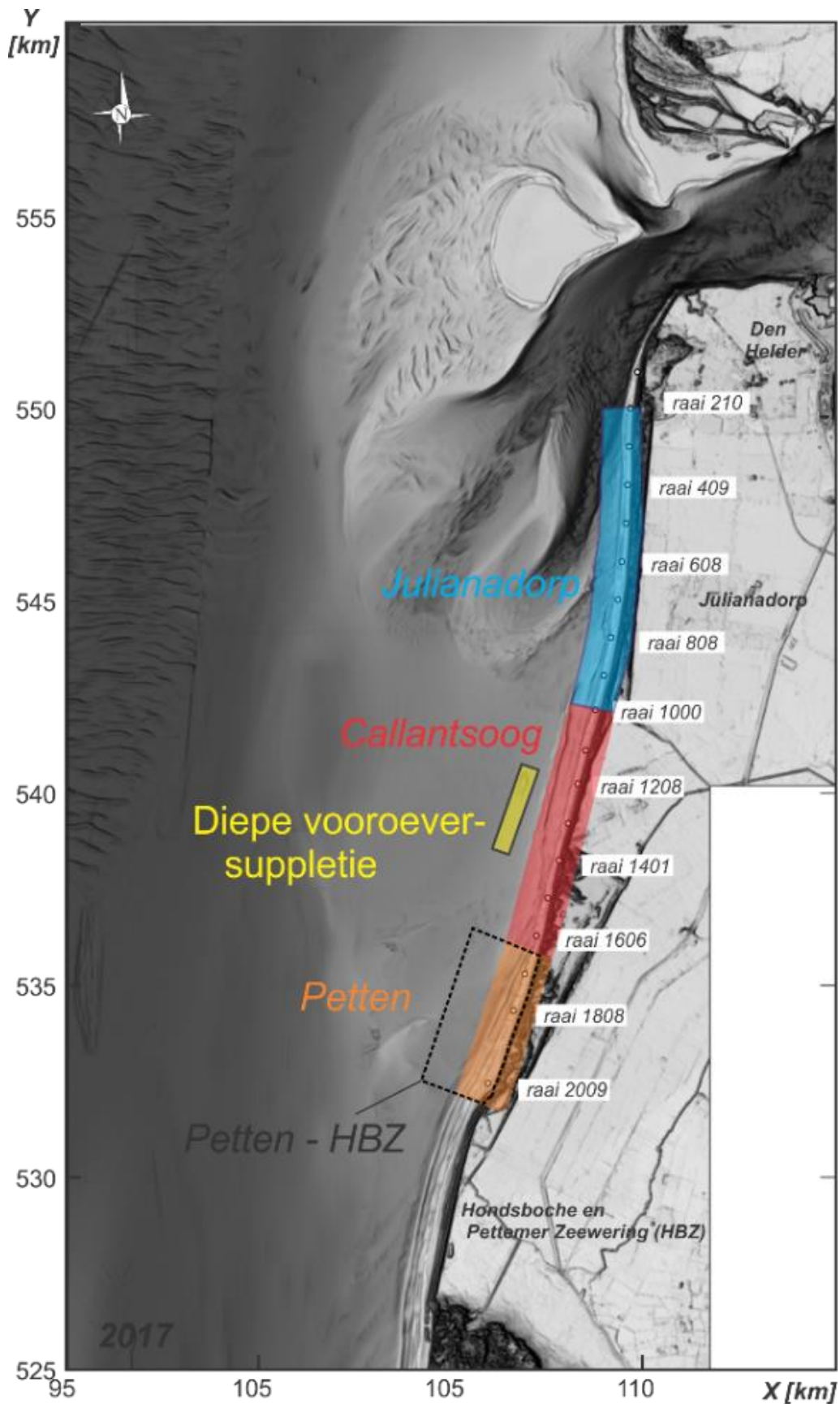
## 3.2 Zandvolume in de kustzone

Een schatting van de volumeverandering van de vooroever is weergegeven in Figuur 3-3. Het kustvak is hiervoor ingedeeld in 3 zones (Figuur 3-2). Zone 1 beslaat het kustvak tussen raaien 210 en 1000. Het kustvak Callantssoog bevat de raaien 1000 tot en met 1708. Het vak tussen raai 1798 en 2023 geeft de aansluiting met de HPZ weer. Voor iedere polygoon is het volume van het droge strand bepaald (gedefinieerd als de zone tussen Gemiddeld HoogWater (GHW) en de duinvoet (DV)), het natte strand oftewel het intergetijdengebied (tussen GHW en GLW) en in de vooroever (zone tussen de GLW en de zeevaartse grens van de polygoon).

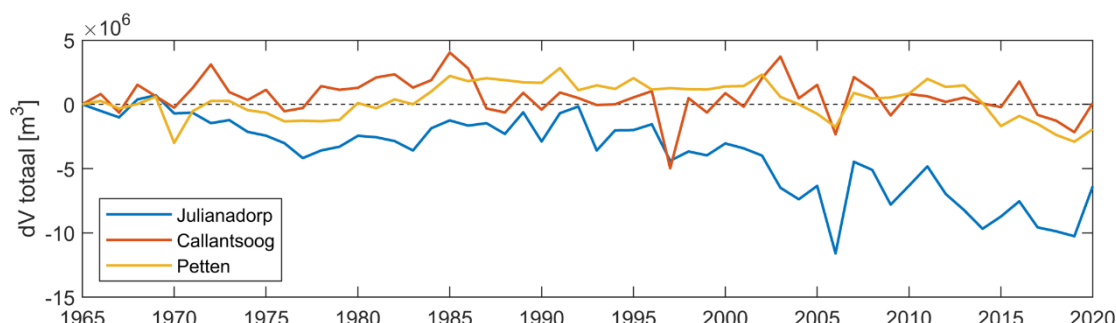
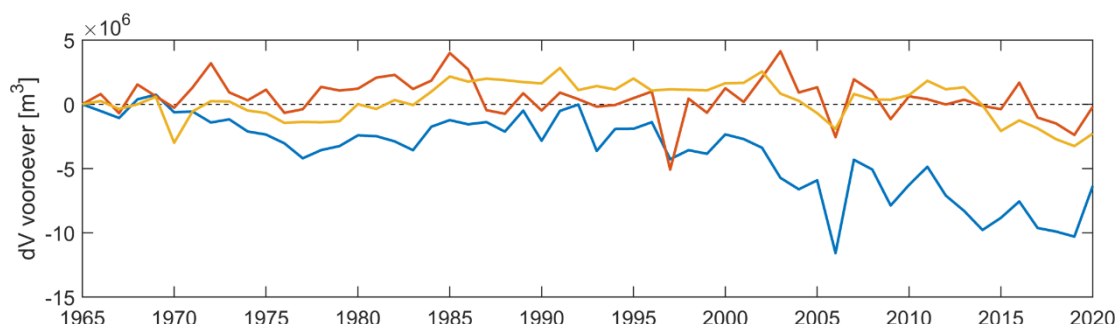
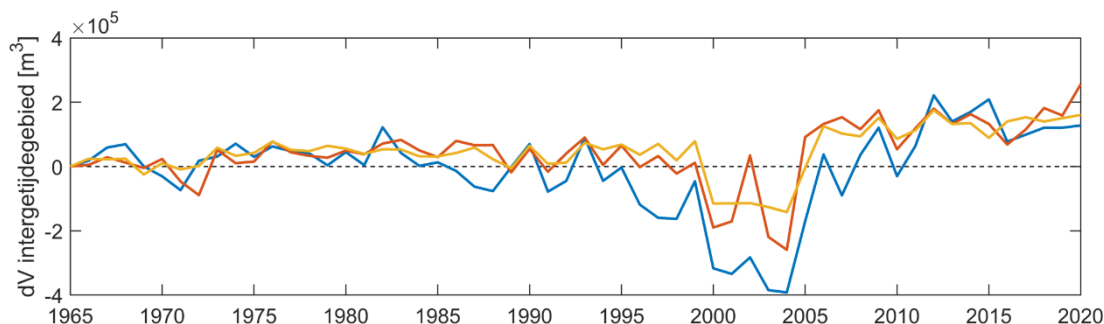
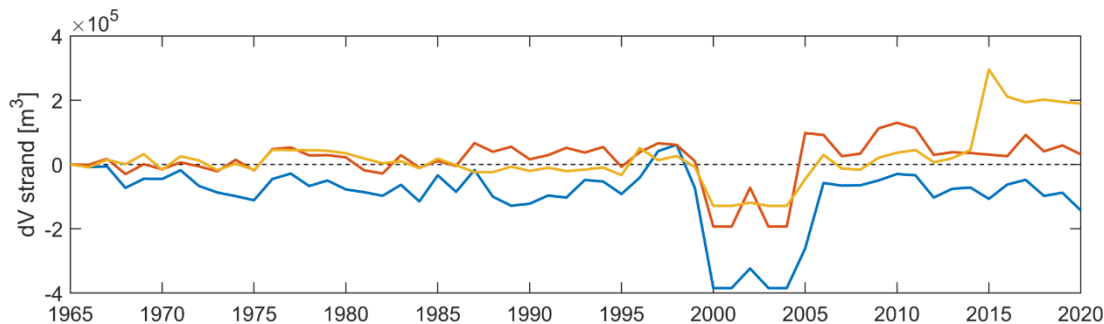
Het is opmerkelijk dat het effect van de vele suppleties en de HPZ niet in de volumebalans te onderscheiden is (Figuur 3-3, onder). De totale volumeverandering per polygoon laat zien dat de vakken Petten en Callantssoog over de gehele periode vrijwel niet in volume zijn veranderd. Alleen het vak Julianadorp neemt in volume af (0.5 miljoen m<sup>3</sup>). Deze afname is vooral gerelateerd aan het landwaarts opschuiven van het Nieuwe Schulpengat (Elias en van der Spek, 2017). Het totale volume van de Petten polygoon was tot 2002 eigenlijk vrij stabiel, maar neemt sindsdien voornamelijk af. In 2020 ligt het volume dan ongeveer 4 miljoen m<sup>3</sup> lager t.o.v. 2002. De aanleg van de HPZ is hier dus niet te onderscheiden. In de volumeontwikkeling van het droogvallende strand is deze aanleg wel te zien. Het vak laat een toename zien van ongeveer 0.2 miljoen m<sup>3</sup>. Deze toename treedt vooral op in 2015 wat impliceert dat dit volume tijdens aanleg is aangebracht. Sindsdien nemen de volumes wel iets af. De strandvolumes van de Callantssoog en Julianadorp polygoonen blijven ongeveer gelijk.

In de periode 1970-1990 vertoont het volume van het intergetijdengebied vooral fluctuaties. Tussen 1995 en 2005 liggen de volumes lager, maar dit is gerelateerd aan onvolledige meetdata. Vanaf 2005 is de meetdata weer toereikend. Alle kustvakken vertonen dan een kleine toename van de volumes zodat in 2020 de volumes ongeveer 0.2 miljoen m<sup>3</sup> zijn toegenomen.

De vooroever (onder de GLW) is in alle kustvakken in volume afgenomen. In 2019 is deze afname veel groter dan in 2020. Dit komt doordat er in 2019/2020 in totaal 5.7 miljoen m<sup>3</sup> is gesuppleerd. Ten gevolge hiervan nemen met name het natte strand en de vooroever in volume toe. Ondanks de suppleties neemt het totale volume in het vak Julianadorp af. Het verlies ligt op bijna 10 miljoen m<sup>3</sup> in 2019, maar gaat naar 5.5 miljoen m<sup>3</sup> in 2020. De verliezen in dit vak kunnen (deels) worden verklaard door de landwaartse verplaatsing van de getijgeul Nieuwe Schulpengat. Dit landwaarts verplaatsen geeft een verlies in kustvolume. Daarnaast zorgt de ligging van de geul direct langs de kust dat er veel sediment van de kust afgevoerd kan worden. Deels draagt dit sediment bij aan de vorming van de voorliggende banken en deels wordt dit sediment de Waddenzee ingevoerd. Het 2020 volume in het vak Callantssoog is vrijwel gelijk aan het volume in 1970. Hier kan geconcludeerd worden dat de kustvolumes met suppleties behouden kunnen worden. In het vak Petten namen de volumes eerst toe (tot 1985). In de periode 1985 tot 2002 blijven de volumes dan stabiel. Sinds 2002 neemt het volume dan echter weer iets af (met ongeveer 5 miljoen m<sup>3</sup>). Deze afname betekent niet dat dit zand het kustvak geheel heeft verlaten. De volumebalans is uitgevoerd met een vaste zeevaartse grens en tot de +3m NAP lijn landwaarts. Een volumetoename van het duin (boven de 3m NAP) is hier dan ook niet in meegenomen. Ook het zeewaarts opschuiven van het kustprofiel kan een kunstmatig volumeverlies veroorzaken. Als de landwaartse grens zeewaarts verschuift neemt het rekenvak voor de volumebalans in oppervlakte af. In Hoofdstuk 3.5 is daarom de volumebalans over een kortere periode bepaald. De recente metingen strekken zich verder zeewaarts uit, waardoor een nauwkeurigere volumebalans kan worden bepaald. Uit de recente balans blijkt dat het kustvak na aanleg van de Hondsbosche Duinen in volume is toegenomen.



Figuur 3-2: Overzicht van de polygonen waarover de volumeveranderingen van de kustzone zijn bepaald. Zie H.3.4 voor volumeontwikkeling van polygoon: Petten-BHZ

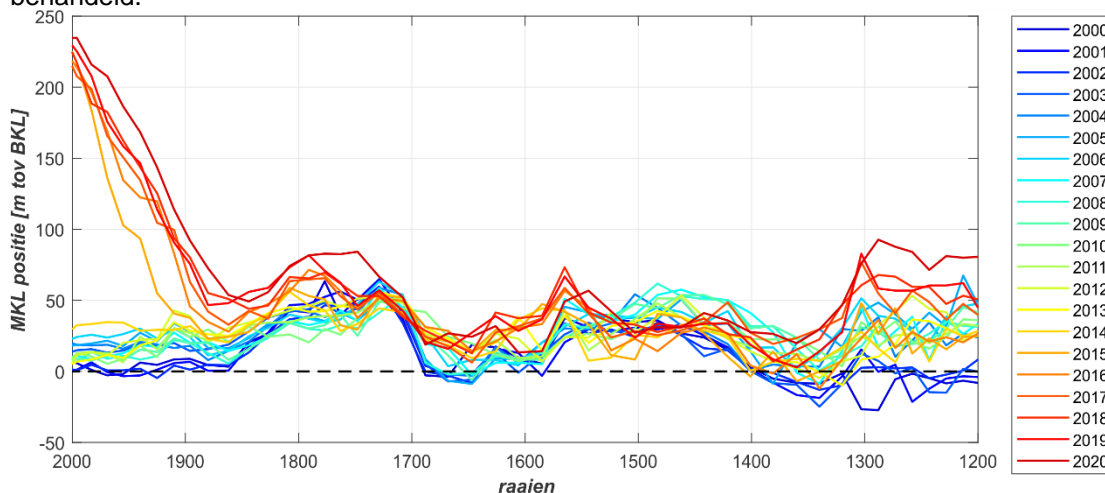


Figuur 3-3 (van boven naar onder): Een overzicht van de volumeveranderingen voor het droge strand (+0.80 tot +3 m NAP), het natte strand (-0.90m - +0.80m NAP) en de vooroever tussen -10 en -0.90 m NAP. De kustzone is onderverdeeld in 3 deelpolygonen Julianadorp (raai 210-1000), Callantsoog (raai 1000-1708) en Petten (1708-2023). Onderste figuur geeft de totale volumeverandering per polygoon. Let op: de dip in volume van strand en intergetijdegebied tussen 2000 en 2004 wordt veroorzaakt door incomplete datasets. De volumes van intergetijde gebied en strand zijn weergegeven in  $10^5$  en die van vooroever en het totaal in  $10^6$ .

### 3.3 Detailanalyse van de indicatoren en kustlijnprofielen

#### 3.3.1 Indicatoren

Een overzicht van de ontwikkeling van de indicatoren tussen raai 1200 en 2000 wordt gegeven in Figuur 3-4, Figuur 3-5 en Figuur 3-6. De ontwikkeling van de indicatoren sinds 1965 en van het totale kustvak (raai 0-2000) worden voor de volledigheid samengevat in Figuur 3-6. In deze figuur vallen twee zaken op. Ten eerste zijn grote ruimtelijke en temporele variaties in ligging zichtbaar. Ten tweede verplaatsen de GHW (Gemiddeld Hoogwater), GLW (Gemiddeld Laagwater) en DV (Duinvoet) zich tussen raai 0 en 1400 zeewaarts en tussen raai 1400-1900 landwaarts. In dit hoofdstuk richt de analyse zich op vooral op het gebied tussen raaien 1200 en 1800 (Figuur 3-4, Figuur 3-5). Het vak tussen raai 1800 en 2000 heeft in 2015 een duidelijke trendbreuk na aanleg van de HPZ. De ontwikkelingen nabij de HPZ worden in Hoofdstuk 3.4 behandeld.

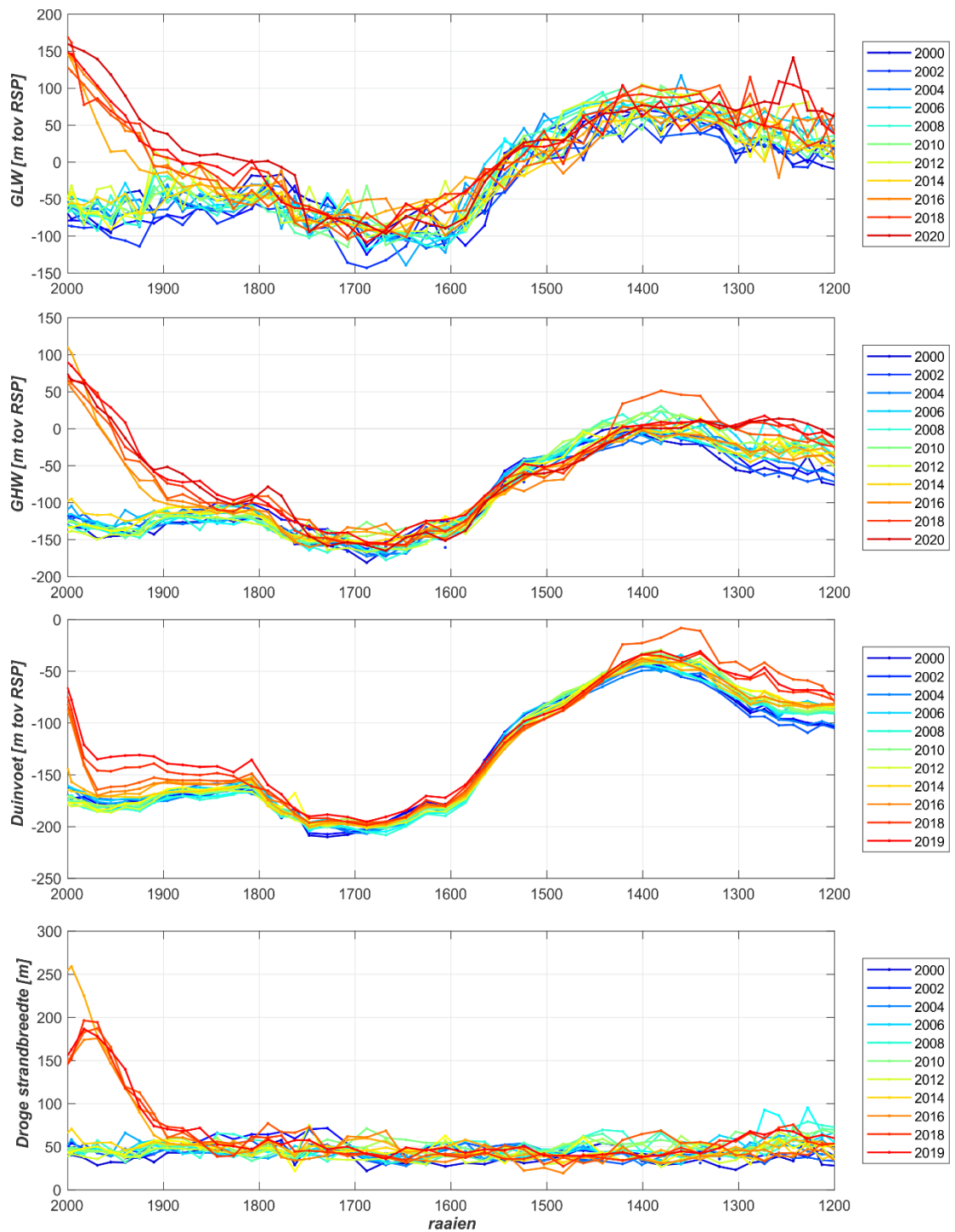


Figuur 3-4: Verloop van de MKL positie uitgedrukt ten opzichte van de BKL-positie voor het kustvak Callantssoog gelegen tussen raaien 1200 en 1800 over de periode 2000-2020.

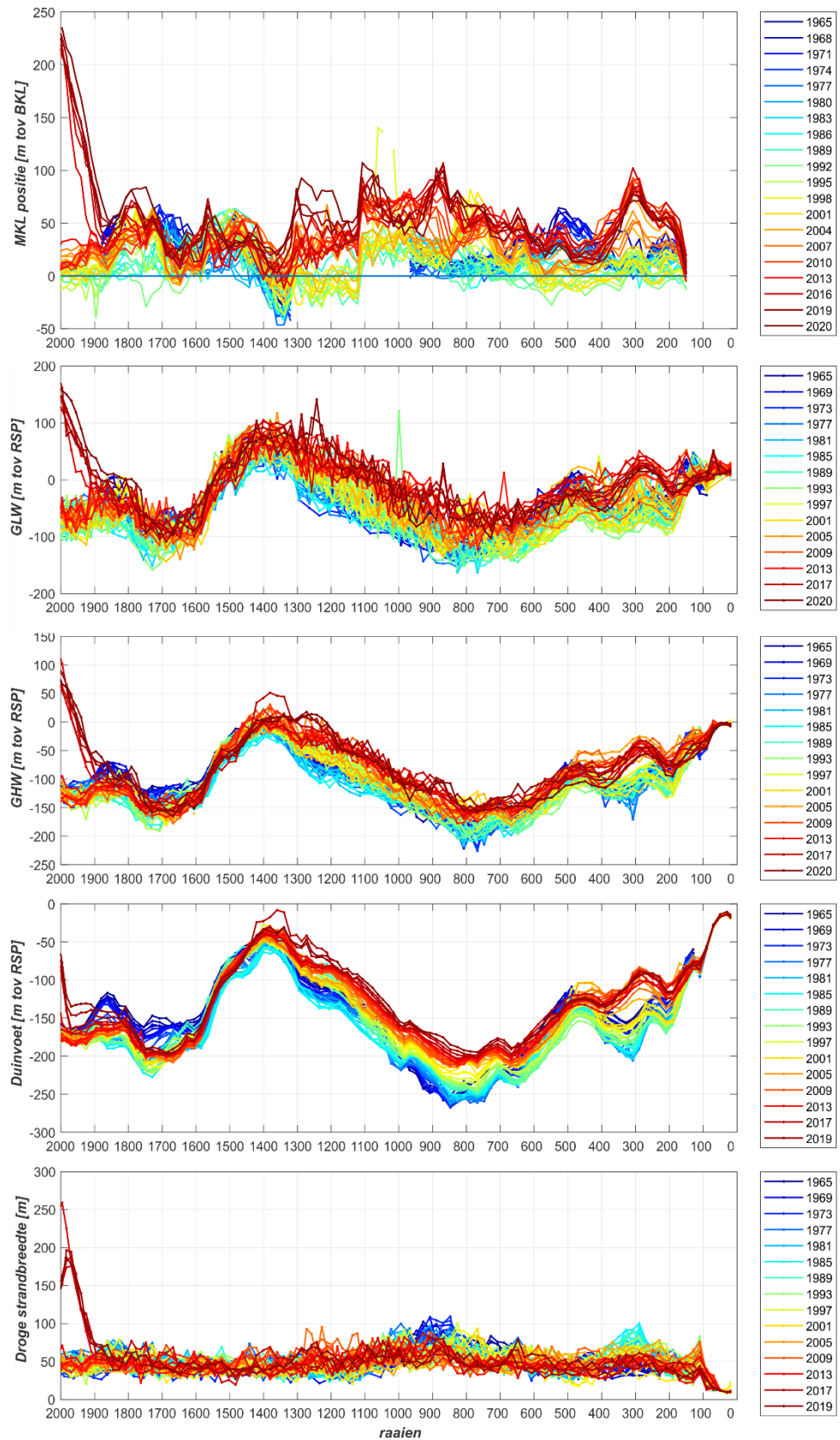
De MKL vertoont een grillig verloop met relatief grote fluctuaties tussen de verschillende raaien (Figuur 3-4). De huidige MKL ligt over het gehele kustvak zeewaarts van de BKL. Tussen raai 1350-1400 is de afstand tussen MKL en BKL echter minimaal. Sinds 2000 is de MKL overwegend zeewaarts verplaatst. Uitzondering hierop is het gebied tussen raai 1700 – 1750 en het gebied tussen raai 1400-1550. De grootste verplaatsing trad op tussen raai 1200 en 1300. Hier is de MKL meer dan 80 m zeewaarts verplaatst, dit wordt veroorzaakt door de zeewaartse verlegging van de BKL en de hieraan gerelateerde benodigde suppletie inspanning (zie analyse raai 1288 in paragraaf 3.2.2.). De aanleg van de Hondsbossche duinen is in de MKL duidelijk zichtbaar vanaf raai 1860. Ook tussen raai 1748 en 1860 is er een zeewaartse verplaatsing zichtbaar.

De lijnen van gemiddeld hoogwater (GLW), gemiddeld laagwater (GHW), duinvoet (DV) en droge strandbreedte worden weergegeven in Figuur 3-5. Zowel de GHW en GLW vertonen een duidelijk fluctuerend karakter met een bandbreedte in ligging van rond de 50m. De 2020 positie ligt tussen raai 1400 en 1800 ongeveer in het midden van deze bandbreedte. Ten zuiden en ten noorden hiervan ligt de positie juist zeewaarts van het gemiddelde. De duinvoet ligt stabiel in positie. Tussen raai 1440 en 1800 zijn fluctuaties beperkt, wel ligt de duinvoet tussen 1440 en 1600 over het algemeen landwaarts van de 2000 positie en tussen raai 1600-1800 zeewaarts. Ten noorden en zuiden hiervan verplaatst de duinvoet zich zeewaarts. De droge strandbreedte ligt gemiddeld rond de 50m en vertoont vooral fluctuaties rond deze evenwichtsligging.

Een vergelijking tussen de recente trends Figuur 3-5 en Figuur 3-6 laat duidelijk een kentering in gedrag zien door het uitvoeren van suppleties. In het gebied tussen raai 1550-1800 vond in de periode 1965-1995 een duidelijke terugtrekking plaats. Sindsdien zijn de GHW en DV weer weer zeewaarts verplaatst en daarna vrijwel gestabiliseerd.



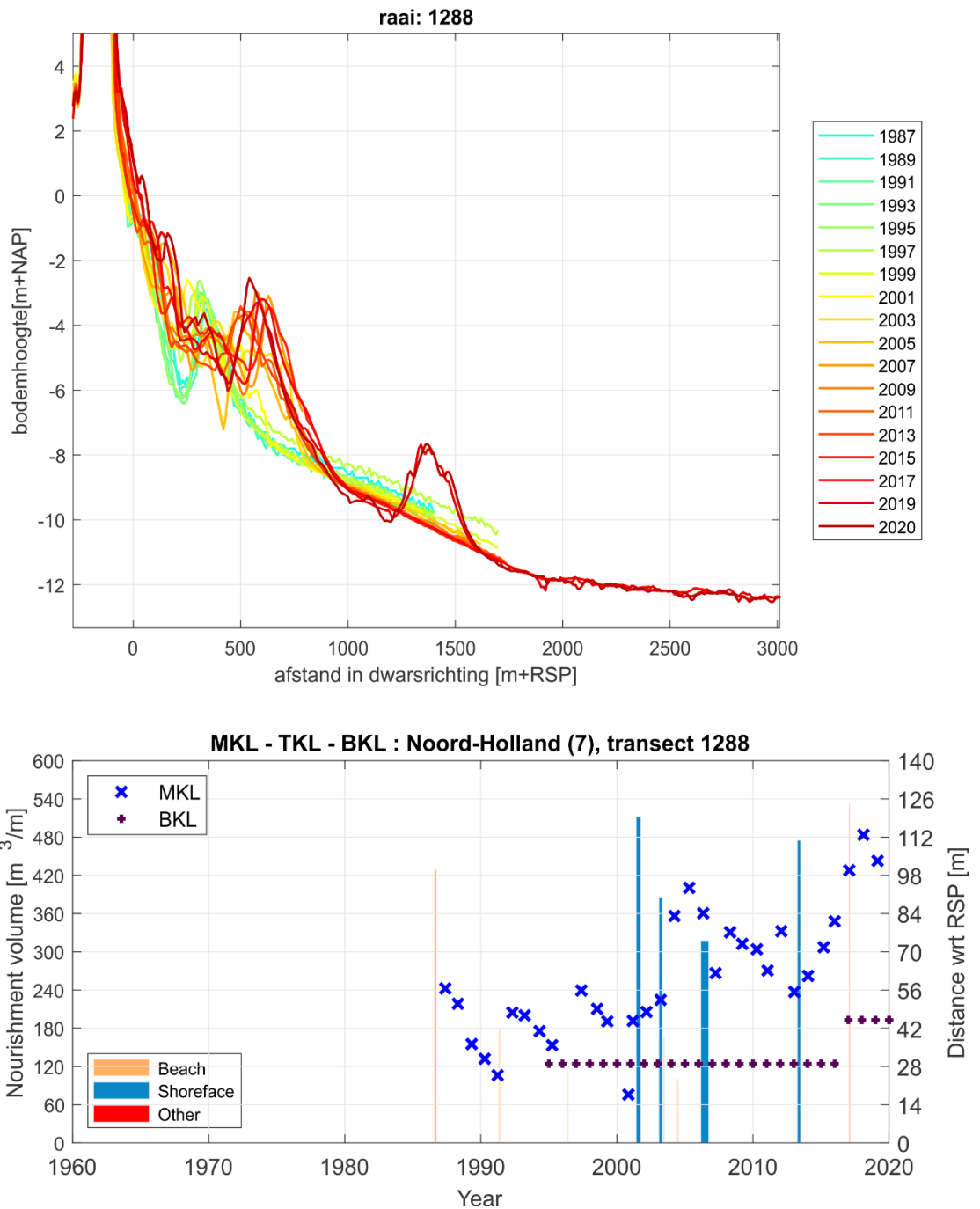
Figuur 3-5: Een overzicht van geselecteerde indicatoren voor het kustvak Callantsoog gelegen tussen raaien 1200 en 2000 sinds 2000. Van boven naar onder: gemiddeld hoogwaterlijn (GHW), gemiddeld Laagwaterlijn (GLW), de duinvoet (+3m) en de droge strandbreedte (afstand tussen GHW en de DV).



Figuur 3-6: Een overzicht van geselecteerde indicatoren voor het kustvak gelegen tussen raaien 0 en 2000 sinds 1965. Van boven naar onder: MKL positie, gemiddeld hoogwaterlijn (GHW), gemiddeld Laagwaterlijn (GLW), de duinvoet (+3m) en de droge strandbreedte (afstand tussen GHW en de DV).

### 3.3.2 Raai 1288

Tussen raai 1000 en 1401 is in de 2020 bodem een vrijwel rechte, enkele brekerbank te onderscheiden in het dwarsprofiel. Raai 1288 en 1320 geven een representatief beeld van de ontwikkelingen in dit vak (Figuur 3-7 en Figuur 3-9).

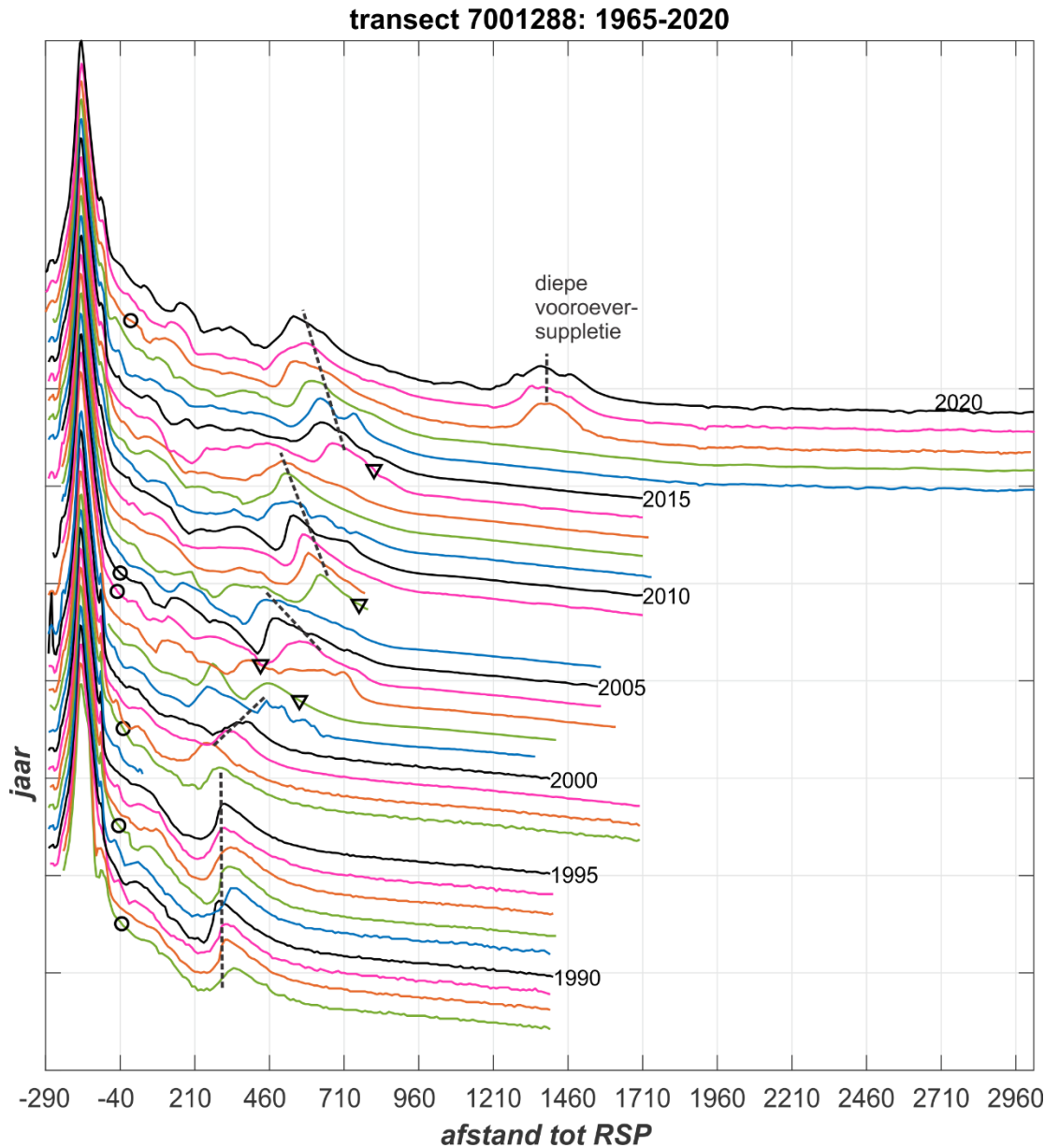


Figuur 3-7: Ontwikkeling van dwarsprofiel 1288 (boven) en de bijbehorende MKL ligging.

Voor dit dwarsprofiel is alleen data sinds 1987 beschikbaar. Deze data wordt gekenmerkt door een enkele brekerbank op een afstand van 500m tot de RSP. In de 2019 en 2020 bodems is ook de Diepe Vooroeverstapeling te onderscheiden. Deze blijft stabiel liggen. De MKL vertoont fluctuaties in ligging. Door suppleties verplaatst de MKL zeewaarts, maar na suppletie volgt een consistente trend van terugtrekking. De vele suppleties hebben ervoor gezorgd dat de MKL in 2020 ver zeewaarts van de BKL ligt. De BKL is daarbij in 2016 zeewaarts verlegd.



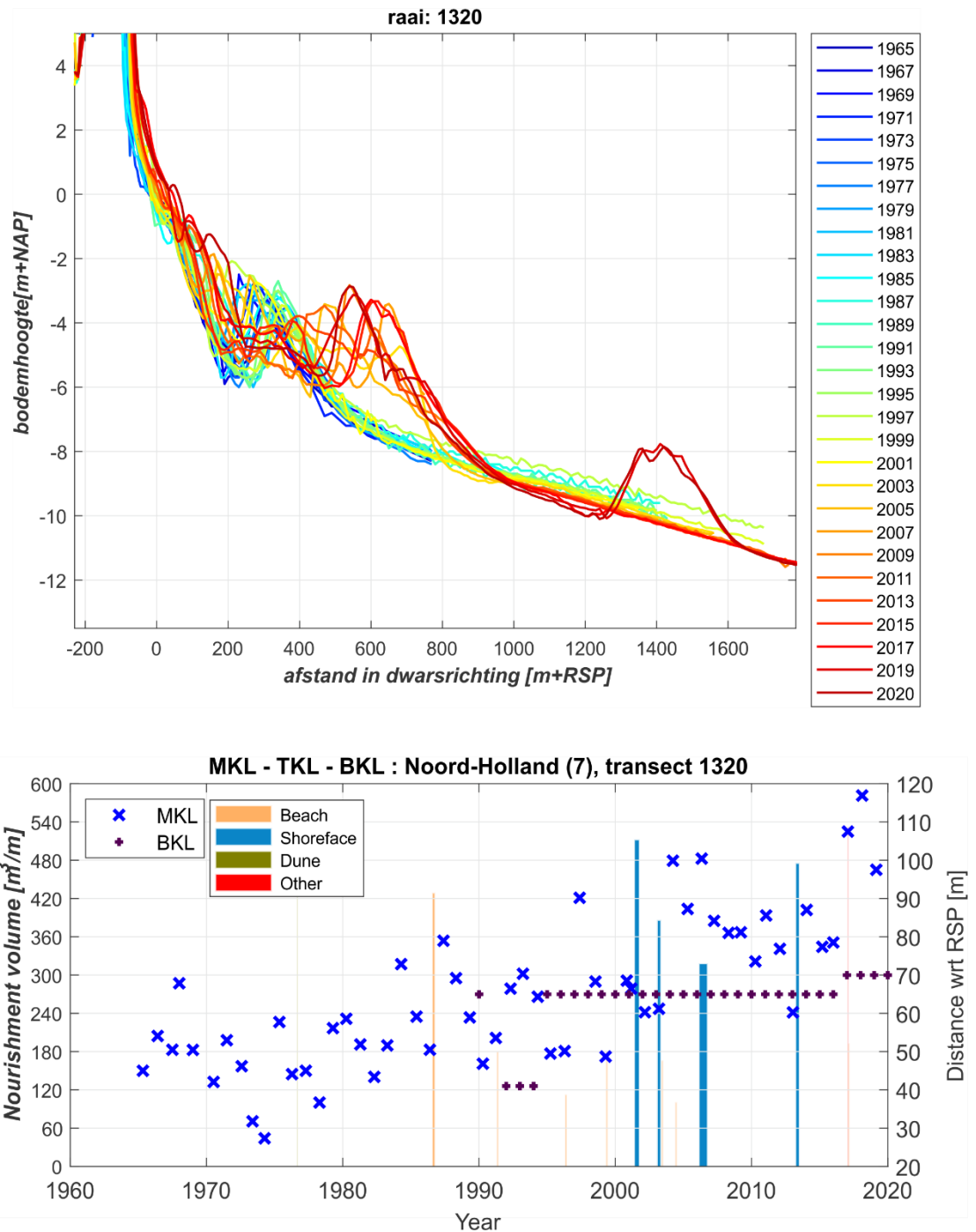
De timestack van profielontwikkeling weergegeven in Figuur 3-8 geeft aanvullend inzicht in de opgetreden morfologische veranderingen. In de periode tot 1995 blijft de brekerbank vrij stabiel liggen. Sindsdien zijn de brekerbanken stapsgewijs zeewaarts verplaatst. Deze verplaatsingen lijken samen te hangen met de uitgevoerde vooroeversuppleties. Direct na suppletie verplaatst de bank zeewaarts in de volgende jaren verplaatst deze bank zich dan langzaam landwaarts. Voordat de oorspronkelijke (1987-1995) bankpositie wordt bereikt heeft er dan alweer een nieuwe suppletie plaatsgevonden. Tussen de brekerbank en de kust ontwikkelen zich periodiek wel kleine bankjes maar een duidelijk bankgedrag is daarvan niet te onderscheiden.



Figuur 3-8: Timestack van dwarsprofielen van raai 1320 (o en ▽ geven respectievelijk het tijdstip van uitgevoerde strand- en vooroeversuppleties aan, de gestreepte lijnen de ontwikkeling van de brekerbank).

### 3.3.3 Raai 1320

Op basis van de dwarsprofielen kan eigenlijk alleen geconcludeerd worden dat het kustprofiel van raai 1320 gedomineerd wordt door een enkele brekerbank (Figuur 3-9). Deze bank ligt iets dichterbij de kust vóór 2000 (300m tot RSP) en verder zeewaarts (500-600m tot de RSP) sindsdien. De bank fluctueert in hoogte en positie waardoor eigenlijk de zone tussen de 0 en 750m tot de RSP een grote bandbreedte heeft in hoogteligging. Deze fluctuaties zijn ook in de MKL volumes waarneembaar.



Figuur 3-9: Ontwikkeling van dwarsprofiel 1320 (boven) en de bijbehorende MKL ligging.

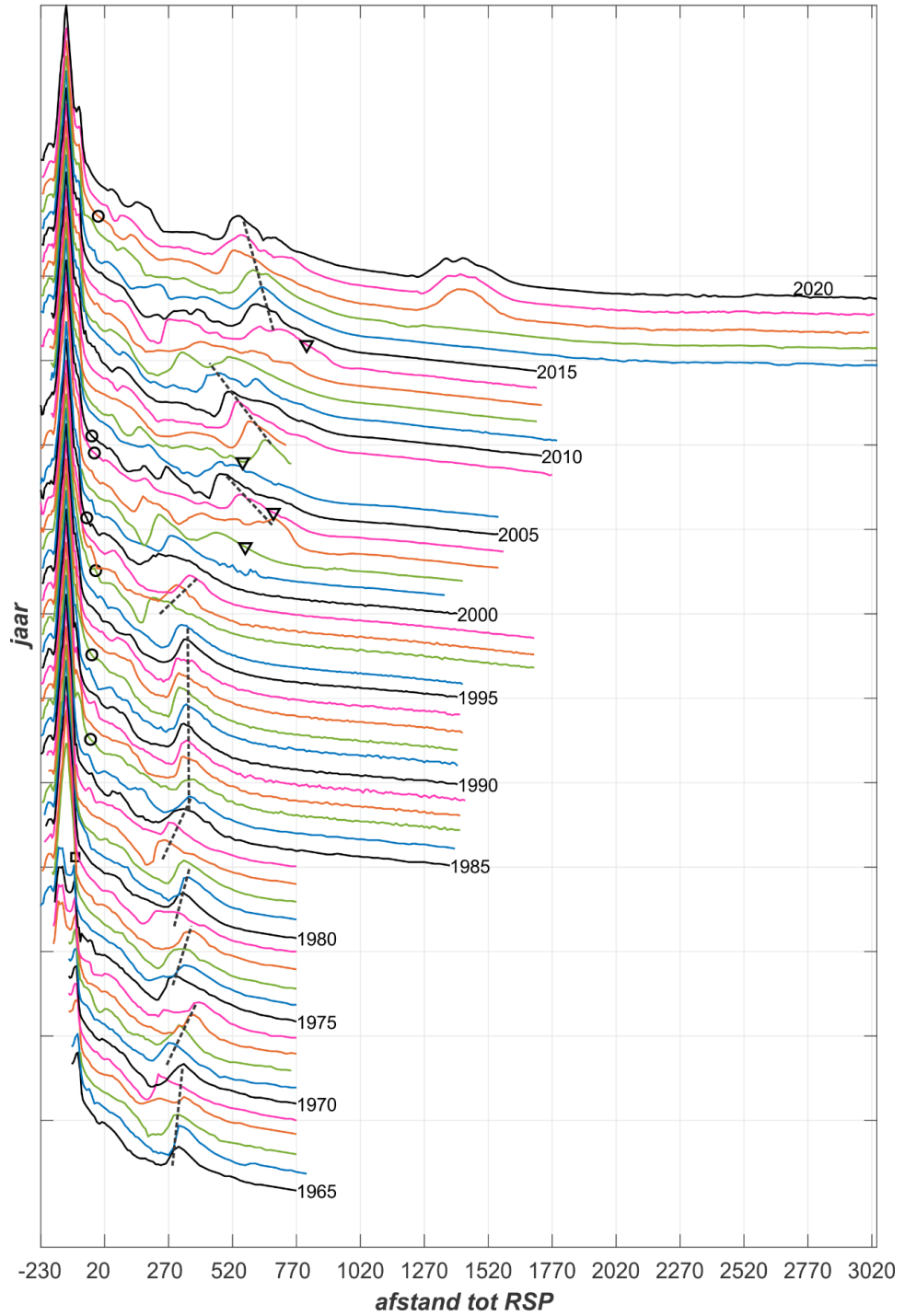
De MKL-ligging vertoont fluctuaties in ligging maar is sinds 1970 gemiddeld wel zeewaarts verplaatst. In 1970 lag de MKL nog rond de 40m tot de RSP terwijl de ligging tussen 2018 en 2020 tussen de 100 en 120m tot de RSP is toegenomen. Deze toename is gerelateerd aan de uitgevoerde suppleties die hier om de 2 tot 3 jaar worden herhaald. Deze toename is mede gerelateerd aan de zeewaartse verlegging van de BKL. Om de MKL zeewaarts van de BKL te houden is dan een grote suppletie inspanning benodigd.

In de periode voor 1988 lag de MKL weliswaar verder landwaarts, maar deze vertoont ondanks de grote fluctuaties een stabiele ligging. Hieruit kan misschien geconcludeerd worden dat de MKL-ligging rond de 180m tot de RSP in evenwicht is met de strandhoofden. Om de MKL zeewaarts te verplaatsen zijn dan grote inspanningen benodigd.

De timestack van profielontwikkeling weergegeven in Figuur 3-10 geeft aanvullend inzicht in de opgetreden morfologische veranderingen. In de periode 1965-1985 is er een enkele brekerbank aanwezig op ongeveer 300m tot de RSP. Deze bank vertoont perioden van 3-5 jaar van zeewaartse verplaatsing gevolgd door een landwaartse sprong terug (zie de gestippelde lijnen in de figuur), waarna het proces zich herhaalt. Tussen 1985 en 1996 blijft de bank dan over een lange periode vrijwel stabiel in locatie liggen. Mogelijk heeft deze stabilisatie te maken met de strandsuppleties die dan ook starten.

Vanaf 1997 vertoont het kustprofiel een grillig gedrag. Vooroever-suppleties verplaatsen de brekerbank zeewaarts, rond de 600m tot de RSP, dit is verder zeewaarts dan de natuurlijke ligging voordat de suppleties werden aangebracht. Na suppletie verplaatst de brekerbank overwegend landwaarts. Doordat de bank verder zeewaarts ligt ontstaan er landwaarts ook kleinere banksystemen. Deze verplaatsen zich onregelmatig. De diepe vooroever-suppletie aangelegd in 2017 blijft ook in de opeenvolgende jaren vrijwel stabiel in positie. Wel neemt de hoogte iets af en de breedte toe. De diepe vooroever-suppletie draagt mogelijk bij aan een stabilisatie van de landwaarts gelegen brekerbank. Deze bank ontstaat door de vooroever-suppletie uitgevoerd in 2013 en blijft sindsdien behouden.

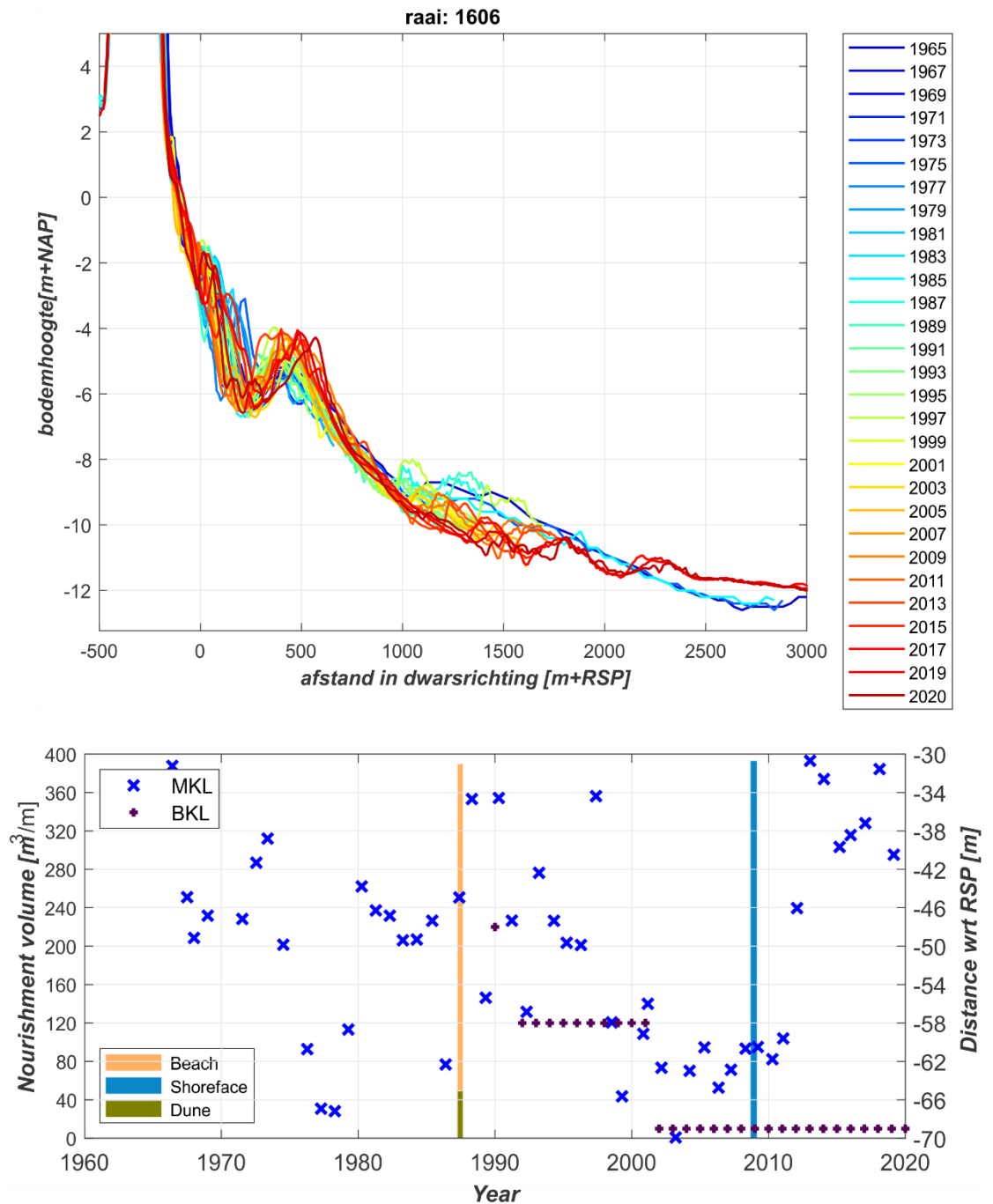
transect 7001320: 1965-2020



Figuur 3-10: Timestack van dwarsprofielen van raai 1320 (o en ▽ geven respectievelijk het tijdstip van uitgevoerde strand- en vooroeversuppleties aan, de gestreepte lijnen de ontwikkeling van de brekerbank).

### 3.3.4 Raai 1606

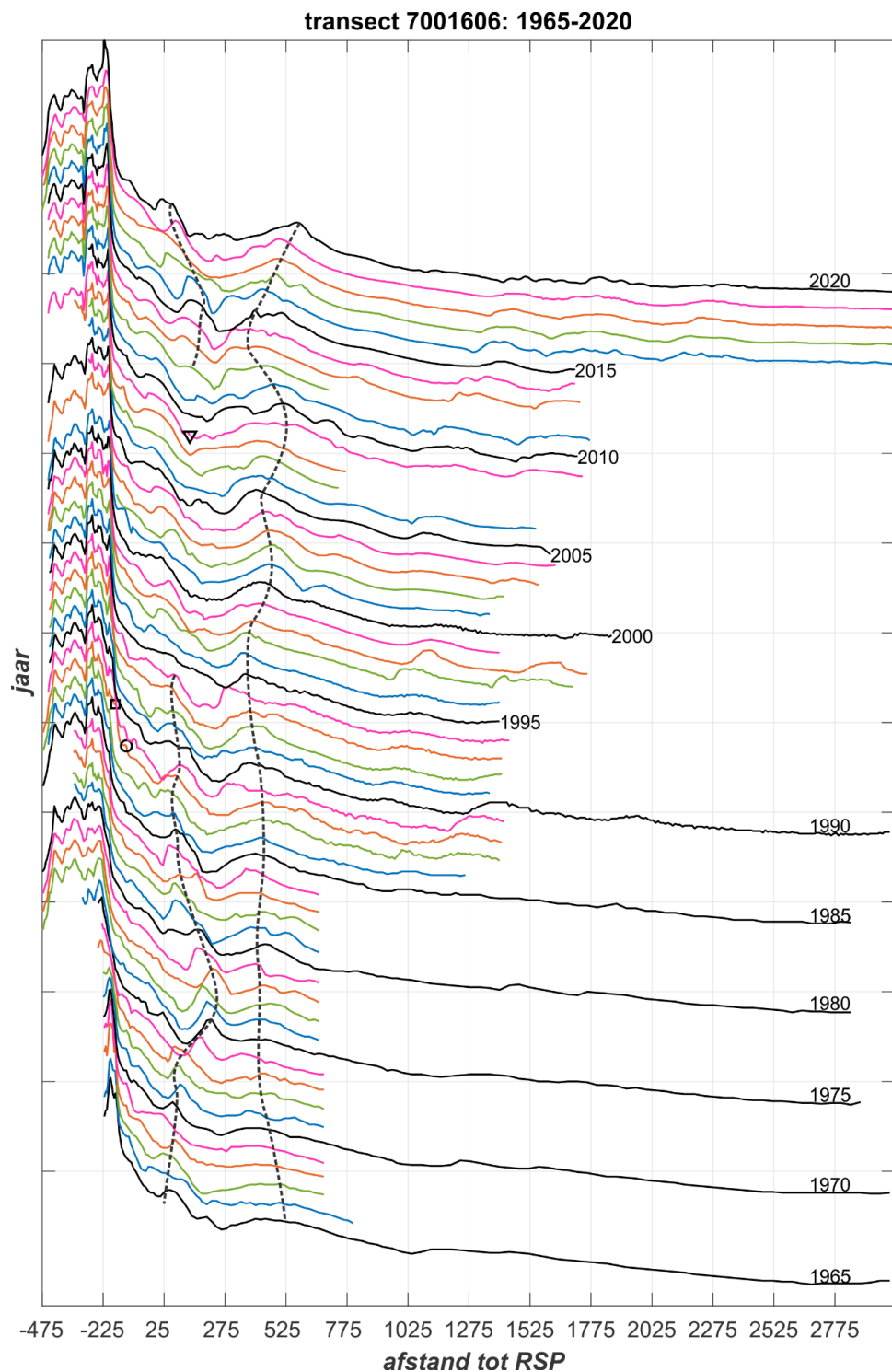
De duidelijke enkele en vrijwel rechte brekerbank zoals geobserveerd tussen raai 1000 en 1401, is ten zuiden van raai 1401 minder hoog en vertoont een grotere ruimtelijke variatie. De profielontwikkeling van het stuk kust tussen raai 1401 en raai 1606 wordt weergegeven door raai 1606 (Figuur 3-11 en Figuur 3-12).



Figuur 3-11: Ontwikkeling van dwarsprofiel 1606 (boven) en de bijbehorende MKL ligging.

Het dwarsprofiel weergegeven in Figuur 3-11 geeft een brekerbank weer op ongeveer 500m tot de RSP lijn. De kruinhoogte van deze bank ligt op maximaal -4m NAP en is hiermee dieper dan de bank in profiel 1320. De kustzone tussen de bank en de kust vertoont grote variaties in diepte (in een bandbreedte van ongeveer 2 m).

De MKL ontwikkeling laat zien dat de MKL in de periode 1965-1998 vooral fluctuaties vertoonde met een maximale ligging van -30m tot de RSP en een minimale ligging van -66m tot RSP. In de periode 2000-2012 vertoont de MKL minder variatie en ligt dan gedurende een langere periode rond de -62m tot RSP. De grote vooroeversuppletie uitgevoerd in 2009 zorgt er dan voor dat de MKL zeewaarts verplaatst naar een ligging tussen de -30 en -42m tot de RSP

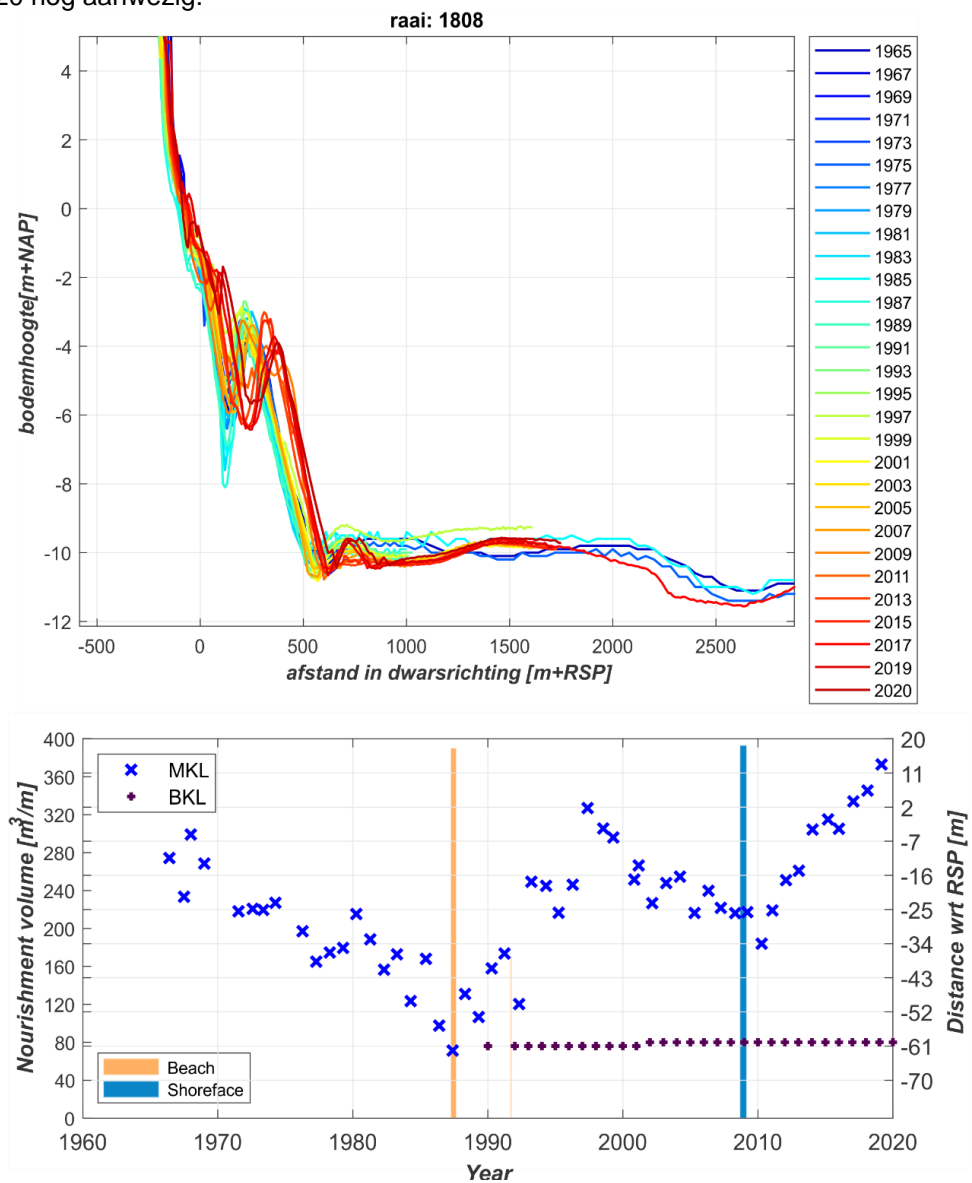


*Figuur 3-12: Timestack van dwarsprofielen van raai 1606 (o en v geven respectievelijk het tijdstip van uitgevoerde strand- en vooroeversuppleties aan, de gestreepte lijnen de ontwikkeling van de brekerbanken).*

In de timestack van de profielontwikkeling (Figuur 3-12) is het bankgedrag hier beter te volgen. Over de gehele periode is er een diepere brekerbank aanwezig rond 500m tot de RSP. De bank is door de tijd ook geleidelijk in kruinhoogte toegenomen. De bank varieert iets in positie door de tijd. Sinds 2015 is er wel een duidelijke trend van zeewaartse verplaatsing aanwezig hierdoor ontstaat een bredere trog (geul) tussen de bank en de kust. Naast de zeewaartse bank zijn er ook perioden met een kleinere landwaartse bank aanwezig. De ligging van deze bank vertoont een grillig verloop, waarin periodes van landwaartse en zeewaartse verplaatsing elkaar opvolgen.

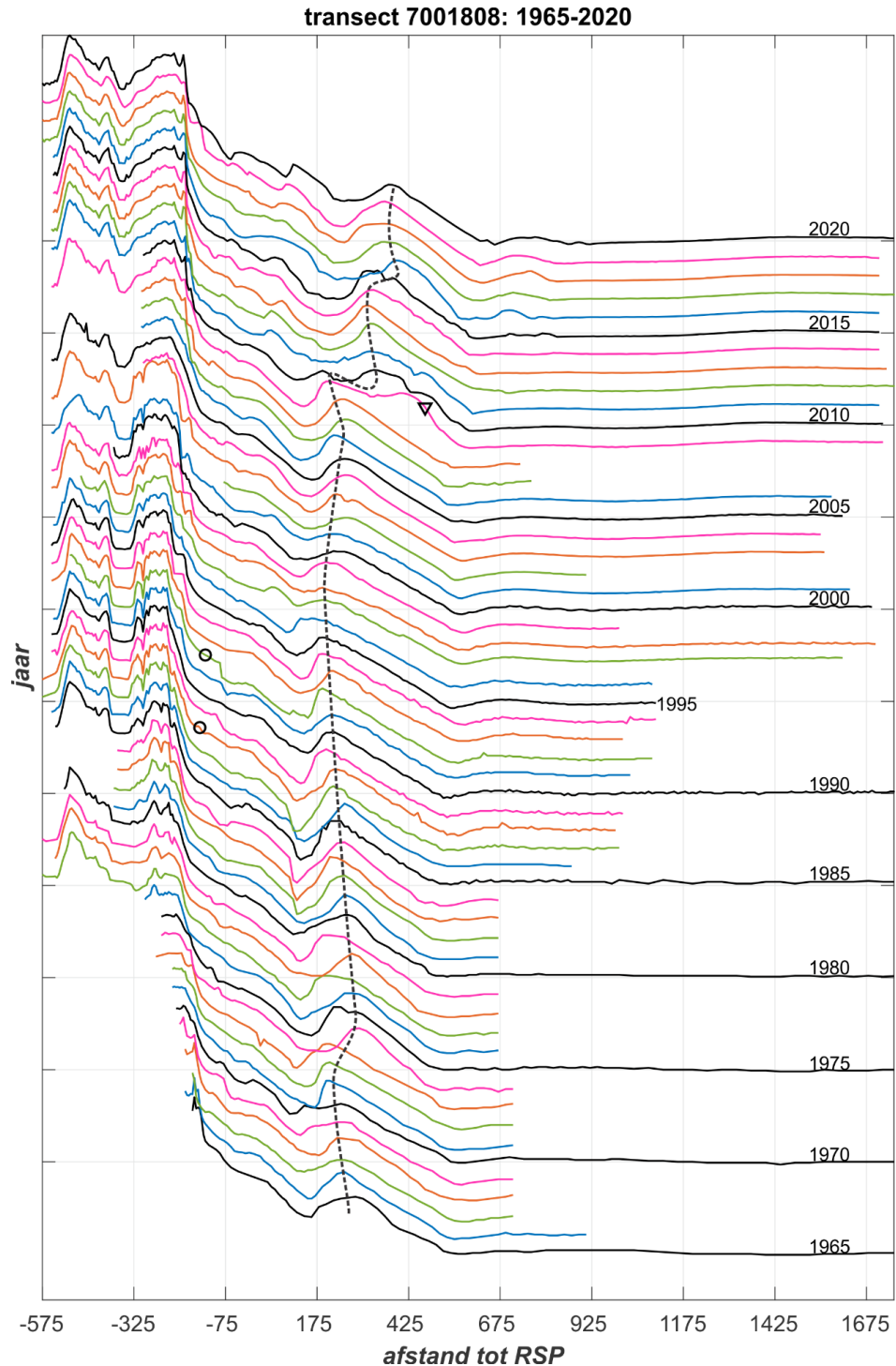
### 3.3.5 Raai 1808

Tussen raai 1606 en de HPZ hervormt de brekerbank. Raai 1808 geeft hier een representatief beeld van (Figuur 3-13 en Figuur 3-14). In deze raai wordt de Pettemer Polder duidelijk zichtbaar in de vorm van een vrijwel horizontaal platform met een diepte tussen de -10 en -12m RSP. Tussen het strand en dit platform is dan een steil profiel aanwezig met een enkele brekerbank. Deze brekerbank heeft een kruinhoogte tussen de -3 en -4m NAP en blijft over de gehele periode zichtbaar. De vooroeveroppletie uit 2009 heeft als gevolg dat de brekerbank zeewaarts verschuift ten opzichte van de voorgaande periode. Deze zeewaartse ligging is ook in 2020 nog aanwezig.



Figuur 3-13: Ontwikkeling van dwarsprofiel 1808 (boven) en de bijbehorende MKL ligging.

De MKL ligging vertoont een afname tot 1988. Na uitvoering van een strandsuppletie in 1988 en 1992 nemen de volumes sterk toe met een maximaal volume rond 1997. Vanaf 1997 nemen de volume af tot er in 2009 een vooroeversuppletie wordt uitgevoerd. Na deze suppleties zijn de volumes weer toegenomen. De MKL ligt in 2020 dan ook ruimschoots zeewaarts van de BKL. In de timestack (Figuur 3-14) is ook een respons van de brekerbank op de suppletie zichtbaar. De brekerbank verplaatst zeewaarts en blijft sindsdien ook duidelijk zeewaarts van de oorspronkelijke locatie liggen.



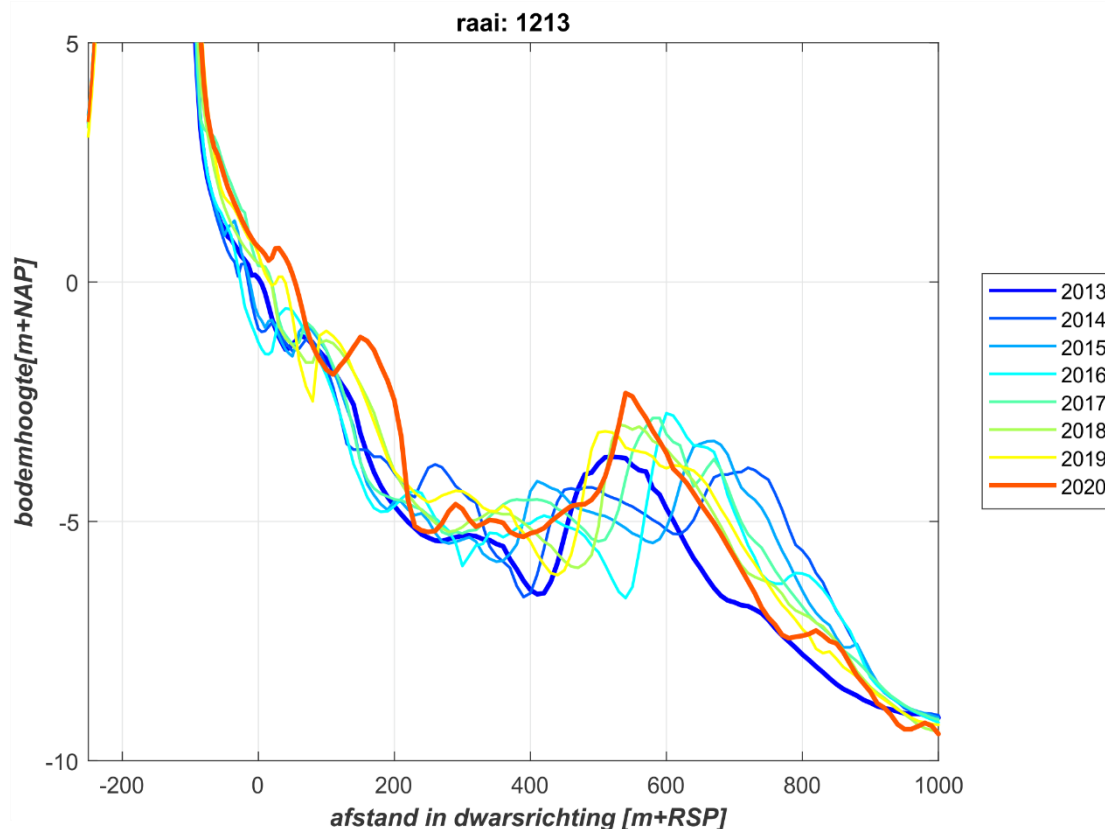
*Figuur 3-14: Timestack van dwarsprofielen van raai 1808 (o en ▽ geven het tijdstip van uitgevoerde strand- en vooroeversuppleties aan, de gestreepte lijnen de ontwikkeling van de brekerbank).*



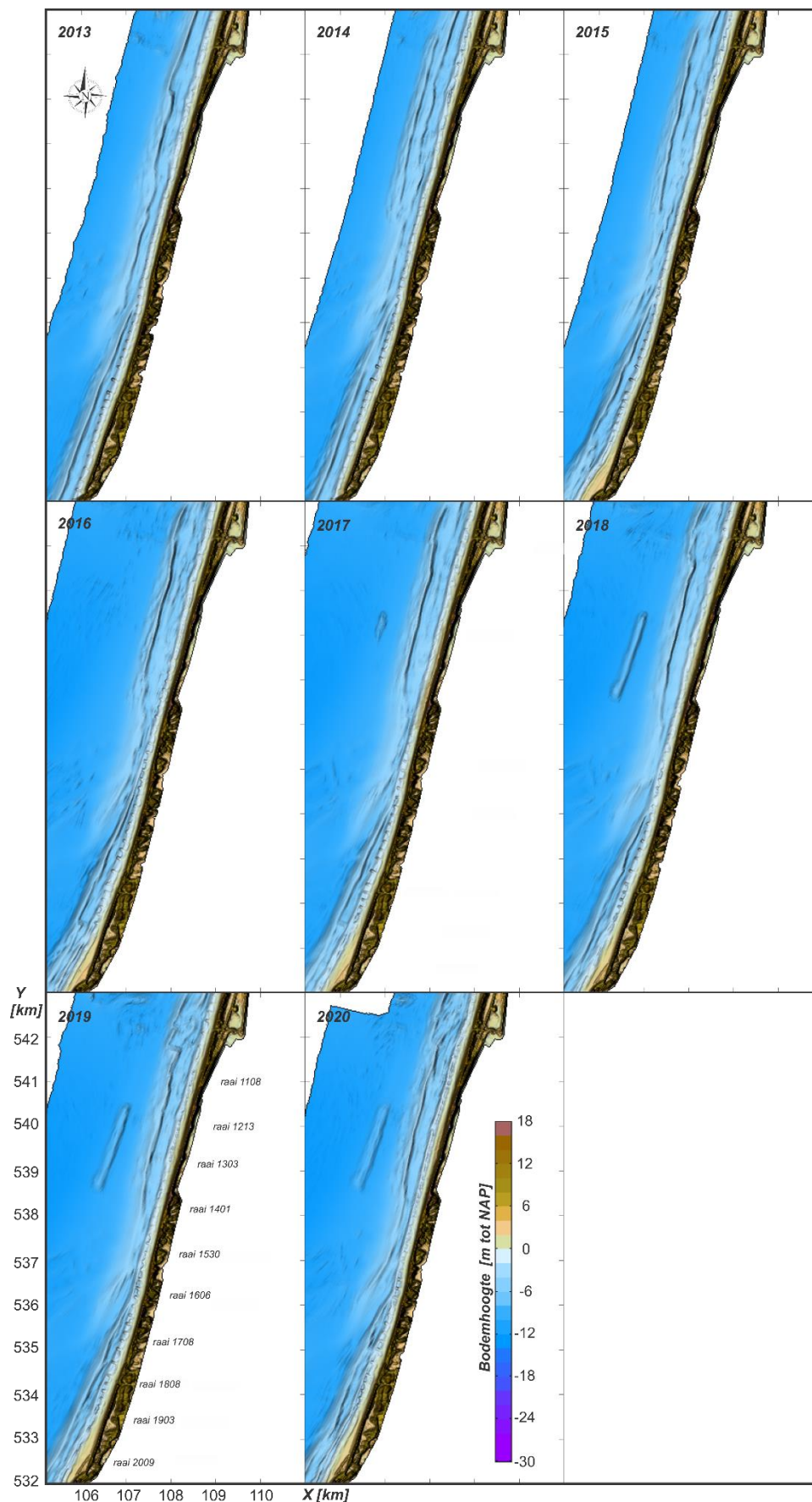
### 3.4 Ontwikkeling van de 2013 vooroeversuppletie

In 2013 is er een grote (2 miljoen m<sup>3</sup>) vooroeversuppletie aangebracht tussen raai 1000 en 1421. In Figuur 3-15 en Figuur 3-16 is de ontwikkeling in detail te volgen. In de 2013 bodem is de vooroeversuppletie nog niet aanwezig. In het profiel bevindt zich een brekerbank met een top van -4m op een afstand van 500m tot de RSP. De 2014 bodem vertoont het profiel inclusief de vooroeversuppletie. De suppletie is zeewaarts tegen de brekerbank aangelegd. De top van de suppletie heeft een vergelijkbare hoogte (-4m) maar ligt verder zeewaarts op 700m RSP. De vooroeversuppletie is tegen de brekerbank aangelegd, maar deze bank en suppletie hebben ieder nog een eigen top en zijn beide duidelijk zichtbaar in zowel het dwarsprofiel als bovenaanzicht. In het bovenaanzicht (Figuur 3-16, 2014) is de suppletie zichtbaar als langgerekte bank tussen raai 1000 en 1400. Na aanleg migreert de suppletie landwaarts en vormt steeds meer een geheel met de al aanwezige bank. In 2016 is er dan eigenlijk nog slechts één duidelijke bank zichtbaar. Deze bank ligt nog steeds verder zeewaarts dan de originele brekerbank vóór suppletie. Tussen 2014 en 2019 is heeft de landwaartse migratie een snelheid van 30 tot 40 m/jaar. De kruinhoogte van de brekerbank/suppletie neemt tussen 2014 en 2016 eerst toe van -3.9 m tot -2.8 m, waarna de hoogte weer afneemt tot -3.2m in 2019. In 2020 is een duidelijke respons op de in 2019 aangelegde strandsuppletie zichtbaar. De trend van landwaartse migratie en verlaging wordt nu doorbroken. De brekerbank/suppletie neemt sterk in hoogte toe (van -3.2m naar -2.4 m) en verplaatst zich iets zeewaarts.

Het zeewaarts opschuiven van de brekerbank door het aanbrengen van de vooroeversuppletie en het vervolgens landwaarts terugtrekken is ook in de timestack van raai 1320 (Figuur 3-10) duidelijk te volgen.

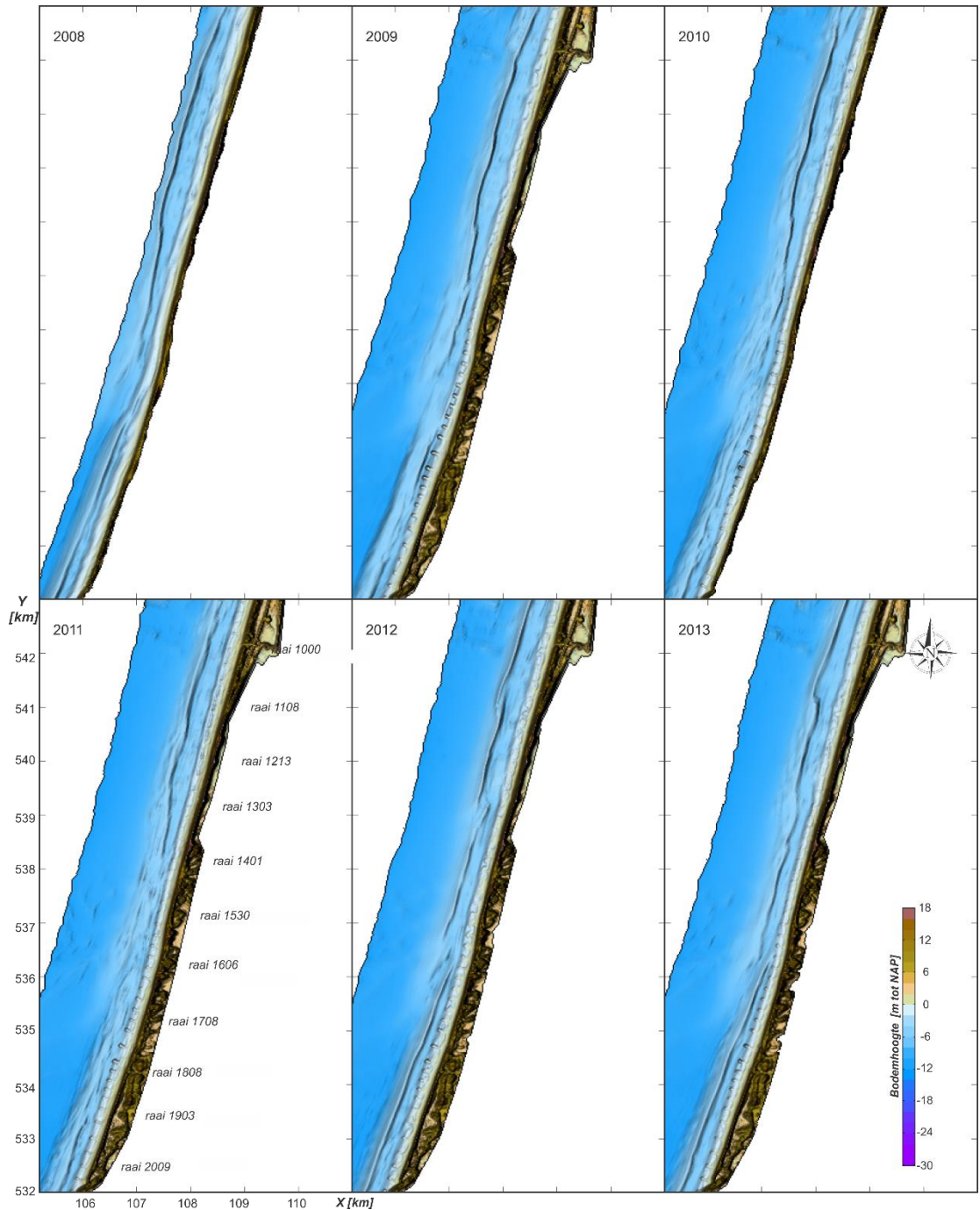


Figuur 3-15: Ontwikkeling van het dwarsprofiel (raai 1213) over de periode 2013-2020.



Figur 3-16: Ontwikkeling Jarkusgrids voor de periode 2013-2020.

In 2008-2009 is er een grote (5,7 miljoen m<sup>3</sup>) vooroeversuppletie aangebracht tussen raai 1500 en 2950. In Figuur 3-17 is de ontwikkeling van de kustzone in de jaren erna te zien. De suppletie zorgt dat een grote, brede brekerbank ontstaat (vergelijk de jaren 2008 en 2009). In de 2009 bodem vormt de suppletie geen doorlopend geheel. Rond raai 1650 lijkt er een opening te blijven tussen het noordelijke en zuidelijke deel van de twee suppletiegebieden. Deze suppletie heeft wel een groot effect op het kustprofiel. Dit blijft verstoord in de jaren 2010 en 2011. Pas in 2012 hervormt de brekerbank zich, waarbij de opening tussen de 2 brekerbanken weer opnieuw aanwezig is. Deze suppletie leidde dus niet tot een enkele doorlopende brekerbank.

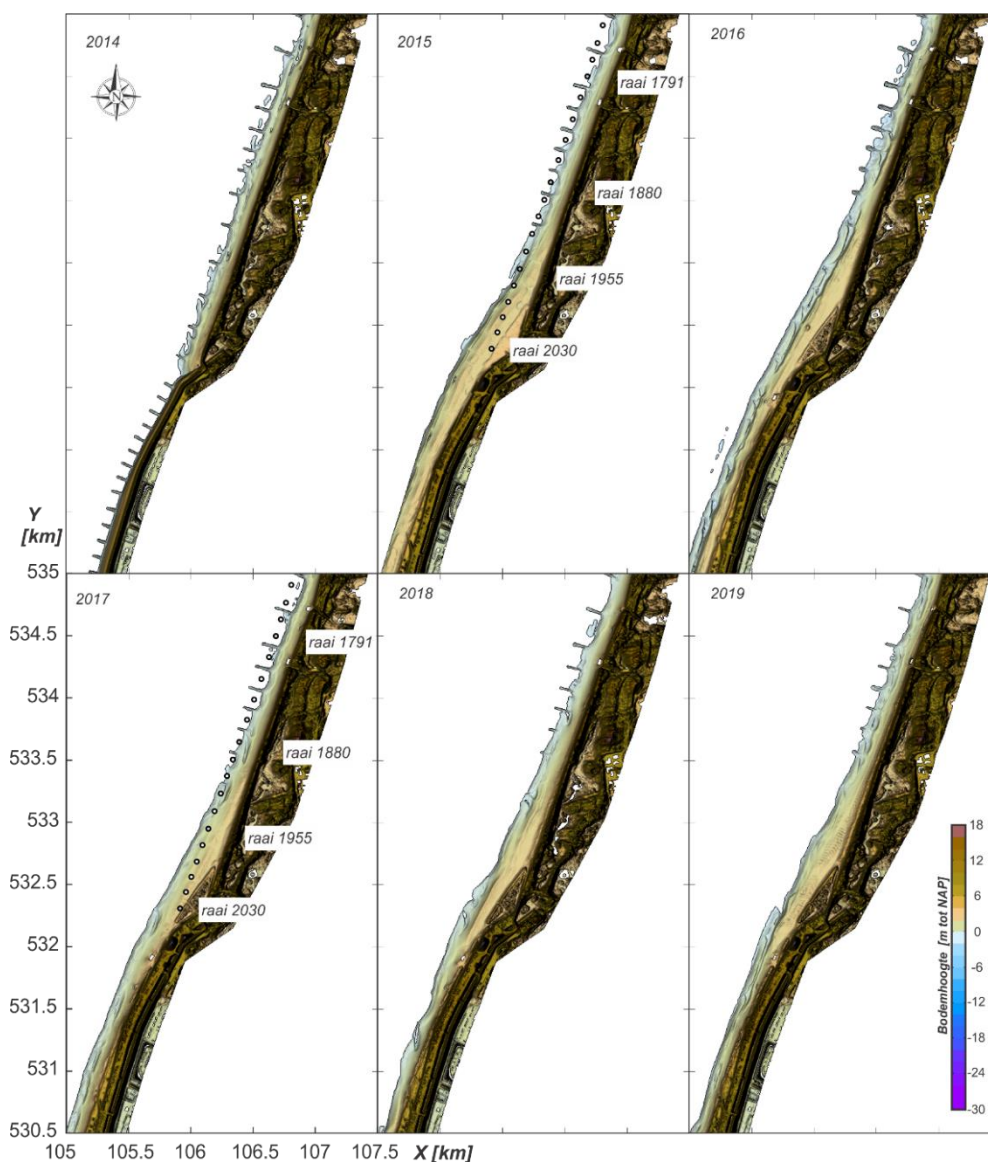


Figuur 3-17: Ontwikkeling Jarkusgrids voor de periode 2008-2013.

## 3.5 Kustlijnontwikkeling nabij de HPZ

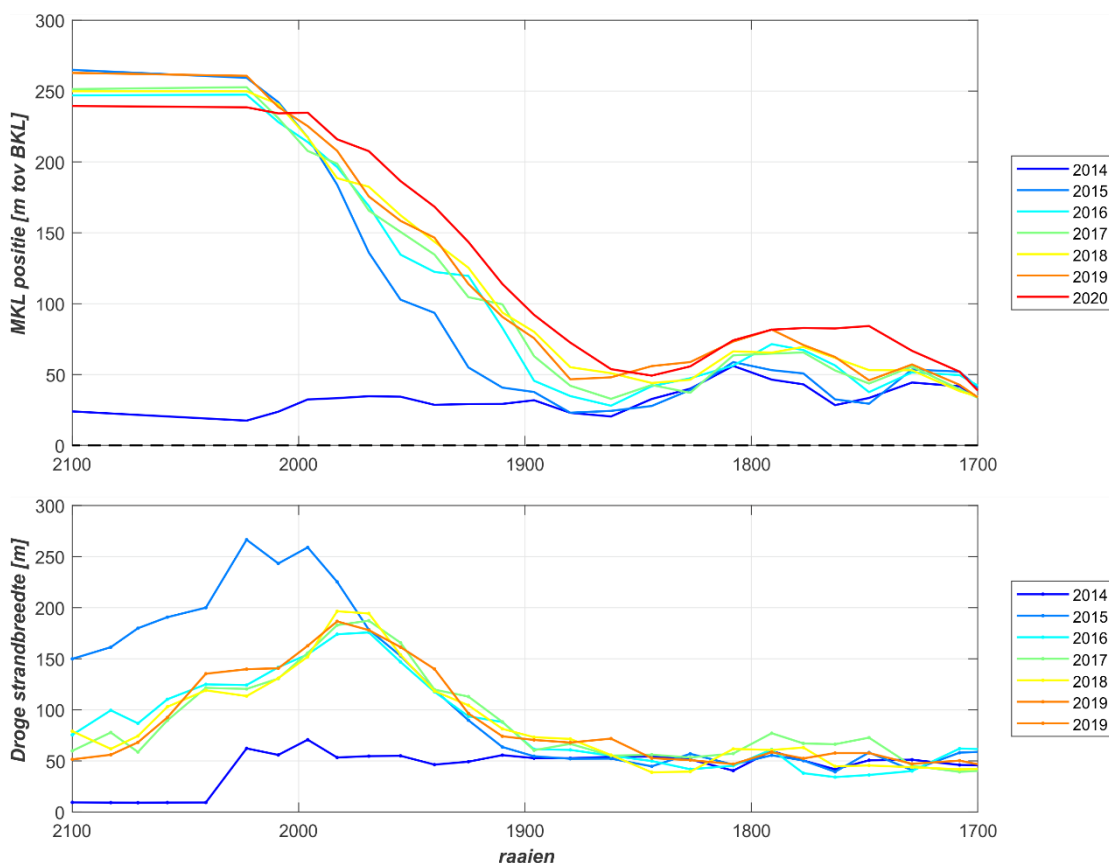
### 3.5.1 Ontwikkeling van het droogvallende strand

Een goed beeld van de recente morfologische ontwikkeling van de kustlijn en het droogvallende strand kan worden verkregen met behulp van de Kusthoogte (LIDAR) datasets. Als onderdeel van de Jarkus metingen, worden de hoogtewaarnemingen van het strand en de duinen sinds 1996 opgenomen met een laserscanner (LiDAR) aan boord van een vliegtuig. Na analyse van de resultaten wordt een Digitaal Terrein Model (DTM) verkregen. De DTM wordt verwerkt in de Jarkus metingen maar wordt ook in 5 m rasterresolutie gearcheveerd. Deze 5 m resolutie geeft een nauwkeuriger beeld van het droogvallende strand en de duinen. Er zijn 21 DTM 's beschikbaar voor de periode 1997 – 2019. De metingen in de periode 1997-2013 vertonen een gelijkwaardig beeld aan de 2014 opname in Figuur 3-18. In deze opname is de harde kustlijn van de HPZ zichtbaar. Ten zuiden van raai 2030 is dan geen strand aanwezig en ten noorden is de strandbreedte beperkt. De strandhoofden zijn zichtbaar langs de kustlijn.



Figuur 3-18: Ontwikkeling van het droogvallende strand van het kustvak tussen raai 1748 en de HPZ voor de jaren 2014 – 2019 aan de hand van de Kusthoogte (LiDAR) metingen. De dekking van de LiDAR hangt af van het getij. Tijdens laagwater is er dan een grotere dekking dan tijdens hoogwater.

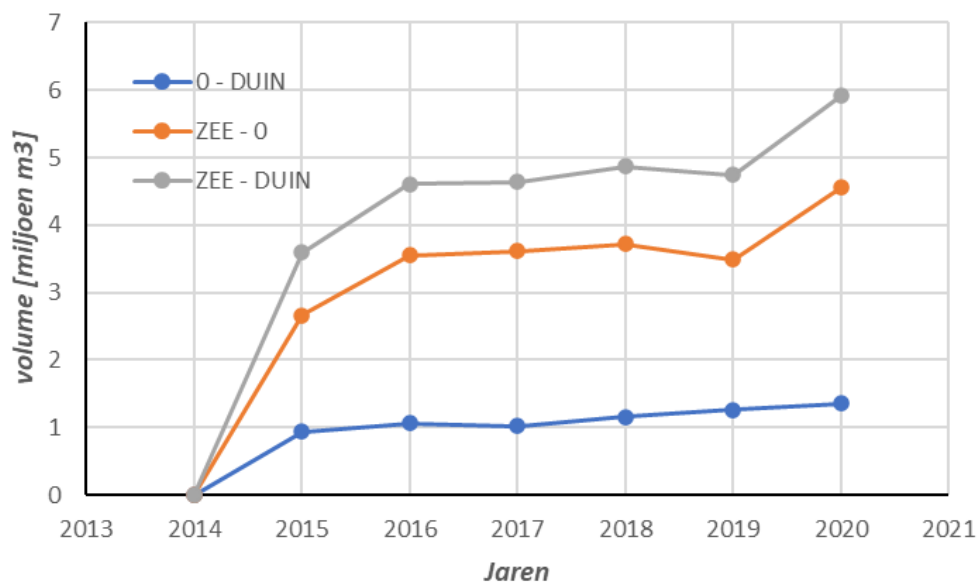
Na aanleg van de Hondsbossche Duinen is er een breed strand voor de HPZ (Figuur 3-18, 2015). Dit strand strekt zich noordelijk uit tot ongeveer raai 1955. Na aanleg neemt dit strand sterk in breedte af. Een deel van het zand zal noordelijk afgezet zijn. In 2019 is duidelijk te zien dat er meer zand in het vak tussen raai 1880 en 2009 aanwezig is. Dit wordt ook bevestigd door de MKL volumes (Figuur 3-19, boven). De MKL positie ligt in 2014 tussen de 25 en 50m ten opzichte van de RSP. Direct na aanleg neemt de MKL positie van raai 1900 sterk toe. Voor de HPZ ligt de MKL dan op zo'n 265m ten opzichte van de RSP. Voor de HPZ (raai 2000-2100) trekt de MKL zich dan in de volgende jaren terug tot 239m ten opzichte van de RSP. In het gebied tussen raai 1700 en 1900 neemt de MKL toe met 10-50 m. De toename van MKL komt terug in de strandbreedte. Die neemt met een ongeveer gelijke waarde toe. De strandbreedte tussen raai 1950 en 2100 neemt direct na aanleg sterk toe, door de aanleg. In de volgende jaren blijft de ligging vrij stabiel rond de 2016 positie liggen.



Figuur 3-19: Ontwikkeling van de MKL (boven) en het droge strand (onder) na aanleg van de Hondsbossche Duinen op basis van de Jarkus datasets.

De volumebalans die is opgesteld op basis van de Jarkusgrids (Hoofdstuk 3.2) laat zien dat voornamelijk het strand in volume toeneemt. De toename van het strand ligt op 0,2 miljoen m<sup>3</sup>. Deze toename wordt direct bereikt na aanleg. In de periode 2016-2020 veranderen de volumes nauwelijks. De volumebalans laat ook zien dat het gehele kustvak (inclusief de vooroever) in volume afneemt. De zandverliezen van de Hondsbossche Duinen zijn dus niet direct terug te zien in de volumeontwikkeling van het noordelijk gelegen kustvak. Een probleem in deze balans is dat de polygonen gebaseerd zijn op de minimum dekking van de Jarkusgrids. De recentere bodemopnames strekken zich verder zeewaarts uit, dit maakt het mogelijk een groter vak mee te nemen. In Figuur 3-20 is daarom de volumeontwikkeling voor de vergrote Petten polygoon (raai 1798 - 2023) weergegeven. Hierbij is de polygoon geoptimaliseerd om een maximale dekking over de periode 2014-2020 te verkrijgen. Met deze grotere polygoon wordt duidelijk dat de volumes wel degelijk zijn toegenomen.

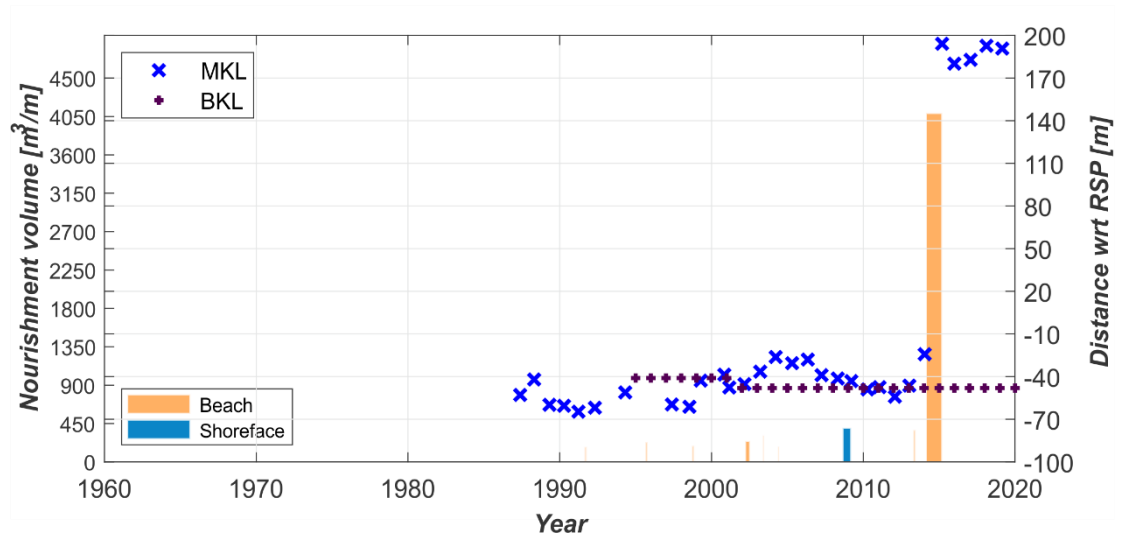
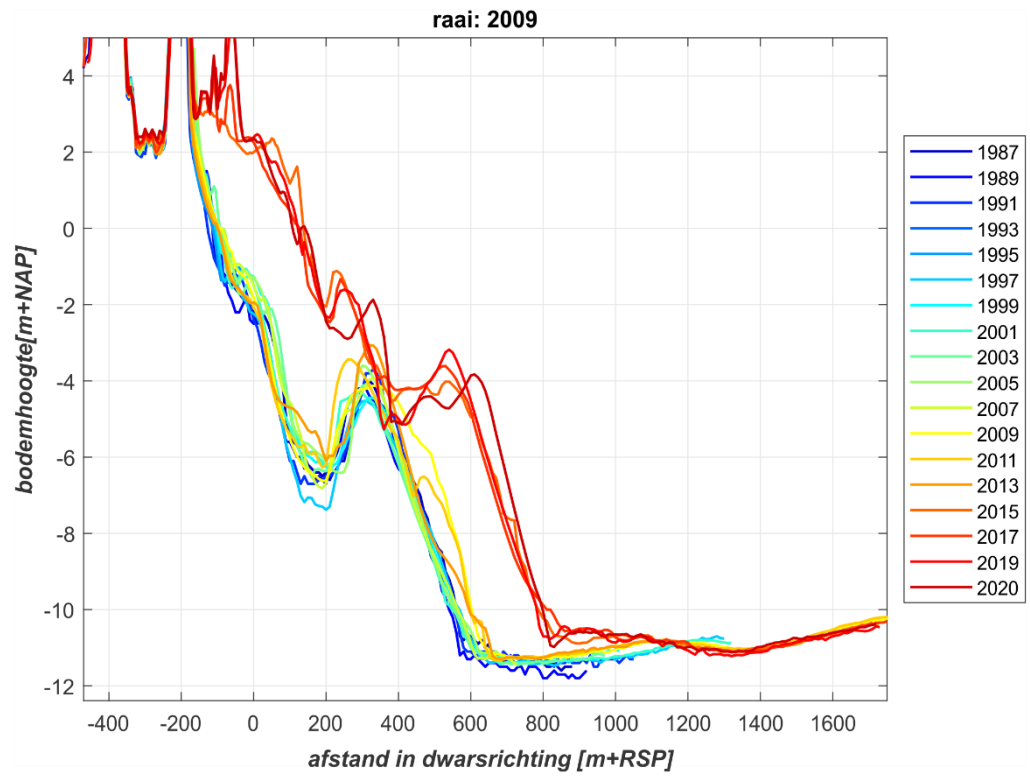
De totale volumetoename is 5,9 miljoen m<sup>3</sup> sinds 2014. Het merendeel van deze toename vond plaats in de periode 2014-2016 (+ 4,6 miljoen m<sup>3</sup>) en tussen 2019 en 2020 (+ 1,3 miljoen m<sup>3</sup>). Tussen 2016 en 2019 trad er nauwelijks verandering op.



Figuur 3-20: Volumeontwikkeling van de polygoon Petten – HPZ (zie Figuur 3-2) onderverdeeld in het deel met een hoogte kleiner dan 0m en het deel boven water. De landwaartse grens is gebaseerd op de ligging van de duinenrij in 2014.

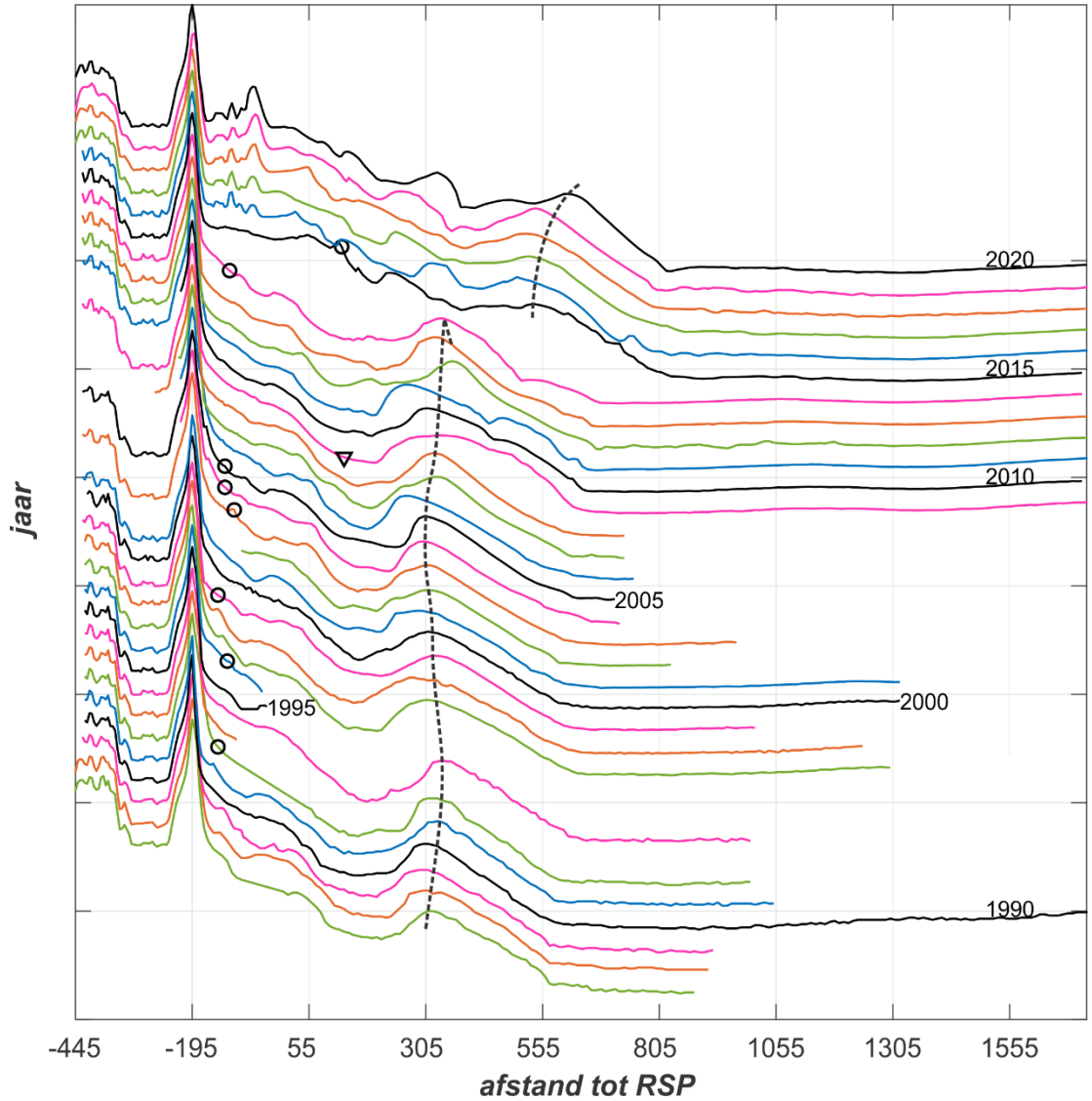
De ontwikkeling van het kustprofiel wordt in meer detail weergegeven voor raai 2009. Raai 2009 ligt net ten noorden van de HPZ. In dit profiel is de invloed van de HPZ versterking uit 2014-2015 duidelijk te zien. Het dwarsprofiel verplaatst 200m zeewaarts (Figuur 3-21). Een nieuwe duinenrij vormt zich dan snel rond de 0m RSP-lijn. In 2020 is deze duinenrij al zo'n 5m hoog. De zeewaartse sprong is ook in de MKL-ligging te onderscheiden. De MKL lag voor 2014 tussen de -30 en -70m tot de RSP. De recente MKL ligt rond de 200m zeewaarts van de RSP.

In de timestack van dwarsontwikkeling is een brekerbank zichtbaar op 305m tot de RSP (Figuur 3-22). Deze bank blijft tot 2015 goed behouden. De bank gaat over via een steil talud naar een platform met een diepte van rond de NAP -11m. Na 2015 is er nog steeds een bank zichtbaar alleen ligt die dan verder zeewaarts (rond de 555 m tot de RSP). Het voorliggende platform blijft ongewijzigd. Hier is verder geen invloed van de HPZ te onderscheiden.



Figuur 3-21: Ontwikkeling van dwarsprofiel 2009 (boven) en de bijbehorende MKL ligging.

transect 7002009: 1965-2020



Figuur 3-22: Timestack van dwarsprofielen van raai 2009 (o en ▽ geven het tijdstip van uitgevoerde strand- en vooroeversuppleties aan, de gestreepte lijnen de ontwikkeling van de brekerbank).



## 4 Modelling van de vooroeversuppletie

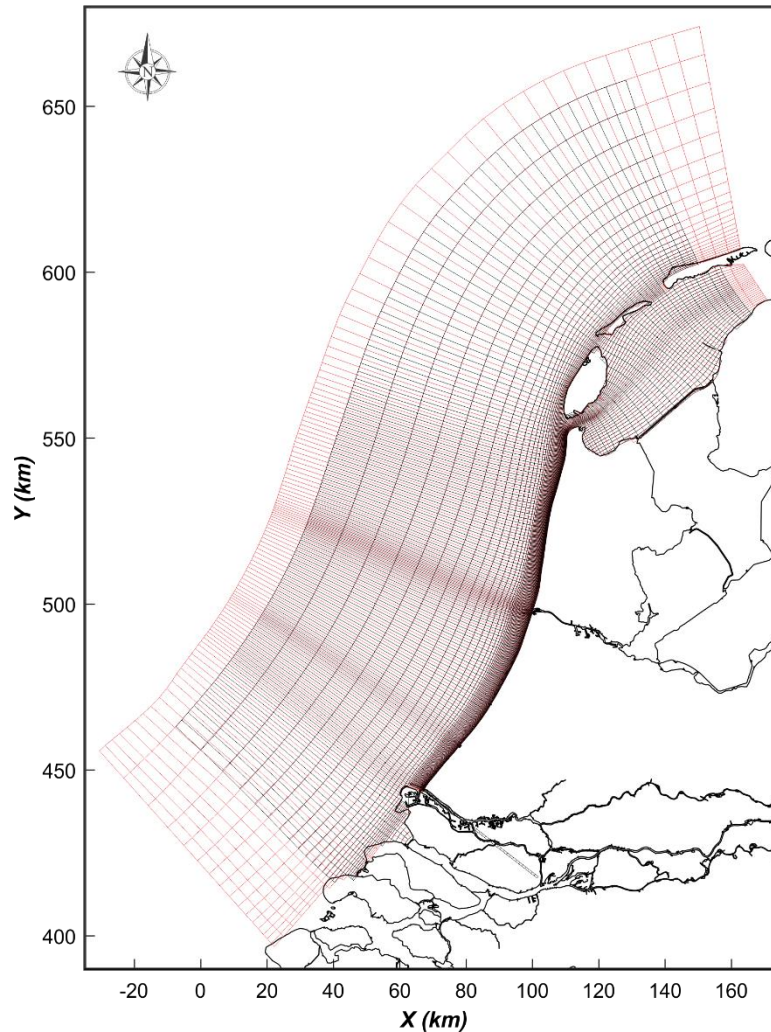
### 4.1 Het Delft3D model

#### 4.1.1 Rekenrooster

Voor de modellering wordt gebruik gemaakt van een bestaand morfologisch model voor de Hollandse kust zoals doorontwikkeld door Van der Hout et al. (2009). Dit model vindt zijn oorsprong in verschillende studies ten behoeve van de aanleg van een vliegveld in zee (Roelvink et al., 2001a, 2001b). Het oorspronkelijke Holland Coastal Zone (HCZ) model volgt de Nederlandse kust en heeft een breedte van 60 km (Figuur 4-1). De roostergrootte varieert tussen de 20 en 100 m in dwarsrichting met de hoogste resolutie in de brandingszone. In langsrichting is de resolutie lager en varieert dan tussen de 800 en 1200m. Het totale stromingsrooster bestaat dan uit 200 x 233 roostercellen. Het bijbehorende rooster voor het golfmodel is in essentie identiek aan het stromingsmodel, maar aan de zeezijde met een aantal roostercellen uitgebreid. De belangrijkste aanpassing door Van der Hout et al. (2009) was implementatie van de toen nieuwe Delft3D Online Morphology aanpak (deze aanpak is nu de standaard optie). Van der Hout concludeert daarbij dat bij deze omzetting de transporten op diep water niet nauwkeurig gerepresenteerd werden. Deze tekortkomingen zijn met verdere doorontwikkeling van Delft3D opgelost.

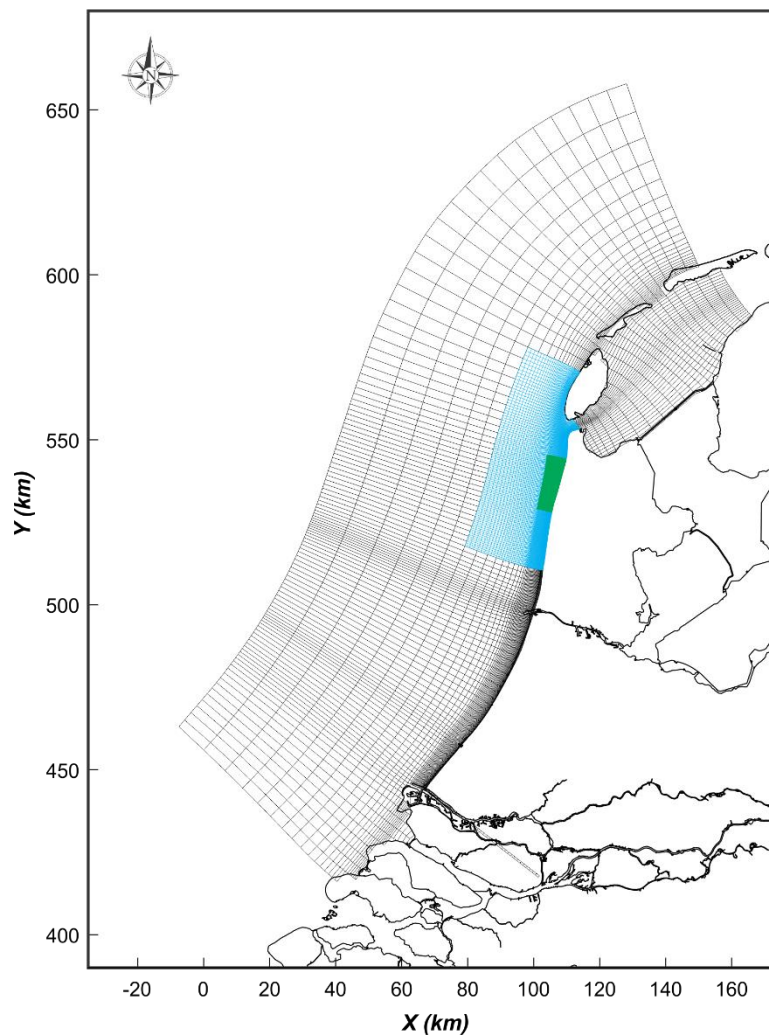
Het HCZ model is uitvoerig gekalibreerd en gevalideerd met meetdata (Roelvink et al. 2001a). De waterstanden hebben een rms fout van kleiner dan 6% in amplitude en kleinere dan 10° in de M2 component. De rms fout van de debieten in Marsdiep is kleiner dan 10%. Een vergelijking met de gemeten residuele stromingen in Noordwijk geeft een residuele fout die kleiner is dan 0.01 m/s. Gezien de uitvoerige validatie en kalibratie met metingen langs de centrale kust en de uitwisseling met het Marsdiep lijkt dit model dan ook geschikt voor de huidige studie. De berekende jaargemiddelde langstransporten (Figuur 4-5) lijken goed in overeenstemming met de inzichten uit Van Rijn (1997).

De randvoorwaarden voor het model zijn afgeleid in Roelvink et al. (2001a) en verbeterd door Van der Hout (2009), en bestaan uit stroomsnelheden op de zuidelijke rand, waterstanden op de westelijke en beide noordelijke randen (Noordzee en Waddenzee). De afvoer van de Nieuwe Waterweg is meegenomen door hier een debiet op te leggen. De randvoorwaarden beslaan een 30-daagse springtij-doodtij cyclus bestaand uit 99 getijcomponenten (23-04-1999 13:00 tot en met 23-05-1999 13:00). Deze periode vormt ook de basis voor de hydrodynamica in deze studie, omdat het omzetten van het Delft3D model naar een andere periode een grote inspanning vergt en de exacte tijdsperiode voor de in deze studie uitgevoerde analyses eigenlijk niet van belang is. Alleen voor een validatie van het model met huidige meetdata is het belangrijk dat de tijd de juiste periode bevat. Voor het modelleren van de effecten van het getij op een bepaalde bodem maakt dit in principe niet uit. Het model simuleert een springtij-doodtij cyclus (gebaseerd op de opgelegde tijdsperiode) maar genereert de stromingen en transporten op basis van de opgelegde bodem. Met de meest recente huidige bodem zijn de transporten daarom representatief voor de huidige periode.

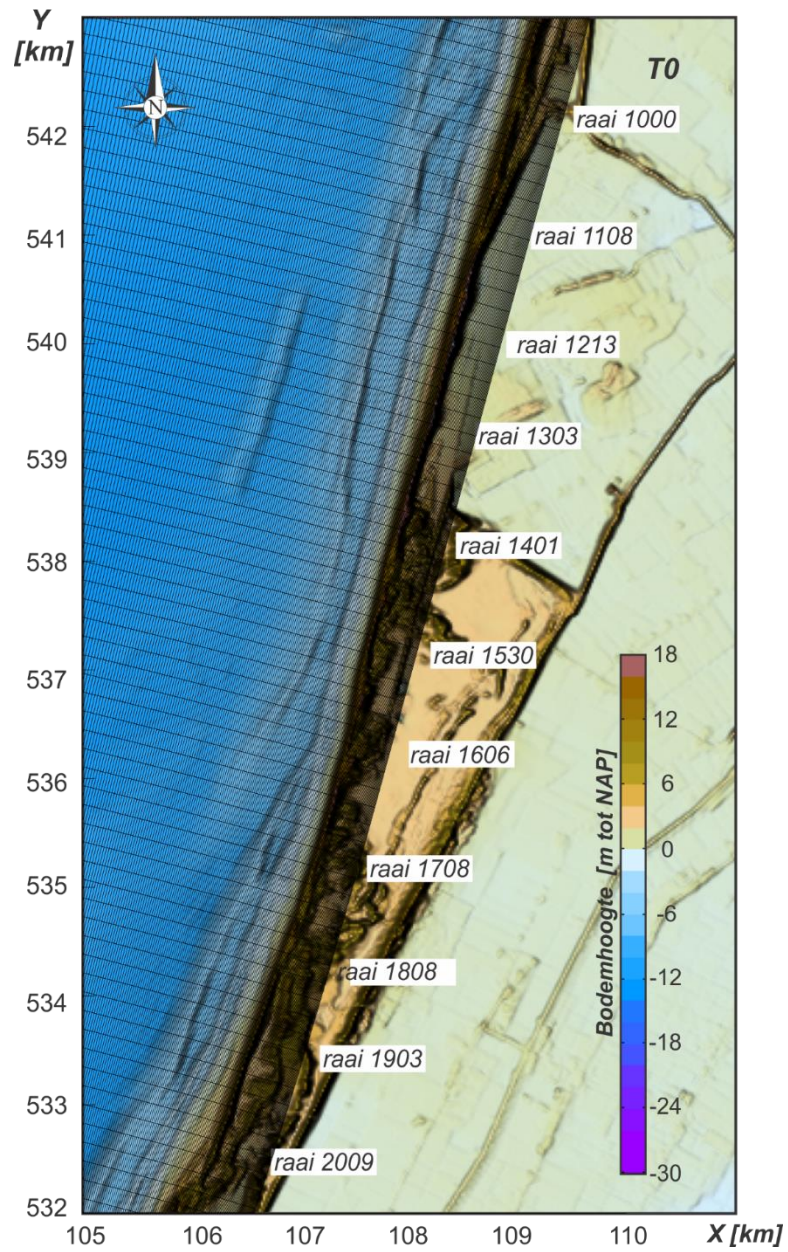


*Figuur 4-1: Grootschalige stromingsrooster (zwart) en golfrooster (rood) van het originele HCZ model.*

Het HCZ model is van voldoende resolutie om grootschalig de transporten langs de kust te berekenen, maar deze resolutie is niet voldoende om de transporten bij Callantssoog in detail door te rekenen. Door middel van Domein Decompositie (DD) is het HCZ model verder verfijnd (Figuur 4-2). De verfijning bestaat uit 2 rekenrooster waarbij de resolutie in ieder domain een factor 3 hoger wordt. In het kustvak tussen Callantssoog en de HPZ heeft dan een resolutie van ongeveer 80m in langsrichting en 4 m in dwarsrichting. Vanwege deze hoge resolutie moet de rekentijdstep verkleind worden van 2 minuten in het oorspronkelijke HCZ model naar 12 seconden in het HCZ-DD model.



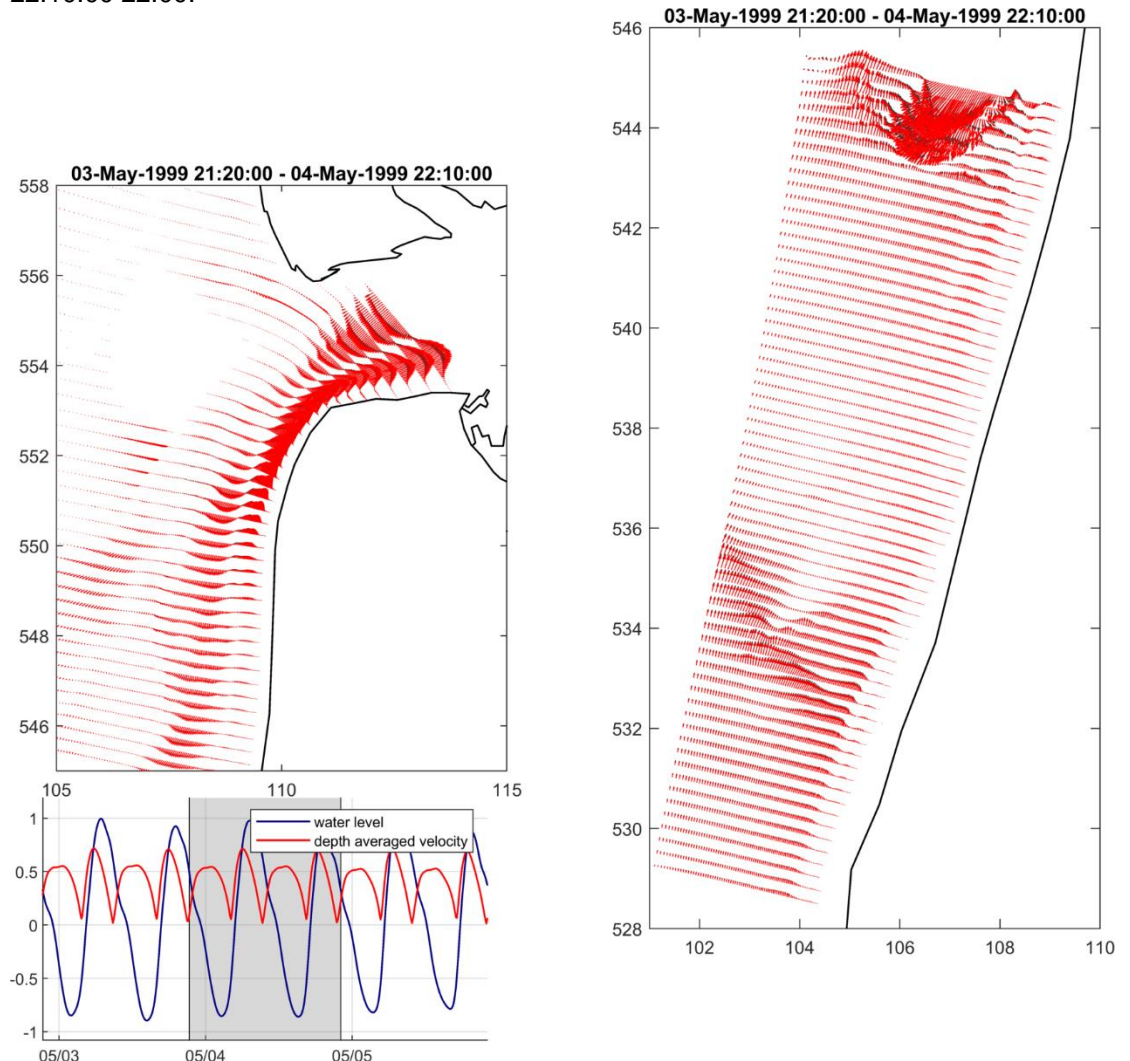
*Figuur 4-2: Stromingsroosters van het HCZ-DD model zoals gebruikt in de huidige studie. De zwarte, blauwe en groene lijnen geven de drie domeinen van de DD schematisatie weer.*



Figuur 4-3: Stromingsrooster van het kleinste modeldomein van het HCZ-DD model geprojecteerd op de T0 bodem.

### 4.1.2 Randvoorwaarden

Het model maakt gebruik van een representatieve periode van 30 dagen (23-04-1999 13:00 tot 23-05-1999 13:00), met twee doottij-springtij cycli (van der Hout et al., 2009). Op basis van deze maandsimulatie is dan een morfologisch representatief getij bepaald. Dit morfologische getij is verkregen door het HCZ model te draaien over een springtij- doottij cyclus en het residuele (getijgemiddelde) transport te bepalen over de gehele periode. Tijdens deze simulatie worden ook de getijgemiddelde transporten voor ieder afzonderlijk dubbeldaags getij weggeschreven. Er ontstaat zo een tijdserie van getijgemiddelde transporten. De transporten van de verschillende, afzonderlijke dubbeldaags getijden worden daarna vergeleken met het totale residuele transport over de gehele springtij-doottij cyclus (Figuur 4-4). Op basis van een optimale ruimtelijk correlatie wordt dan de meest representatieve periode geselecteerd. In dit geval is dat het dubbeldaags getij dat begint op 3 mei 1999 21:20 en loopt tot en met 4 mei 22:10:00 22:00.



Figuur 4-4 Vectorvelden van tijdsgemiddelde residuele transporten in het kustvak Callantsoog op basis van de volledige springtij-doottij cyclus (zwart) en op basis van het morfologische getij (rood). De tijdserie (linksonder) geeft de gekozen periode weer: 3 mei 1999 21:20 tot en met 4 mei 22:10:00 22:00.

### 4.1.3 Golven

In de brandingszone zijn golven belangrijk voor de sedimenttransporten. Voor een nauwkeurige weergave van de golf-stroom interactie wordt het golvenmodel elk uur 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. 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 % voor relatieve en absolute golfhoogte verschillen in 98% van de natte roostercellen.

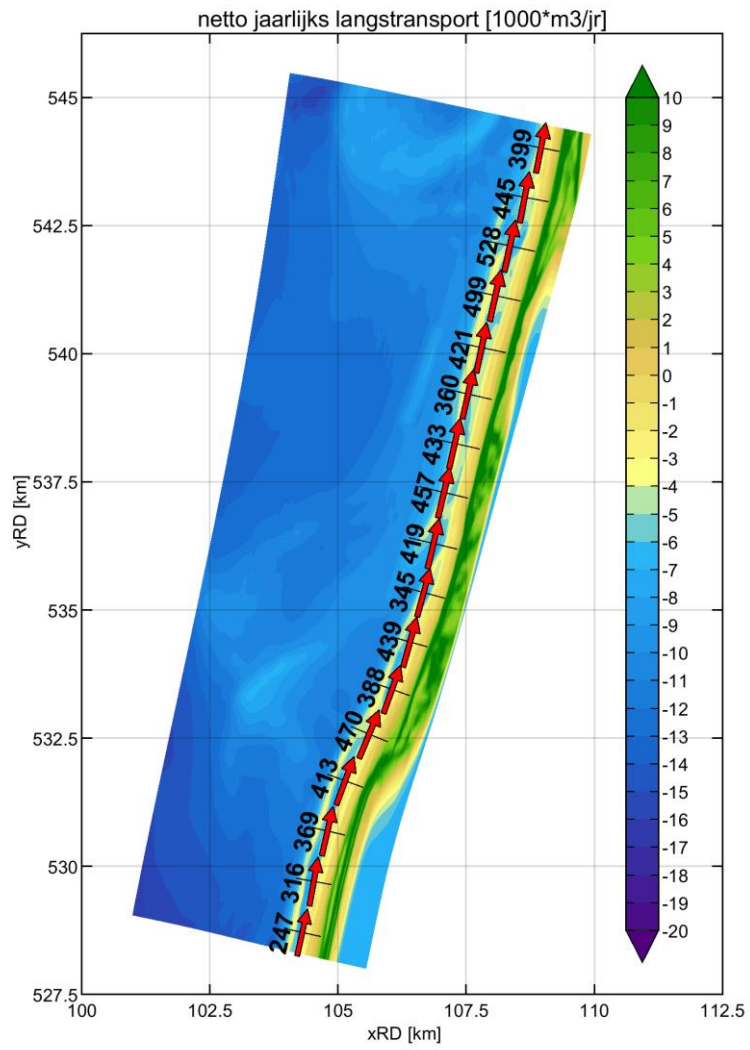
De golven worden berekend met het gekoppelde spectrale golfmodel SWAN. Het stromingsrooster wordt rechtstreeks gebruikt in het SWAN golfmodel. Op ieder van de domeinen van het DD model worden de golven dus op gelijke resolutie als het stromingsmodel opgelost. Hierdoor kunnen de interacties tussen stroming en golven efficiënt meegenomen worden.

De golfcondities zijn parametrisch opgelegd door de significante golfhoogte, periode en richting voor een standaard JONSWAP spectrum. Het gebruikte golfklimaat is afgeleid door Roelvink et al. (2001a) en is gebaseerd op lange-termijn wind- en golfdata van meetstations 'Eierland', 'IJmuiden' en 'Europlatform', zie Tabel 4.1.

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

Conditie	Hsig [m]	Tp [s]	Dir [deg]	Prob [%]	Wvel [m/s]	Wdir [deg]
0	0	0	0	20.95	0	0
1	1.3	5.5	210	9.95	7.3	200
2	1.2	5.7	240	11.93	7.2	225
3	1.2	5.8	270	7.46	5.9	245
4	1.2	6.1	300	7.86	4.8	270
5	1.2	6.5	330	12.73	3.4	315
6	1.1	6.3	360	12.06	4.2	20
7	2.7	7.2	210	3.02	13.3	200
8	2.9	7.2	240	4.72	12.9	230
9	3.1	7.8	270	2.74	12.6	270
10	3.1	8.0	300	2.54	11.9	290
11	3.1	8.4	330	3.05	10.5	325
12	2.8	7.8	360	1.04	9.1	10

Een overzicht van het netto jaarlijks langtransport op basis van het geselecteerde getij en morfologische golfklimaat wordt weergegeven in Figuur 4-5. In het kustvak ligt het berekende brandingstransport tussen de 0.3 en 0.5 miljoen  $\text{m}^3$ /jaar. Deze transporten komen goed overeen met eerdere studies zoals die van Roelvink et al. (2001) en Van Rijn (1997).



Figuur 4-5 Berekende jaarlijks-gemiddelde transporten op basis van het morfologische getij en golfklimaat.

#### 4.1.4 Sedimenttransport en SedTRAILS

De sedimentformuleringen Van Rijn (2007) in Delft3D FM zijn gebruikt voor de sedimenttransporten. Lesser et al. (2004) geven een uitleg hoe de formuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D 4. Deze aanpak geldt ook voor Delft3D FM. In de Van Rijn formulering worden zowel de bodemtransporten als de suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld. De bodemtransporten zijn gebaseerd op een parametrische formulering die ook het effect van golven meeneemt. De suspensietransporten worden berekend met een advection-diffusie vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane ( $d_{50}$ ) korrel diameter van 250  $\mu\text{m}$ .

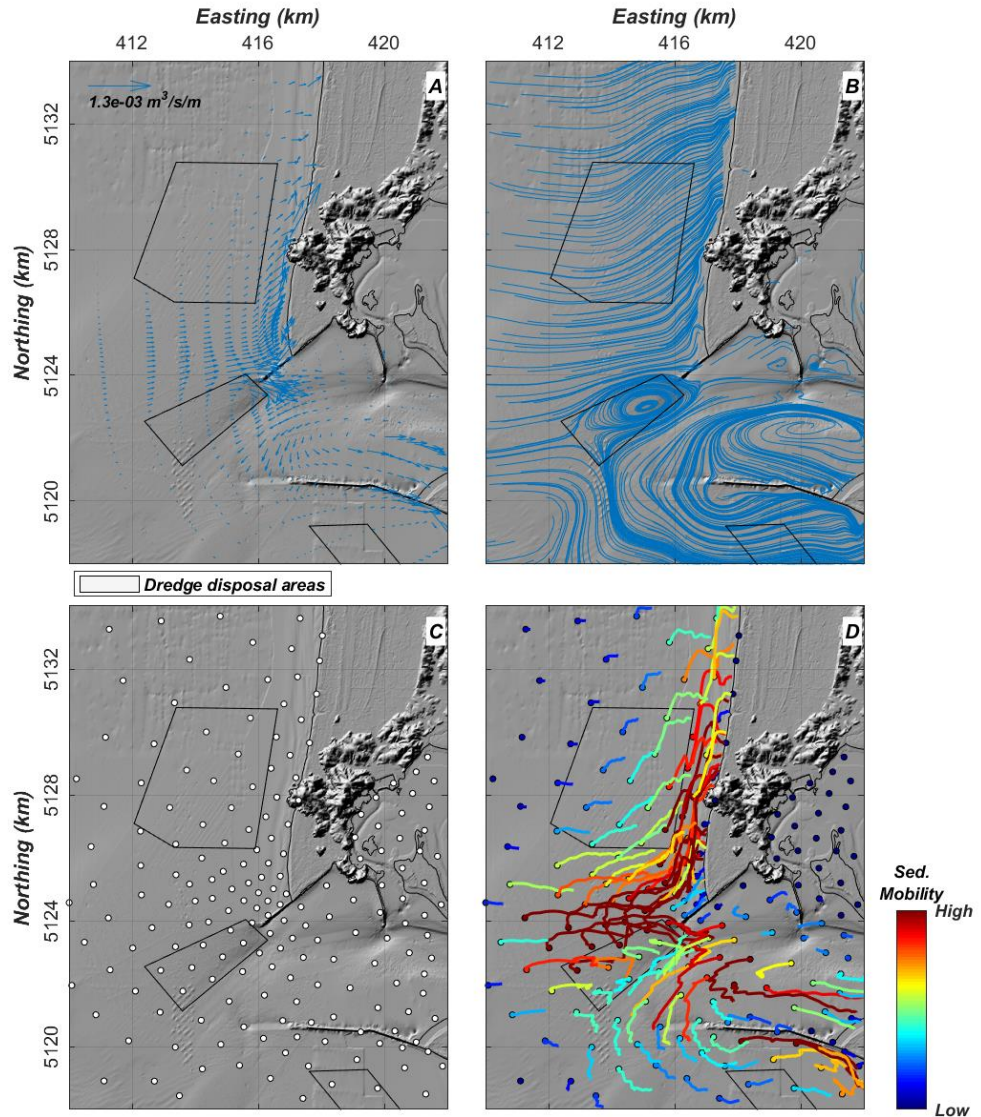
In deze studie wordt de bodemhoogte gedurende de simulatie niet aangepast, maar wordt er een morfostatische berekening uitgevoerd. De aldus verkregen sedimenttransporten worden ook wel de "potentiële sedimenttransporten" genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten 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 mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden. Hiervoor worden de transporten over de verschillende golfcondities berekend en de resultaten gewogen (met de kans van voorkomen) bij elkaar opgeteld. Op deze manier kunnen op eenvoudige en efficiënte wijze schattingen van de jaargemiddelde transporten worden verkregen. 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 efficiënt in termen van numerieke rekentijd worden opgelost.

De berekende sedimenttransporten geven inzicht in het morfologische systeem en de impact of verstoring van de verschillende suppletievarianten erop. Een veel gebruikte analysemethode is het afleiden van de residuele transporten. Door een vergelijking van de residuele transporten voor de verschillende processen (getij, golven) en golfcondities kan een inschatting van de maatgevende processen en condities worden gemaakt. Veranderingen in de residuele patronen tussen de T0 en T1 simulatie geven inzicht in de toekomstige morfologische veranderingen. Doordat de suppletie lokaal de bodem verstoort zullen hier lokaal, ongeacht de grootte van de ingreep, de transporten veranderen. Als de veranderingen beperkt zijn ten opzichte van de omliggende sedimentdynamiek is het op basis van de residuele transporten lastig een inschatting te maken van eventuele grootschalige effecten. Hiervoor zouden lange morfologische simulaties gemaakt moeten worden. Deze simulaties zijn rekenintensief en de resultaten vaak discutabel. Het is lastig om numerieke fouten en natuurlijke veranderingen te onderscheiden.

Een nieuwe, alternatieve methode om een beter inzicht te krijgen in de grootschalige effecten van een ingreep is de SedTRAILS methode. *SedTRAILS* (*Sediment TRANsport vlsualization & Lagrangian Simulator*) is geen nieuwe of apart uit te voeren modelsimulatie maar een nabewerking op de resultaten van al uitgevoerde sedimenttransportmodellering. Op basis van de berekende (instantane) sedimenttransportvectoren worden transportpaden berekend. De transportpaden visualiseren de beweging van de deeltjes door het kuststelsel. Door analyse van de transportpaden vóór en ná suppletie kan inzicht worden verkregen hoe de transportpaden veranderen en hoever die veranderingen zich uitstrekken. Als de transportpaden alleen lokaal beïnvloed worden is het niet waarschijnlijk dat de suppletie een grootschalige invloed uitoefent. Als de transportpaden in de omliggende morfologische gebieden wel veranderen na suppletie geeft dit aan dat de suppletie het systeem wel grootschalig kan beïnvloeden.



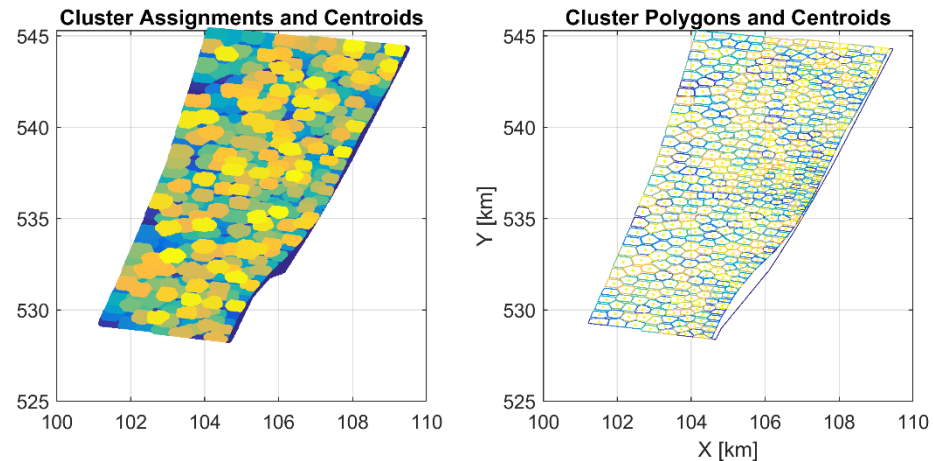
In dat geval zou er aanvullend onderzoek met bijvoorbeeld uitgebreide morfologische modellering noodzakelijk zijn om deze beïnvloeding te onderzoeken. Een voorbeeld van hoe de SedTRAILS methode werkt wordt gegeven in Figuur 4-6 en een aanvullende beschrijving kan worden gevonden in Elias en Pearson (2020). Binnen het KPP B&O Zeegaten onderzoek is SedTRAILS toegepast voor de analyse van systeemsuppleties bij Texel en Ameland (Elias et al., 2021b), het Bankje van Zoutelande (Elias et al., 2021a) en het in kaart brengen van transportpatronen in het Friesche Zeegat (Elias en Oost, 2021) en de Put van Hansweert in de Westerschelde (Elias et al. 2020).



*Figuur 4-6: 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 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, kan deze spaghetti ontward worden en kunnen verbanden tussen de verschillende morfologische gebieden in kaart worden gebracht.*

De SedTRAILS-analyse is alleen zowel uitgevoerd op de modelresultaten van het kleinste domein van het DD model. Dit domein beslaat het gehele kustvak in hoge resolutie. Door op het kleine model te concentreren is het mogelijk een hoge resolutie van de SedTRAILS bronlocaties te gebruiken (Figuur 4-7). Karakterisering van de transportpaden in het gehele kustvak is gebaseerd door het aanbrengen van 500 sedimentbronnen verdeeld over het gehele rekenrooster (Figuur 4-7, boven). Naast deze grootschalige analyse zijn de sedimentverplaatsingen in detail doorgerekend door de 500 sedimentbronnen te herschikken in representatieve raaien (Figuur 4-7, onder).

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.

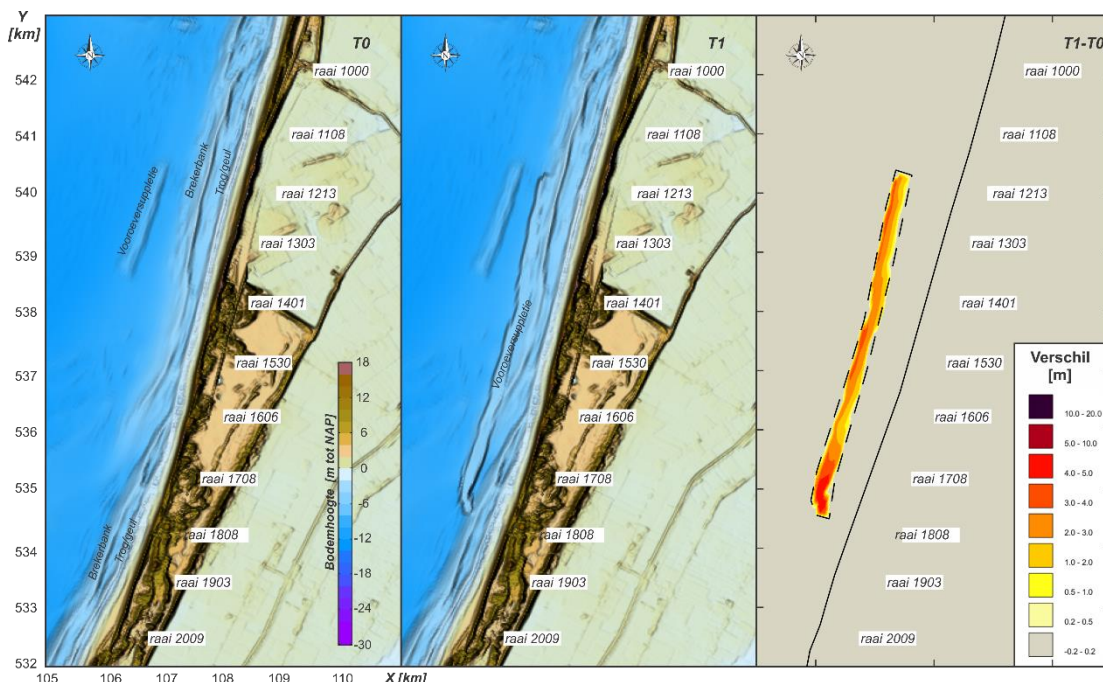


*Figuur 4-7 Locaties van 500 sedimentbronnen verdeelt over het gehele kustvak (boven) of in 3 geselecteerde raaien (onder).*

Zoals hierboven al uitgelegd, is SedTRAILS een nabewerking op de al bestaande Delft3D modelresultaten. Deze nabewerking heeft tot doel complexe sedimenttransportpatronen beter in kaart te brengen. Zulke patronen zouden kunnen optreden in het "geultje" tussen de kust en de brekerbank. Uit analyse van de modelresultaten blijkt dat de modelresultaten worden gedomineerd door de (golfgedreven transporten) langs de kust. De analyse van de instantane en residuele stromingen en transporten geeft hier al goed inzicht in de processen. De SedTRAILS analyse geeft hier geen aanvullende informatie. De SedTRAILS resultaten worden daarom weergegeven in de Appendix en vormen geen deel van het hoofdrapport.

## 4.2 Een overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten

Het HCZ-DD model is gebruikt om een *T0* simulatie, de 2019 bodem vóór suppletie door te rekenen evenals een identieke simulatie maar nu met een bodem die is aangepast op het door Rijkswaterstaat aangeleverde suppletieontwerp (*T1*); zie Figuur 4-8.



Figuur 4-8: Een overzicht van de *T0*, *T1* bodem en het verschil.

De suppletie is ontworpen aan de zeezijde van de al aanwezige brekerbank en strekt zich uit tussen raai 1213 en raai 1808. De aanlegdiepte ligt tussen de -5 m en -9 m en de kruinhoogte van de suppletie ligt op -5 m NAP. In totaal geeft dit in het rekenontwerp een volume van 3 miljoen m<sup>3</sup>.

De suppletie heeft ook als doel de kustlijn met de BKL als referentie te onderhouden. Door de suppletie te verlengen tot raai 1808 wordt ook getracht de zandverliezen in de aanwezige geul tussen de brekerbank en het strand te verminderen en zo de rechtstreekse verbinding van de geul met de vooroever te doorbreken.

Beide simulaties, *T0* en *T1*, bestaan uit een berekening van de getijgedreven transporten (conditie w00 in Tabel 4.1) en berekeningen van de transporten voor ieder van de 12 condities van het representatieve golfklimaat. In deze simulaties wordt zowel de invloed van getij, wind en golven meegenomen. Door iedere tijdstap (elke 10 minuten) de resultaten van de golfsimulaties gewogen bij elkaar op te tellen wordt een tijdserie van jaarlijks gemiddeld transport verkregen. Deze tijdserie vormt de basis van de uitgevoerde analyses. De jaargemiddelde transporten worden op een standaard manier geanalyseerd (instantane stromings- en transportvectoren en residueel transport) en de SedTRAILS transportpaden worden bepaald.

De analyse van de suppletieontwerpen richt zich op twee aspecten. Ten eerste de beïnvloeding van het golfklimaat en ten tweede de grootschalige beïnvloeding van de sedimenttransporten.

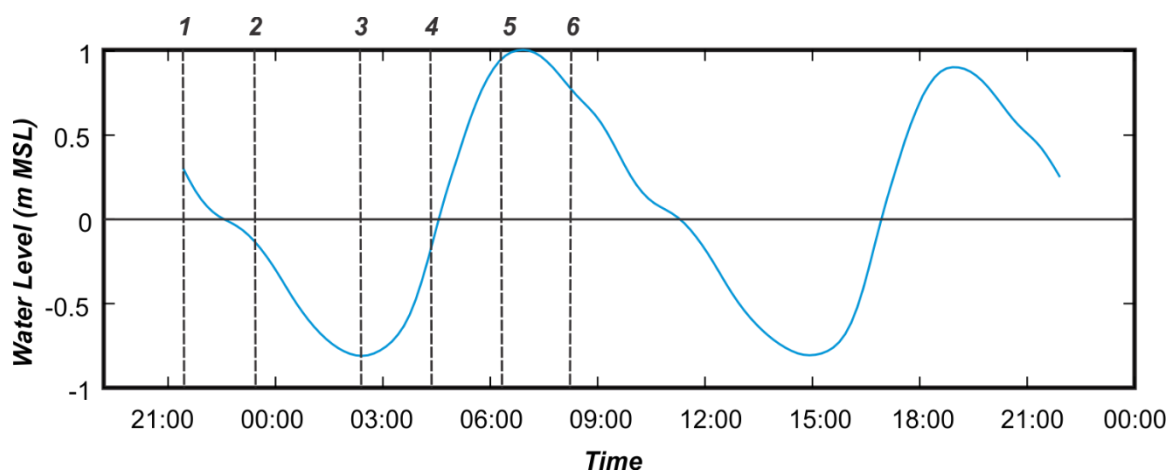
## 4.3 Modelresultaten voor de T0 situatie

### 4.3.1 Getijgedreven stromingen en -transporten

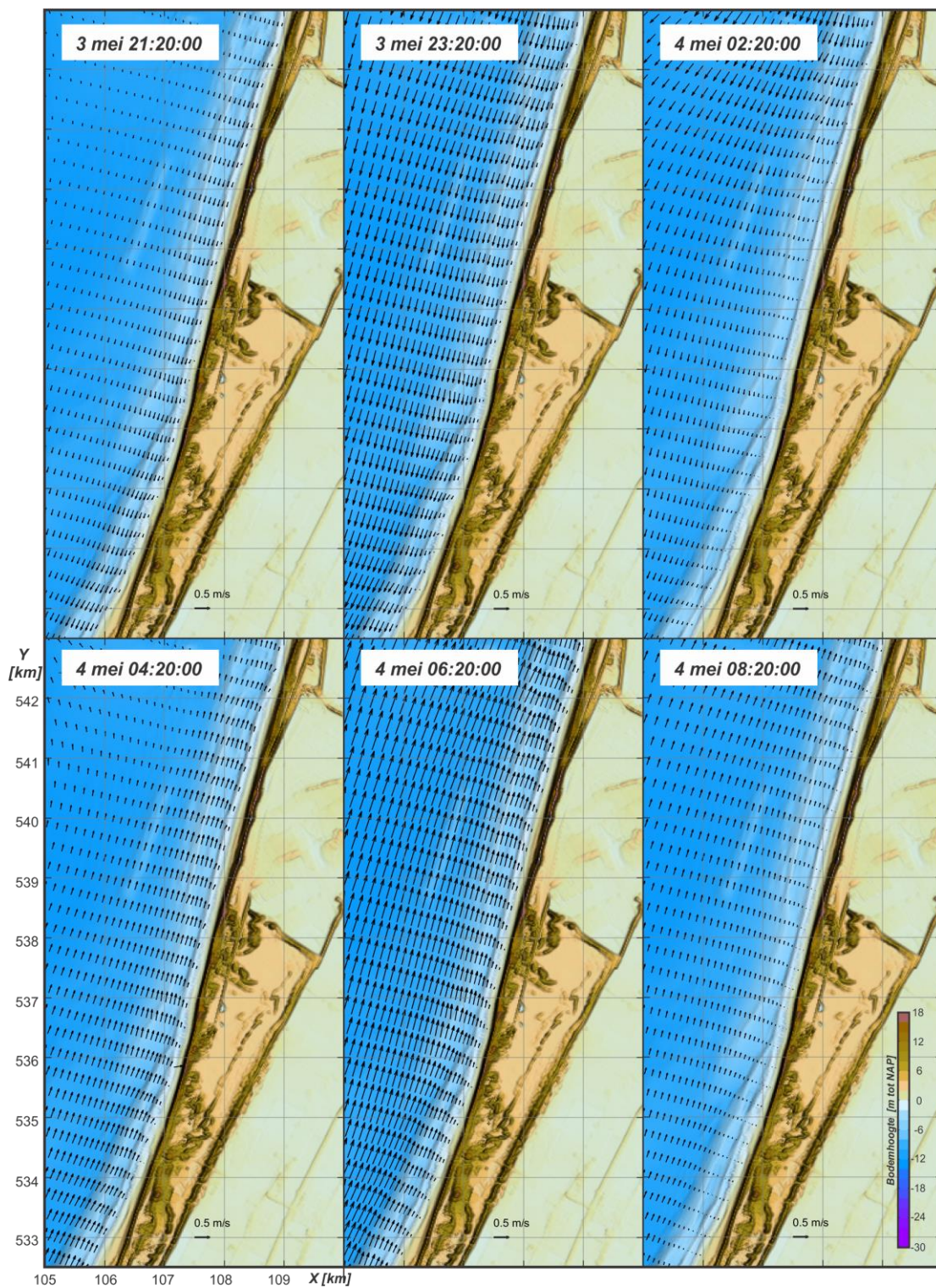
Een overzicht van de getijgedreven stromingen langs het kustvak staat in Figuur 4-10 en Figuur 4-11. Op tijdstip 1 (Figuur 4-9) is het afgaande getij net begonnen. Stromingen in het kustvak zijn dan nog beperkt. De stromingen zijn langs de kust hoger dan zeewaarts. Nabij Callantsoog ligt de stroming rond de 0.20 m/s. Ze neemt in zuidelijke richting toe tot 0.35 m/s vóór de HPZ. De stroomrichtingen zijn vrijwel uniform door het gehele kustvak en volgen de oriëntatie van de kustlijn. Deze stromingen zijn maximaal rond 23:20 (tijdstip 2, Figuur 4-9). De maximale stromingen in het kustvak liggen dan tussen de 0.5 en 0.7 m/s. De stromingen zijn tijdens laagwater (02:20; tijdstip 3, Figuur 4-9) nabij de HPZ al sterk afgenomen. In het noordelijke deel zijn de stromingen dan echter maximaal (tot 0.8 m/s). Deze grote stromingen worden veroorzaakt door de uitstroming van het zeegat. Op de voorgestelde suppletielocatie is de invloed van het zeegat niet direct merkbaar. Na kentering van het getij draait de stroomrichting om. Ook tijdens opkomend getij volgen de vectoren de oriëntatie van de kustlijn. De stromingen nemen toe van maximaal 0.4 m/s op 04:20 tot 0.8 m/s om 06:20 (resp. tijdstippen 4 en 5 uit Figuur 4-9).

Op basis van de getijgedreven stromingen is een duidelijk geultje of een zeewaartse uitstroming door dit geultje niet te onderscheiden. De stroomvectoren worden door de voorliggende vooroever slechts beperkt beïnvloedt. Direct bij het strand zijn wel kleinere vectoren te onderscheiden, maar ook deze vectoren volgen de grootschalige oriëntatie van de kustlijn. Op de brekerbank zijn de stromingen over het algemeen iets lager dan in de naastliggende geul. Dit resulteert echter slechts in zeer beperkte veranderingen in het snelheidsveld. Complexe uitstroombatronen via de geul of grootschalige circulaties zijn in de instantane stromingsvelden zoals getoond in Figuur 4-10 niet terug te zien.

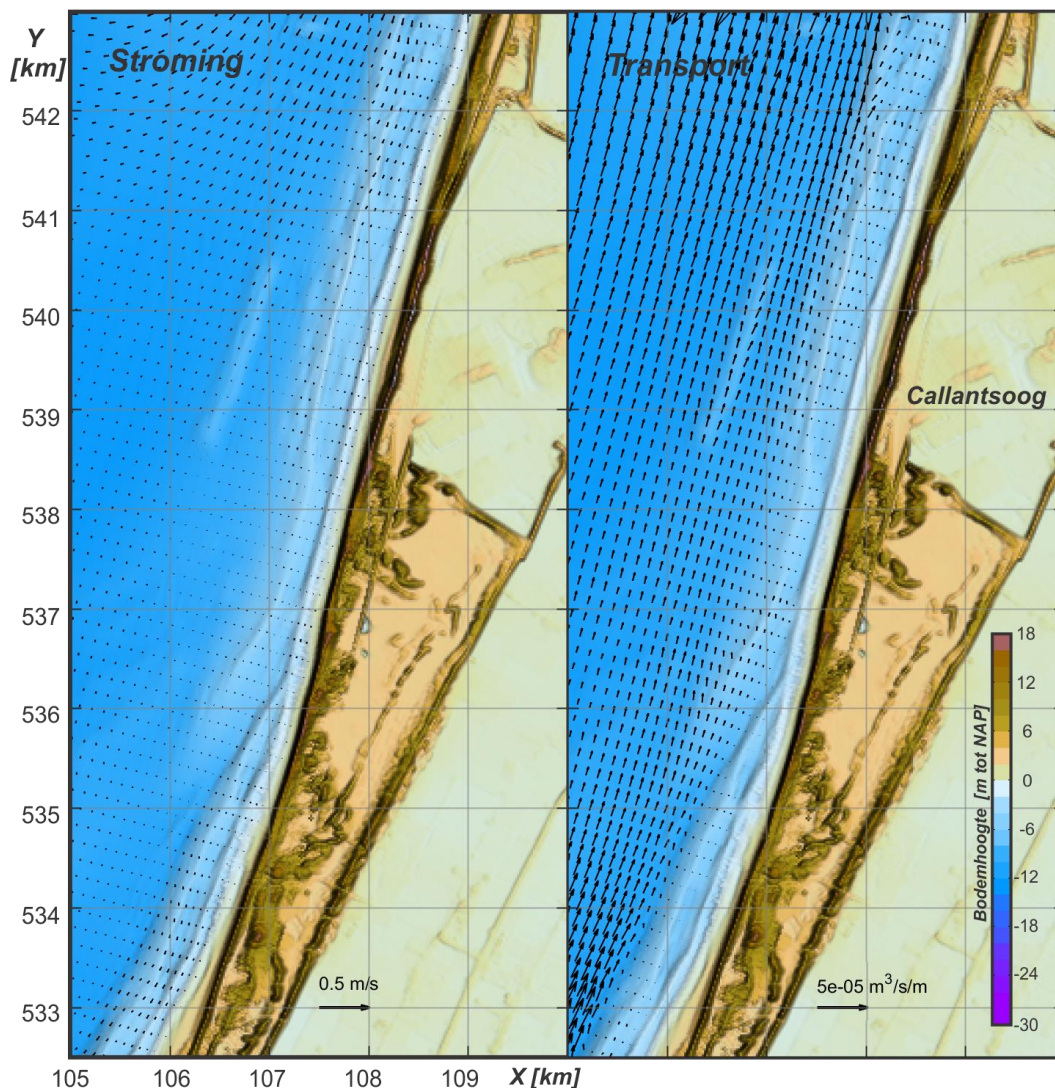
Gemiddeld over het morfologische getij zijn de residuele stromingen beperkt (Figuur 4-11). In het centrale deel van het kustvak zijn de residuele getijstromingen nihil. Alleen in het noorden en zuiden van het kustvak is een residuele stroming te onderscheiden. De zuidelijke reststroming treedt op in de kustzone en is richting de HPZ gericht. De stromingen zijn over het algemeen kleiner dan 0.1 m/s. Ten Noorden van Callantsoog zijn de residuele stromingen gerelateerd aan het naastliggende zeegat van Texel. De stroming in de getijgeul Nieuwe-Schulpengat is ebdominant. De invloed van deze ebdominantie strekt zich ook ten zuiden van het zeegat uit. Ten noorden van Y-km 541 liggen de residuele stromingen op 0.1 tot 0.2 m/s. Ook in het residuele stroomveld vindt er geen stroming plaats in de geul tussen de brekerbank en de kust.



Figuur 4-9: Overzicht van de waterstand bij Callantsoog.

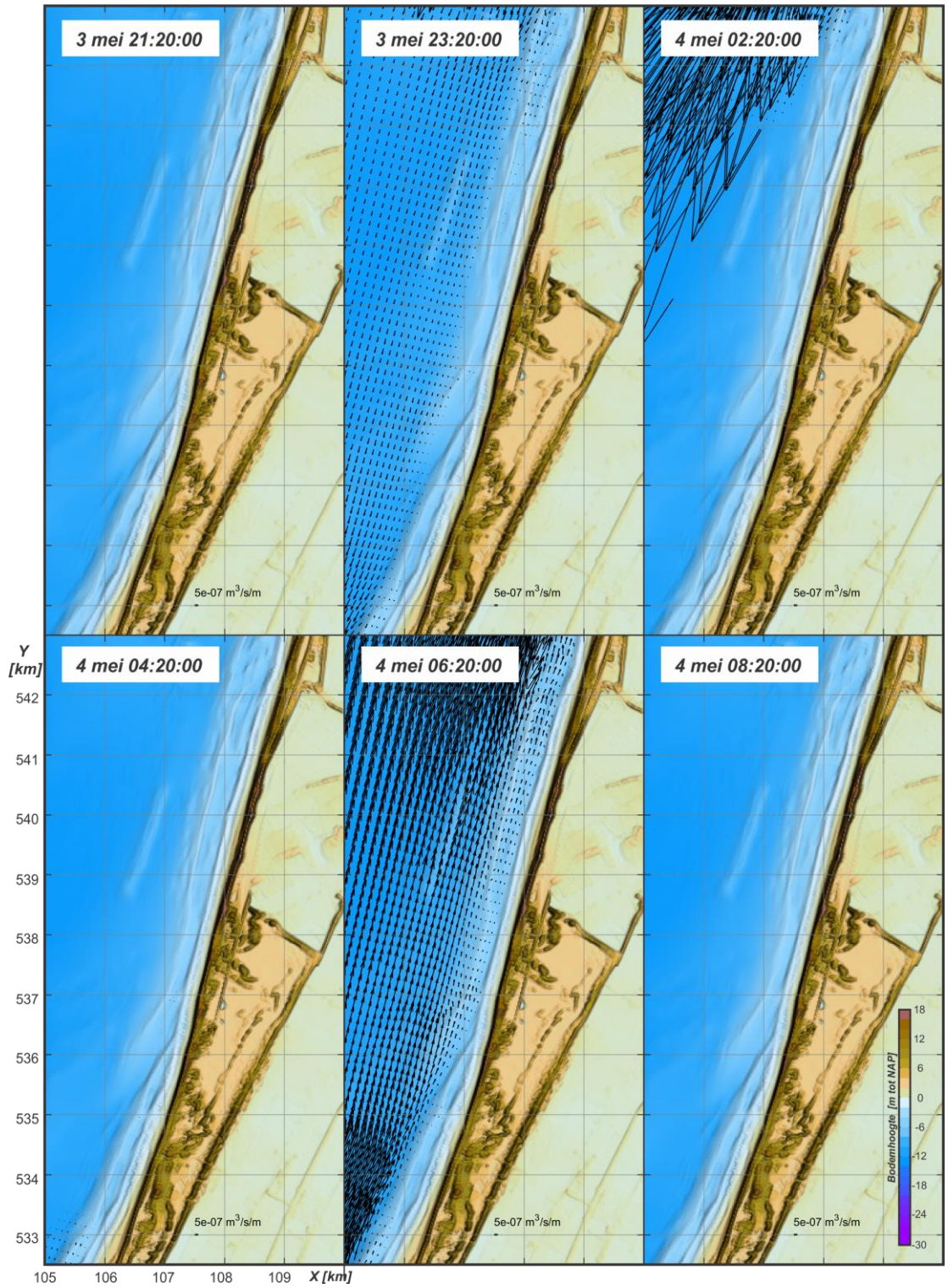


Figuur 4-10: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode in het kustvak Callantsoog op basis van de T0 bodem. Zie Figuur 4-9 voor een bijbehorend overzicht van de waterstanden, de nummering 1 tot 6 correspondeert met de getoonde tijdstappen.



Figuur 4-11: Residuele stroming (links) en sediment transport (rechts) over de getijperiode in het kustvak Callantsoog op basis van de T0 bodem.

Figuur 4-12 geeft de instantane getijgedreven transporten weer. Het verschil in transportgrootte door de tijd en in de ruimte maakt het lastig deze vectoren weer te geven. Wat in de figuur opvalt is dat de sedimenttransporten duidelijk gedomineerd worden door de maximale stromingen. Alleen op tijdstip 23:20 (maximale ebstroming) en op 06:20 (maximale vloedstroming) is er in het kustvak een transport te zien. De opname van 02:20 vertoont wel vectoren maar deze zijn afkomstig vanaf de buitendelta. Deze grote vectoren laten echter wel zien dat de getijgedreven transporten in het zeegat vele malen groter zijn dan die in het kustvak van Callantsoog. De vloedgedomineerde transporten zijn aanzienlijk groter dan de ebgedomineerde transporten. Dit verschil komt duidelijk tot uitdrukking in het residuele getijgemiddelde transport. Het transport is dan ook vloedgedomineerd (Figuur 4-11). De residuele transporten zijn het grootst zeewaarts van de brekerbank en in de orde van  $10^{-6}$   $m^3/s/m$ . Transporten tussen de brekerbank en de kust en in het geultje zijn beperkt.

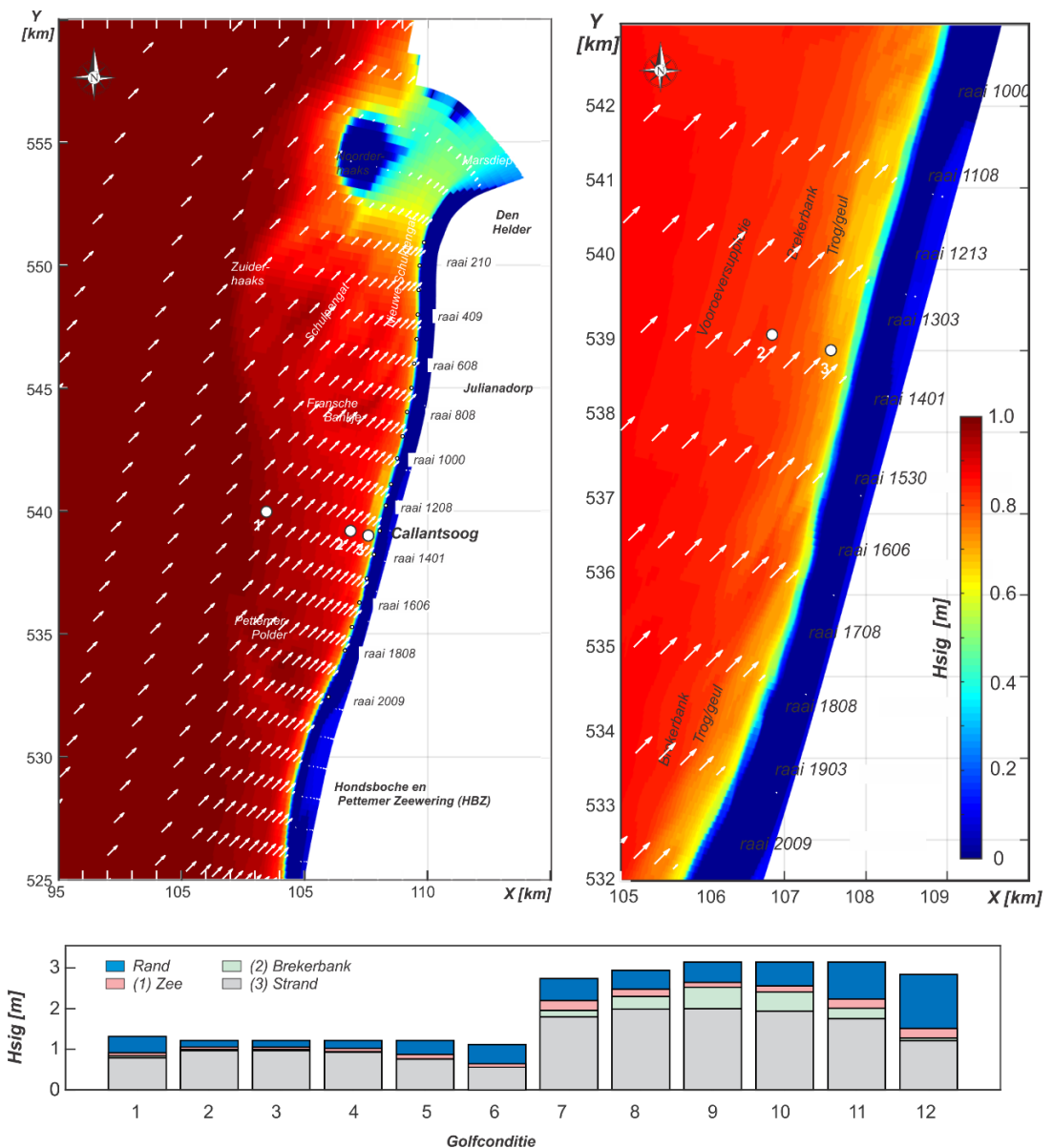


Figuur 4-12: Sedimenttransporten over de getijperiode in het kustvak Callantsoog op basis van de T0 bodem. Zie Figuur 4-9 voor een bijbehorend overzicht van de waterstanden, de nummering 1 tot 6 correspondeert met de getoonde tijdstappen.

### 4.3.2 Invloed van golven

De getijgemiddelde golfhoogte voor de individuele golfcondities worden weergegeven in Appendix B en samengevat in Figuur 4-13. Figuur 4-13 geeft de jaargemiddelde golfhoogte weer. Op een wat grotere schaal (links) vindt een duidelijke variatie in golfhoogte plaats. Golfbreking op de ondiepte van de buitendelta zorgt ervoor dat de golfenergie hier sterk afneemt. De afname in golfhoogte is het grootst in de luwte van de Noorderhaaks, maar ook in zuidelijk richting is nog invloed te zien. De ondiepte van de Pettemer polder zorgt ervoor dat er golfdissipatie optreedt door bodemwrijving. De gemiddelde golfhoogte tussen de buitendelta en de HPZ is dan ook kleiner dan de golfhoogte ten zuiden van de HPZ. De jaarlijks gemiddelde golfrichting is hier uit het zuidwesten.

Op kleinere schaal (Figuur 4-13, rechts) zijn er kleine variaties in kustlangse golfhoogte te zien. Zo is de golfhoogte ter hoogte van raai 1606 iets hoger dan in de omliggende raaien doordat er golfenergie via de uitstroom van het geultje richting de kust kan propageren.



Figuur 4-13: Een overzicht van de jaargemiddelde golfhoogte en -richting (witte vectoren) voor het gehele kustvak tussen HPZ en Texel (links) en bij Callantsoog (rechts). De onderste deelfiguur geeft de gemiddelde golfhoogte per golfklasse (niet geschaald) voor de randvoorwaarde en 3 observatiepunten (zie bovenste figuren voor ligging)



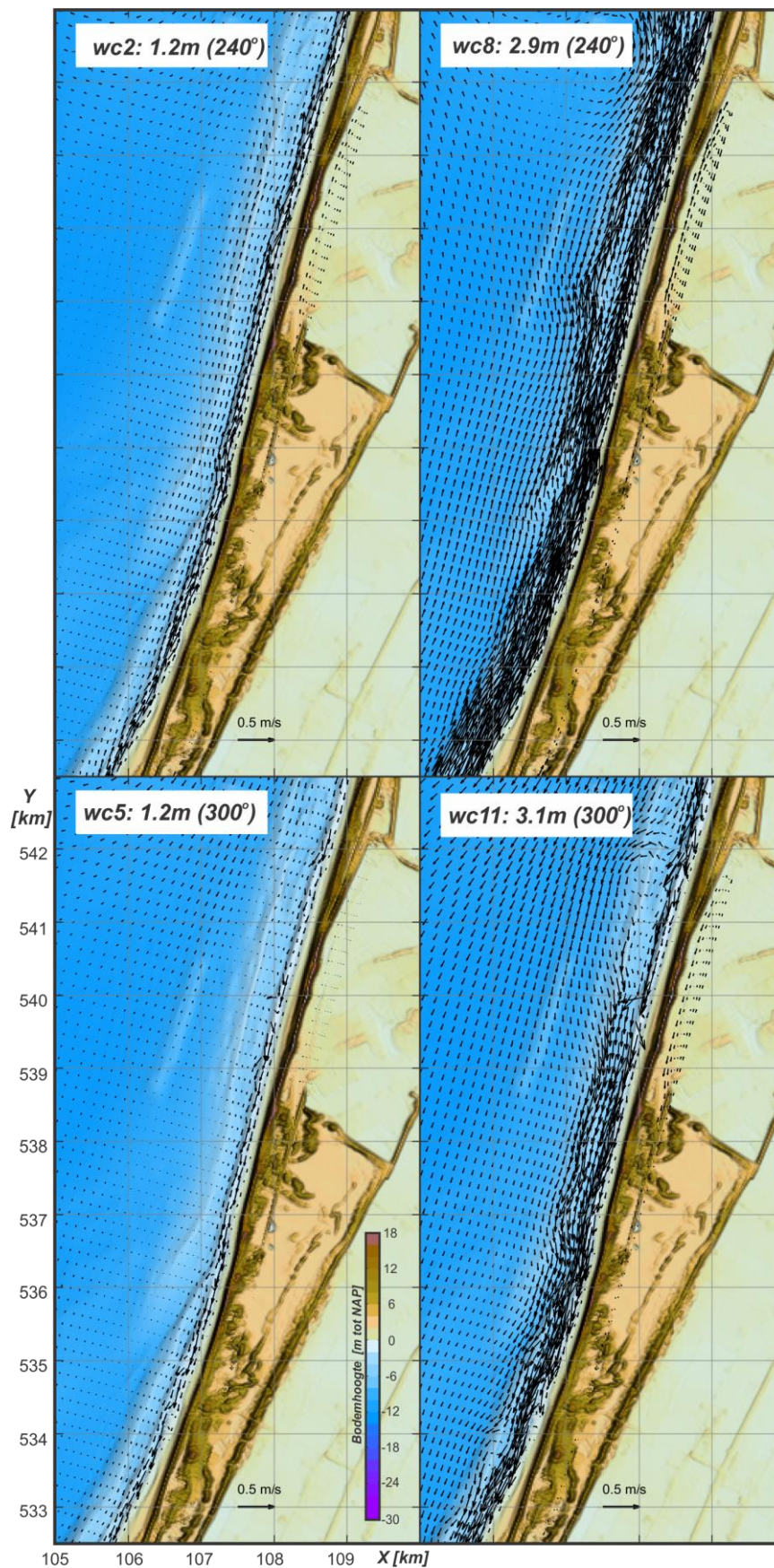
### 4.3.3 Golfgedreven stromingen en transporten

De invloed van golven op de sedimenttransporten wordt geïllustreerd aan de hand van de getijgemiddelde stromingen en transporten voor 4 geselecteerde golfcondities in Figuur 4-14 en Figuur 4-15. Deze golfcondities zijn representatief voor de patronen die optreden tijdens lage en hoge golven uit zuidelijke en uit noordelijke richting. Door toevoeging van de golven worden de stromingen in de kustzone sterk vergroot. Golfbreking zorgt ervoor dat er overdracht van energie plaatsvindt van de golven naar de waterkolom, waardoor er waterstand gradiënten ontstaan en er stroming aangedreven wordt. Tijdens de lage golfcondities breken de golven op het strand en treden de grootste stromingen dan ook op direct langs het strand. Hoge golven breken ook op de brekerbank, waardoor daar ook grote stromingen gegenereerd worden. Onder alle condities springt de tussenliggende geul er niet duidelijk uit. Stromingen lijken vooral de brekerbanken te volgen, er is geen duidelijke zeewaartse uitstroming uit de geul zichtbaar.

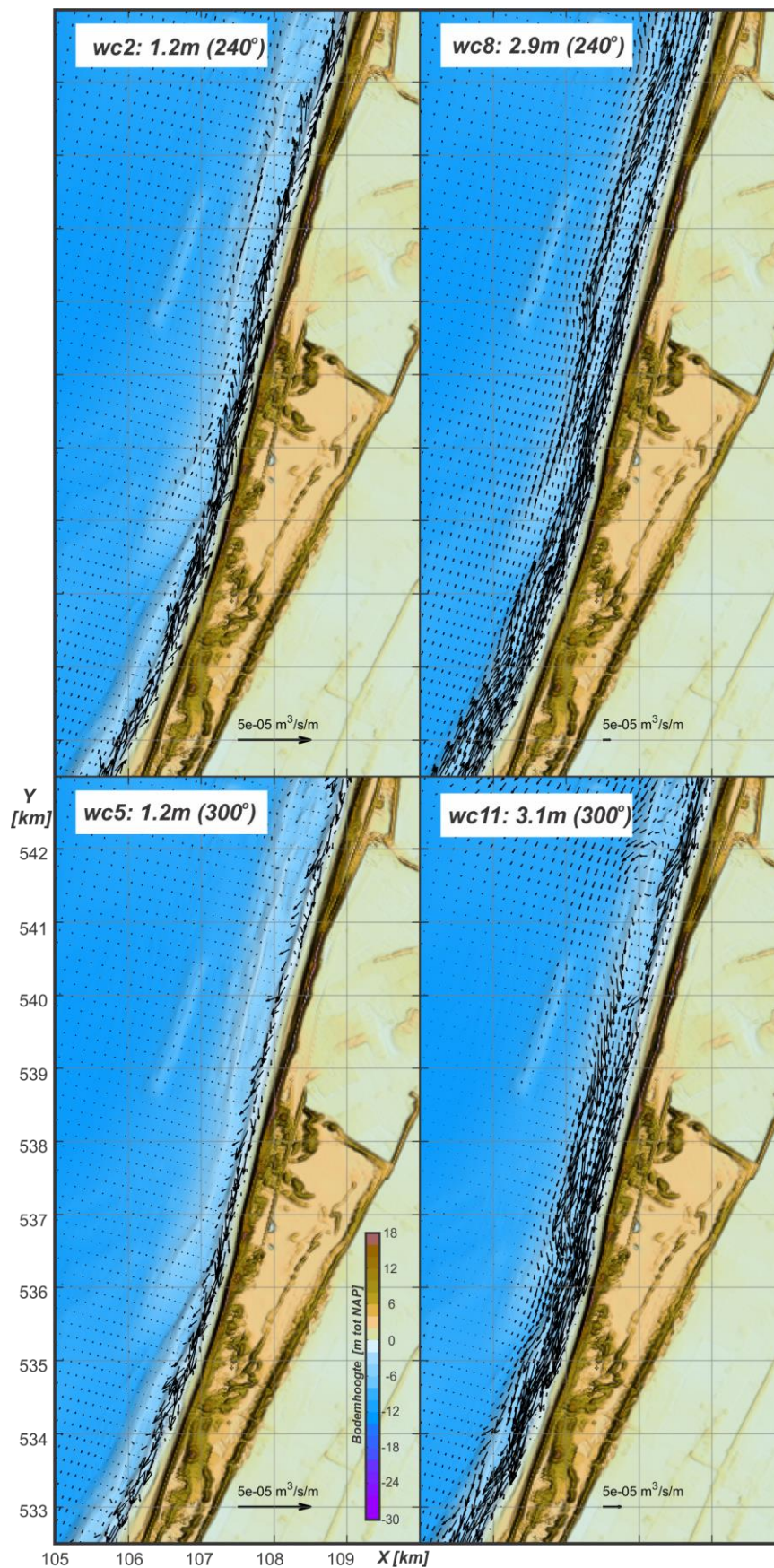
Het verschil in grootte tussen de residuele stroming door golven versus de residuele stroming door alleen getij (Figuur 4-11 en Figuur 4-16, linker plots) laat zien dat golven hier het dominante proces zijn voor zowel de stroming als het sedimenttransport. De residuele transporten onder invloed van golven zijn een orde groter dan de getijtransporten (Figuur 4-15 versus Figuur 4-11, rechts). De transportpatronen laten een gelijkwaardig beeld zien aan de stromingen met de grootste transporten in de kustzone. De transportrichting komt overeen met de golfrichting. Golven uit het zuiden resulteren in een noordwaarts transport en omgedraaid golven uit het noorden geven een zuidwaarts transport. De kleine golfcondities (conditie 2 en 5 in Figuur 4-15) resulteren vooral in transporten langs het strand. Golfgedreven transport op de brekerbank is beperkt. De hogere golven (conditie 8 en 11) geven zowel een groot transport langs de kustzone en op de brekerbanken. Onder alle omstandigheden is er geen duidelijk transportpad door de geul te zien. Onder hoge golven vindt er wel transport in de geul plaats, maar dit transport vindt dan zowel plaats op de bank en in de kustzone. Een duidelijke zeewaartse uitstroom vanuit de geul zeewaarts treedt niet op.

Het jaargemiddelde transport weergegeven in Figuur 4-16. Die vat bovenstaande inzichten samen. Bij vergelijking tussen de transportpatronen door alleen getij (Figuur 4-16, links) versus het jaargemiddelde transport, dus inclusief de invloed van golven, (Figuur 4-16 rechts) vallen twee zaken op. Ten eerste is er een verschil in locatie van de maatgevende transporten en ten tweede is er een verschil in grootte. Het getijgemiddelde transport treedt vooral op de diepere vooroever, zeewaarts van de brekerbank, op. Deze transporten zijn noordelijk gericht. De jaargemiddelde transporten domineren de brandingszone (op de brekerbank en landwaarts hiervan). De jaargemiddelde transporten zijn ook noordelijk gericht en een orde groter dan de transporten op basis van het getij alleen.

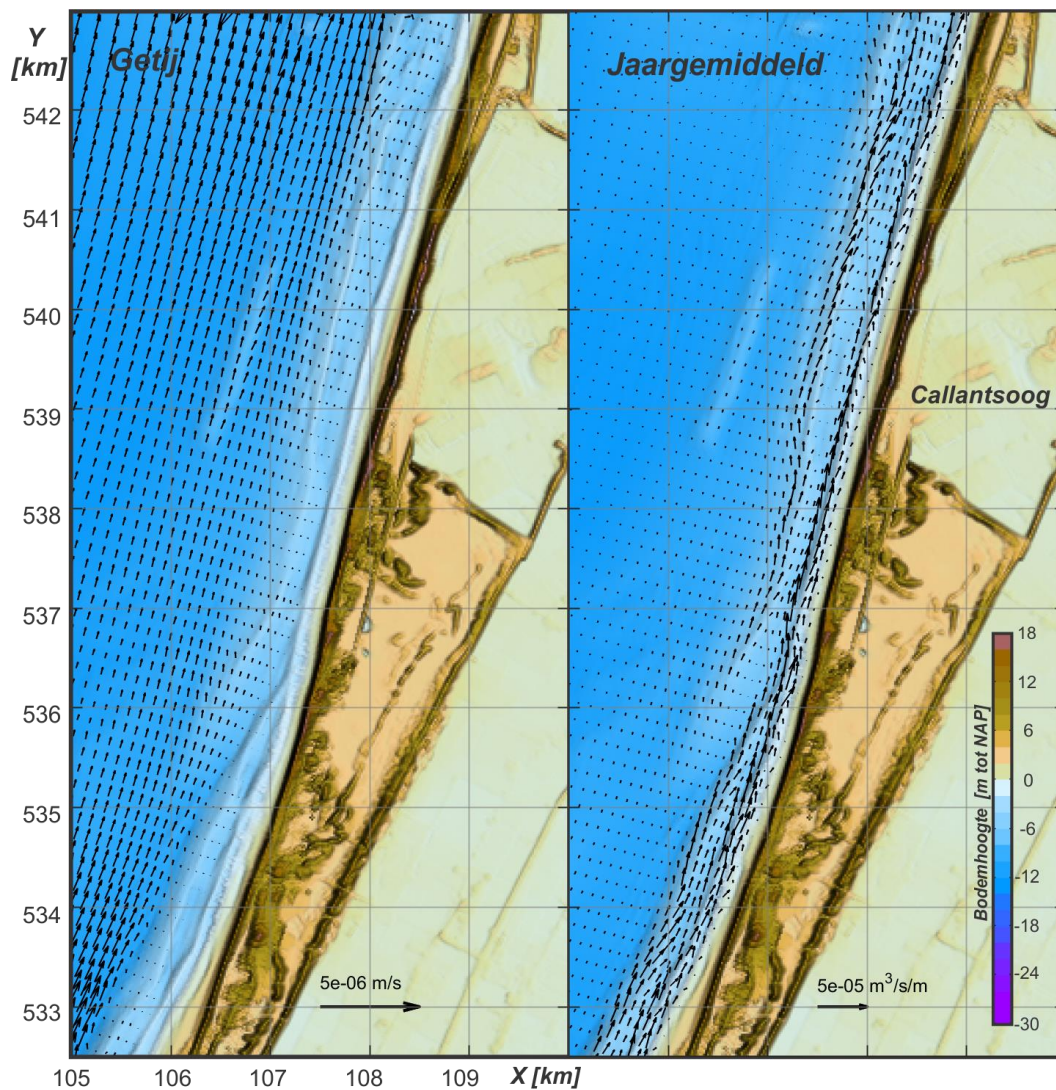
Ook in de residuele transportpatronen is een duidelijk transportpad in de geul of een uitstroming zeewaarts niet zichtbaar. Op basis van de T0 modelresultaten kan niet worden geconcludeerd dat er een dominante zeewaartse uitstroming vanuit de geul plaatsvindt. De modelresultaten worden gedomineerd door kustlangse transporten. Deze transporten zijn groter op de brekerbank en direct langs de kust.



Figuur 4-14: Residuele (getijgemiddelde) stroming voor golfcondities 2, 8, 5 en 11 representatief voor hoge en lage golven uit westzuidwest en noordnoordwest.



Figuur 4-15: Residuele (getijgemiddelde) transporten voor golfcondities 2, 8, 5 en 11 representatief voor hoge en lage golven uit westzuidwest en noordnoordwest.



Figuur 4-16: Residuele stroming (links) en transport (rechts) over de getijperiode in het kustvak Callantsoog op basis van de T0 bodem.

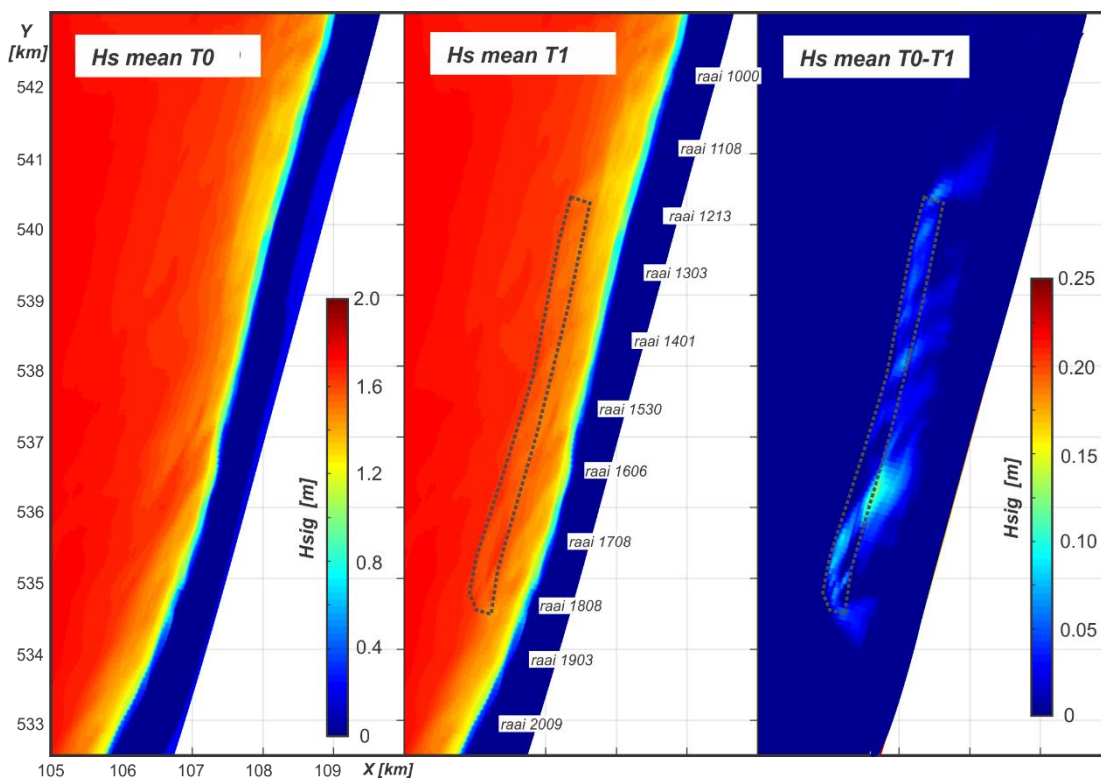
## 4.4 Invloed van de vooroeverstapeling (T1)

### 4.4.1 Golven

De invloed van de vooroeverstapeling op het jaargemiddelde golfklimaat is zichtbaar in Figuur 4-17. Deze invloed is beperkt. De grootste beïnvloeding vindt plaats in het zuidelijke deel. Het beperkte effect op de golfhoogte is verklaarbaar door 2 factoren. Ten eerste is de vooroeverstapeling van vrijwel gelijke hoogte als de brekerbank en ten tweede vindt er alleen golfbreking plaats tijdens de hoge golven die relatief weinig voorkomen.

Het grootste deel van de stapeling is tegen de al bestaande brekerbank aangelegd. Deze brekerbank heeft ongeveer een gelijke hoogte aan de vooroeverstapeling. Golven breken nu iets verder zeewaarts op de vooroeverstapeling in plaats van op de brekerbank. Voor de golfhoogte achter de brekerbank maakt dit weinig verschil. In het noordelijke deel van het stapelingsgebied is dit effect ook zichtbaar. In het zuidelijke deel van de stapeling is een groter effect. Hier was geen brekerbank aanwezig.

In Appendix B.2 worden de golfhoogten voor de verschillende golfcondities getoond. Uit deze figuren wordt duidelijk zichtbaar dat de kleine golven (die relatief vaak voorkomen) vrijwel niet beïnvloed worden. Deze propageren vrijwel ongestoord over de stapeling heen. De grotere golven verliezen duidelijk meer golfenergie op de vooroeverstapeling. Deze golven hebben echter een lage kans van voorkomen. Per golfconditie kan het effect groot zijn en lopen de verschillen op tot meer dan 0.5 m. Geschaald met voorkomen is dit een geringe beïnvloeding. Jaargemiddeld is het maximale verschil kleiner dan 10 cm.

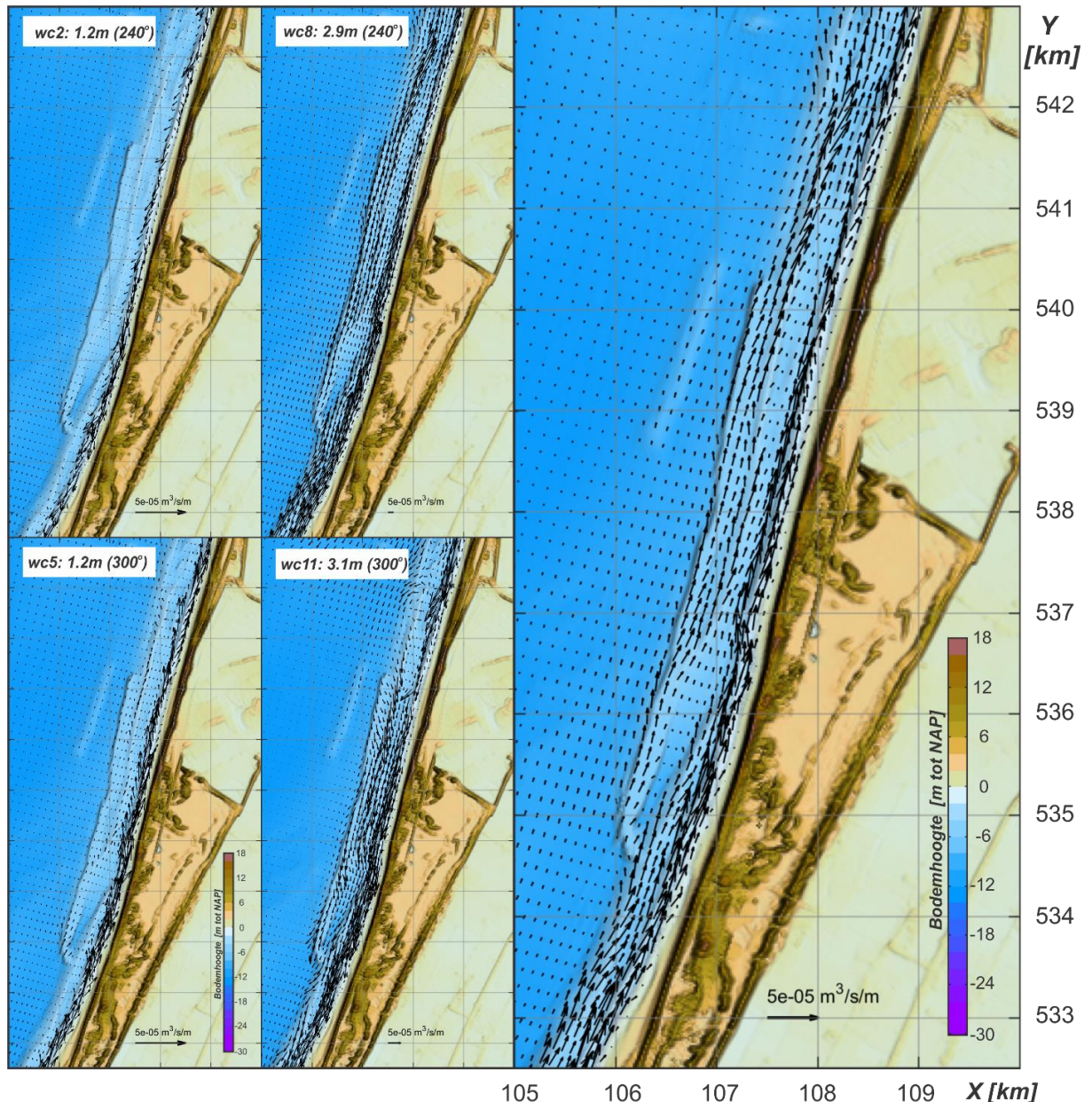


Figuur 4-17: Een overzicht van de jaargemiddelde golfhoogte voor de T0 (links), de T1 (midden) en het verschil in golfhoogte (rechts).

#### 4.4.2 Sedimenttransport

De verschillen in stroming en sedimenttransport tussen T0 en T1 zijn beperkt. Een samenvatting voor de invloed van transporten voor geselecteerde golfcondities en het jaargemiddelde transport is gegeven in Figuur 4-18.

De residuele transportvectorvelden voor de T0 en T1 vertonen grote overeenkomsten. In beide simulaties vindt er een netto noordwaarts transport langs de kust plaats en op de voorliggende brekerbank. De vooroeveroppletie verbreedt en verlengt eigenlijk de brekerbank die al langs een groot deel van de vooroeveroppletie aanwezig is. Onder lage golven (Figuur 4-18, wc2 en 5) is golfbreking op de bank en ook op de vooroeveroppletie beperkt. In de kustzone vindt dan een overeenkomstig transport plaats. Voor golven uit het noorden is het transport zuidwaarts gericht en vice versa voor golven uit het zuiden. De transporten zijn voor de T0 en T1 vrijwel identiek.



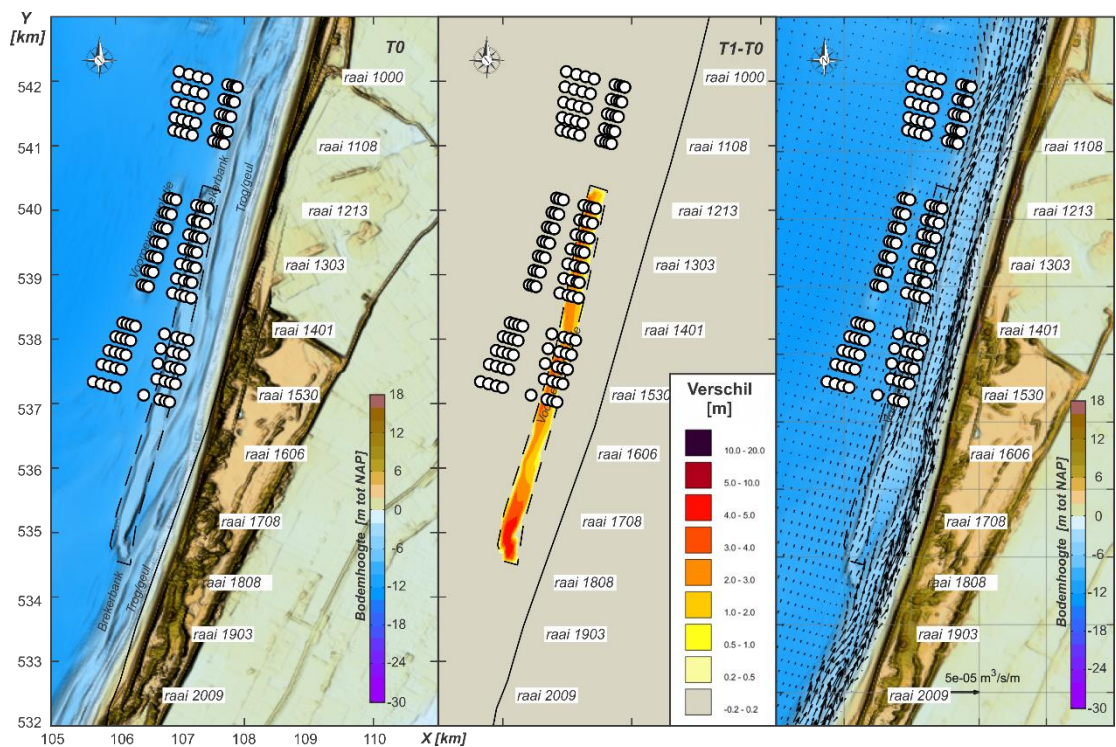
Figuur 4-18: Linker plots: Residuele (getijgemiddelde) transporten voor golfcondities 2, 8, 5 en 11 representatief voor hoge en lage golven uit westzuidwest en noordnoordwest. Rechts: residuele jaargemiddelde sedimenttransporten inclusief vooroeveroppletie.

### 4.4.3 Beïnvloeding van de bemonsteringslocaties

Zeewaarts van de voorgestelde vooroeversuppletie is in 2017 een diepe vooroeversuppletie aangelegd (zie ook H2.2.4). Rond deze suppletie vindt een uitvoerig ecologisch bemonsteringsprogramma plaats (zie Figuur 4-19 links voor een overzicht van de bemonsteringslocaties). De meetpunten kunnen in een landwaarts en een zeewaarts deel worden onderverdeeld en in een noordelijk, centraal en zuidelijk vak, samen zes vakken van bemonstering. Door aanleg van de vooroeversuppletie worden twee van de landwaartse vakken rechtstreeks beïnvloed. De aanleg van de suppletie leidt hier tot bedekken met suppletiezand. De overige vakken worden bij aanleg niet direct beïnvloed.

Het lijkt niet waarschijnlijk dat de zeewaartse bemonsteringspunten na aanleg beïnvloed worden. De sedimenttransporten blijven hier immers onveranderd (Figuur 4-19, rechts). De noordelijke punten kunnen mogelijk wel beïnvloed worden. Over de brekerbank vindt een duidelijk noordelijk sedimenttransport plaats dat de bemonsteringslocaties doorsnijdt. Een morfologische aanpassing van de brekerbank door aanleg van de vooroeversuppletie is waarschijnlijk. Dit zal dan ook een effect hebben op de sedimenttransporten en de bemonsteringspunten.

Concluderend, het is waarschijnlijk dat het landwaartse deel van de bemonsteringspunten na aanleg van de vooroeversuppletie beïnvloed worden.



Figuur 4-19: Overzicht van de bemonsteringslocaties en de beïnvloeding van deze locaties door aanleg van de vooroeversuppletie.

#### 4.4.4 Discussie van de modelresultaten

De belangrijkste boodschap uit de T0 en T1 berekening is dat de sedimenttransportpatronen eigenlijk overeenkomstig zijn. Vóór aanleg van de suppletie zijn er twee duidelijke transportpaden zichtbaar: 1) sediment transport over de brekerbank en 2) sediment transport direct langs de kust, nabij het strand. Het residuele transport is noordelijk gericht. Deze paden zijn ná aanleg van de suppletie ook nog aanwezig. De vooroeversuppletie zorgt er wel voor dat de brekerbank breder en langer wordt. Hierdoor strekken de transporten zich over een langere en bredere afstand uit.

Een duidelijk transport in de geul ter hoogte van raaien 1600 en 1700 tussen brekerbank en kust is in beide simulaties niet te zien. Uit de T0 simulatie volgt geen sedimentverlies door het geultje. De vooroeversuppletie beïnvloedt alleen de golven, maar door het ontbreken van een duidelijke stroming die de geul volgt heeft de suppletie geen effect. Het geultje werkt als een reguliere trog zoals die in brekerbanksystemen voorkomen. Het wel of niet aanwezig zijn van een open verbinding rond raai 1600-1700 heeft hier geen effect. Het dichtzetten van het geultje heeft wel effect op de golfhoogte. Doordat golfbreking nu plaatsvindt op de brekerbank wordt de achterliggende kust afgeschermd. Langs deze weg kan het dichtzetten van het geultje wel bijdragen tot het verminderen van kusterosie rond raai 1606.

Opvallend is dat de residuele transporten in de T1 net iets groter zijn dan in de T0 situatie. Dit grotere residuele transport betekent niet per definitie dat er meer erosie in het kustvak Callantsoog optreedt. Er kan (theoretisch) meer sediment door het kustvak heen verplaatsen, maar de gradiënten in de transporten bepalen sedimentatie en erosie, niet de transportgrootte.

Het verschil tussen de T0 en T1 is waarschijnlijk gedeeltelijk te verklaren door de nauwkeurigheid of gevoeligheid van de toegepaste methode. De simulaties worden morfostatisch berekend, waarbij de transporten over twee getijden worden berekend en vervolgens worden vermenigvuldigd met de kans van voorkomen. Kleine verschillen in de berekende transporten (bijv. ten gevolge van numerieke nauwkeurigheid van het golf- en stromingsmodel), kunnen al een verschil in transport geven. Analyse van de individuele golfcondities laat zien dat een deel van het verschil verklaard kan worden door de fysische processen. Bij hoge golven (Figuur 4-18, conditie 8 en 11) vindt er golfbreking plaats op de brekerbank (T0) en op de brekerbank en vooroeversuppletie (T1). In de T1 simulatie resulteert dit in een bredere en langere zone van sedimenttransport vergeleken met de T0. Langs de kust nemen de transporten dan iets af. Dit laat zien dat de vooroeversuppletie werkt in het reduceren van sedimenttransport langs de kust onder stormcondities. Dit effect is niet voor alle golfcondities gelijk. De afname van transport direct langs de kust is groter voor de noordelijke golfcondities dan de zuidelijke golfcondities. Het netto resultaat is dat de noordwaarts gerichte resttransporten toenemen na aanleg van de suppletie.



## 5 Conclusies en Aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Op basis van de grootschalige analyse wordt geconcludeerd dat het kustvak ten noorden van raai 1000 direct beïnvloed wordt door de processen in het zeegat. Hier wordt de kustlijnontwikkeling gestuurd door de verplaatsingen van de geulen en platen op de buitendelta. De kust tussen raai 1000 en 2009 ligt buiten de rechtstreekse invloedssfeer van het zeegat. De vooroever wordt hier gekenmerkt door een ondiep platform, de Pettemer polder. Die aanwezigheid zorgt daar voor meer golfdissipatie in de vooroever dan langs de kust ten zuiden van de Hondsbossche Duinen. Indirect speelt ook de buitendelta van het zeegat van Texel hier een rol, door de golfafschermende werking op noordelijke golfcondities. Langs de kust bevindt zich een enkele brekerbank. Tussen deze brekerbank en de kust is een geultje aanwezig. Dit geultje maakt verbinding met de vooroever ter hoogte van raai 1606 – 1708. Hierdoor ontstaat een scheiding tussen de noordelijke en zuidelijke brekerbank.

De enkele brekerbank en de scheiding in een noordelijke en zuidelijke bank is in vrijwel de gehele Jarkus meetserie zichtbaar (1965-2020). Er is een duidelijke beïnvloeding in bankgedrag door de uitgevoerde suppleties zichtbaar. Een evaluatie van de 2013 vooroeversuppletie laat zien dat na aanleg van de suppletie deze verheelt met de brekerbank. De nieuwe brekerbank ligt dan verder zeewaarts, vergeleken met de ongestoorde situatie, en migreert langzaam landwaarts. Een soortgelijk gedrag is ook na aanleg van de voorgestelde vooroeversuppletie te verwachten. De ontwikkeling van de 2008-2009 vooroeversuppletie suggereert dat het dichtzetten van het geultje niet heel effectief is. De meetdata laat zien dat het geultje snel is hervormd. Hierbij is opgemerkt dat het uit de aanwezige bodemdata niet is af te leiden of dit komt doordat het geultje snel hervormt, of omdat de suppletie in 2 delen is neergelegd, waarbij het geultje dan (gedeeltelijk) aanwezig bleef.

Analyse van de zandvolumes en de kustindicatoren laat zien dat met de vele uitgevoerde suppleties de kustlijn is behouden. Met uitzondering van het gebied rond raai 1500-1600 is in het gehele kustvak de MKL zeewaarts verplaatst sinds 2000. Ten zuiden van raai 1800 is een grote zeewaartse sprong in MKL-ligging en strandbreedte opgetreden na aanleg van de Hondsbossche Duinen. Een eerste schatting op basis van de Jarkus bodemdata geeft aan dat de volumes in het vak tussen raai 1606 en de HPZ met 5.9 miljoen m<sup>3</sup> zijn toegenomen. Het merendeel van deze toename vond plaats tijdens of direct na aanleg.

Met morfostatische modellering zijn de sedimenttransporten in het kustvak in kaart gebracht (T0) en de veranderingen hierin ten gevolge van de voorgestelde vooroeversuppletie (T1). Op basis van de T0 sedimenttransportpatronen kan niet worden geconcludeerd dat het geultje een belangrijke rol speelt in de zandverliezen van de kustzone. Zowel stroming als sedimenttransport laten geen sedimenttransportpad door het geultje of een zeewaartse uitstroom via het geultje zien. Alleen voor hoge golven uit het noordwesten was er een kleine zeewaartse uitstroom door het geultje te onderscheiden. De kans van voorkomen van deze conditie is echter zeer klein, waardoor dit verlies jaar-gemiddeld verwaarloosbaar is.

De residuele transporten zijn noordwaarts gericht en treden vooral op de voorliggende brekerbank op en in de brandingszone direct grenzend aan de kust. Het geultje speelt hier vrijwel geen rol in. De conclusie is dan ook dat het geultje waarschijnlijk geen primaire rol speelt in de kusterosie in de strandzone tussen raai 1320-1421. Het aanbrengen van een vooroeversuppletie om het geultje dicht te zetten heeft daarop geen effect.

Wat wel het maatgevende proces is van de hier lokaal hogere kusterosie is uit de modellering niet direct af te leiden.

De modellering van de vooroeversuppletie (T1) laat zien dat deze suppletie wel een effect heeft op de golven. Deze suppletie zal werken als een reguliere vooroeversuppletie, waarbij golfbreking op deze suppletie zorgt voor een reductie van de golven, in het bijzonder tijdens stormcondities. Het golfbrekende effect is het sterkst ter plaatse van het geultje omdat hier geen of een lagere brekerbank aanwezig was. In de T0 situatie kunnen hogere golven tot de kust (nabij raai 1606) doordringen, waardoor er hier meer erosie kan optreden. Langs deze weg draagt de vooroeversuppletie bij aan een reductie van de erosie van de achterliggende kust (rond raai 1606). De modellering geeft echter geen antwoord op de vraag of bij dichtzetten van het geultje de ter plekke gevormde brekerbank zich voor langere termijn handhaaft. Zowel op basis van de stroming als de sedimenttransporten kan geen duidelijk proces worden geïdentificeerd wat de vorming van het uitstroombuiltje verklaart. De persistente aanwezigheid van het geultje doet vermoeden dat deze wel zal hervormen.

Door aanleg van de suppletie zullen de landwaartse ecologische meetpunten van de diepe vooroeversuppletie worden bedekt of beïnvloed. Er is geen directe beïnvloeding van de zeewaarts gelegen meetpunten.

## 5.2 Aanbevelingen

Op basis van de studie kan worden verklaard waarom er een netto noordwaarts transport langs de kust is richting het Zeegat van Texel. De oorzaak van lokale verschillen in snelheid van de kusterosie binnen het kustvak kunnen echter nog niet worden verklaard. Aanvullende gedetailleerde analyses van de meet- en modeldata voor geselecteerde raaien zou aanvullend inzicht in kunnen verschaffen.

Er is een eerste schatting van de effecten van de Hondsbossche Duinen op de zandvolumes in het noordelijk gelegen kustvak gemaakt. Om het effect nauwkeurig te kwantificeren is het nodig het volledige sedimentbudget te beschouwen. Dit budget kan worden verkregen door analyse van de volumeverandering van de Hondsbossche Duinen en de aangrenzende kustvakken ten noorden en zuiden hiervan.

De uitstroom van het geultje blijft gedurende de gehele set aan bodemdata aanwezig. Dit kan nog niet worden verklaard. Aanvullend onderzoek naar de redenen voor deze persistente ligging zou zich kunnen richten op mogelijke beïnvloeding door de onderliggende bodemlagen.

## 6 Referenties

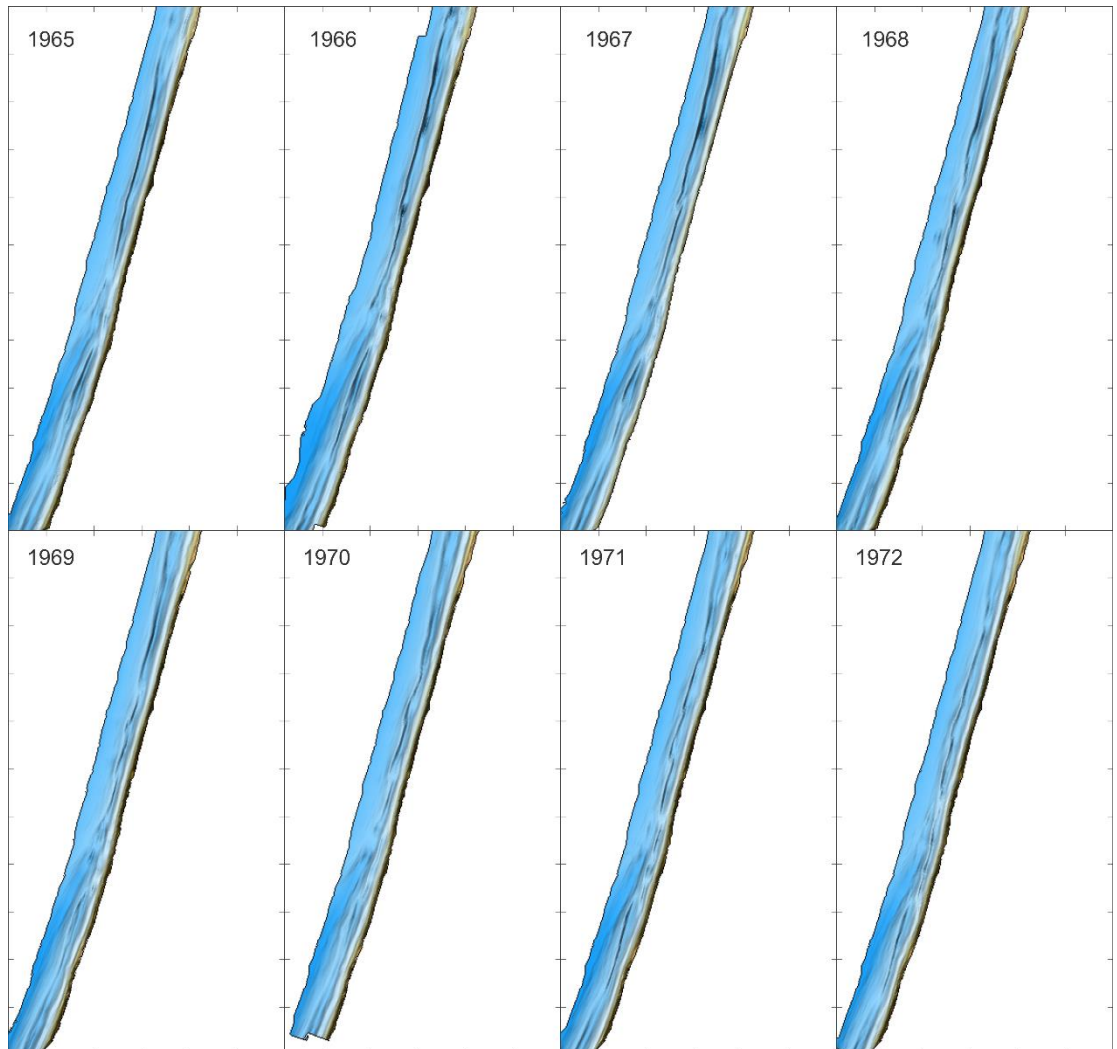
- Allersma, E. (1988). Analyse erosie-problematiek vooroever Hondsbossche Zeewering. Analyse van het erosieproces. Verslag bureaustudie. Rapport H237, WL-Delft Hydraulics, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L. & Cleveringa, J., 2003. Morfologische analyse van de ontwikkeling van het Nieuwe Schulpengat en de aangrenzende kust. Report RIKZ-2003.040, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ (The Hague): 61 pp. (in Dutch)
- Elias, E., & Pearson, S. 2020. SedTRAILS - Sediment TRANsport vizualization & Lagrangian Simulator . Rapport 11205236-003-ZKS-0002, Deltares, Delft.
- 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), 293–317.
- Elias, E.P.L., Pearson, S., van Weerdenburg, R., 2021a. Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zouteland. Rapport 11205236-003-ZKS-0002, Deltares, Delft, 92 p.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S., Huisman, B. 2020. Investigation of Sediment Pathways in the Put Van Hansweert. Morphological effects of dumping in a deep pit of the Western Scheldt. Report 1210301-001-ZKS-0010, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S., 2021b. Systeemsuppleties op Eilandkoppen Modellerings suppletievarianten Texel en Ameland, Rapport 11205236-005-ZKS-0006, Deltares, Delft, 202 p.
- Elias, E.P.L., Oost, A.P. 2021. Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Een conceptueel model. Rapport 11205236-003-ZKS-0005, Deltares, Delft, 130 p.
- Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. Van Kester, and G. S. Stelling., 2004, Development and validation of a three-dimensional morphological model, Coastal Eng., 51, 883–915, doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.014
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2012): Basiskustlijn 2012.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2018): Basiskustlijn 2017. Herziening van de ligging van de basiskustlijn. 29 p.
- Mulder, E.F.J. de, 1983. Geologische geschiedenis van de Hondsbossche Zeewering. Derde uitgave van 'Vrienden van de Hondsbossche', 15 pp.
- Roelvink, J.A., van der Kaaij, T., and Ruessink, B.G., 2001a. Calibration and verification of large-scale 2D/3D flow models, MARE consortium report no. Z3029.11, ONL Coast and Sea studies, June 2001 (final)
- Roelvink, J.A., van der Kaaij, T., Ruessink, B.G. and Bos, K.J., 2001b. Reference scenarios and design alternatives, MARE consortium report no. Z3029.12, ONL Coast and Sea studies.

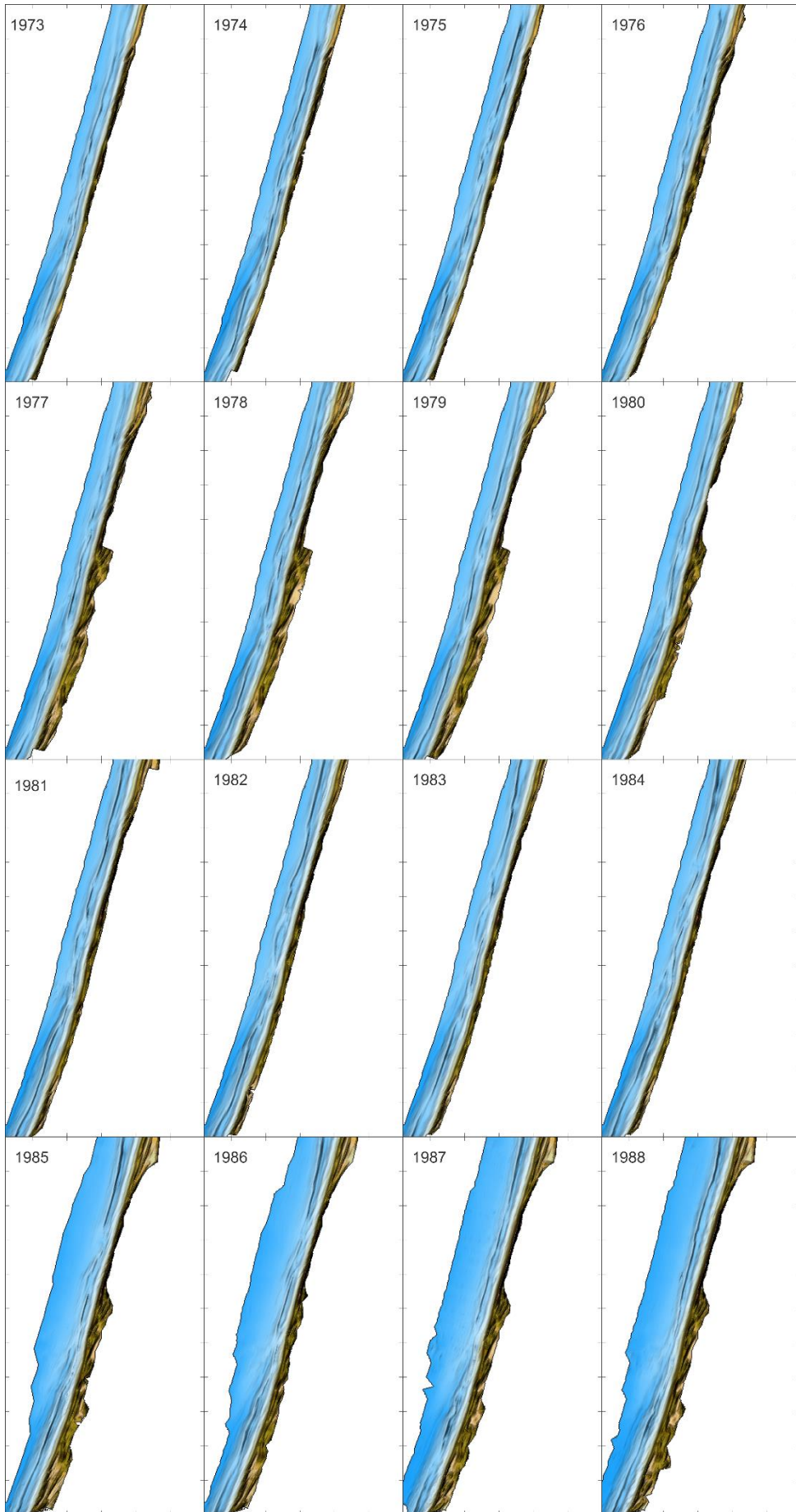
- Van der Hout, C.M., Tonnon, P.K., de Ronde, J.G., 2009. Morphological effects of mega-nourishments. Deltares rapport 1200659-000.
- van Rijn, L.C., 1997. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. Coastal Engineering 32: 61-90.
- Verhagen, H. J. & van Rossum, H., 1990. Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Report, Ministry of Transport and Public Works, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (The Hague): 40 pp. (in Dutch).

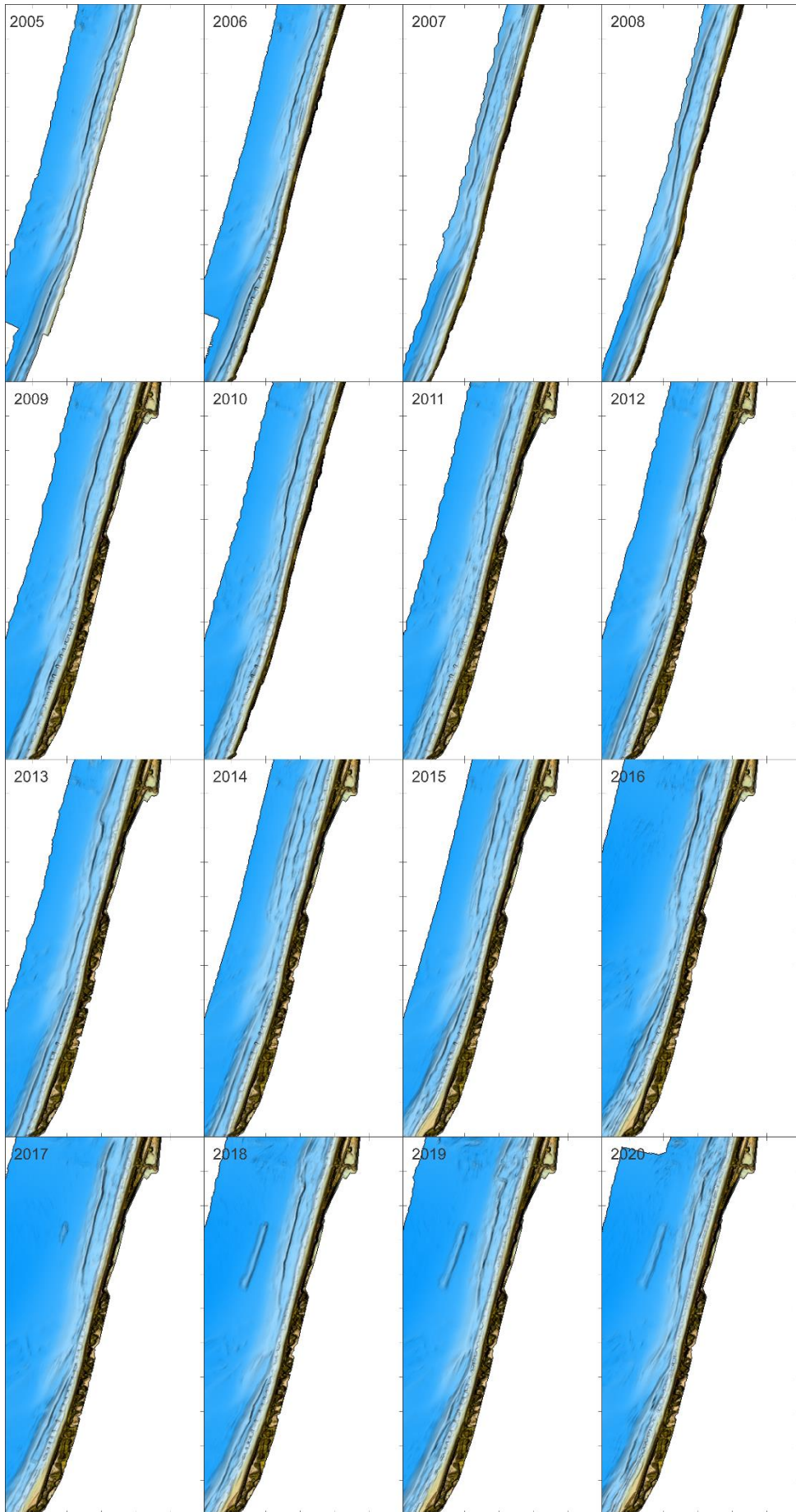
# A Meetdata

## A.1 Jarkusgrids

Onderstaande figuren geven een overzicht van de Jarkusgrids over de periode 1965-2020

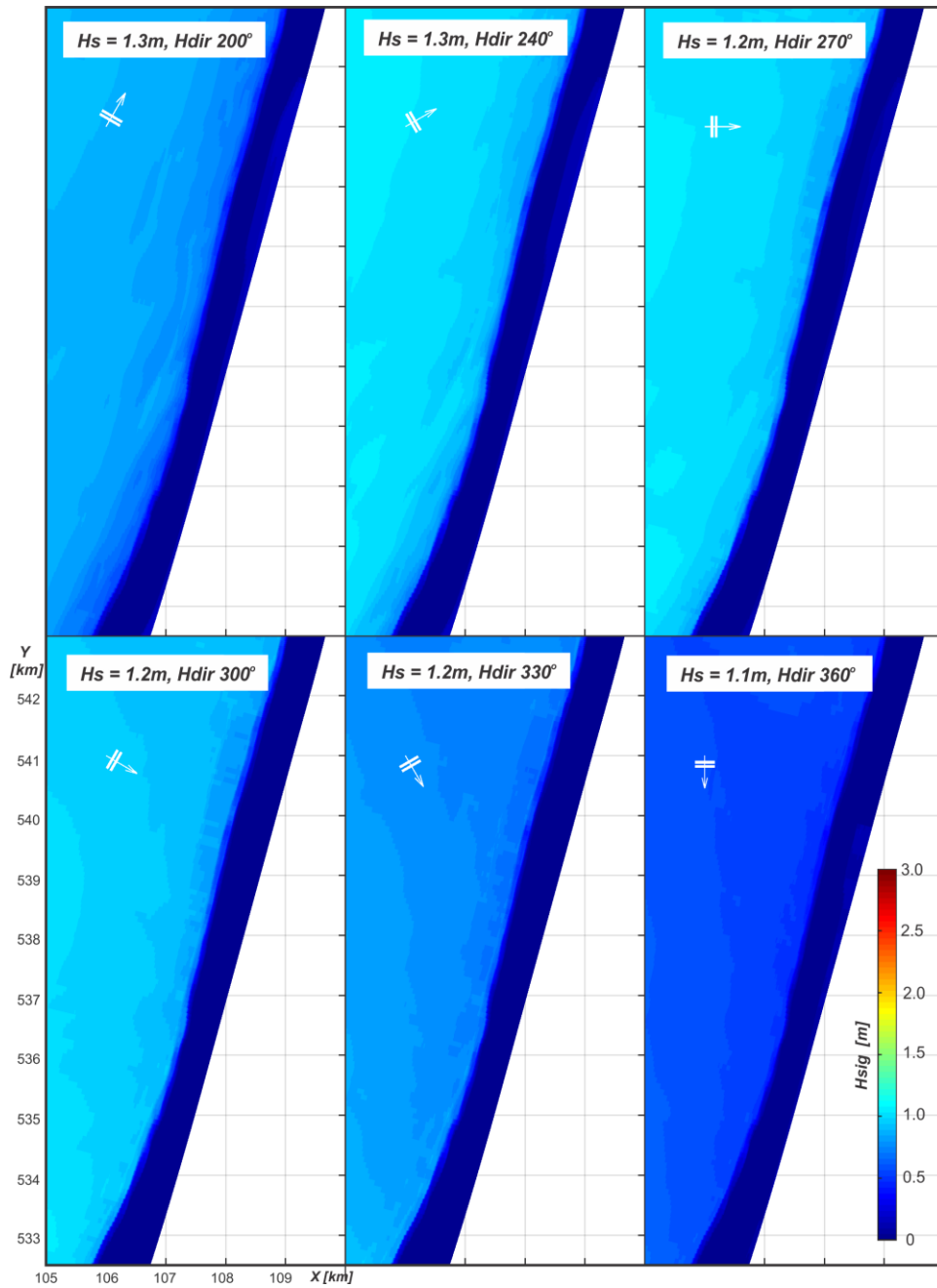






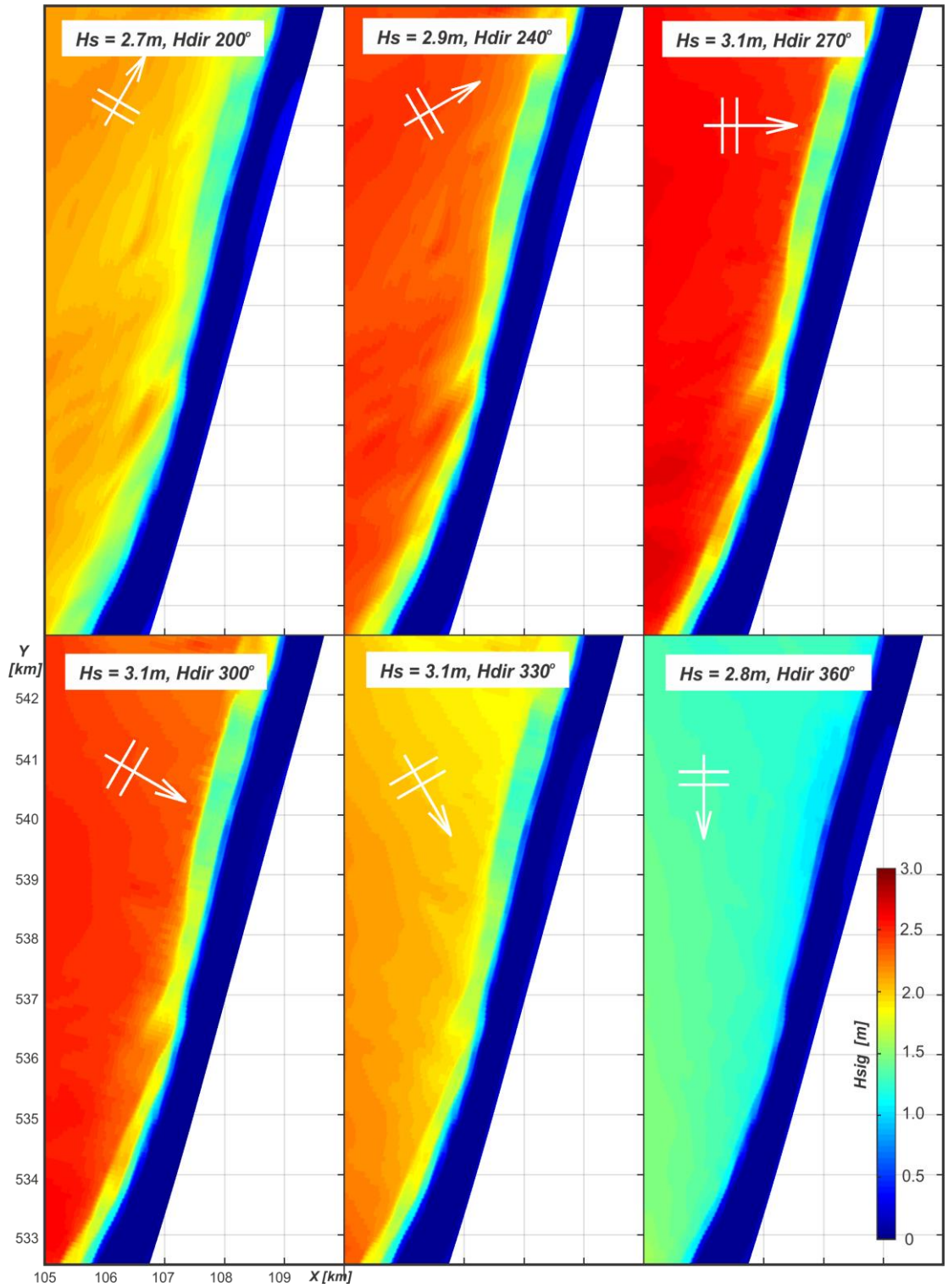
# B Modelling

## B.1 Golven (T0)



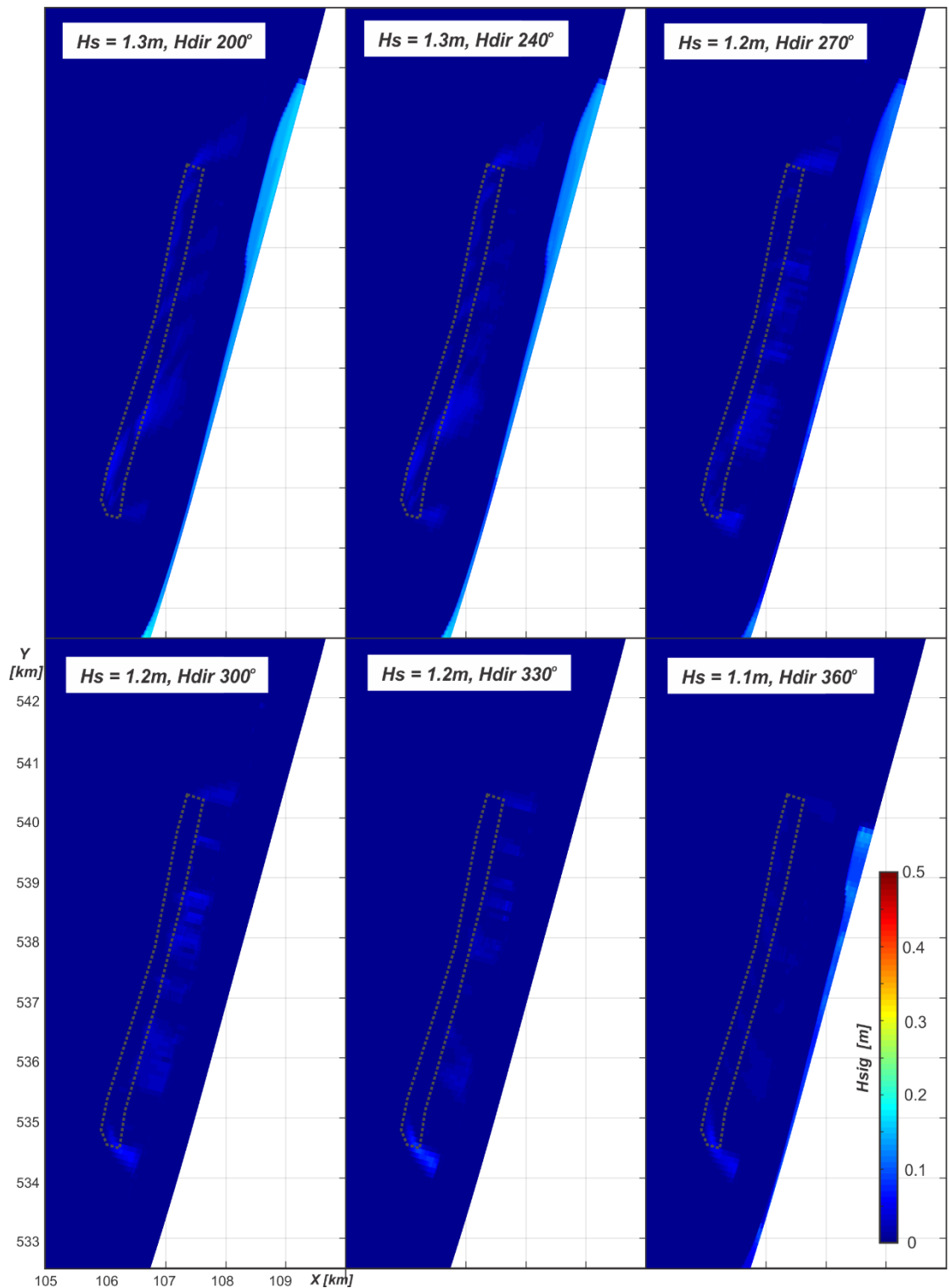
Figuur B- 1: Getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities 1 t/m 6



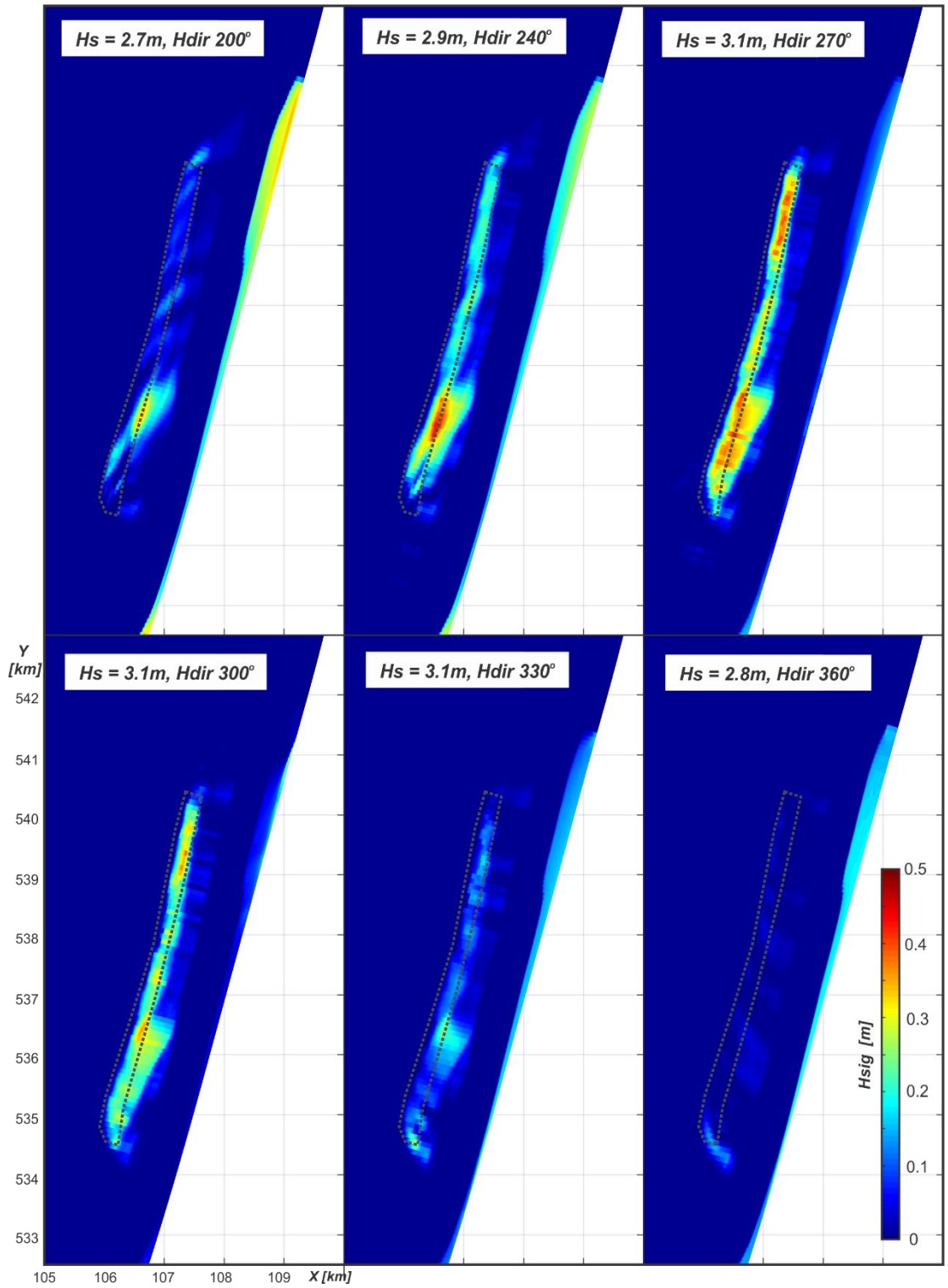


Figuur B- 2: Getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities 7 t/m 12

## B.2 Verschil in golfhoogte tussen de T0-T1

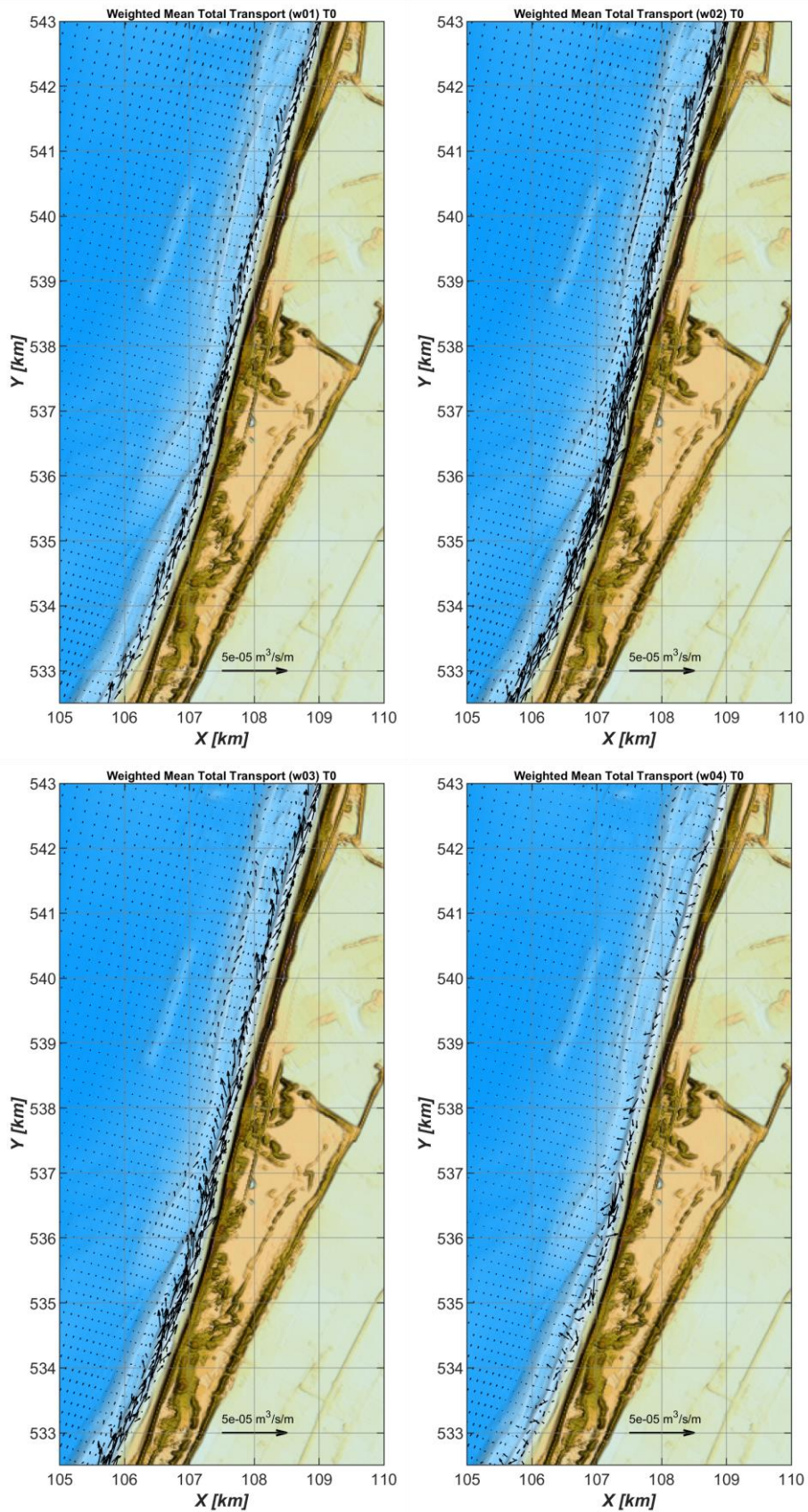


Figuur B- 3: Verschil in golfhoogte tussen de T0 en T1 voor golfcondities 1 t/m 6

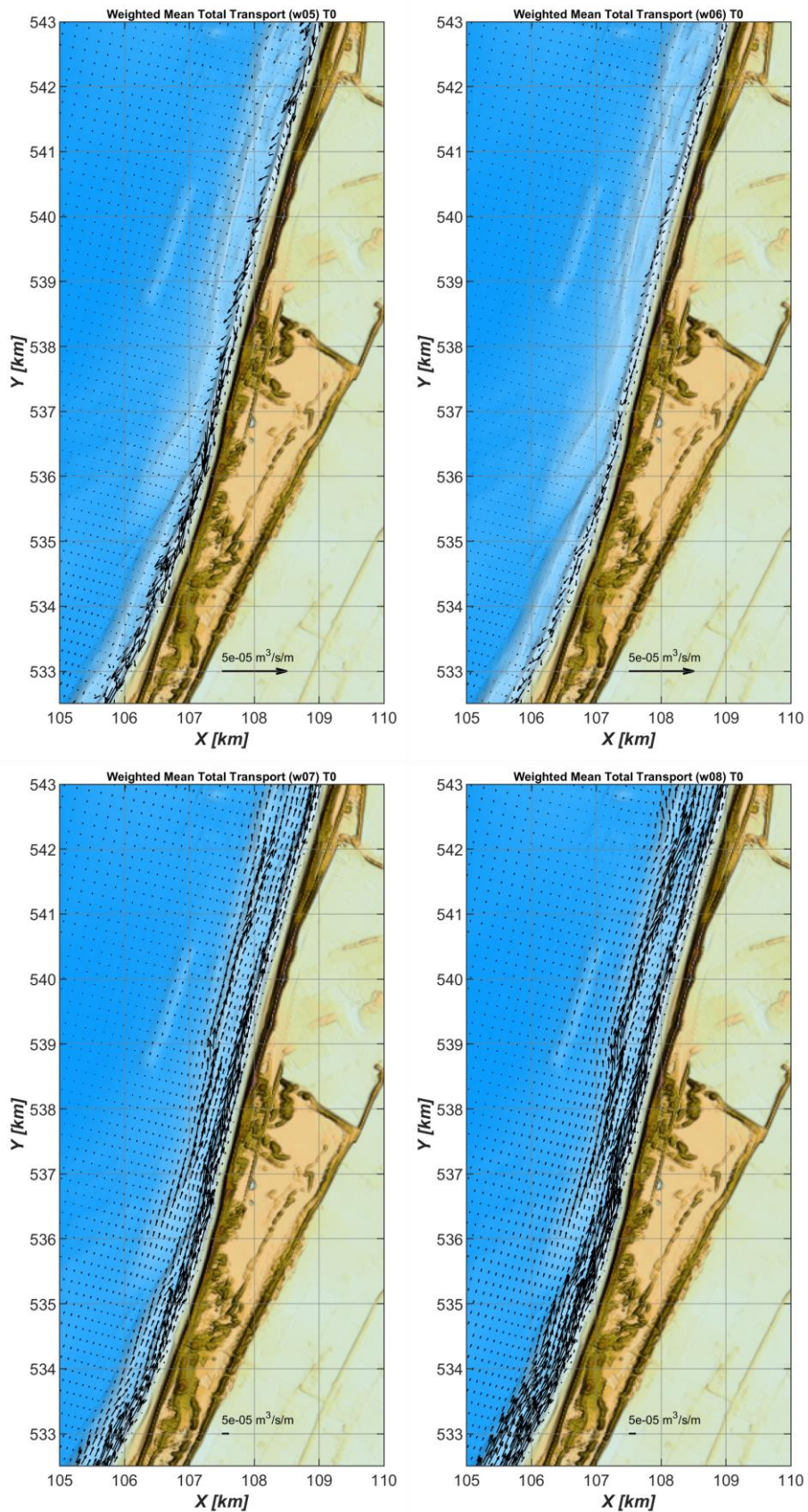


Figuur B- 4: Verschil in golfhoogte tussen de T0 en T1 voor golfcondities 7 t/m 12

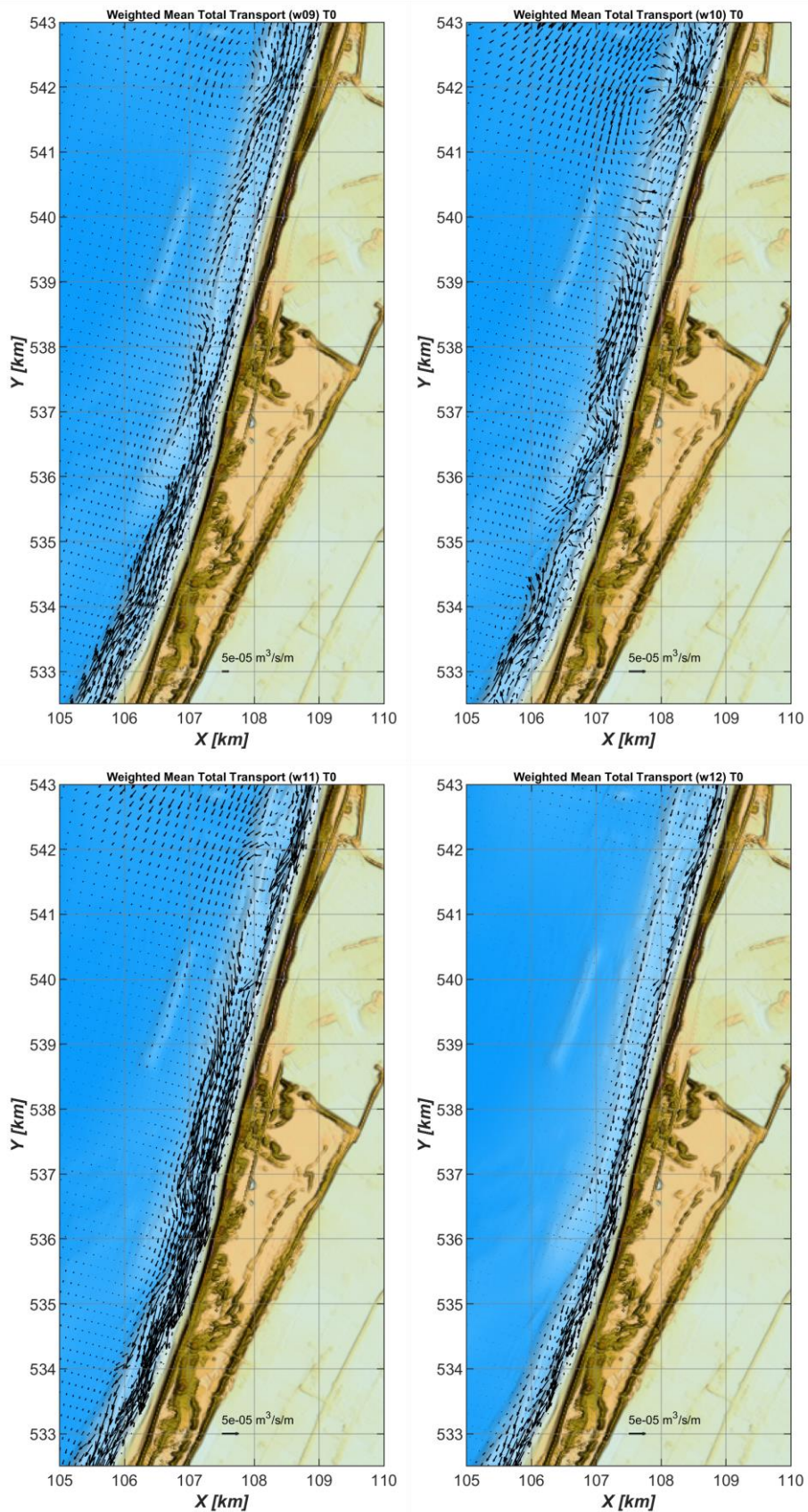
### B.3 Sedimenttransport per golfconditie (T0)



Figuur B- 5: Getijgemiddelde sedimenttransport voor de T0 en golfcondities 1-4.

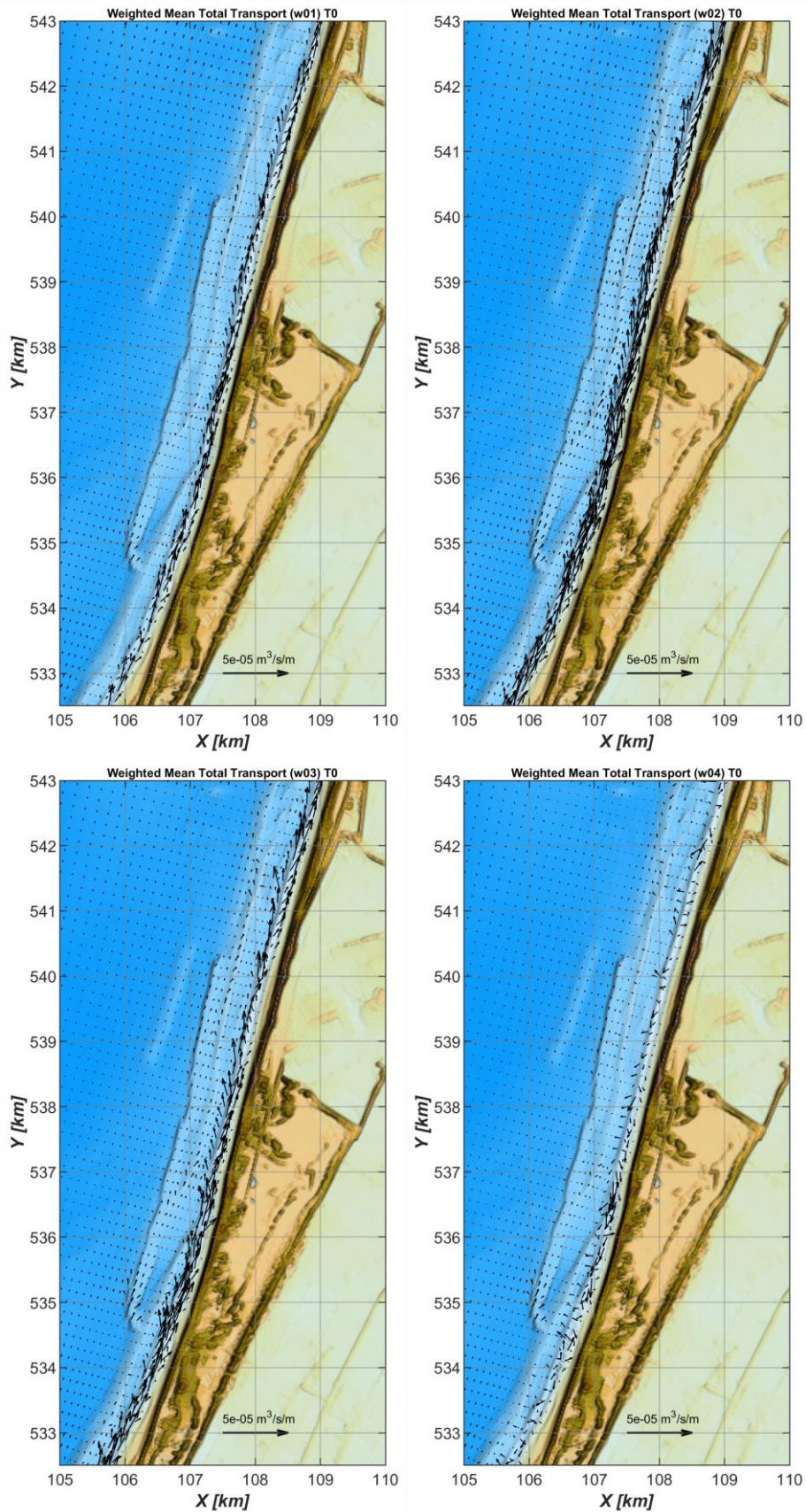


Figuur B- 6: Getijgemiddelde sedimenttransport voor de T0 en golfcondities 5-8.

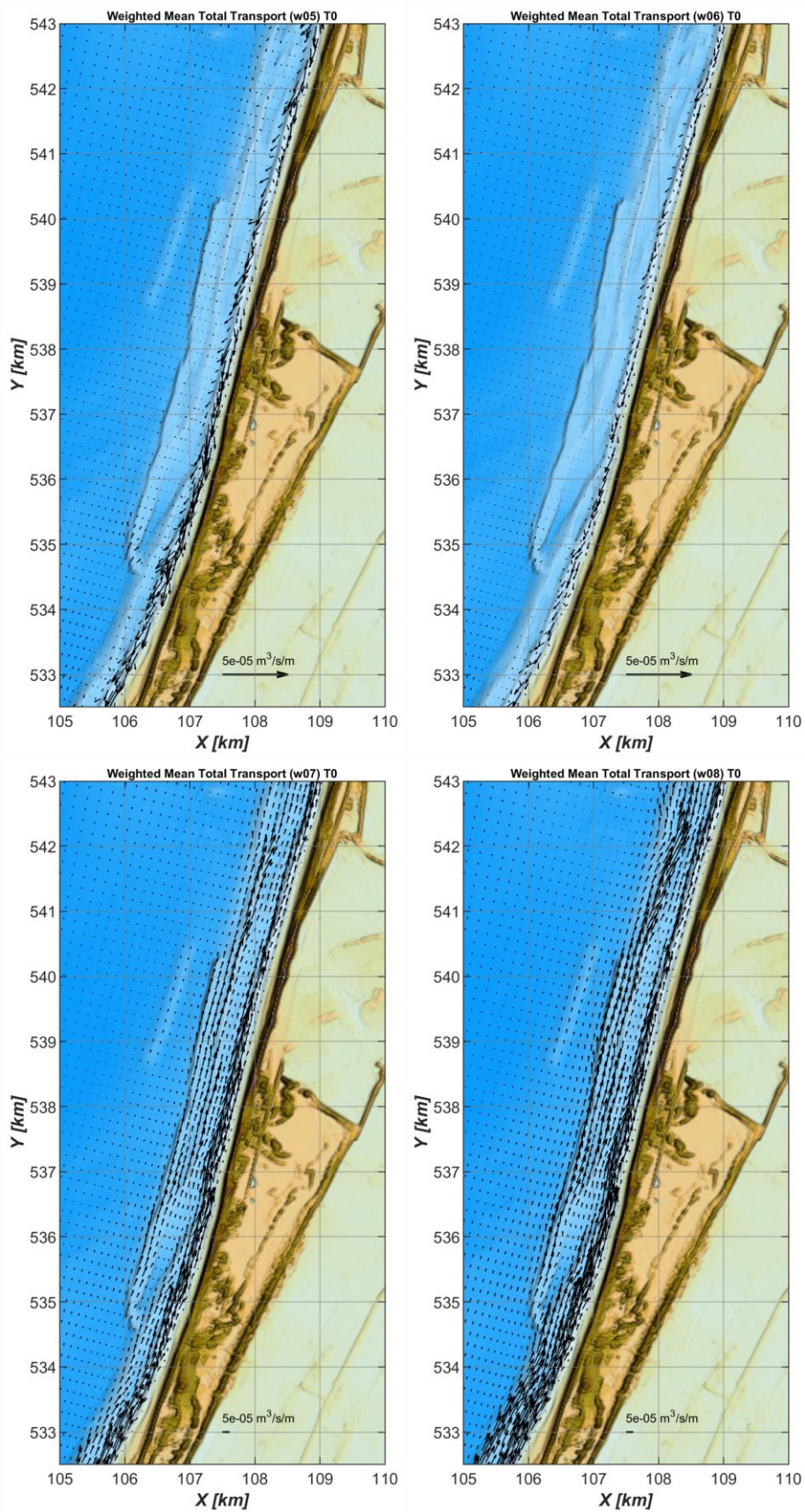


Figuur B- 7: Getijgemiddelde sedimenttransport voor de T0 en golfcondities 9-12.

## B.4 Sedimenttransport per golfconditie (T1)

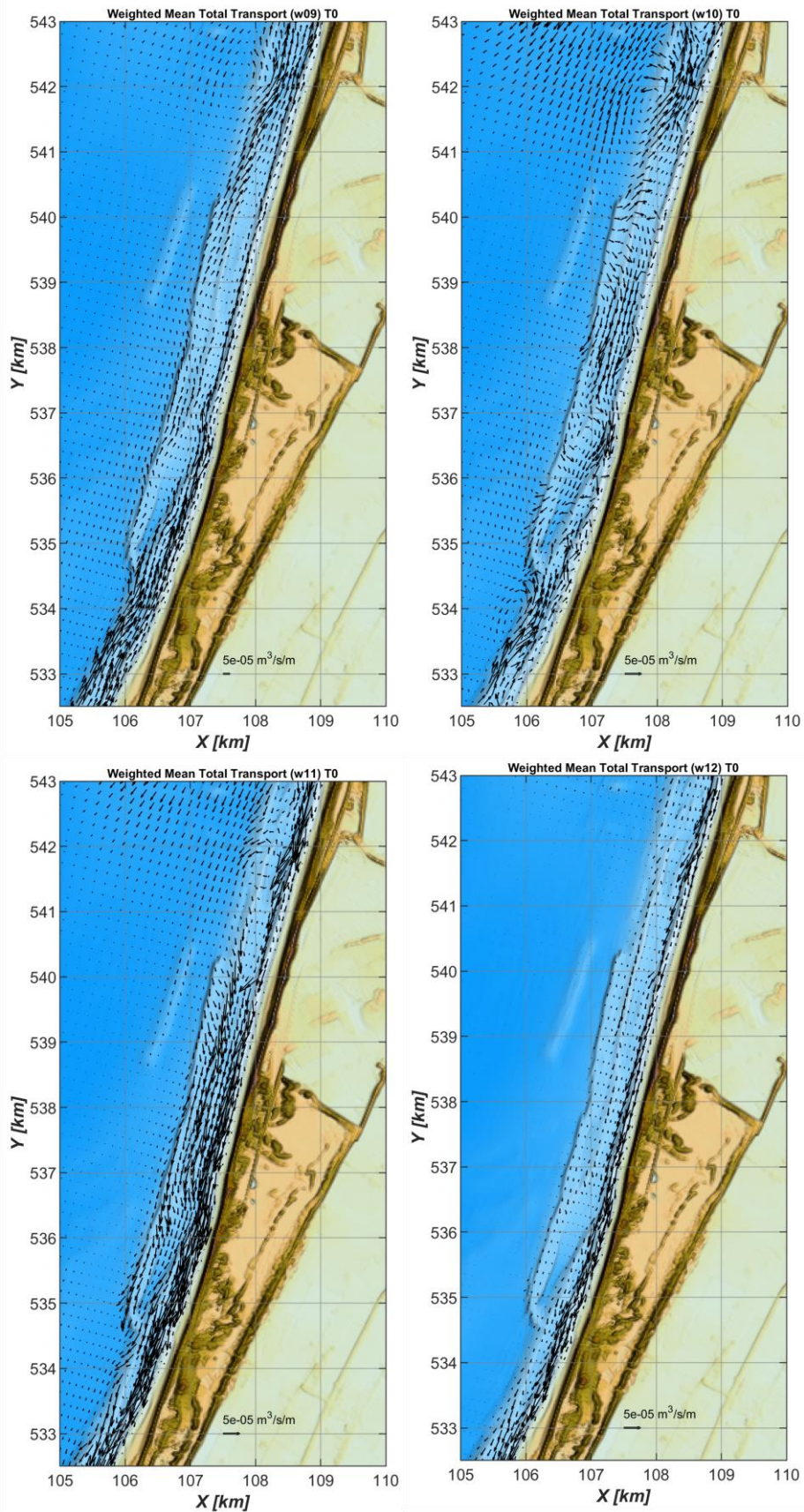


Figuur B- 8: Getijgemiddelde sedimenttransport voor de T1 en golfcondities 1-4.



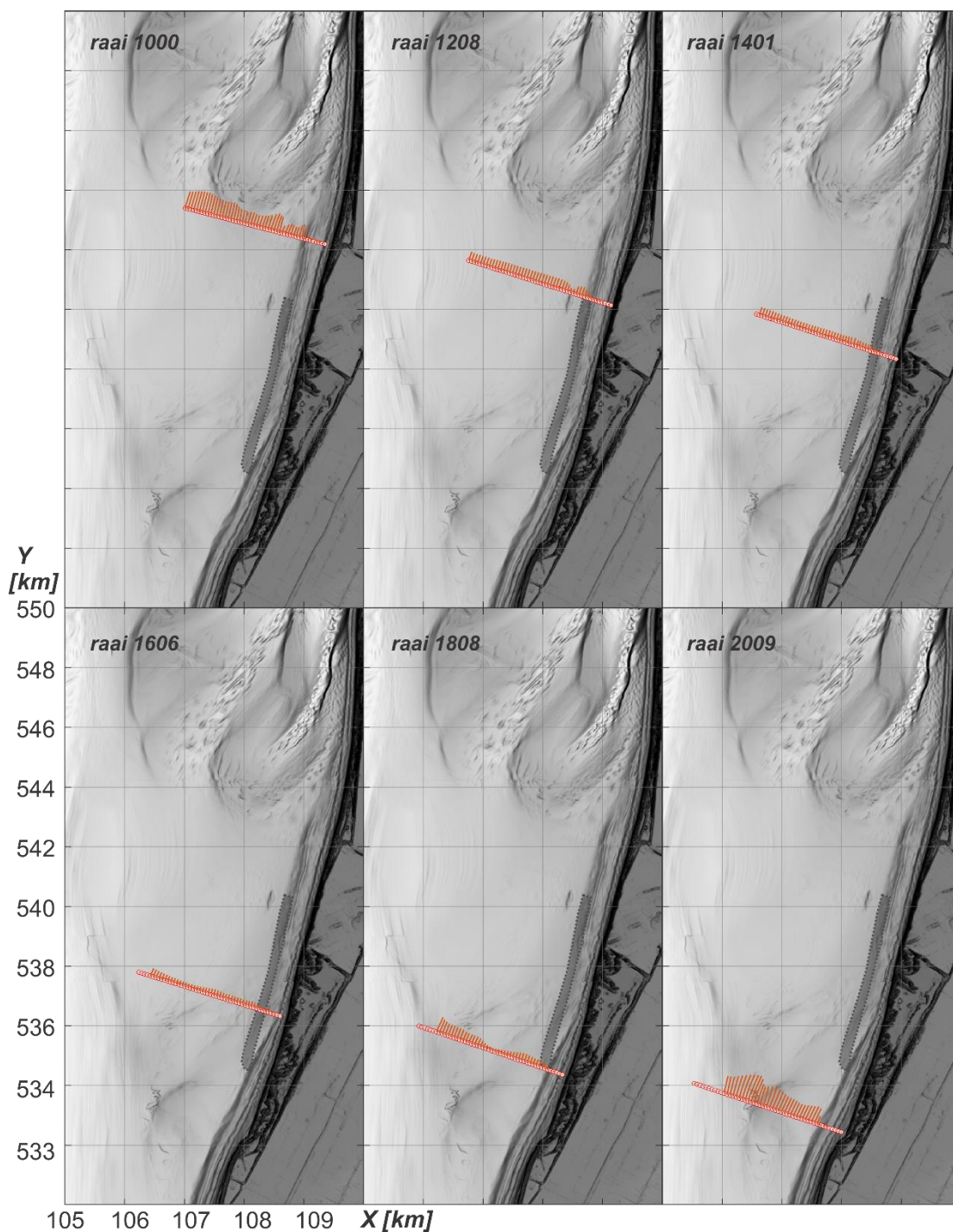
Figuur B- 9: Getijgemiddelde sedimenttransport voor de T1 en golfcondities 5-8.



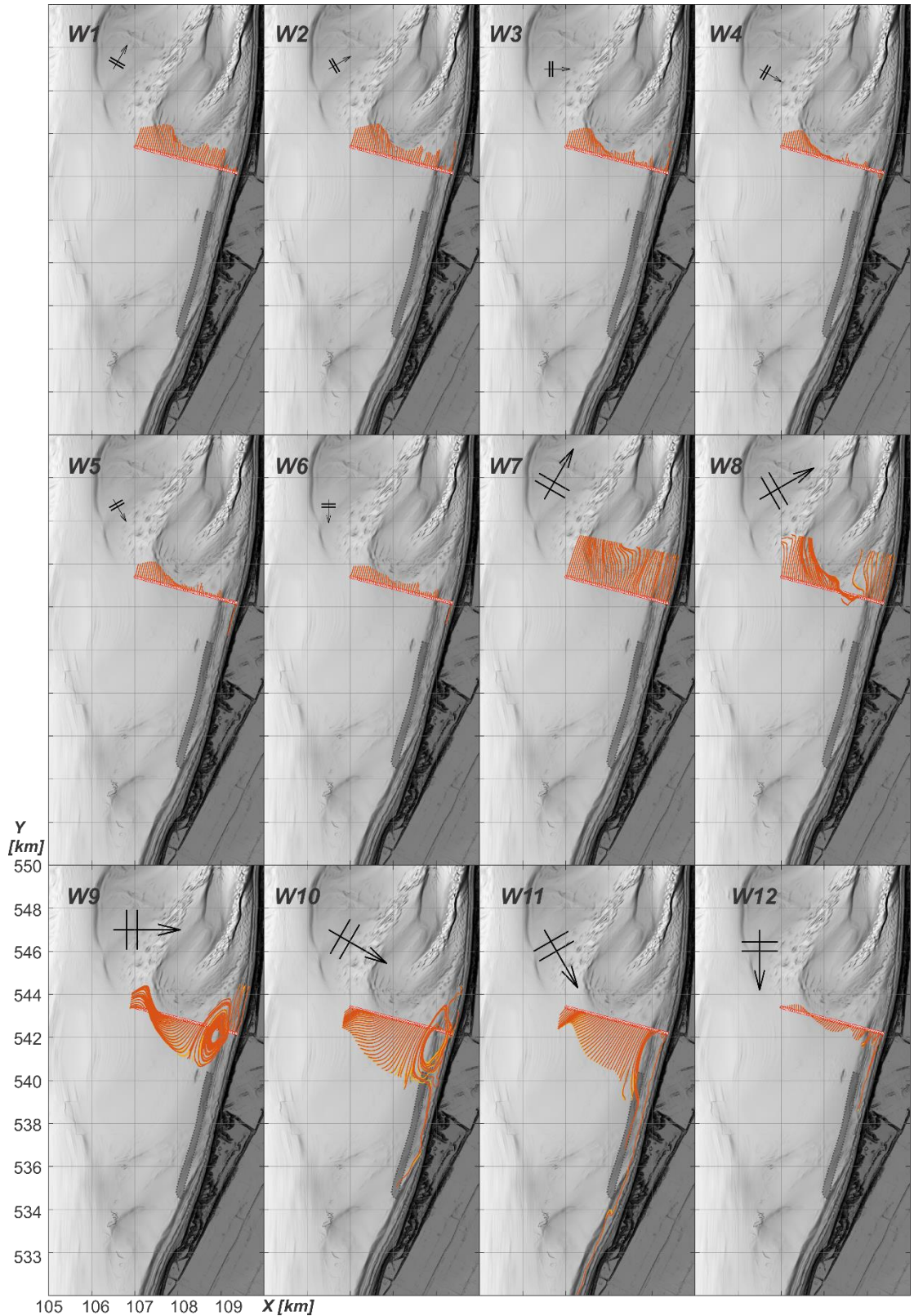


Figuur B- 10: Getijgemiddelde sedimenttransport voor de T1 en golfcondities 9-12.

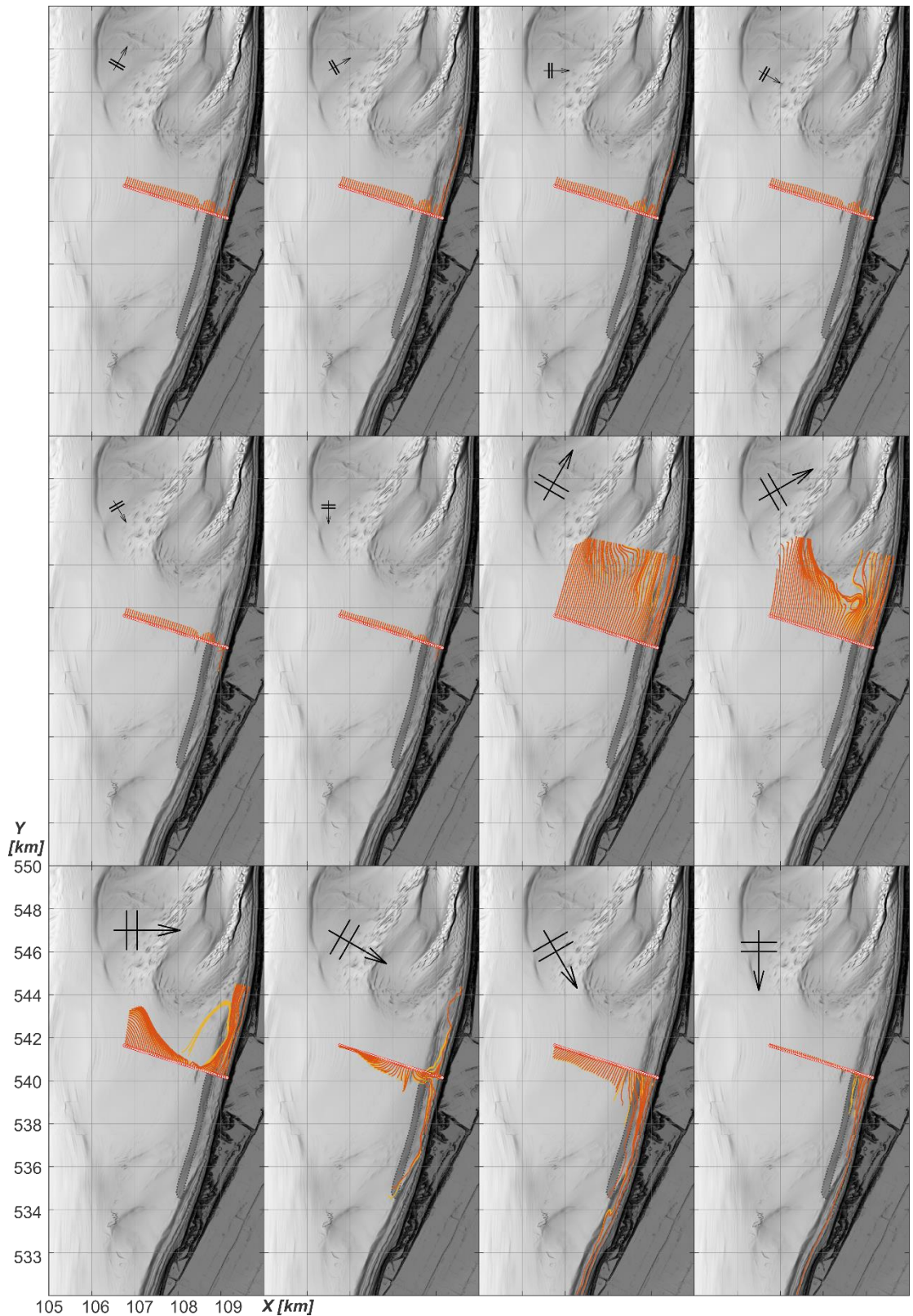
## B.5 SedTRAILS



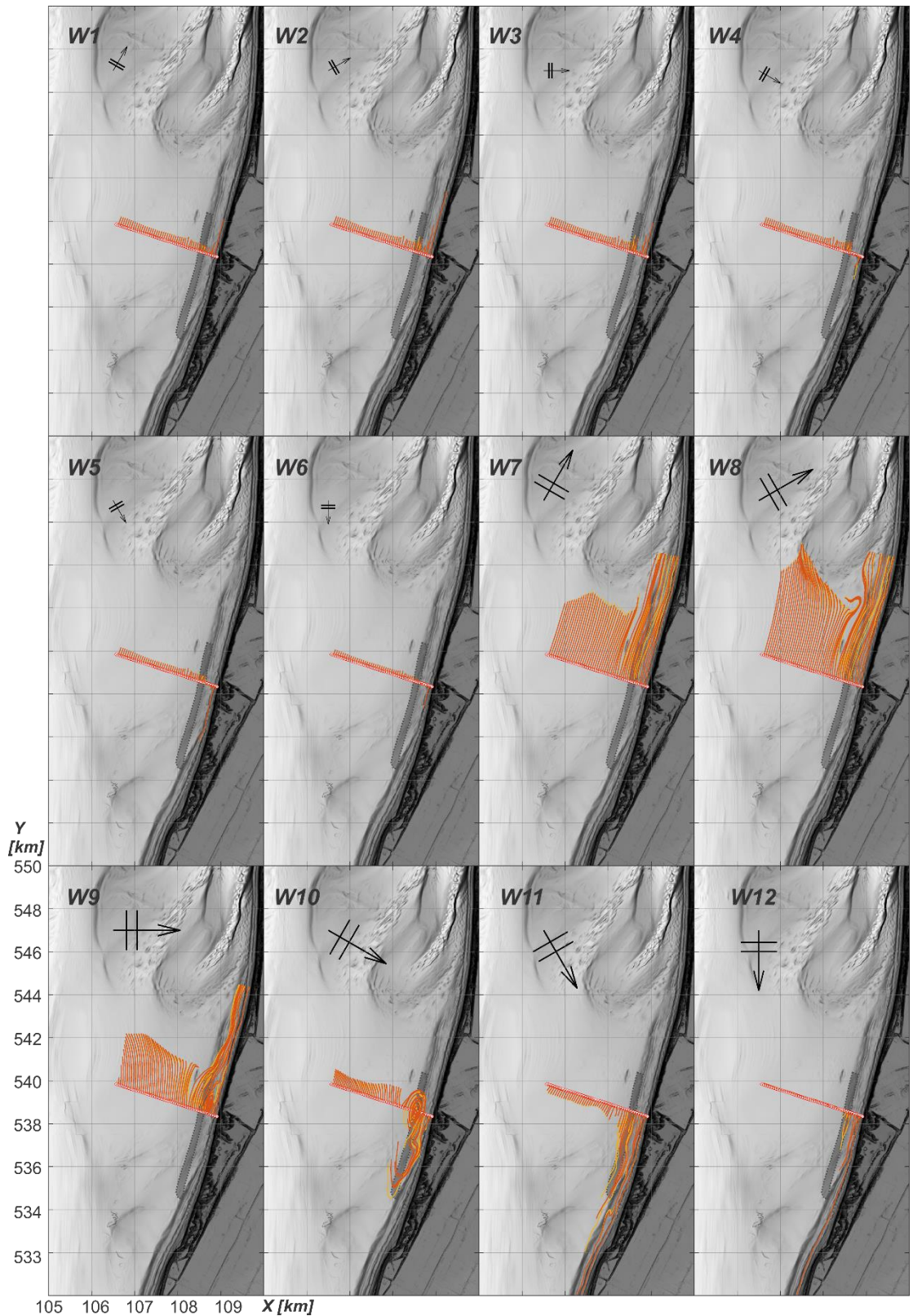
Figuur B- 11: SedTRAILS visualisatie van de getijgedreven transporten voor 6 geselecteerde raaien. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).



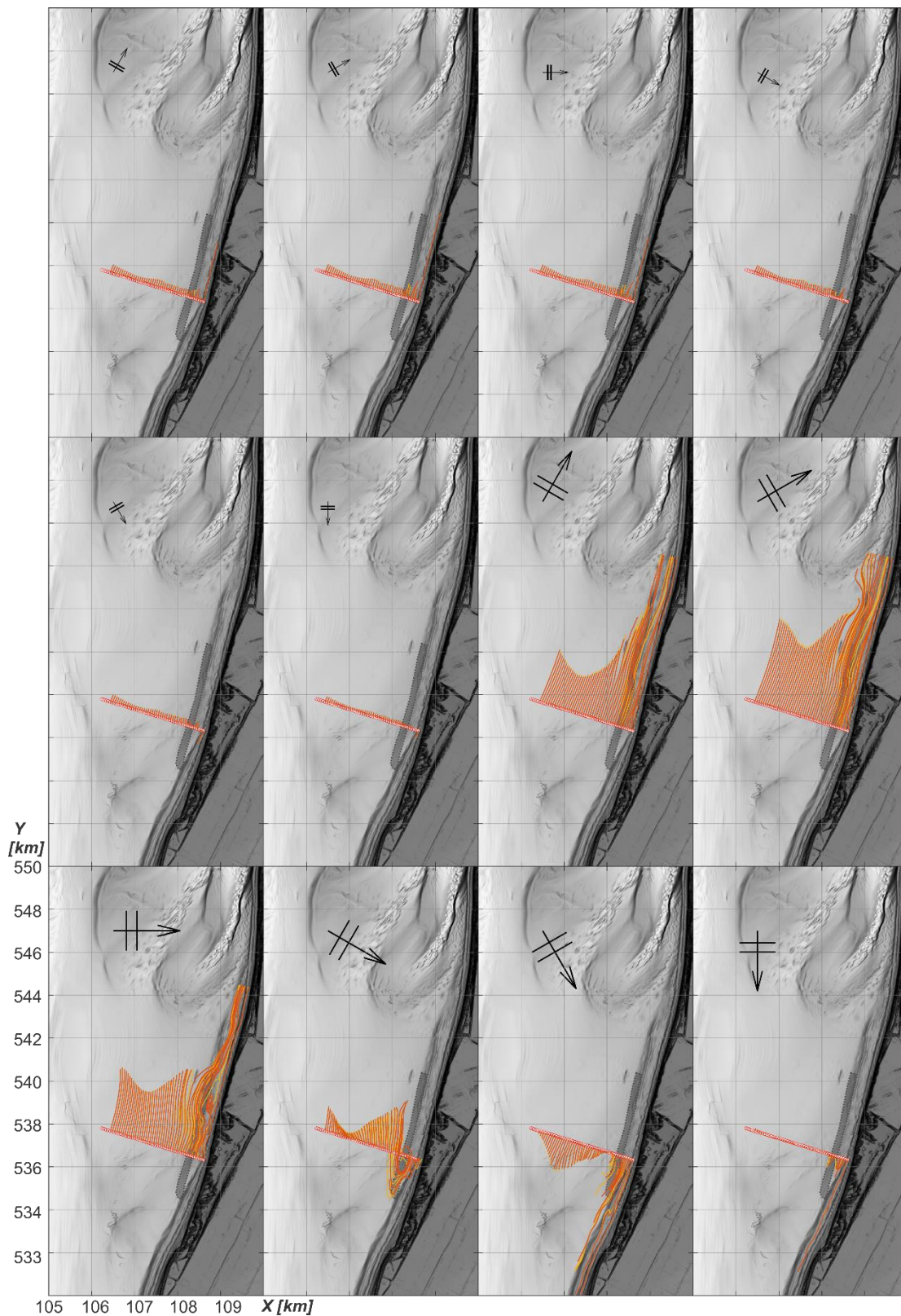
Figuur B- 12: SedTRAILS visualisatie van de transporten door raai 1000 voor de 12 golfcondities. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).



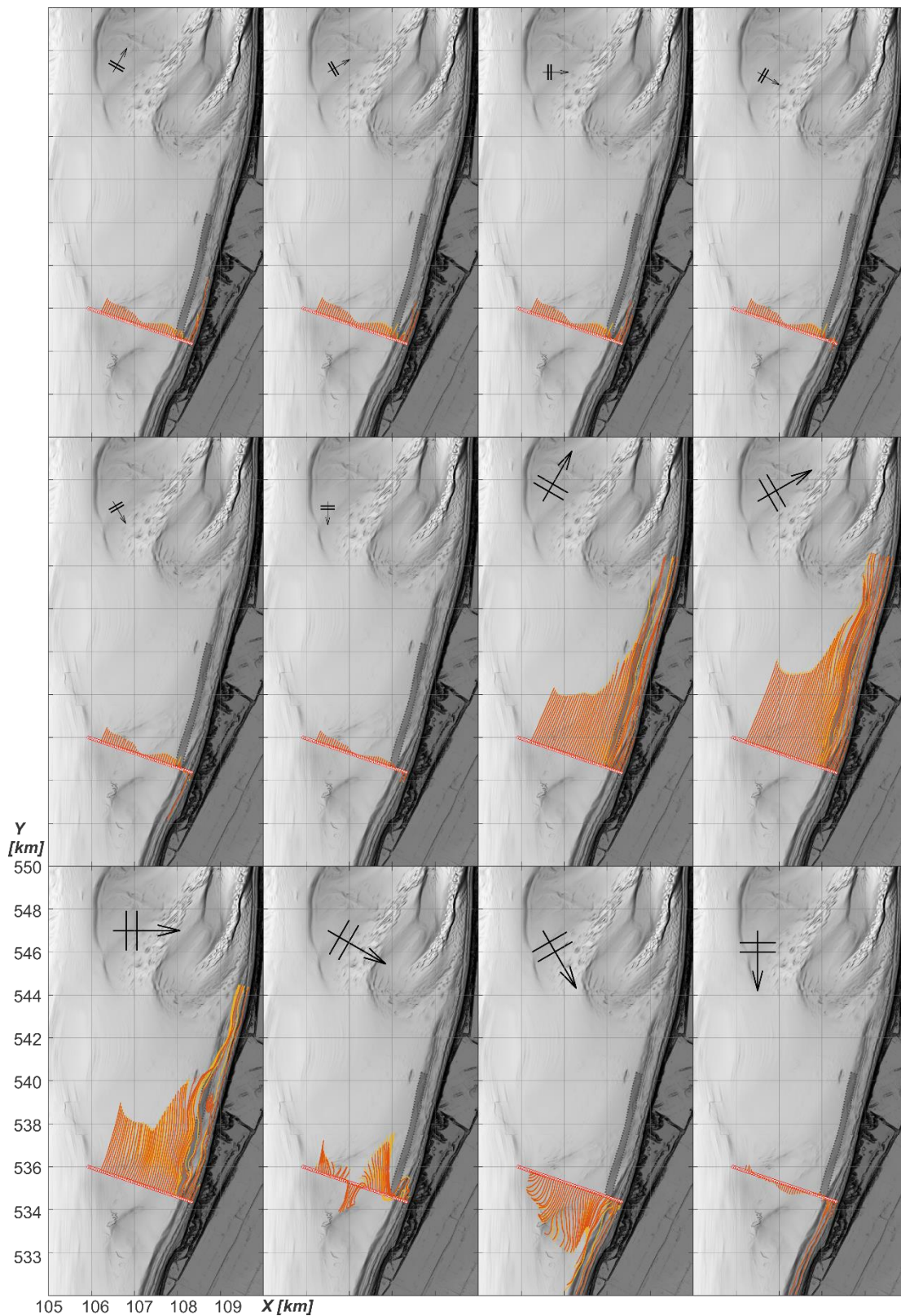
Figuur B- 13: SedTRAILS visualisatie van de transporten door raai 1208 voor de 12 golfcondities. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).



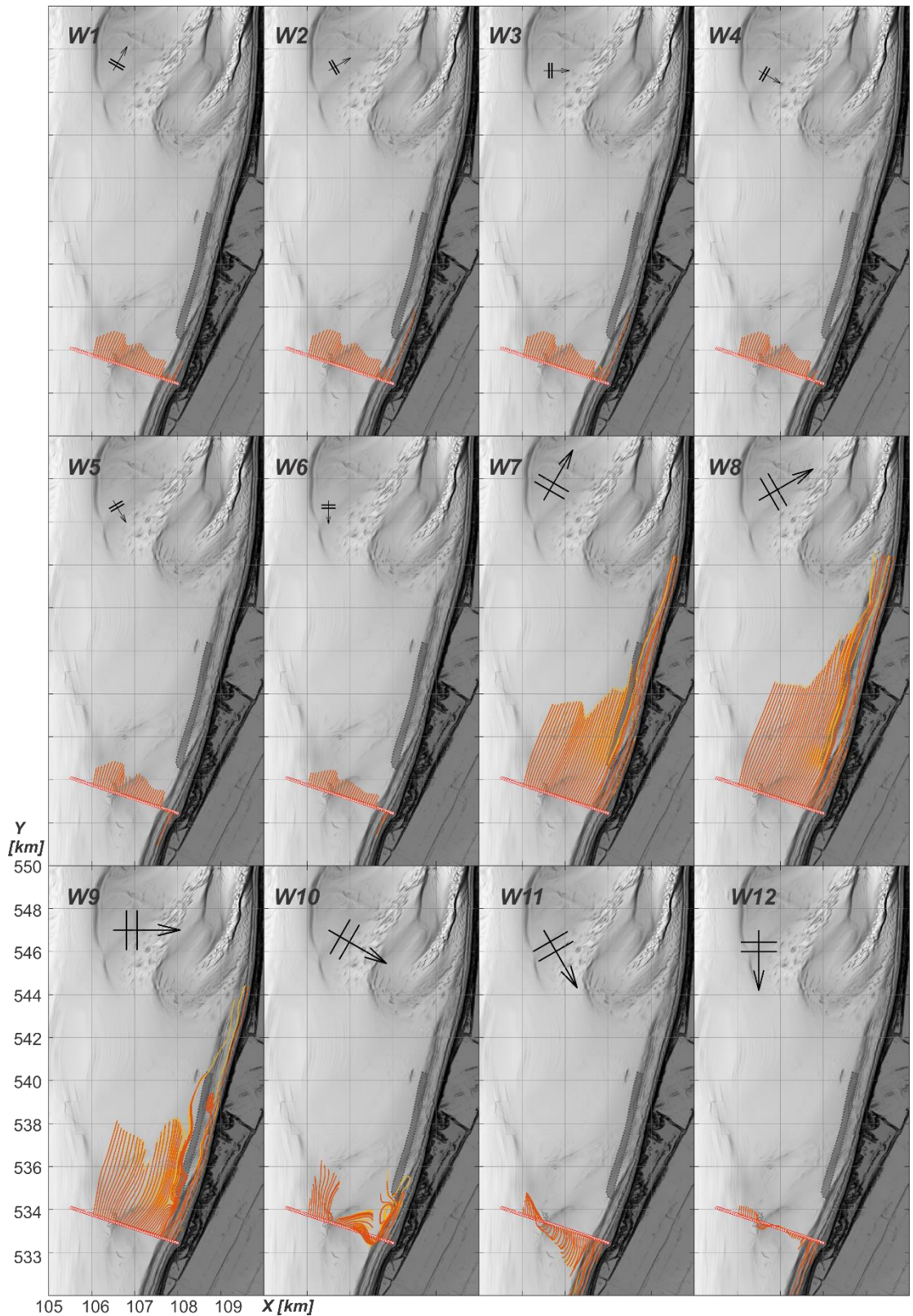
Figuur B- 14: SedTRAILS visualisatie van de transporten door raai 1401 voor de 12 golfcondities. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).



Figuur B- 15: SedTRAILS visualisatie van de transporten door raai 1606 voor de 12 golfcondities. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).

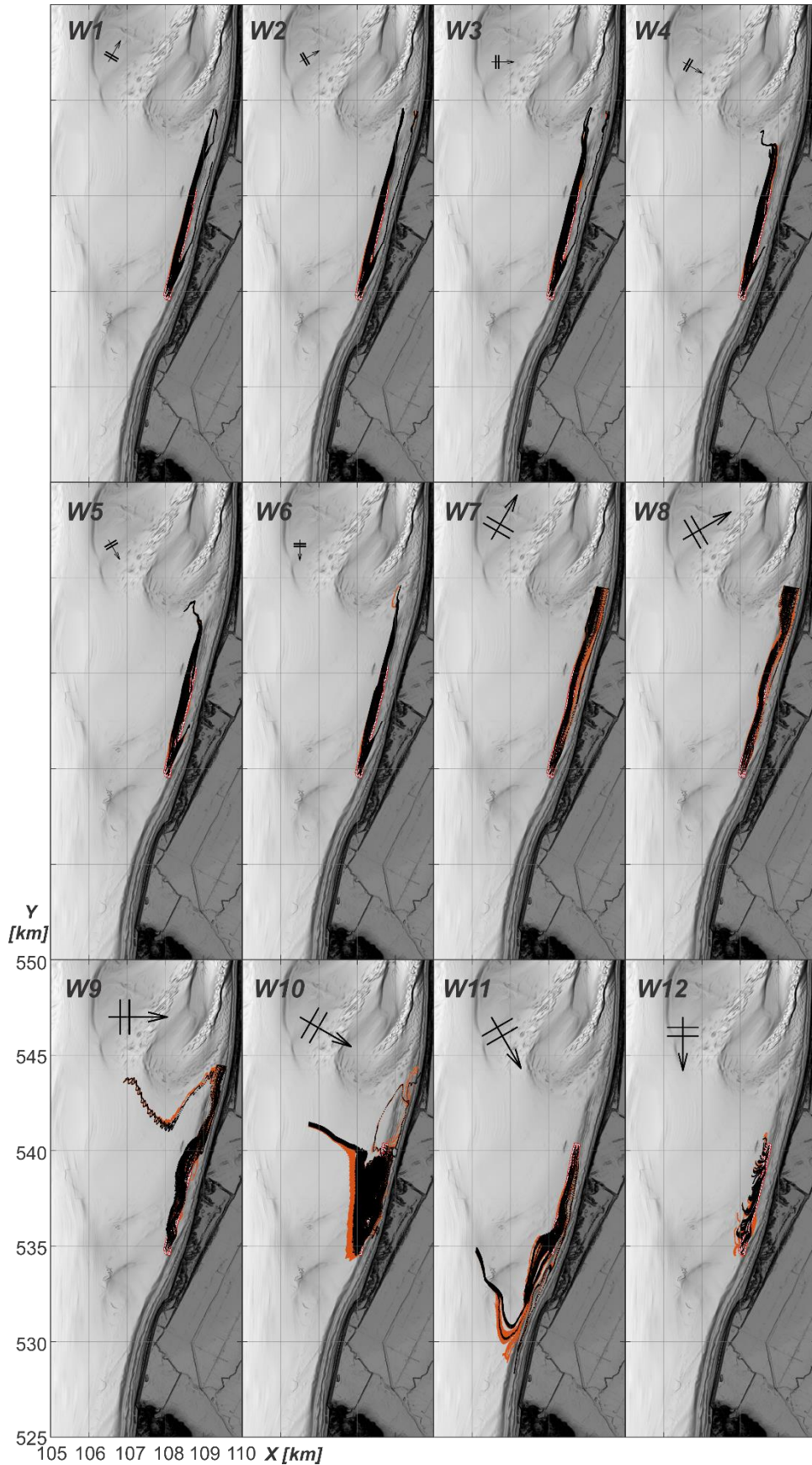


Figuur B- 16: SedTRAILS visualisatie van de transporten door raai 1808 voor de 12 golfcondities. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).



Figuur B- 17: SedTRAILS visualisatie van de transporten door raai 2009 voor de 12 golfcondities. Geel = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).





Figuur B- 18: SedTRAILS visualisatie van de transporten vanaf de locatie van de suppletie voor de 12 afzonderlijke golfcondities. Zwart = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).

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](http://www.deltares.nl)