

## Regionaal advies: Vooroeversuppletie Katwijk



## Regionaal advies: Vooroeversuppletie Katwijk

### Auteur(s)

Ellen Quataert

Edwin Elias

## Regionaal advies: Vooroeveraanvulling Katwijk

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer S.R.P.M. Pluis
<b>Referenties</b>	Referenties
<b>Trefwoorden</b>	Katwijk, Zwakke Schakel vooroeveraanvulling, uitwateringssluis, Beheer en Onderhoud Kust, Delft3D

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	04-04-2022
<b>Projectnummer</b>	11206794-001
<b>Document ID</b>	11206794-001-ZKS-0007
<b>Pagina's</b>	63
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Edwin Elias	
	Ellen Quataert	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias	Marcel Taal	Toon Segeren	
	Ellen Quataert			

# Samenvatting

Rijkswaterstaat en Deltares onderzoeken samen de impact van suppleties op het morfologische gedrag van de kust en de onderhoudsbehoefte. De 'Zwakke Schakel versterking Katwijk', uitgevoerd in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma, omvat een dijk-in-duinconstructie die tussen oktober 2013 en februari 2015 is aangelegd (raaien 8625 - 8775). Na de aanleg is de kustlijn zeewaarts uitgebouwd. Deze vertoont vanaf 2015 weer een negatieve trend in de MKL-positie. Door Rijkswaterstaat wordt overwogen een vooroever suppletie aan te leggen langs de kustlijn bij Katwijk als alternatief voor of aanvulling op strandsuppleties. Doel is de kustlijn bij Katwijk te handhaven.

Het doel van deze studie is:

- 1) het beter begrijpen van het autonome kustgedrag bij Katwijk (raaien 8525 – 8850), zowel voor als na de Zwakke Schakel versterking (aanvullen systeemkennis van dit kustvak), en
- 2) het (initieel) effect van het aanbrengen van een nieuwe vooroever suppletie op de maatgevende processen bepalen.

Belangrijke vraag hierbij is of er zanduitwisseling tussen de kust en de uitwateringssluis bij Katwijk plaatsvindt. Aansluitend is de vraag of een vooroever suppletie in potentie leidt tot meer verzanding van de uitwateringssluis dan de huidige strategie van strandsuppleties.

Het onderzoek bestaat uit analyse van meetdata (vaklodingen, JarKus grids). Aanvullend zijn met behulp van numerieke modellering (Delft3D) de sedimenttransporten en de veranderingen van sedimenttransporten ten gevolge van de vooroever suppletie bij Katwijk in kaart gebracht.

De modellering vóór en ná de suppletie leert dat door aanleg van de toekomstige vooroever suppletie geen significante verandering van de transporten wordt verwacht. Ter plekke van de suppletie zijn er veranderingen zichtbaar, maar de verliezen uit het kustvak blijven nagenoeg gelijk. Er worden geen negatieve effecten van de vooroever suppletie op het functioneren van de uitwateringsgeul (sluis) verwacht. Er wordt geen toename van de verzanding voorspeld door het modelonderzoek

Analyse van de ontwikkeling van vooroever suppleties in het verleden laat zien dat ze na aanleg snel (binnen enkele jaren) in hoogte afnemen en er landwaartse herverdeling van het sediment plaatsvindt. Het is daarom de verwachting dat een nieuwe vooroever suppletie ook snel zal worden opgenomen in het natuurlijke bankensysteem en daarbij bijdraagt aan het behoud van het sedimentvolume in dit kustvak. In de periode dat de vooroever suppletie aanwezig is, kan deze voor golfafscherming van de achterliggende kust zorgen. Dit effect is met name zichtbaar onder (zware) stormcondities en kan bijdragen tot de reductie van sedimentverliezen van de kust van Katwijk.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>7</b>
1.1	Achtergrond en aanleiding	7
1.2	Doelstelling	8
1.3	Aanpak	8
1.4	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Analyse van de kustontwikkeling bij Katwijk</b>	<b>10</b>
2.1	Overzicht	10
2.2	Suppleties en kustversterkingen	11
2.2.1	Harde kustverdedigingswerken	11
2.2.2	Basiskustlijn	13
2.2.3	Overzicht uitgevoerde suppleties	13
2.3	Morfologische ontwikkeling bij Katwijk	14
2.4	Detailanalyse van de kustindicatoren en strandlijnen	17
2.4.1	Grootschalige ontwikkeling van de MKL	17
2.4.2	Detailanalyse raai 8500 (km 85)	19
2.4.1	Detailanalyse raai 8600 (km-86)	21
2.4.1	Detailanalyse raai 8700 (km-87)	23
2.5	Synthese	25
<b>3</b>	<b>Modellering van de vooroeversuppletie</b>	<b>26</b>
3.1	Het Delft3D model	26
3.1.1	Rekenrooster	26
3.1.2	Randvoorwaarden	28
3.1.3	Golven	29
3.1.4	Sedimenttransport	31
3.2	Opzet modelsimulaties en suppletievariant	32
3.3	Modelresultaten T0-2021 simulatie	33
3.3.1	Getijgedreven stromingen en transporten	33
3.3.2	Invloed van golven	36
3.3.3	Getij en golfgedreven stromingen en transporten	36
3.3.4	Netto jaarlijks langstransport	40
3.4	Invloed van de vooroeversuppletie (T1-2021)	41
3.4.1	Golven	41
3.4.2	Sedimenttransport	41
3.4.3	Netto jaarlijks langstransport	45
3.4.4	Invloed van stormcondities	46
3.5	Invloed van de Zwakke Schakel versterking	49
3.5.1	Golven	49
3.5.2	Sedimenttransport	49

3.5.3	Netto jaarlijks langtransport	52
3.5.4	Discussie van de modelresultaten	53
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>54</b>
4.1	Conclusies	54
4.2	Aanbeveling	55
	<b>Literatuur</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Modelresultaten</b>	<b>57</b>
A.1	Golfhoogte T0	57
A.2	Residuele transporten T1-2021 – T0-2021	60

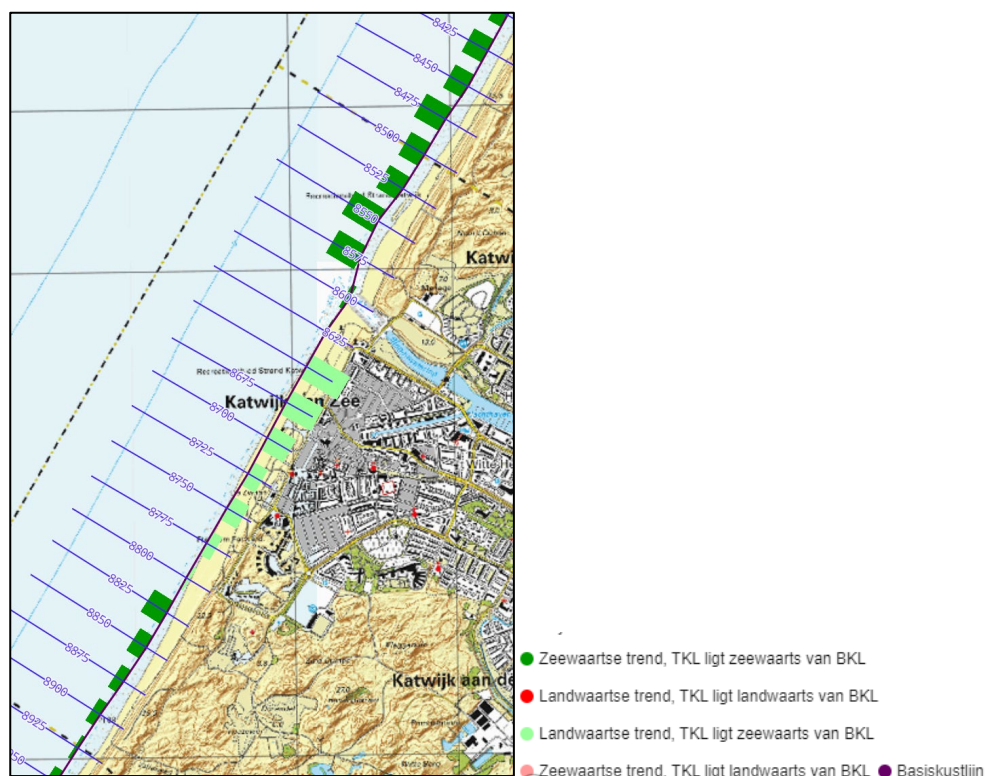
# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond en aanleiding

In het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust worden kennis en tools door Deltares ontwikkeld die Rijkswaterstaat ondersteunen bij 1) verkrijgen van inzicht in de ontwikkeling van het zandig kuststelsel en 2) die ondersteunen in het beheer en onderhoud van het zandig kuststelsel. Binnen het deelprogramma 'Toegesneden specialistische advisering RWS' van KPP B&O Kust worden specifieke regionale vragen beantwoord.

De Zwakke Schakel versterking (Hoogwaterbeschermingsprogramma) bij Katwijk omvatte een dijk-in-duinconstructie die tussen oktober 2013 en februari 2015 is aangelegd (raaien 8625 - 8775). Na aanleg van de versterking is de kustlijn zeewaarts uitgebouwd. Deze vertoont vanaf 2015 weer een negatieve trend in de MKL-positie. De BKL-positie is na de versterking niet gewijzigd. Wellicht gebeurt dit in het kader van de evaluatie van de BKL in 2023, om zo de benodigde volumes van de kustversterking in stand te houden.

Rijkswaterstaat overweegt een vooroeversuppletie aan te leggen langs de kustlijn bij Katwijk, als alternatief of aanvulling op de strandsuppleties die hier worden uitgevoerd. Een vooroeversuppletie brengt extra zand in het kustprofiel en verhoogt zeer waarschijnlijk ook het zandvolume in de rekenschijf (oftewel een zeewaartse uitbouw van de MKL-positie). Een vooroeversuppletie zorgt voor langere termijn voeding van de kust bij Katwijk en kan mogelijk de erosieve (golfgedreven) processen beïnvloeden. Voordat Rijkswaterstaat over wil gaan tot uitvoeren van een vooroeversuppletie is meer inzicht in het autonome kustgedrag bij Katwijk (voor en na Zwakke Schakel versterking), de effectiviteit van een vooroeversuppletie en de mogelijke impact hiervan op zandtransporten richting de uitwateringsluis (raai 8600) nodig.



Figuur 1-1 – Overzicht van de MKL-trends bij Katwijk zoals in het kustlijnkartenboek 1-1-2021

## 1.2 Doelstelling

De doelstellingen van deze studie zijn:

- 1 het beter begrijpen van het autonome kustgedrag bij Katwijk (raaien 8525 – 8850), zowel voor als na de Zwakke Schakel versterking, en de maatgevende processen die hier verantwoordelijk voor zijn;
- 2 het (initieel) effect van het aanbrengen van een vooroeversuppletie op de maatgevende processen bepalen. Belangrijke vraag hierbij is of eventuele zanduitwisseling met de kust en de uitwateringssluis bij Katwijk plaatsvindt, en zo ja, of een vooroeversuppletie in potentie leidt tot meer verzanding van de uitwateringssluis dan de huidig gekozen strategie van strandsuppleties.

## 1.3 Aanpak

Het onderzoek bestaat uit 2 delen. Het eerste deel bestaat uit een onderzoek van de morfologische ontwikkelingen en processen die spelen in de autonome situatie (T0). Dit gebeurt door analyse van meetdata en door morfostatische modellering m.b.v. Delft3D. Het tweede deel is een analyse van de processen direct na de vooroeversuppletie (T1 analyse). Dit gebeurt via morfostatische modellering. Hieronder worden de analyses nader uitgewerkt.

### **T0-data analyse**

Dit deel van het onderzoek bestaat uit:

- 1 *Analyse van het kustvak bij Katwijk (van net noordelijk van de uitwateringssluis t/m de Zwakke Schakel versterking).*

Met behulp van de JARKUS metingen wordt de kust nabije zone tussen raai 8525 en 8850 geanalyseerd. Deze analyse richt zich op het bankgedrag en de ontwikkeling van de vooroever en strand. Ook de kustindicatoren (zoals MKL, Duinvoet, GLW, GHW, droge Strandbreedte) worden in kaart gebracht. Daarnaast wordt in kaart gebracht wat de invloed van de kustverdedigingswerken en suppleties die hier zijn aangebracht.

- 2 *Detail analyse van het lokale kustgedrag.*

Hier worden de JARKUS profielen gebruikt om de veranderingen in de kustzone in detail te analyseren. Met behulp van deze analyses kunnen de effecten van de uitgevoerde suppleties in kaart worden gebracht, die mogelijk inzicht geven in het effect van een suppletie in de toekomst. Binnen dit deel wordt extra aandacht besteed aan de ontwikkeling van de vooroever vóór en ná de versterking van de kustlijn en de eventuele veranderingen in processen door de uitgevoerde versterking.

### **T0-model analyse**

Met behulp van het Delft3D model worden de stromingen en transporten bij Katwijk in kaart gebracht voor de autonome situatie (T0). De aanpak die hier gevolgd wordt is vergelijkbaar aan de studie uitgevoerd naar de vooroeversuppletie nabij Callantsoog (Elias et al. 2021) en Scheveningen (Quataert et al., 2021).

Om het effect van de Zwakke Schakel versterking op de stromingen en sedimenttransporten in kaart te brengen, is een T0-model analyse uitgevoerd voor 3 verschillende JARKUS bodemconfiguraties in het interessegebied: (1) de bodem vóór de versterking (2013 JARKUS opname), (2) de bodem na de versterking (2016 JARKUS opname) en de meest recente bodemopname (2021 JARKUS opname). Met een morfostatisch (Delft3D4) model worden hydrodynamica en sedimenttransport voor zowel het getij als de golven gesimuleerd. Doel



hiervan is het beter in kaart brengen van de stromingen en sedimenttransporten en met name de eventuele zanduitwisseling tussen de kust en de uitwateringssluis.

### ***T1-model analyse***

Een soortgelijke morfostatische modelaanpak is gevolgd voor de situatie T1. De huidige morfologie inclusief het door RWS voorgestelde rekenontwerp van de vooroeversuppletie is gesimuleerd. Het doel is analyse van de veranderingen in de stromingen en transporten ten opzichte van de T0-situatie. Ook hier is extra aandacht besteed aan de eventuele (veranderingen in) zanduitwisseling tussen de kust en de uitwateringssluis.

Uit soortgelijk onderzoek bij Scheveningen (Quataert et al., 2021) volgde dat het potentiële effect van een vooroeversuppletie op de erosieve processen waarschijnlijk sterker zal zijn onder meer extreme (storm) condities. Daarom zijn de T0-2021 en T1-simulaties ook uitgevoerd voor twee representatieve stormcondities.

## **1.4 Leeswijzer**

In Hoofdstuk 2 beschrijft de kustontwikkeling van het studiegebied bij Katwijk (raai 8525 en 8850). Het omvat een beschrijving van de uitgevoerde ingrepen, de morfologische ontwikkeling en detailanalyses van de kustindicatoren en kustlijnprofielen. Tevens worden de voorgaande vooroeversuppleties geanalyseerd. Hoofdstuk 3 is gericht op de resultaten van de modellering. Het model en de modelaanpak staan beknopt in 3.1. Een overzicht van de suppletievarianten volgt in 3.2. Hoofdstuk 3.3 geeft de resultaten voor de T0-2021 simulaties en in Hoofdstuk 3.4 staan de resultaten van de simulaties T1-2021 (inclusief het ontwerp vooroeversuppletie). Hoofdstuk 3.5 geeft de modelresultaten over de invloed van de Zwakke Schakel versterking. Hoofdstuk 4 geeft de conclusies en aanbevelingen.

## 2 Analyse van de kustontwikkeling bij Katwijk

### 2.1 Overzicht

Katwijk aan Zee heeft zich ontwikkeld aan de monding van de Oude Rijn. Een riviermonding is er nu niet meer zichtbaar. Wel ligt ten noorden een uitwateringskanaal (Figuur 2-1). De kust bij Katwijk is tussen 2013 en 2015 versterkt in het kader van de Zwakke Schakels langs de Nederlandse Kust. Hierbij is een dijk-in-duin constructie aangebracht. Tevens zijn de uitwateringssluis en het uitwateringskanaal aangepast. Meer over de harde kustverdedigingswerken volgt in 2.2.1.



Figuur 2-1 Satellietopname van Katwijk van Sept-Oct 2021. Locatie van Katwijk aan Zee en de uitwateringssluis zijn aangegeven.

## 2.2 Suppleties en kustversterkingen

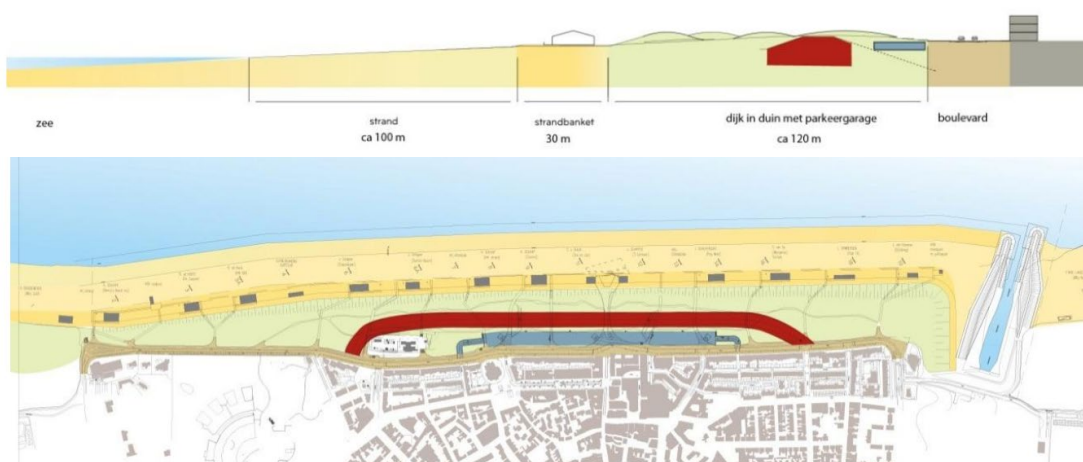
### 2.2.1 Harde kustverdedigingswerken

Binnen het HWBP programma “De Zwakke Schakels” is een versterking uitgevoerd (raaien 8625 - 8775). Door het Hoogheemraadschap van Rijnland is gewerkt aan een plan voor versterking van de waterkering, in samenspraak met de provincie Zuid-Holland, de gemeente Katwijk en het Rijk. Er is gekozen voor een dijk-in-duinconstructie die in de periode oktober 2013 tot en met februari 2015 is aangelegd. Voorheen woonden ongeveer 3000 mensen buitendijks doordat de waterkering verder landinwaarts gelegen was (Figuur 2-2). Na aanleg van de dijk-in-duin constructie is het centrum van Katwijk binnendijks komen te liggen waardoor de waterveiligheid vergroot is (Arcadis, 2013).

De kering is versterkt met een dijk-in-duin zeewaarts van de boulevard, inclusief een parkeergarage tussen de dijk en boulevard (Figuur 2-3). De totale breedte van de Dijk-in-Duin (van Boulevard tot duinvoet) is circa 120 meter. Dit is een verbreding van circa 90 m ten opzichte van de situatie voorafgaand aan de versterking. De hoogte van de dijk is NAP +7,5 meter. Het duin dat over de dijk heen ligt, volgt de hoogte van het bestaande duin, variërend van circa NAP +8 meter ter hoogte van het centrum tot NAP + 11 a + 12 m ter hoogte van het noordelijke en zuidelijke gedeelte van de Boulevard (Arcadis, 2013). De totale lengte van de Dijk-in-Duin sectie is circa 900 m.



Figuur 2-2 Primaire waterkering Katwijk voor (links) en na (rechts) de Zwakke Schakel versterking (bron: Arcadis, 2013)

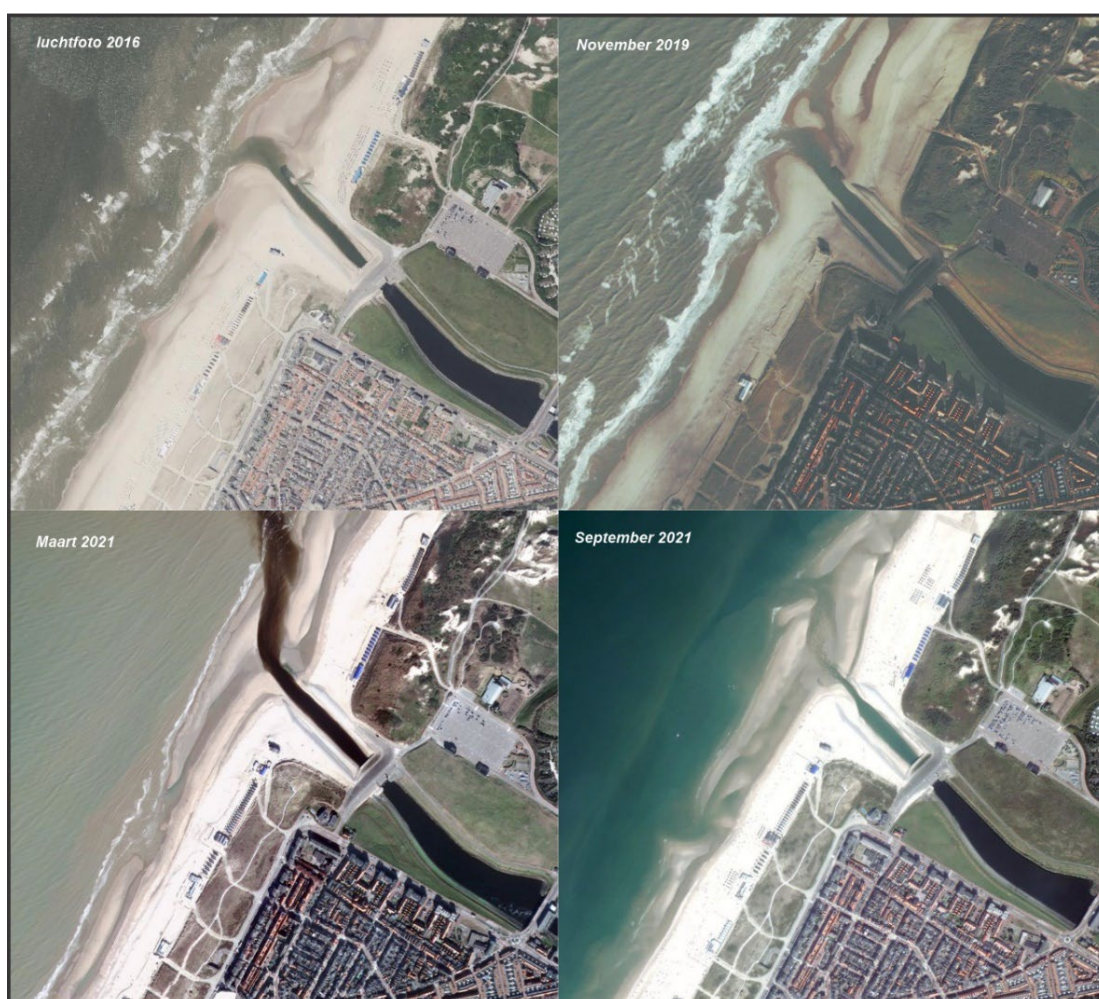


Figuur 2-3 Ontwerp dijk-in-duin bij Zwakke Schakel versterking Katwijk dwarsdoorsnede (boven) en bovenaanzicht (onder) (bron: Arcadis, 2013)

De uitwateringssluis van Katwijk is aangelegd in 1983. Als onderdeel van de Zwakke Schakel werkzaamheden is het kanaal van de uitwateringssluis verlengd met 50m om verzanding van het kanaal te voorkomen en de waterafvoerende functie te behouden (Arcadis, 2013).



Figuur 2-4 Uitwateringssluis bij Katwijk in 2011 (links), 2021 na verlenging met 50m (midden) en het ontwerp van de verlenging (rechts). Bron: Google Earth en Arcadis (2013)



Figuur 2-5 Uitwateringssluis bij Katwijk in 2016, November 2019, Maart en September 2021. Bron: [www.satellietdataportaal.nl](http://www.satellietdataportaal.nl).

De lucht- en satellietfoto's (Figuur 2-5) illustreren de lokale invloed van de uitwateringssluis op het voorliggende strand. In 2016 en September 2021 is het intergetijdedeel van de uitwateringsgeul vrijwel geheel verzand. Alleen hoog in het profiel waar zandtransporten

beperkt zijn is de geul duidelijk zichtbaar. Tijdens perioden met grote uitwatering (november 2019 en maart 2021) is er juist een langgerekte brede uitwateringsgeul zichtbaar die zich door het gehele intergetijde strand doorzet.

## 2.2.2 Basiskustlijn

In Figuur 2-6 is de vigerende (2017) en oude (1990, 1992, 2001 en 2012) BKL-liggingen bij Katwijk weergegeven. Sinds 1992 is de BKL-ligging niet meer herzien. Wegens de aanleg van de Zwakke Schakel versterking tussen 2013 en 2015 wordt een herziening van de BKL overwogen. De technische haalbaarheid van een herziene BKL-ligging en het effect hiervan op kustonderhoud wordt onderzocht in de evaluatie van de BKL 2023.



Figuur 2-6 Satellietfoto met daarop de BKL-positie (roze lijn) bij raaien 8575 tot 8900 (zwarte lijnen). De locatie van de primaire water kering (landwaartse grens waterstaatswerk) is weergegeven met de rode lijn.

## 2.2.3 Overzicht uitgevoerde suppleties

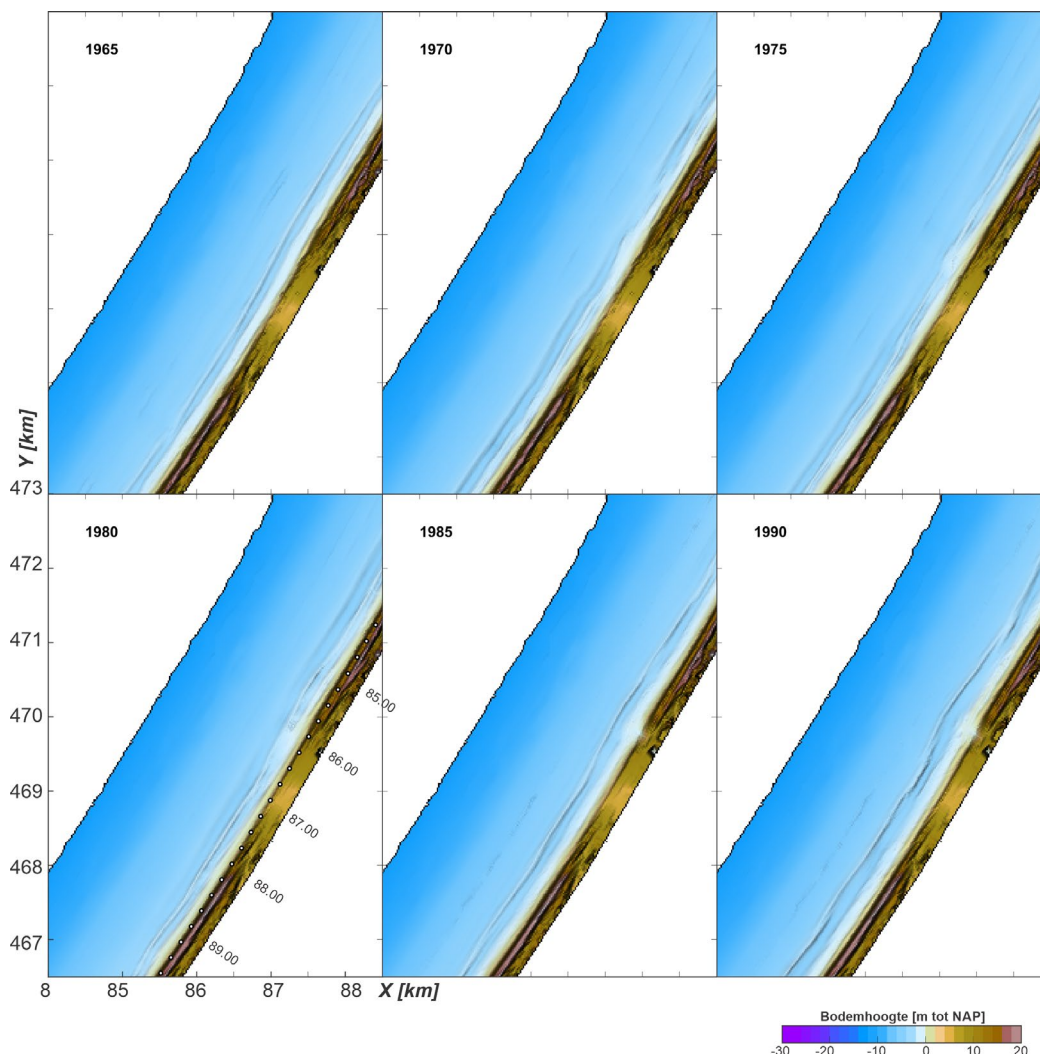
Van het gesuppleerde volume (6,9 miljoen m<sup>3</sup>) bij Katwijk, is 2,5 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd voor de Zwakke Schakel versterking van oktober 2013 tot maart 2014. Dit gebeurde samen met een vooroever-suppletie van 2,2 miljoen m<sup>3</sup> in 2014. Na de versterking is er één strand-suppletie uitgevoerd, in 2019.

Tabel 2-1 – Overzicht van de uitgevoerde suppleties bij Katwijk

Locatie	Datum	Begin Raai	Eind Raai	Lengte	Type	Volume (situ) m <sup>3</sup>
Katwijk	1998	87,50	89,50	2000	vooroever-suppletie	753.338
Noordwijk - Katwijk	2006	81,50	89,00	7500	vooroever-suppletie	1.055.035
Katwijk	2013	85,75	88,00	2250	strand-duinsuppletie	2.500.000
Rijnland Zuid	2014	80,00	88,50	8500	vooroever-suppletie	2,200,000
Katwijk	2019	86,50	88,25	1750	strand-suppletie	400.000
<b>TOTAAL</b>						<b>6.908.373</b>

## 2.3 Morfologische ontwikkeling bij Katwijk

De analyse van de JARKUS grids geeft een overzicht van de ontwikkeling van de kustzone nabij Katwijk (Figuur 2-7, Figuur 2-8 en Figuur 2-9). Er is ingezoomd op de ontwikkeling van de brekerbank in de ondiepe vooroever. Over de gehele periode wordt het profiel bij Katwijk gekenmerkt door een enkele brekerbank. Er is op basis van de JARKUS grids niet direct een dominante invloed van de uitwateringssluis op de ligging van de brekerbank te onderscheiden. De brekerbank is een doorgaande bank die zich langs de sluis doorzet. Soms, bijvoorbeeld in 1990, is een slingering in de bank te zien ter hoogte van de sluis. Deze slingering kan door de sluis veroorzaakt zijn, maar een duidelijk ander bankgedrag is niet zichtbaar. Variaties in de brekerbank zijn ook op andere locaties in Katwijk zichtbaar. De brekerbank is in sommige jaren veel duidelijker zichtbaar is dan in andere jaren (vergelijk in Figuur 2-7 bijvoorbeeld de bodemopname van 1975 met die van 1985). Hieruit blijkt dat er grootschalige variaties in het bankgedrag aanwezig zijn.



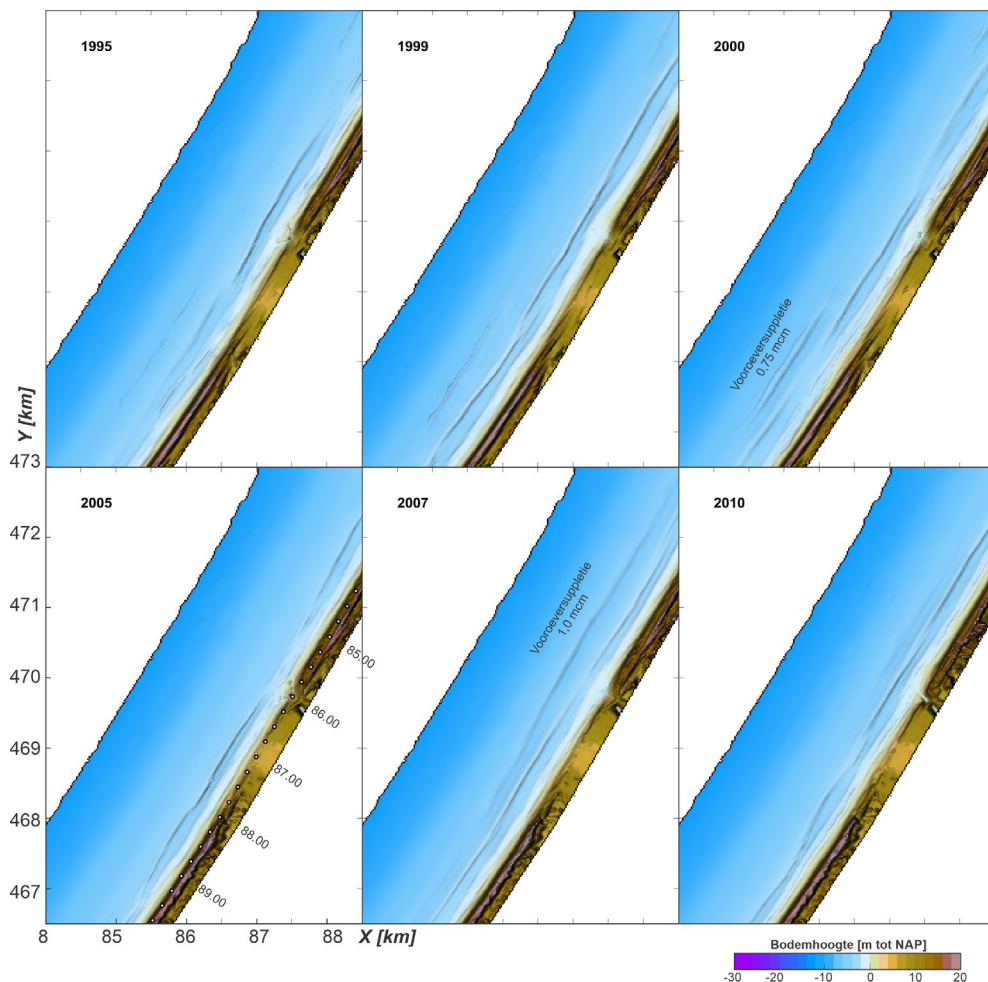
Figuur 2-7: Overzicht van de kustontwikkeling over de periode 1965 -1990 aan de hand van de JARKUS grids (missende datapunten zijn met recentere jaren JARKUS grids ingevuld).

Variaties in bankgedrag zijn duidelijk zichtbaar in de timestacks van de ontwikkeling van het dwarsprofiel (zie Hoofdstuk 2.4, Figuur 2-12, Figuur 2-14, Figuur 2-16). Deze timestacks laten een duidelijk verschil in brekerbankdynamiek zien tussen de periode voor en na ruwweg 1990-1995. Tussen 1965 en 1990-1995 migreren de banken langzaam zeewaarts, waar ze vervolgens uitdempen. Er ontstaat een nieuwe brekerbank wanneer de buitenste bank bijna is

uitgedempt. De cyclus varieert tussen de 4 en 8 jaar. Na 1995 vertonen de banken een duidelijk ander gedrag. Het cyclisch zeewaarts migreren is dan niet meer zichtbaar. Een directe koppeling met de suppleties is niet direct te maken. De eerste vooroever-suppletie werd pas in 1998 uitgevoerd. Dat is nadat de verandering in gedrag optreedt.

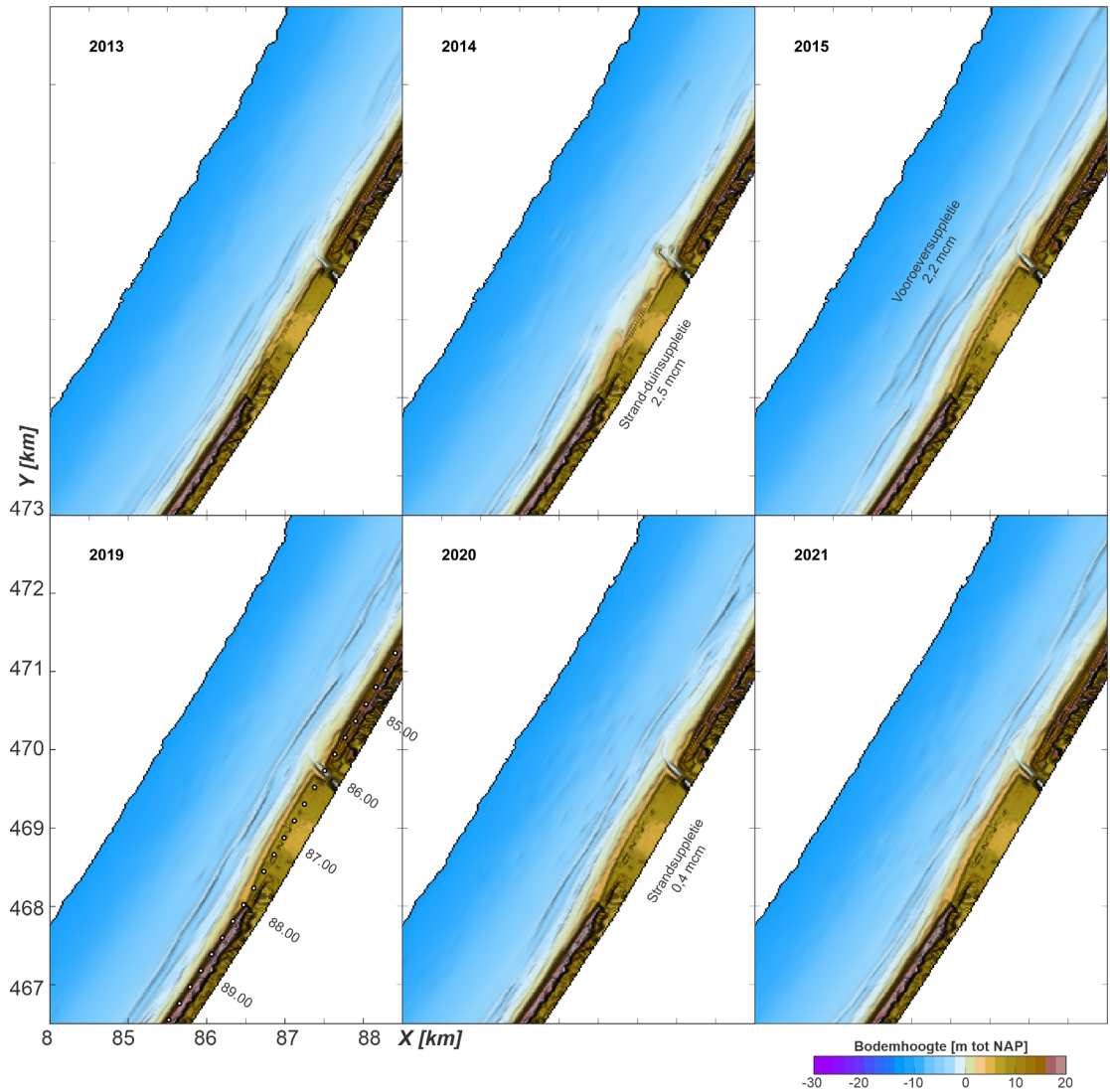
De 1998-vooroeversuppletie is aangebracht als nieuwe brekerbank in het systeem, en ligt niet tegen de bestaande buitenste brekerbank aan. De vooroever-suppletie is niet direct in de 1999 JARKUS opname zichtbaar (Figuur 2-8), doordat deze metingen niet ver genoeg zeewaarts zijn doorgezet. In de 2000 bodem is de suppletie echter wel duidelijk zichtbaar, als zeewaartse bank tussen km-raai 87,50 en km-raai 89,50 (Figuur 2-8). De suppletie blijft enkele jaren zichtbaar in de bodem. In 2002 is de suppletie al verdwenen en ontstaat er opnieuw een enkele, doorgaande bank zoals nog zichtbaar in de 2005 bodem.

Een interessante verandering treedt op rond 2000. Tot 2000 verplaatsen de banken zeewaarts, maar in de periode 2000-2006 migreren de banken juist landwaarts. In 2006 wordt een nieuwe vooroever-suppletie uitgevoerd van ruim 1 miljoen m<sup>3</sup> tussen km 81,50 en km 89,00 zeewaarts van de brekerbank. Deze vooroever-suppletie is in de 2007 bodem zichtbaar als langgerekte nieuwe bank in de vooroever. Deze zeewaartse bank verdwijnt vrijwel direct na aanleg en verplaatst zich meer landwaarts van de aanleglocatie. Deze meer landwaarts gelegen bank correspondeert ruwweg met de locatie van de natuurlijke banken en blijft vervolgens langere tijd (6-8 jaar) in het profiel aanwezig.



Figuur 2-8: Overzicht van de kustontwikkeling over de periode 1995 -2010 aan de hand van de JARKUS grids (missende datapunten zijn met recentere jaren ingevuld).

In 2013-2015 worden in het kader van de Zwakke Schakel versterking een grote strandduinsuppletie (2,5 miljoen m<sup>3</sup>) en vooroeversuppletie (2,2 miljoen m<sup>3</sup>). Deze vooroeversuppletie is in de 2015 bodem duidelijk zichtbaar tussen km 88,50 en km 85,00. Ook in dit geval neemt de vooroeversuppletie snel in hoogte af waarna landwaarts ervan zich een nieuwe hogere bank vormt. Deze bank migreert eerst richting de kust (2015-2018) om vervolgens weer zeewaarts te verplaatsen.



Figuur 2-9: Overzicht van de kustontwikkeling over de periode 2013 -2021 aan de hand van de JARKUS grids (missende datapunten zijn met recentere jaren ingevuld).

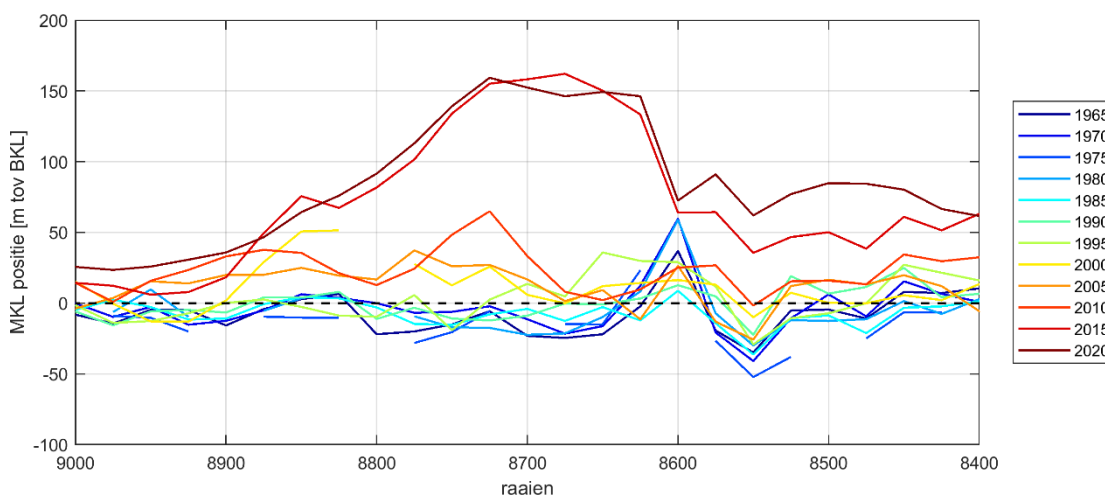


## 2.4 Detailanalyse van de kustindicatoren en strandlijnen

Dit hoofdstuk beschouwt de MKL, dwarsprofielen en strandlijnen van een aantal geselecteerde raaien in detail. Het gaat om raai 8600, ter hoogte van de uitwateringssluis, raai 8500, noordelijk van de sluis en een raai ten zuiden ervan (8700).

### 2.4.1 Grootschalige ontwikkeling van de MKL

De MKL vertoont een fluctuerend gedrag in de periode 1965-2010 (Figuur 2-10). Na 2010 bouwt de kust sterk uit. Deze uitbouw is het resultaat van de strand- en vooroeversuppletie uitgevoerd in het kader van de Zwakke Schakel versterking. De bulk van deze versterking is aangelegd ten zuiden van de uitwateringssluis (raai 8600). Tussen raai 8600 en 8750 is de uitbouw maximaal en loopt dan in zuidelijke richting langzaam af. Rond raai 9000 is het effect beperkt. De recente MKL ligt hier duidelijk zeewaarts van de oudere metingen. In het gehele kustvak bij Katwijk is er over de periode 1965-2014 al een kleine trend van zeewaartse verplaatsing van de MKL. Tot ongeveer 2000 lag de MKL over het algemeen landwaarts van de BKL-positie; na 2000 ligt de MKL overwegend zeewaarts van de BKL. Tijdreeksen van MKL-ontwikkeling voor een aantal representatieve jaren worden getoond in Figuur 2-11.



Figuur 2-10: Ontwikkeling van de MKL-positie ten opzichte van de BKL-positie met een interval van 5 jaar over de periode 1965-2020.

#### Raai 8500

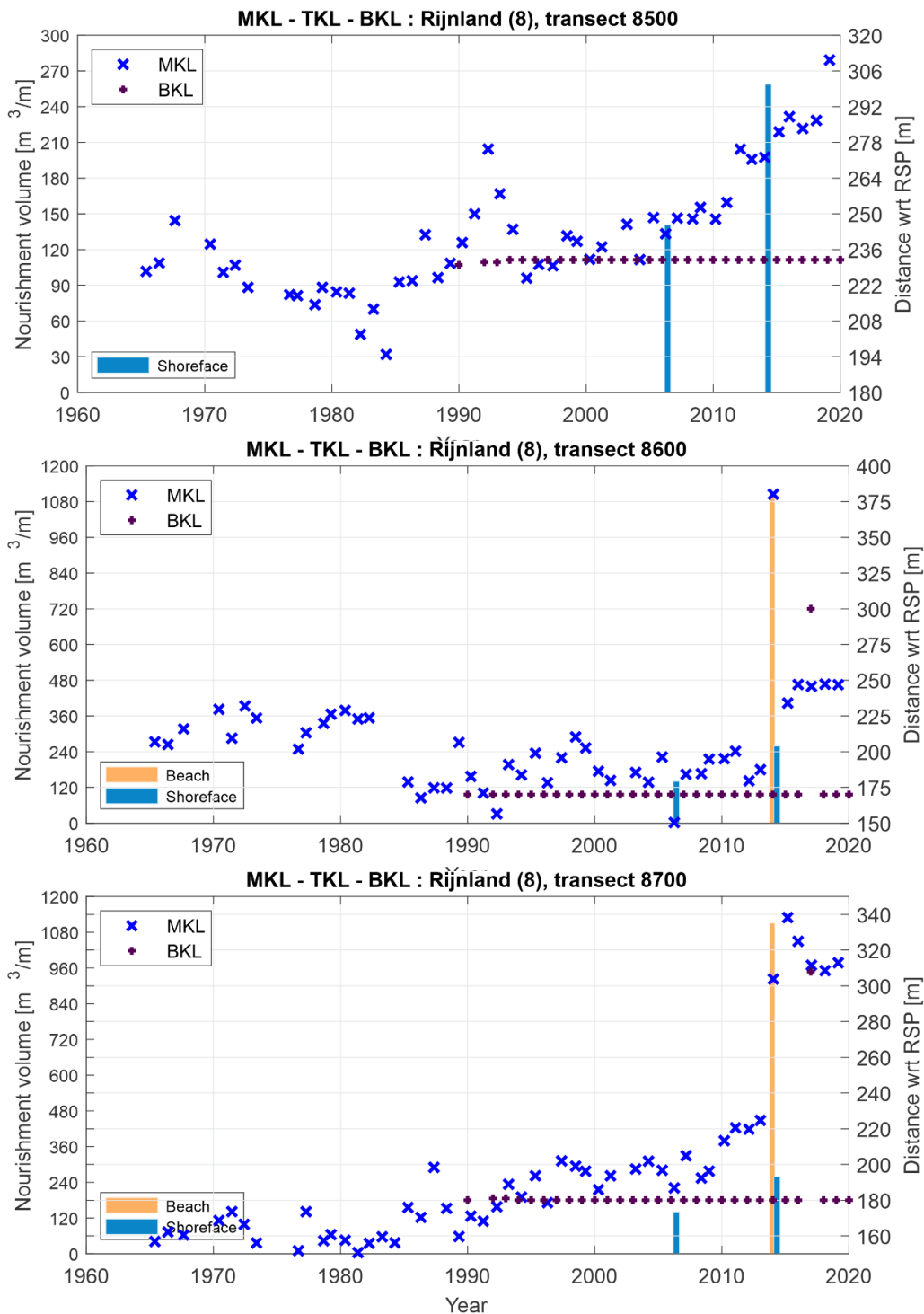
In deze raai, ten noorden van de uitwateringssluis, lag de MKL vóór 1990 verder landwaarts dan erna. Met uitzondering van een drietal jaren, ligt de MKL sinds 1990 zeewaarts van de BKL. Vooral in de periode 1970-1984 is er een langdurige periode van MKL terugtrekking. De minimum ligging wordt bereikt in 1984. Hierna volgt een periode van herstel. Tussen 1984 en 1993 ontwikkelt de MKL zich sterk zeewaarts. Het is mogelijk dat de aanleg van de uitwateringssluis en de geleidende werken aan weerszijden van het uitwateringskanaal aan de zeezijde hier een rol in spelen. Vanaf 1990 fluctueert de MKL wel in positie, maar blijft voornamelijk zeewaarts van de BKL liggen. De vooroeversuppleties uit 2006 en 2014 dragen eraan bij dat de MKL hier met meer dan 50 m zeewaarts verplaatst tussen 2006 en 2020.

#### Raai 8600

Raai 8600 doorsnijdt de uitwateringssluis. Hier ligt de MKL vrijwel de gehele periode zeewaarts van de BKL. De MKL-positie voor 1983 ligt iets verder zeewaarts dan na 1984. Na aanleg van de sluis blijft de MKL dicht bij de BKL liggen. Alleen in 1992 en 2006 wordt de BKL overschreden. Na de vooroeversuppletie uit 2006 ligt de MKL-positie weer zeewaarts van de BKL. Van 2006 tot aan de versterking in 2013 ligt de MKL-positie ongeveer 25 m zeewaarts van de BKL. De strand-duin suppletie geeft een grote zeewaartse sprong van de MKL. In de jaren na de Zwakke Schakel versterking stabiliseert de MKL op 75 m ten opzichte van de RSP.

### Raai 8700

Raai 8700 geeft een beeld van de MKL ontwikkeling ten zuiden van de uitwateringsluis. De MKL lag vóór 1993 over het algemeen landwaarts van de BKL en na 1993 zeewaarts van de BKL. De vooroeversuppletie uitgevoerd in 2006 geeft een zeewaartse verplaatsing van de MKL-positie van ca. 20m. De Zwakke Schakel versterkingen in 2013 en 2014 geven een grote zeewaartse sprong in MKL positie. Na deze versterking blijft de MKL-positie vrij stabiel rond 120m zeewaarts van de BKL.

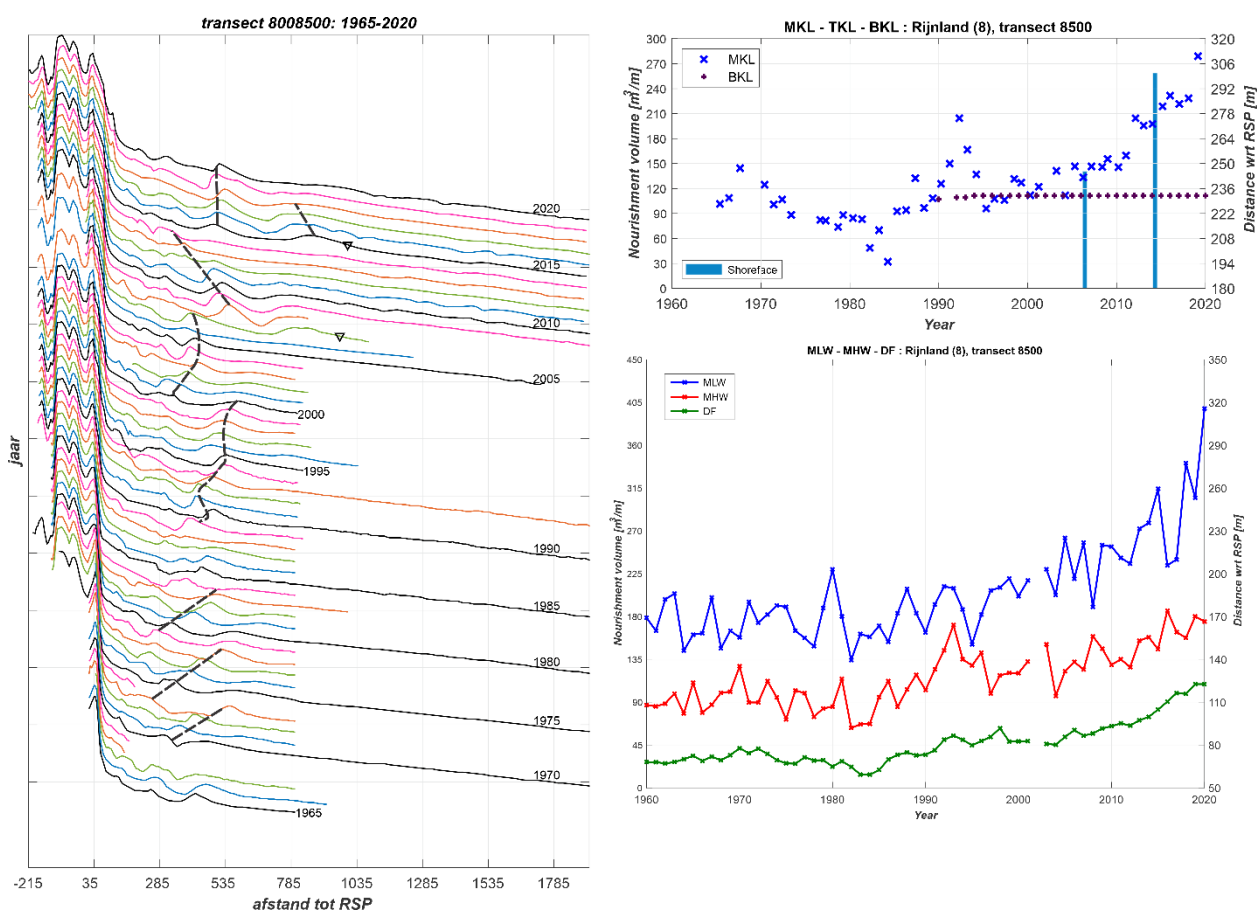


Figuur 2-11: Ontwikkeling van de MKL voor de raaien 8500, 8600 en 8700.

## 2.4.2 Detailanalyse raai 8500 (km 85)

Figuur 2-12 (raai 8500) geeft een representatief beeld van het kustgedrag ten noorden van de uitwateringssluis. De timestack van kustprofielen geeft inzicht in het bankgedrag. Tot 1990 is er een enkele brekerbank te onderscheiden die zich zeewaarts verplaatst en uitdooft, waarna een nieuwe bank landwaarts vormt. Na 1990 is er nog steeds een enkele brekerbank zichtbaar, maar verandert het gedrag. Tussen 1990 en 2000 blijft de bank min of meer op een vaste locatie aanwezig. Van 2000 tot 2006 ligt de bank stabiel, maar dichterbij de kust dan van 1990 tot 2000. De vooroeveroppletting van 2006 lijkt de brekerbank te beïnvloeden. Hierna vormt zich een hogere bank welke landwaarts verplaatst. Na de Zwakke Schakel versterking (2014) ontstaat een nieuwe brekerbank die tot 2020 kustdwars stabiel in positie blijft.

De MKL en strandlijnen vertonen een zeewaartse verplaatsing na aanleg van de uitwateringssluis in 1984. Met name de strandlijnen zijn sindsdien zeewaarts verplaatst. De duinvoet ligt in 2020 meer dan 50m zeewaarts ten opzichte van 1984.



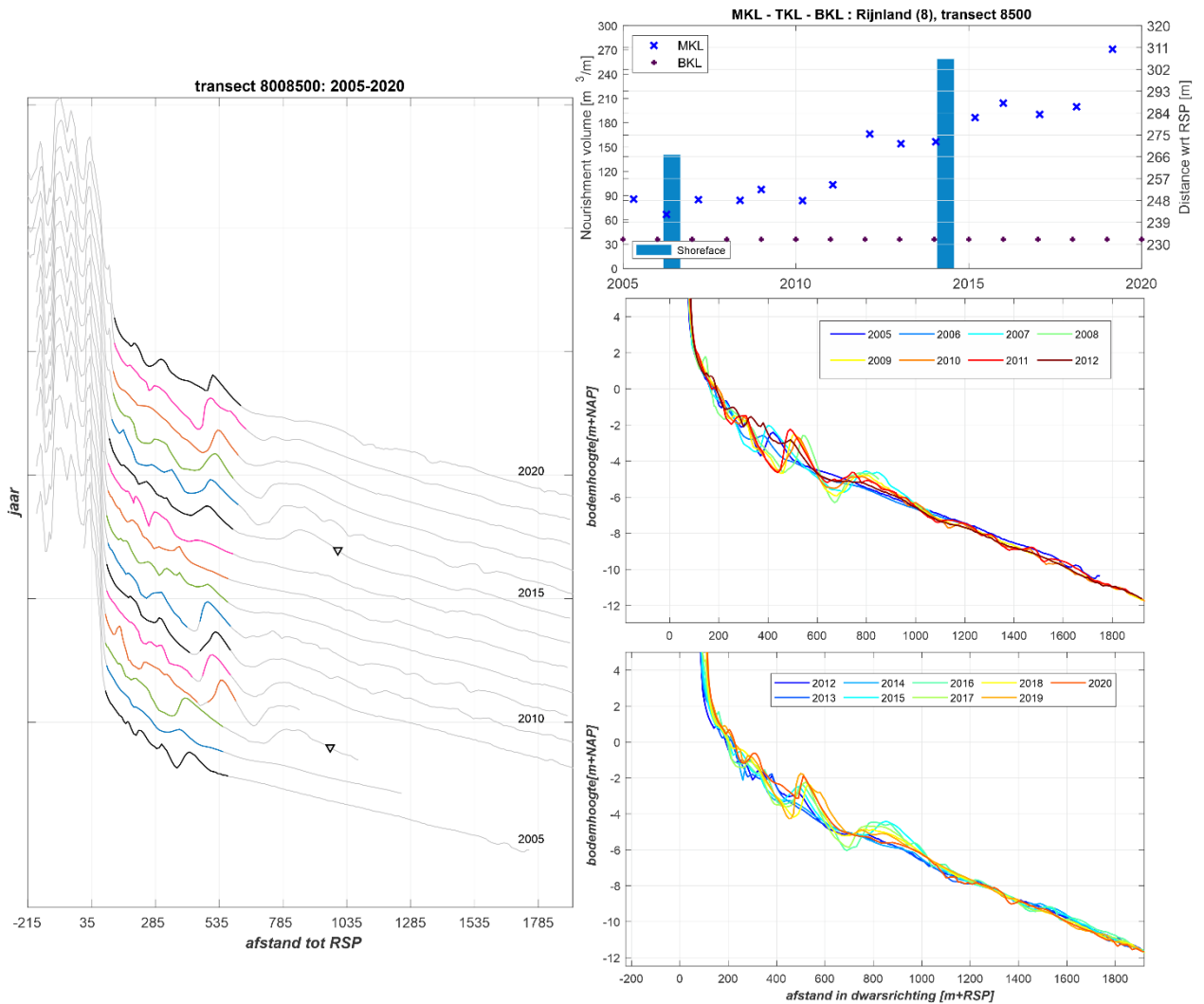
Figuur 2-12: Ontwikkeling van dwarsprofielen raai 8500 (links), MKL en BKL (rechtsboven) en strandlijnen (gemiddeld laagwater MLW, gemiddeld hoogwater MHW en duinvoet DF (rechtsonder).

Figuur 2-13 geeft de invloed van de suppleties in meer detail. De timestack van profielontwikkeling vertoont in deze figuur alleen het deel van het profiel dat meegenomen wordt in de berekening van de MKL. De suppleties worden zeewaarts van de rekenschijf aangelegd en hebben in dus geen direct effect op de MKL-volume.

De ontwikkeling van het dwarsprofiel laat zien dat na aanleg van de vooroeveroppletting in 2006 zich een hoge brekerbank vormt landwaarts van de vooroeveroppletting. Deze bank blijft lang in het profiel aanwezig (tot 2011). In 2012 is de bank minder goed zichtbaar doordat de

bijbehorende trog is gevuld. De vooroeversuppletie neemt hierbij steeds verder in hoogte af en is in 2013 al vrijwel niet meer terug te zien in het dwarsprofiel.

In de 2015 bodem is een tweede vooroeversuppletie zichtbaar. Ook deze suppletie ligt zeewaarts van de MKL-rekenzone. Ook na deze suppletie neemt de brekerbank sterk in hoogte toe. Deze bank blijft tot 2019 duidelijk zichtbaar in het profiel. De MKL is in deze periode ook redelijk stabiel. In 2020 neemt de MKL sterk toe. Dit komt door invulling van de tussenliggende trog. De vooroeversuppletie neemt snel in hoogte af. In 2018 is er nog slechts een kleine verhoging zichtbaar.



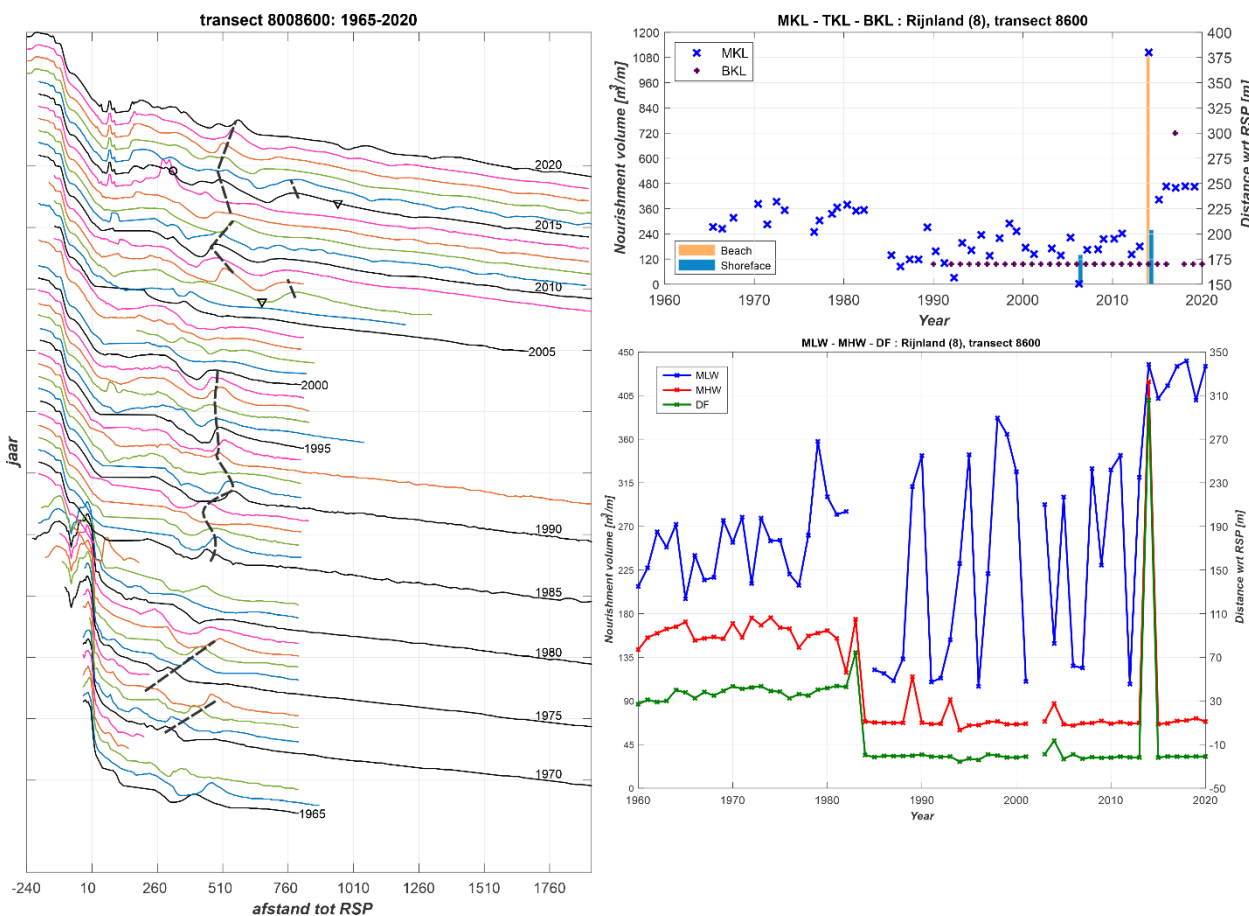
Figuur 2-13: Ontwikkeling van raai 8500 in detail. Links: timestack van profielontwikkeling over de periode 2005-2020. De gekleurde lijnen geven het deel van het profiel dat in de rekenschijf van de MKL zit weer. Rechts: ontwikkeling van de MKL (boven) en dwarsprofielen voor de periode 2005-2012 (midden) en 2012-2020 (onder).

### 2.4.1 Detailanalyse raai 8600 (km-86)

Raai 8600 ligt direct in het verlengde van de uitwateringssluis. De aanleg van de sluis is vooral zichtbaar in de strandlijnen. Na aanleg zijn de duinvoet en gemiddeld hoogwaterlijn (GHW) 40-50 m landwaarts verplaatst. De timestack van dwarsprofielen (Figuur 2-14) laat zien dat deze verplaatsing gerelateerd is aan het verdwijnen van de eerste duinenrij na 1984. Er ontstaat na aanleg een lager, maar wel breed, intergetijdestrand. De gemiddeld-laagwaterlijn (GLW) vertoont dan ook grote fluctuaties (van zo'n 300 m). De bodems 2014 tot 2020 laten een stabilisering van de GLW zien. De strandsuppletie, aangelegd tijdens de Zwakke Schakel versterking, en de verlenging van het uitwateringskanaal hebben dit veroorzaakt.

Het verlies van de duinenrij heeft geen direct effect op de MKL-positie omdat dit buiten de rekenschijf optreedt. Wel ligt de MKL vóór 1983 verder zeewaarts dan na 1983, met enkele overschrijdingen van de MKL na 1983.

Ook in dit profiel is een verandering in bankgedrag zichtbaar. Vóór aanleg van de uitwateringssluis migreerden de banken zeewaarts over een periode van 4-8 jaar. Sinds 1985 blijven de banken over het algemeen stabiel liggen. De suppleties hebben duidelijk invloed op het bankgedrag (Figuur 2-15).

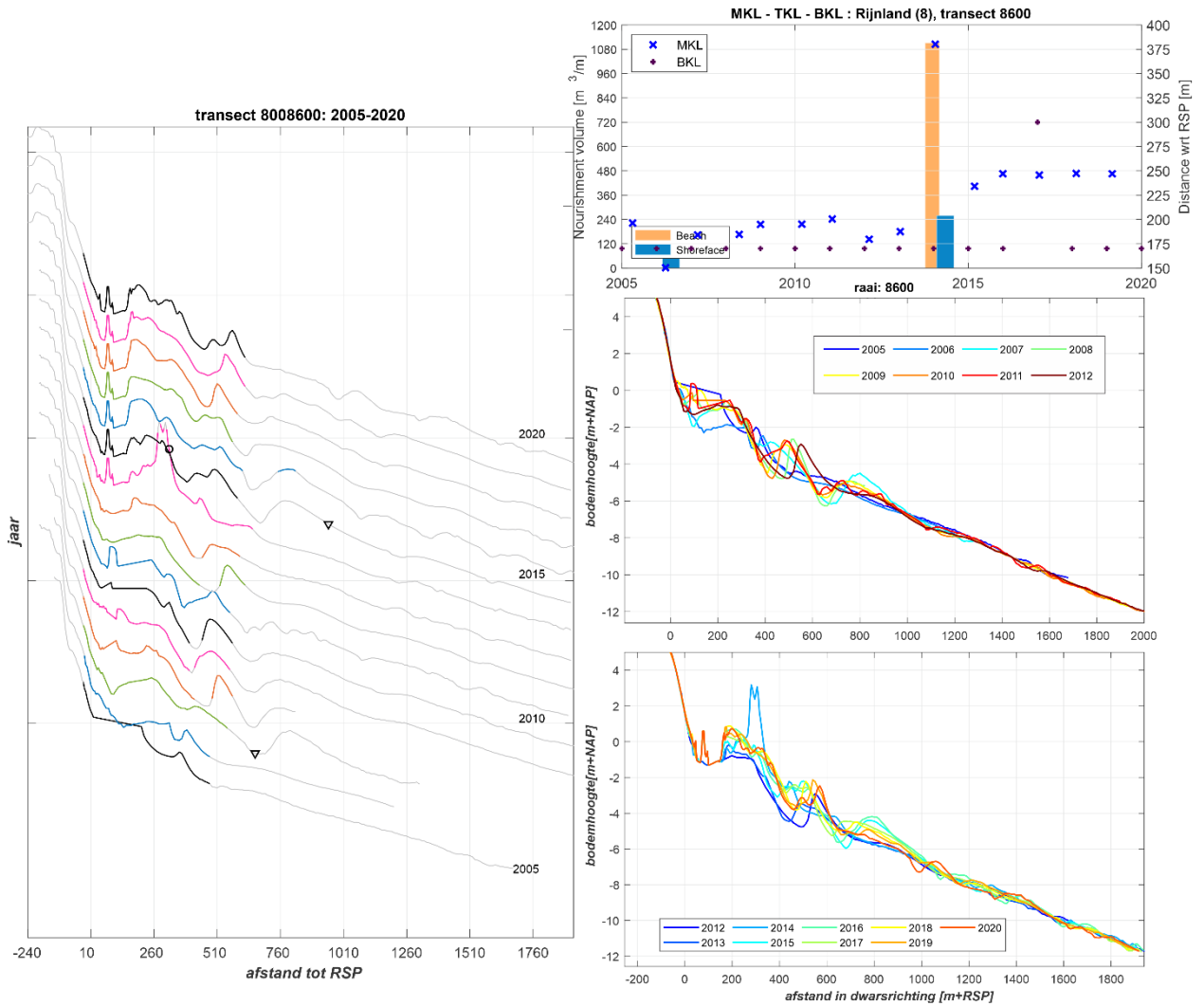


Figuur 2-14: Ontwikkeling van dwarsprofiel raai 8600 (links), MKL en BKL (rechtsboven) en strandlijnen (gemiddeld laagwater MLW, gemiddeld hoogwater MHW en duinvoet DF (rechtsonder).

Vóór aanleg van de 2008 vooroeversuppletie is geen duidelijk brekerbank zichtbaar. Na aanleg van de suppletie ontstaat weer een grotere brekerbank (rond 500 m tot RSP). De vooroeversuppletie ligt niet in de rekenschijf van de MKL. Hierdoor heeft deze suppletie geen direct effect op de MKL. Toch verplaatst de MKL zeewaarts doordat er een nieuwe brekerbank

ontstaat die wel in de MKL-rekenschijf ligt. De vooroeversuppletie dempt in de volgende jaren snel uit en is in 2011 niet meer zichtbaar.

De suppleties in 2013 en 2014 voor de Zwakke Schakel versterking geven een grote verplaatsing in MKL-positie. In 2013 is deze verplaatsing zeer groot omdat er tijdelijk een hoog duin in het profiel zichtbaar is. Dit profiel is niet representatief voor het gedrag. De MKL stabiliseert op een positie rond de 250 m tot de RSP en blijft tussen 2017 en 2020 stabiel. Ook deze vooroeversuppletie dempt snel uit en resulteert in de vorming van een hoge bank (rond de 550m RSP). Het duurt tot rond 2018 voordat zich een duidelijk bank-trog systeem vormt.

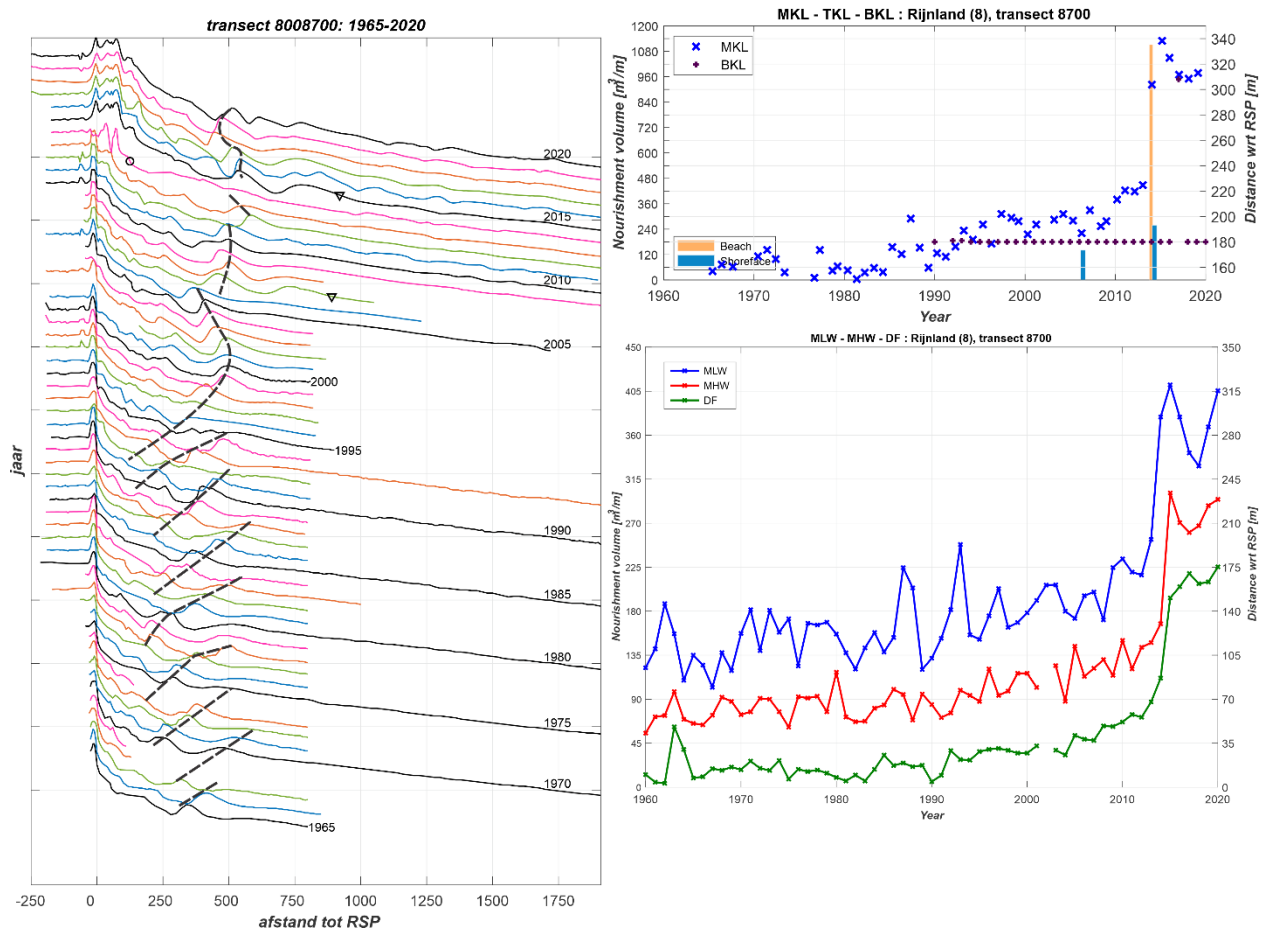


Figuur 2-15: Ontwikkeling van raai 8600 in detail. Links: timestack van profielontwikkeling over de periode 2005-2020. De gekleurde lijnen geven het deel van het profiel dat in de rekenschijf van de MKL zit weer. Rechts: ontwikkeling van de MKL (boven) en van de dwarsprofielen voor 2005-2012 (midden) en 2012-2020 (onder).

## 2.4.1 Detailanalyse raai 8700 (km-87)

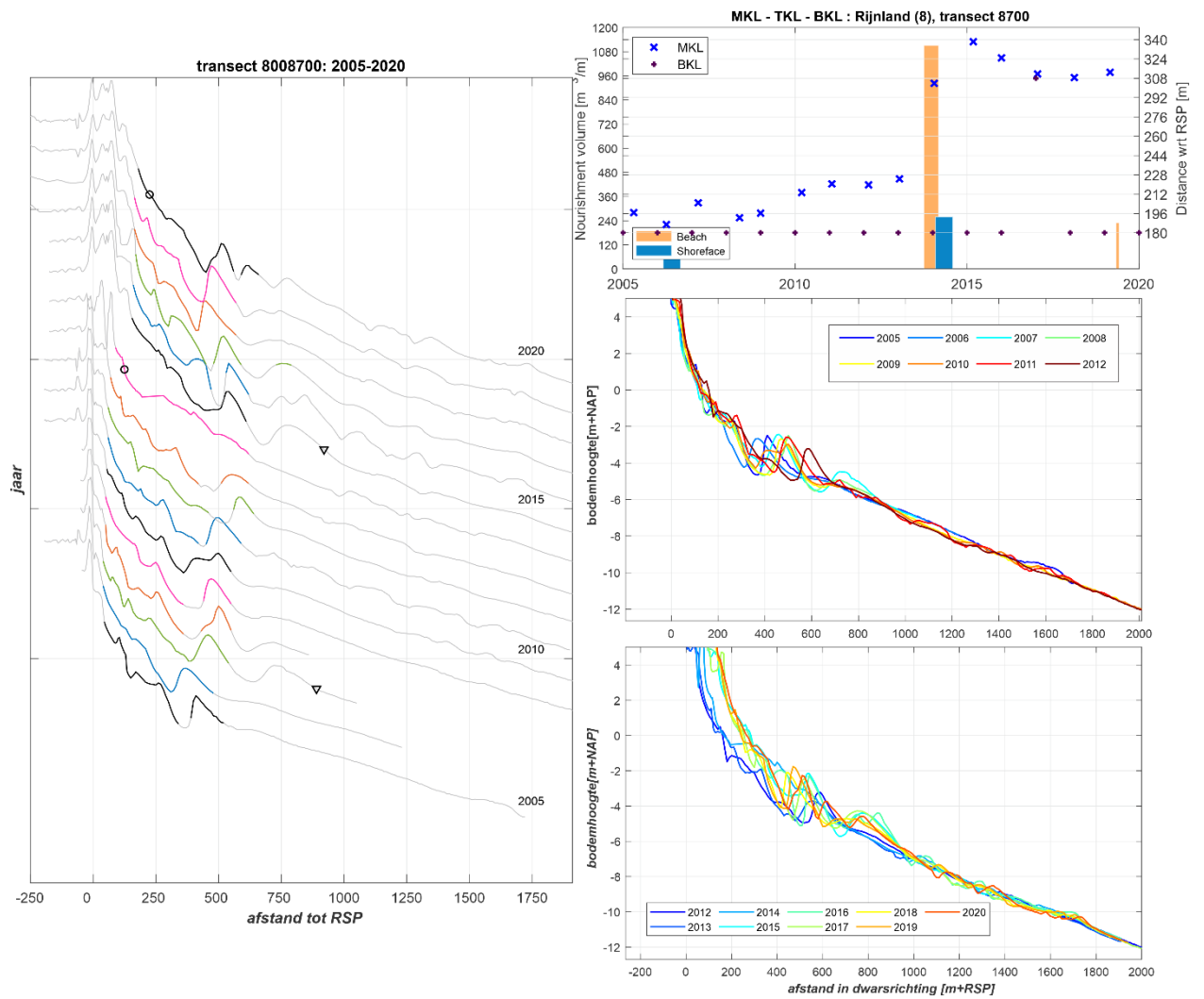
Figuur 2-16 (raai 8700) geeft een representatief beeld van het kustgedrag ten zuiden van de uitwateringssluis. Ten zuiden van de uitwateringssluis verplaatsen zowel de MKL als de strandlijnen zich zeewaarts vanaf 1983. Ook hier lijkt de aanleg van de sluis de kustontwikkeling positief te beïnvloeden. Van 1983 tot 2013 verplaatst de duinvoet 50 m zeewaarts. De Zwakke Schakel suppleties zorgen voor een verdere zeewaartse verplaatsing van de duinvoet van ongeveer 125 m. In 2020 ligt de MKL 140 m zeewaarts van de BKL.

In timestack is de verandering in bankgedrag zichtbaar. Perioden van zeewaarts verplaatsende banken zijn zichtbaar van 1965 tot ongeveer 1990-1995. Na 1995 blijven de banken zichtbaar, maar liggen ze kustdwars stabiel in het profiel, met perioden van zeewaartse en landwaartse verplaatsing. Een duidelijke relatie tussen de fluctuaties in het bankgedrag en de ligging van de MKL is niet af te leiden.



Figuur 2-16: Ontwikkeling van dwarsprofielen km 87,00 (links), MKL en BKL (boven) en strandlijnen (gemiddeld laagwater MLW, gemiddeld hoogwater MHW en duinvoet DF (onder)).

Figuur 2-17 toont het effect van de suppleties op de kustontwikkeling in meer detail. De ontwikkeling van de vooroever suppleties is vergelijkbaar met raaien 8500 en 8600. De suppletie van 2006 was al in 2008 vrijwel niet meer zichtbaar in het profiel. De suppletie van 2013 is zeewaarts van de rekenschijf en brekerbanken aangelegd. Hierna groeit de bestaande brekerbank sterk in hoogte en dempt in de jaren tot 2020 steeds verder uit.



Figuur 2-17: Ontwikkeling van raai 8700 in detail. Links: timestack van profielontwikkeling over de periode 2005-2020. De gekleurde lijnen geven het deel van het profiel dat in de rekenscijf van de MKL zit weer. Rechts: ontwikkeling van de MKL (boven) en dwarsprofielen voor 2005-2012 (midden) en 2012-2020 (onder).



## 2.5 Synthese

De kust van Katwijk wordt gekarakteriseerd door een enkele brekerbank. Het gedrag tot de jaren negentig is dat deze langzaam zeewaarts migreert en uitdempt, waarna kustwaarts ervan een nieuwe brekerbank ontstaat. Deze cyclus varieerde tussen de 4 en 8 jaar. Het huidige kuststelsel vertoont ander gedrag: een bank die rond de 500m zeewaarts van de RSP ligt. Deze bank ligt soms een aantal jaar stabiel in positie, vertoont soms een landwaartse verplaatsing en soms een zeewaartse verplaatsing. Er zijn ook perioden dat de trog opvult en er geen duidelijke brekerbank aanwezig is. Een directe koppeling tussen de verandering van het bankgedrag en de suppleties is niet te maken. De eerste vooroeversuppletie werd pas na de verandering in het gedrag, in 1998, uitgevoerd.

De vooroeversuppleties die zijn aangelegd in 1998 en 2006 vertonen een vergelijkbare respons na aanleg. Deze suppleties zijn rond de 800m tot de RSP aangelegd. Dit is zeewaarts van de maximale ligging van de natuurlijke brekerbanken en buiten de rekenschijf van de MKL. Na aanleg namen de vooroeversuppleties snel in hoogte af, waarna de brekerbank landwaarts van de suppletie sterk in hoogte toeneemt en ook de MKL-volume toeneemt. De toename in hoogte van de brekerbank is waarschijnlijk rechtstreeks gerelateerd aan de aanleg van de vooroeversuppletie, door een landwaartse herverdeling van het sediment. De toegenomen hoogte van de brekerbank valt wél binnen de MKL-rekenschijf en zorgt voor een zeewaartse verplaatsing van de MKL in de jaren na aanleg van de vooroeversuppleties.

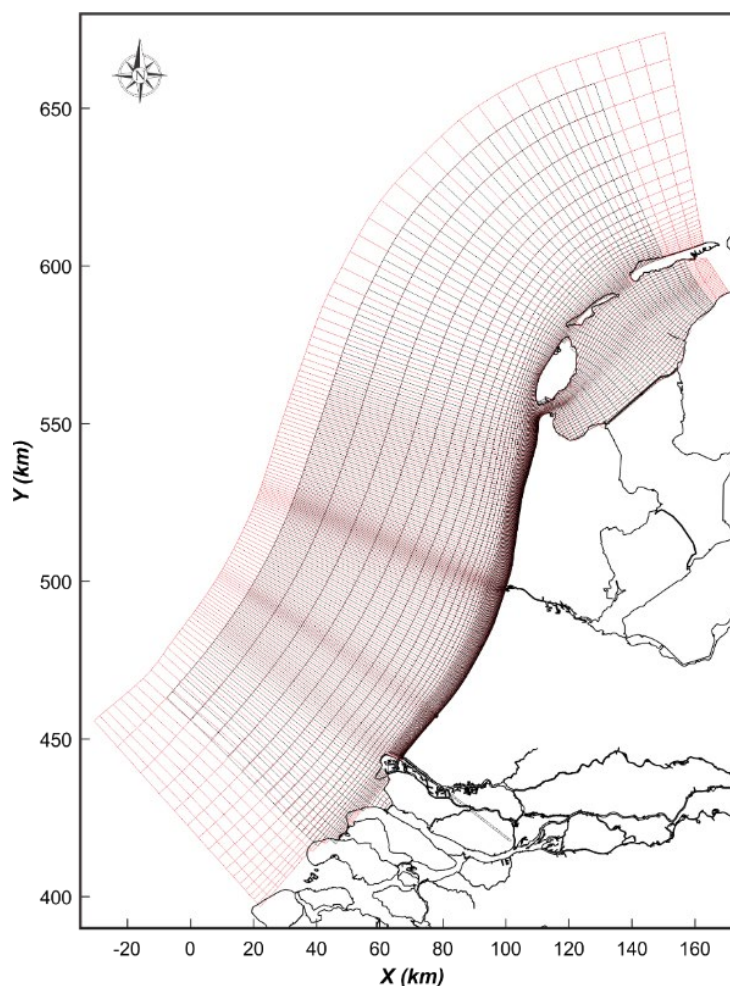
De aanleg en verlenging (t.b.v. Zwakke Schakel versterking) van de uitwateringssluis is direct zichtbaar in de respons van de MKL en de strandlijnen. Vrijwel alle profielen vertonen een zeewaartse verplaatsing van de MKL sinds aanleg. Alleen profiel 8600, direct voor de sluis, vertoont een landwaartse verplaatsing. Dit komt doordat de uitstroom van de sluis er een lager intergetijdestrand creëert. Een duidelijke invloed op het bankgedrag lijkt de sluis niet te hebben. Zowel in de langs- als dwarsprofielen blijven de banken voor en na aanleg gehandhaafd.

## 3 Modelling van de vooroeversuppletie

### 3.1 Het Delft3D model

#### 3.1.1 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 3-1). 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 uit 200x233 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 Morfologie aanpak (dit is nu de standaard optie). Van der Hout concludeert dat bij deze omzetting de transporten op diep water niet nauwkeurig gerepresenteerd werden. Dit is met verdere ontwikkeling van Delft3D opgelost.

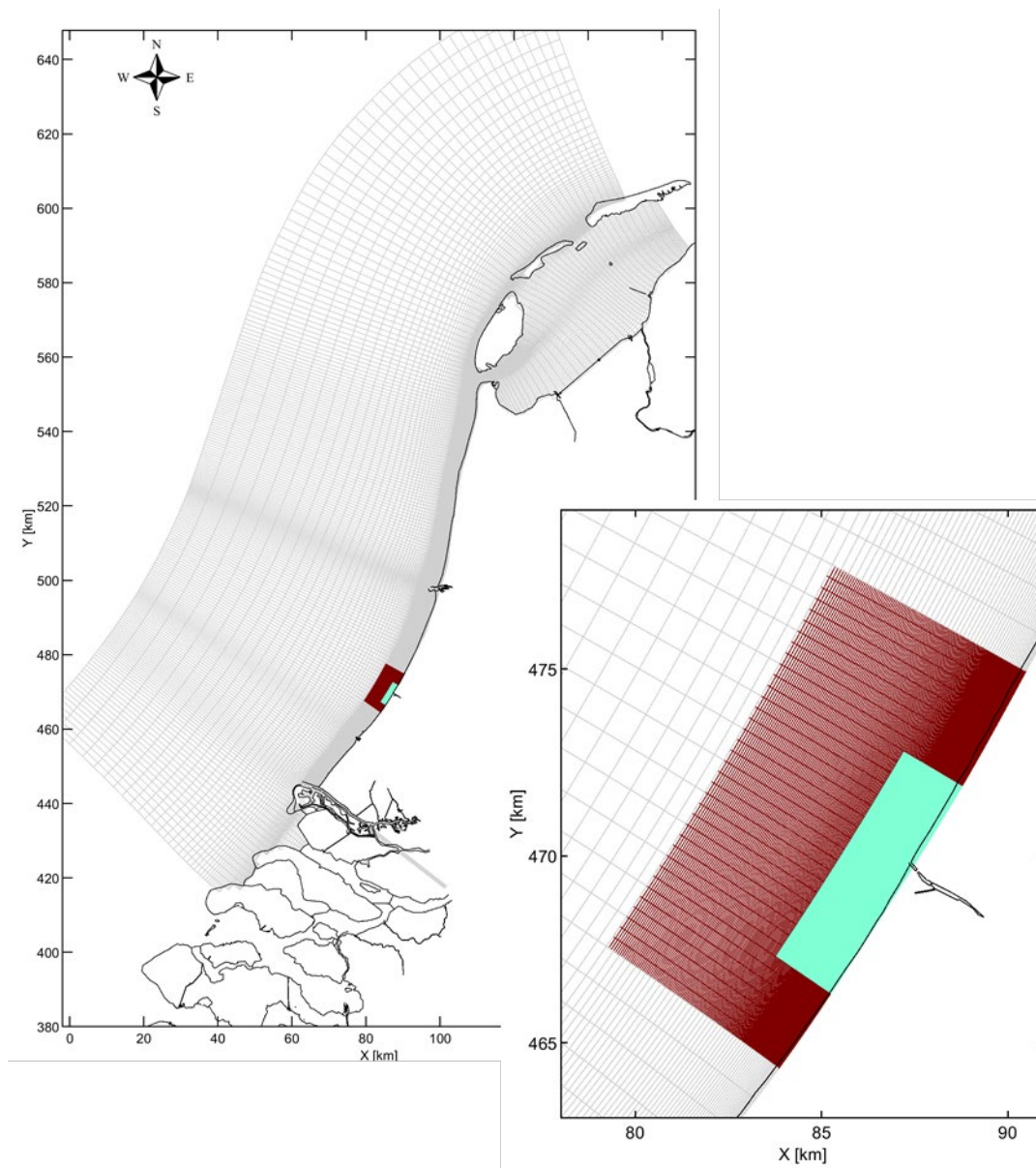


Figuur 3-1: Grootchalige stromingsrooster (zwart) en golfrooster (rood) van het originele HCZ model.

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  $10^\circ$  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 wordt dit model geschikt gevonden voor de huidige studie.

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 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.

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 Katwijk in detail door te rekenen. Door middel van Domein Decompositie (DD) is het HCZ model verder verfijnd. De verfijning bestaat uit 2 rekenroosters waarbij de resolutie in het tweede domein een factor 3 en het derde domein een factor 6 hoger wordt (Figuur 3-2). In het kustvak bij Katwijk is dan een resolutie van ongeveer 38 m 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 3-2 - Stromingsroosters van het HCZ-DD model zoals gebruikt in de huidige studie. De zwarte, blauwe en magenta lijnen geven de drie domeinen van de DD schematisatie weer.

### 3.1.2 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 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 afzonderlijke dubbeldaags getijden worden daarna vergeleken met het totale residuele transport over de gehele springtij-doottij cyclus. Op basis van een optimale ruimtelijk correlatie is de meest representatieve periode geselecteerd. In dit geval is dat het dubbeldaags getij dat begint op 13 mei 1999 17:15 en loopt tot en met 14 mei 1999 18:05.

### 3.1.3 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 3.1.

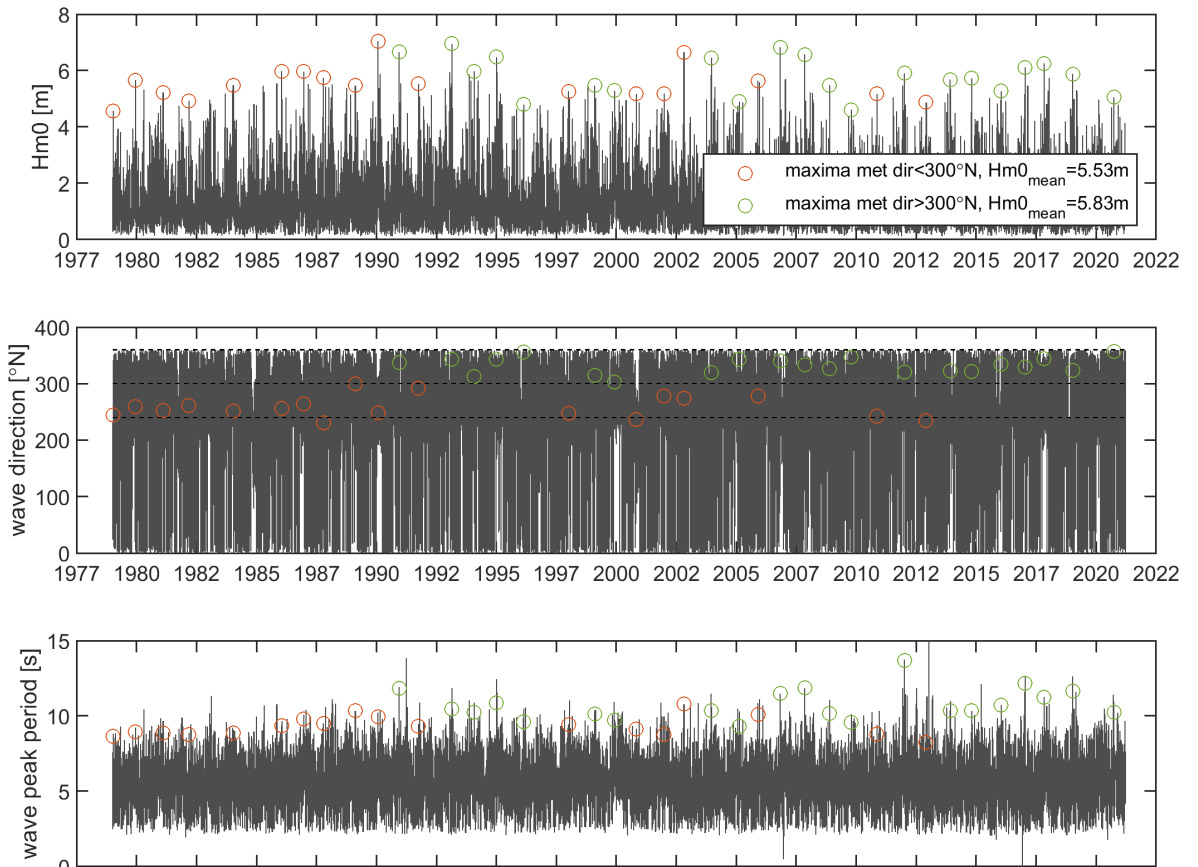
Tabel 3-1 Overzicht van de golf- en windcondities gebruikt voor de modellering.

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

Uit soortgelijk onderzoek bij Scheveningen (Quataert et al., 2021) volgde dat het potentiële effect van een vooroeversuppletie op de erosieve processen waarschijnlijk sterker zal zijn onder meer extreme (storm) condities. Om dit te testen voor de vooroeversuppletie bij Katwijk worden de simulaties ook uitgevoerd voor twee representatieve stormcondities, i.e. één uit noordelijke richting en westelijke richting.

De representatieve stormcondities zijn gebaseerd op lange-termijn wind- en golfdata van meetstations 'IJmuiden' en 'Europlatform'. Uit de gemeten significante golfhoogte ( $H_{m0}$  in Figuur 3-3) zijn de jaarlijkse stormen gedefinieerd door voor elk jaar de maximale golfhoogte af te leiden. Voor elke maximale golfhoogte is vervolgens bepaald of de golven uit het noorden

kwamen (golf richting > 300°N, groene bollen in Figuur 3-3) of uit het westen (golf richting < 300°N, rode bollen in Figuur 3-3). Voor de noordelijke en westelijke maxima-punten is vervolgens het gemiddelde berekend van de maximale golfhoogte, golf richting, golf periode en wind-condities. Deze gemiddelde waarden geven dan de golf- en wind-condities die representatief zijn voor een gemiddelde jaarlijkse stormconditie, voor zowel een storm uit het noorden als het westen (Tabel 3-2).



Figuur 3-3 afleiden van de representatieve stormcondities voor Katwijk. Tijdseries van de golfdata van meetstations 'Ijmuiden' en 'Europlatform' (grijze lijnen), voor de significante golfhoogte (Hm0, boven), golfrichting (midden) en piek golfperiode (onder). De jaarlijkse stormen zijn weergegeven uit noordelijke (groene bollen) en westelijke (rode bollen) richting.

Tabel 3-2 Overzicht van de golf- en windcondities gebruikt voor de modellering van de gemiddelde jaarlijkse stormcondities.

Conditie	Hsig [m]	Tp [s]	Dir [deg]	Wvel [m/s]	Wdir [deg]
Noordelijke storm	5.9	10.7	332	16.0	332
Westelijke storm	5.5	9.2	257	19.0	257

### 3.1.4 Sedimenttransport

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 advectie-diffusie vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane ( $d_{50}$ ) korrel diameter van 250  $\mu\text{m}$ .

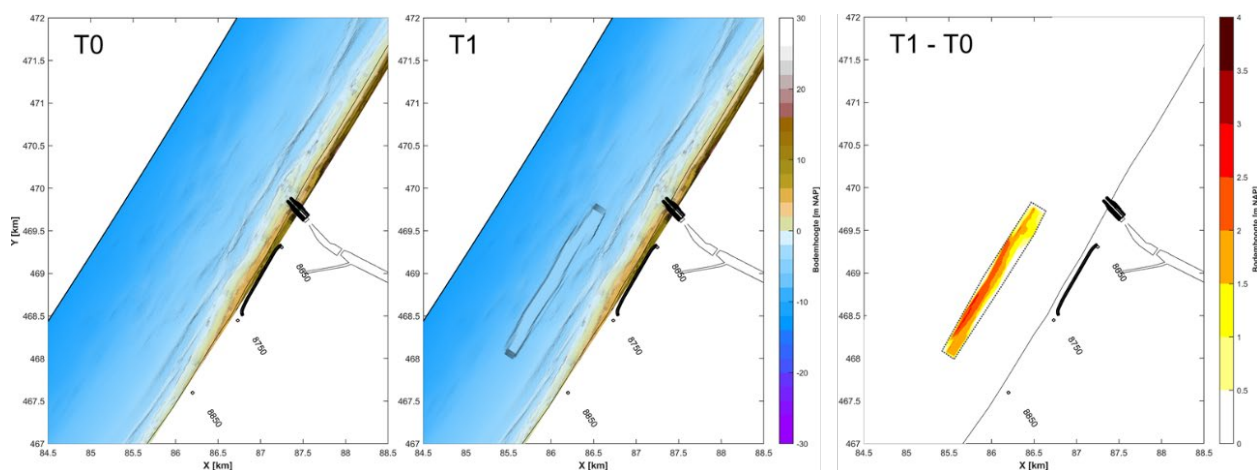
In deze studie wordt de bodemhoogte gedurende de simulatie niet aangepast, maar wordt er een morfostatische berekening uitgevoerd. De aldus verkregen sedimenttransporten worden ook wel de “potentiële sedimenttransporten” genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten 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.

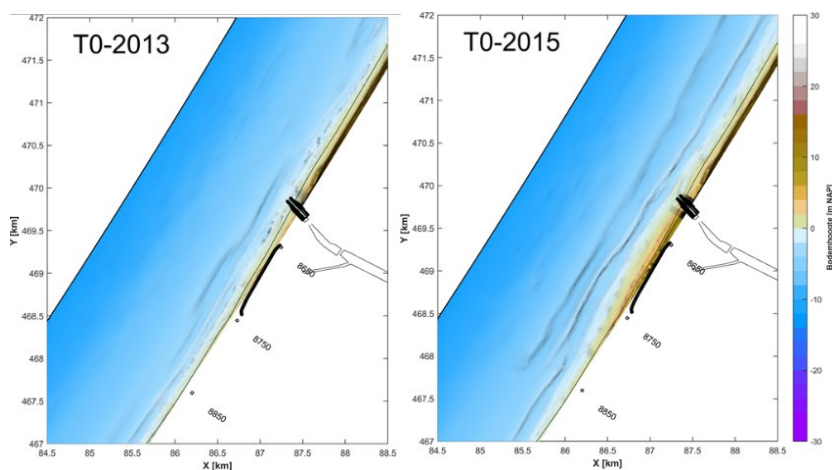
### 3.2 Opzet modelsimulaties en suppletievariant

Het HCZ-DD model is gebruikt om een T0 simulatie, de 2021 bodem vóór suppletie door te rekenen (Figuur 3-4). Voor de T0 bodem is de JAKRUS-grids van 2021 gebruikt. Vervolgens is er een identieke simulatie uitgevoerd, maar nu met een bodem die is aangepast op het door Rijkswaterstaat aangeleverde suppletieontwerp (T1). De suppletie is door Rijkswaterstaat ontworpen aan de zeezijde van de al aanwezige brekerbank en strekt zich uit tussen raaien 8650 en 8850. In het ontwerpvoorstel is de vooroever suppletie aangelegd als een nieuwe brekerbank, vergelijkbaar met de in het verleden uitgevoerde vooroever suppleties bij Katwijk. Bij deze vooroever suppletie wordt uitgegaan van de aanleg op -4m +NAP, met een breedte afhankelijk van het aan te leggen volume, daarna aflopend met een helling van circa 1:10. In totaal geeft dit in het rekenontwerp een volume van 612.500 m<sup>3</sup>.

Ook is het HCZ-DD model gebruikt om het effect van de Zwakke Schakel versterking op de stromingen en sedimenttransporten in kaart te brengen. Hiervoor is de JARKUS bodemmetingen vóór de versterking (T0-2013), na de versterking (T0-2015) gebruikt (Figuur 3-5). In de T0-2015 model bodem is te zien dat de kust zeewaarts is uitgebouwd ten gevolge van de versterking. Daarnaast is ook de vooroever suppletie uit 2014 te zien die tegelijkertijd met de versterking is aangelegd.



Figuur 3-4 – Modelbodem voor de T0 en T1 simulatie, en het verschil tussen beide bodems (T1 - T0). De locatie van de dijk-in-duin constructie en uitwateringssluis is aangegeven met de zwarte vlakken.



Figuur 3-5 – Modelbodem voor de T0-2013 en T0-2015 simulatie. De locatie van de dijk-in-duin constructie en uitwateringssluis is aangegeven met de zwarte vlakken.



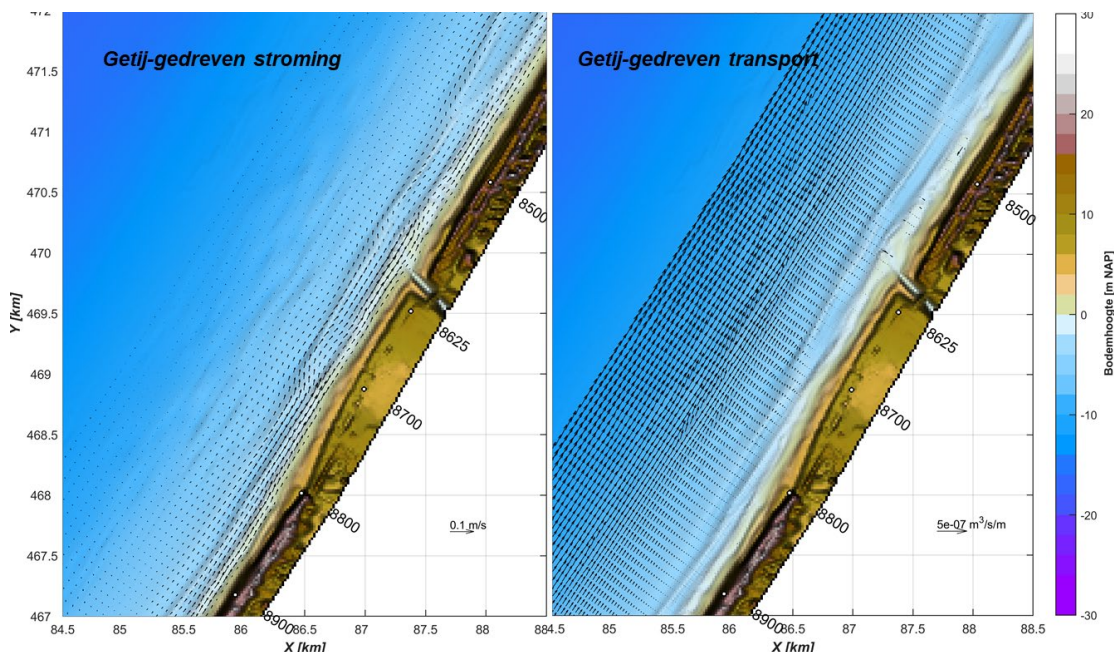
Voor alle simulaties, *T0-2021*, *T1-2021*, *T0-2013* en *T0-2015*, bestaan uit een berekening van de getijgedreven transporten (conditie w00 in Tabel 3.1) en berekeningen van de transporten voor ieder van de 12 condities van het representatieve golfklimaat. In deze simulaties wordt zowel de invloed 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).

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.

### 3.3 Modelresultaten T0-2021 simulatie

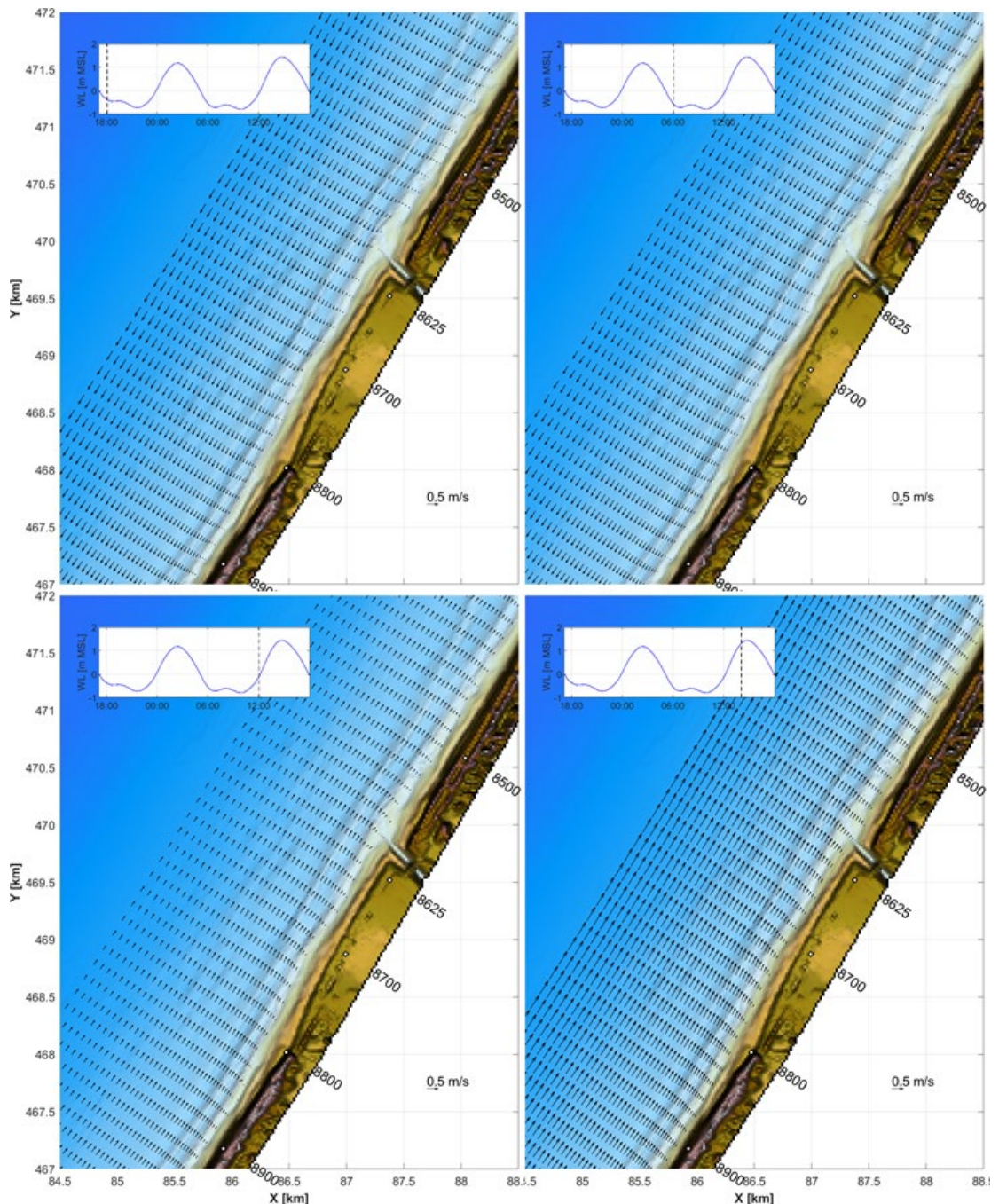
#### 3.3.1 Getijgedreven stromingen en transporten

Een overzicht van de getijgedreven stromingen bij Katwijk is weergegeven door middel van vier tijdstappen uit de T0-2021 simulatie (Figuur 3-7). Bij laagwater (06:15, Figuur 3-7) is de stroming zuidwaarts gericht. De hoogste stroomsnelheden treden zeewaarts op. Direct langs de kust zijn de stromingen lager. Bij het opkomend getij draait de stroomrichting om richting het noorden (12:15, Figuur 3-7) en nemen de stroomsnelheden toe tot maximaal 0.7 m/s (14:15, Figuur 3-7). De stroomvectoren worden door de voorliggende vooroever slechts beperkt beïnvloed. Direct bij het strand zijn wel kleinere vectoren te onderscheiden, deze vectoren volgen de oriëntatie van de kustlijn ter hoogte van de Zwakke Schakel versterking. Bij de uitwateringsslus is te zien dat de stromingsvectoren worden beïnvloed door het intergetijde-deel van het strand. Dit resulteert echter slechts in zeer beperkte veranderingen in het snelheidsveld.



Figuur 3-6 – Residuele getijgedreven stroming (links) en sediment transport (rechts) over de getijperiode in het kustvak bij Katwijk op basis van de T0-2021 bodem.

De residuele stromingen (gemiddeld over het morfologisch getij, Figuur 3-6 links) zijn beperkt, de stromingen zijn over het algemeen kleiner dan 0,1 m/s. In het residuele stroomveld vindt er voornamelijk stroming plaats bij de brekerbank en de kust.

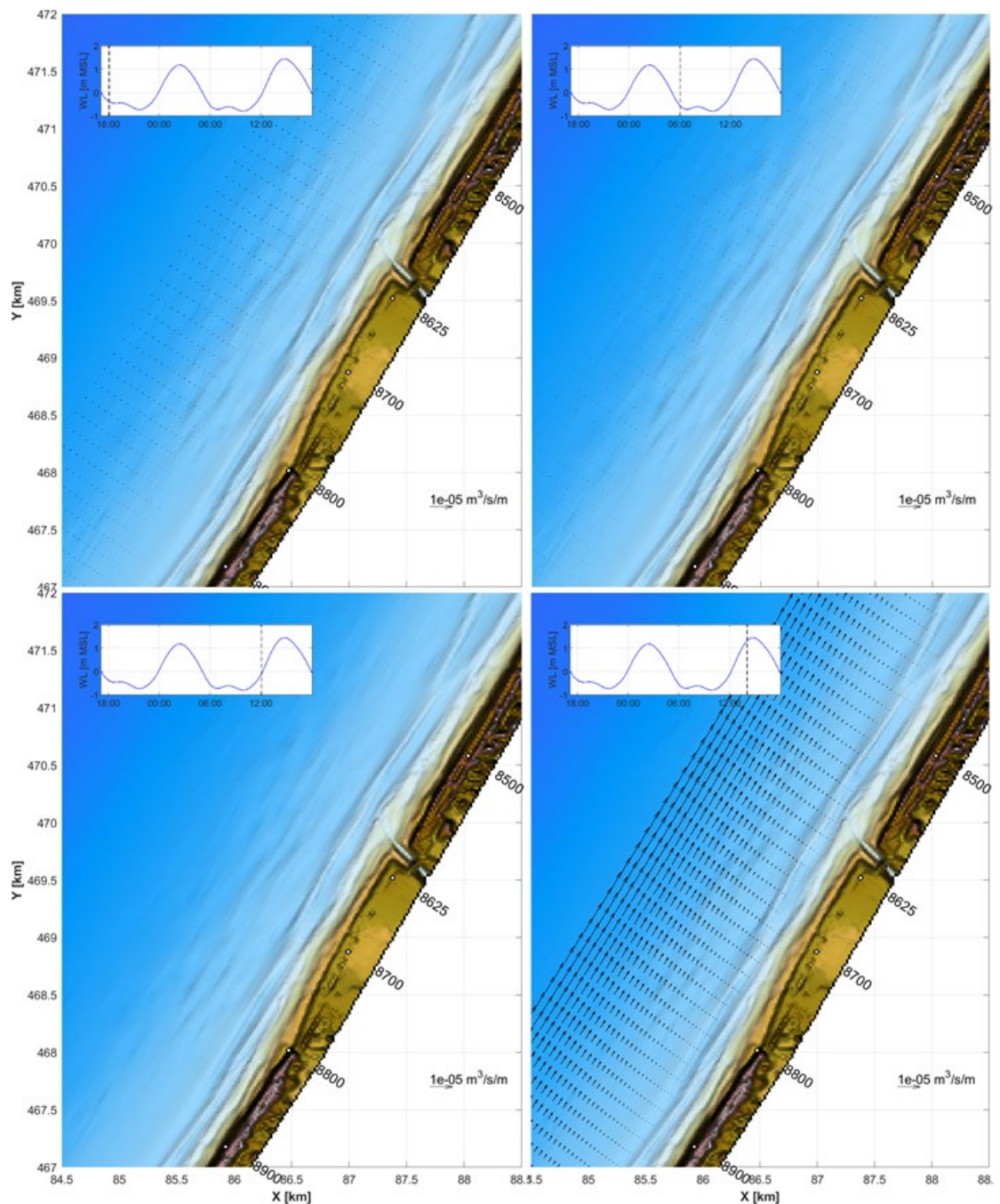


Figuur 3-7 – Dieptegemiddelde (instantane) stroming voor 4 tijdstappen over de getijperiode op basis van T0-2021 bodem..

De instantane getijgedreven sedimenttransporten zijn in Figuur 3-8 weergegeven voor dezelfde vier tijdstappen. Vloedgedomineerde transporten zijn groter dan de ebgedomineerde transporten. Dit is terug te zien in het residuele transport (gemiddeld over het morfologisch getij, Figuur 3-6 rechts), dat wordt gekarakteriseerd door noordwaarts gericht (vloedstroming) transport. De residuele transporten zijn het grootst zeewaarts van de brekerbank en in de orde van  $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . In het algemeen zijn de getijgedreven transporten bij de kust minimaal.

Het patroon van de grotere residuele stromingsvectoren bij de brekerbanken en kust (Figuur 3-6 links) is niet terug te zien in de transportvectoren (Figuur 3-6 rechts). Dit wordt veroorzaakt door de relatief grote asymmetrie tussen de maximale eb- en vloedtransporten. Het residuele transportpatroon is vrijwel gelijk aan de transporten tijdens maximale vloed (14:15, Figuur 3-8).

Tijdens eb liggen de snelheden rond de kritische snelheid voor sedimentverplaatsing (06:15, Figuur 3-8). Deze snelheden zijn niet in staat grootschalige sedimenttransporten te genereren. Tijdens vloed zijn de snelheden iets hoger en liggen dan wel boven de kritische snelheid van sedimentbeweging. Doordat de transporten zich ongeveer tot de macht 5 van de snelheden verhouden geeft dit gelijk een groot transport wat het residuele transportbeeld domineert. Dit verklaart waarom de residuele snelheden en transport vectoren zich zo anders gedragen.

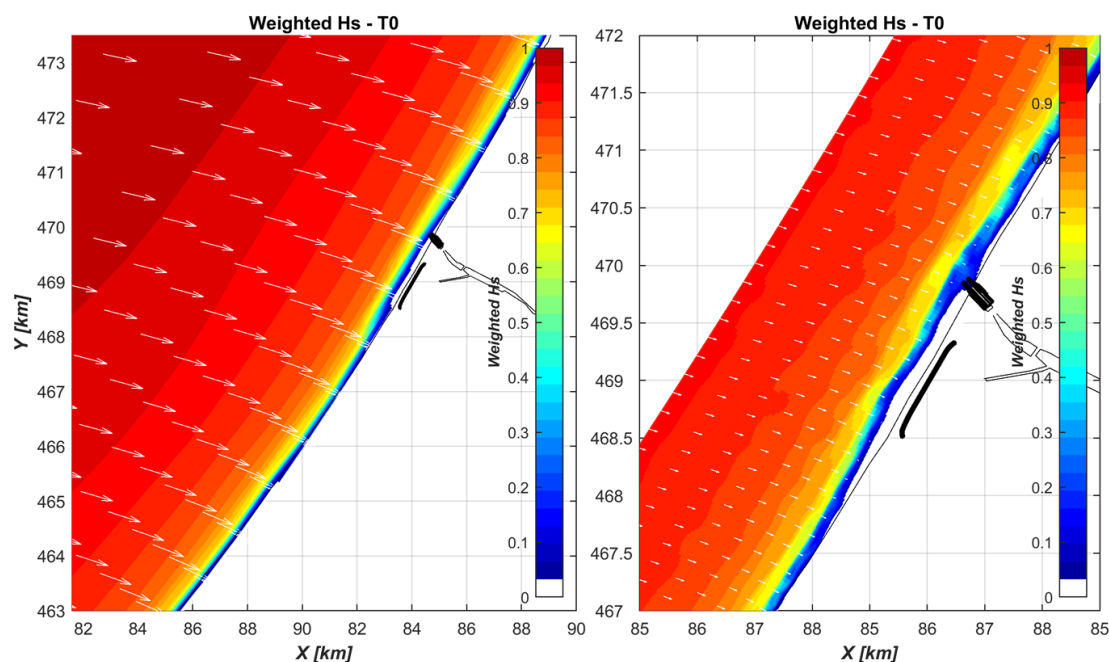


Figuur 3-8: Instantane Sedimenttransporten voor 4 tijdstappen over de getijperiode op basis van de T0-2021 bodem.

### 3.3.2 Invloed van golven

De jaargemiddelde golfhoogte bij Katwijk is weergegeven in Figuur 3-9. Voor dit jaargemiddelde is het gewogen gemiddelde golfhoogte bepaald op basis van de condities en gewichten zoals gegeven in Tabel 3.1. Dit is representatief voor het morfologisch golfklimaat, en is dus inclusief de 'geen golven – w00' conditie, wat zorgt voor de relatief lage gemiddelde golfhoogte van maximaal 1 m in Figuur 3-9. In het morfologisch golfklimaat hebben de hoogste golfcondities de laagste weging, waardoor deze het minst bijdragen aan de reductie in het jaargemiddelde golfhoogte. De getijgemiddelde golfhoogte per individuele golfconditie zijn te vinden in Appendix A.1.

Op grote schaal is er weinig kustlangse variatie in de golfhoogte te zien. Richtiging de kust neemt de golfhoogte af door golfbreking. Het effect van de zeewaartse uitbouw van de kust ten gevolge van de Zwakke Schakel versterking is wel (beperkt) te zien, de jaargemiddelde golfhoogte neemt af over een kortere kust-dwarse afstand. De jaargemiddelde golfrichting komt uit het westen.



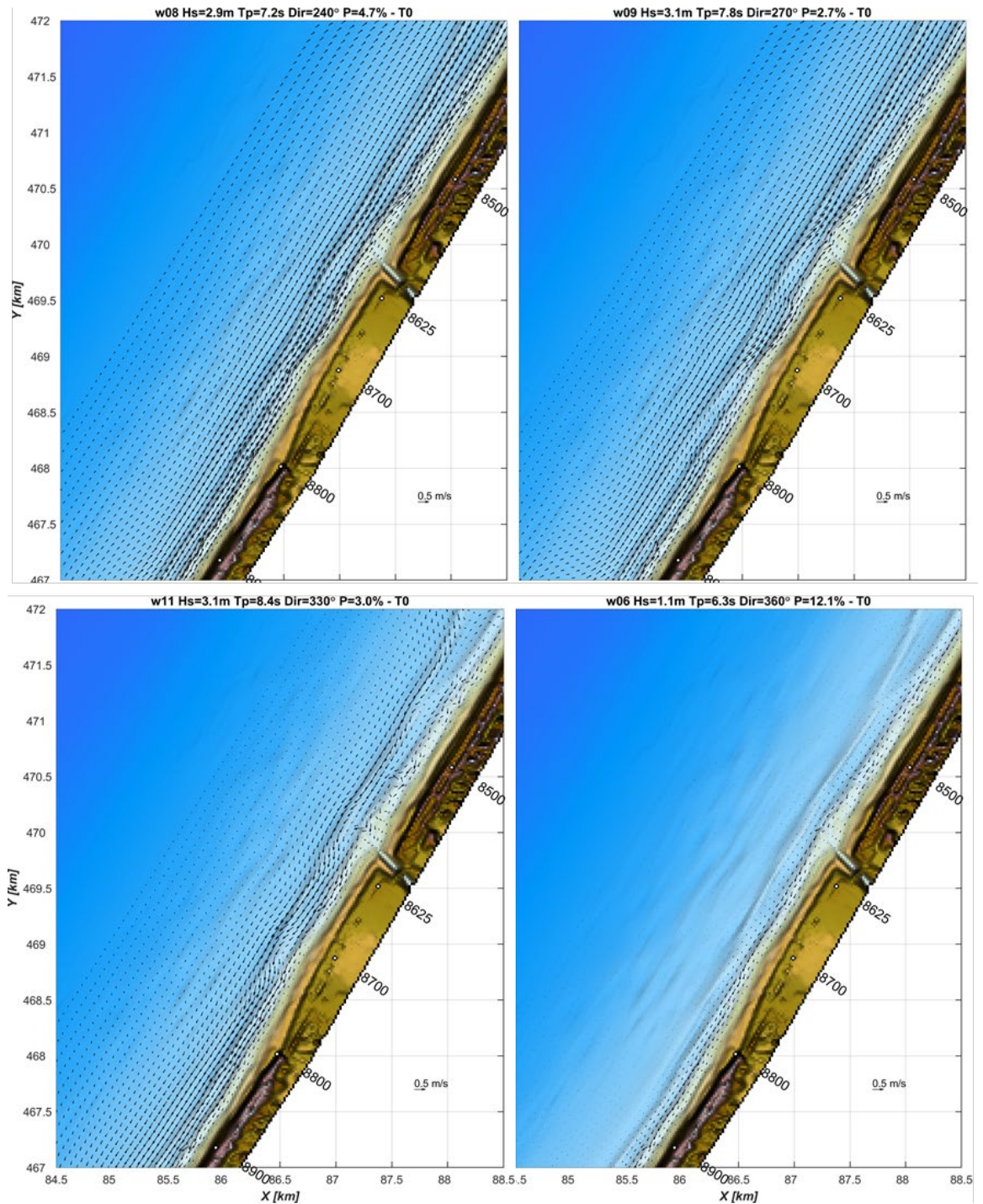
Figuur 3-9 – Jaargemiddelde golfhoogte en -richting (witte vectoren) voor het grootschalige domein (links) en bij Katwijk (rechts). Locatie van de dijk-in-duin constructie en uitwateringssluuis is weergegeven in zwart.

### 3.3.3 Getij en golfgedreven stromingen en transporten

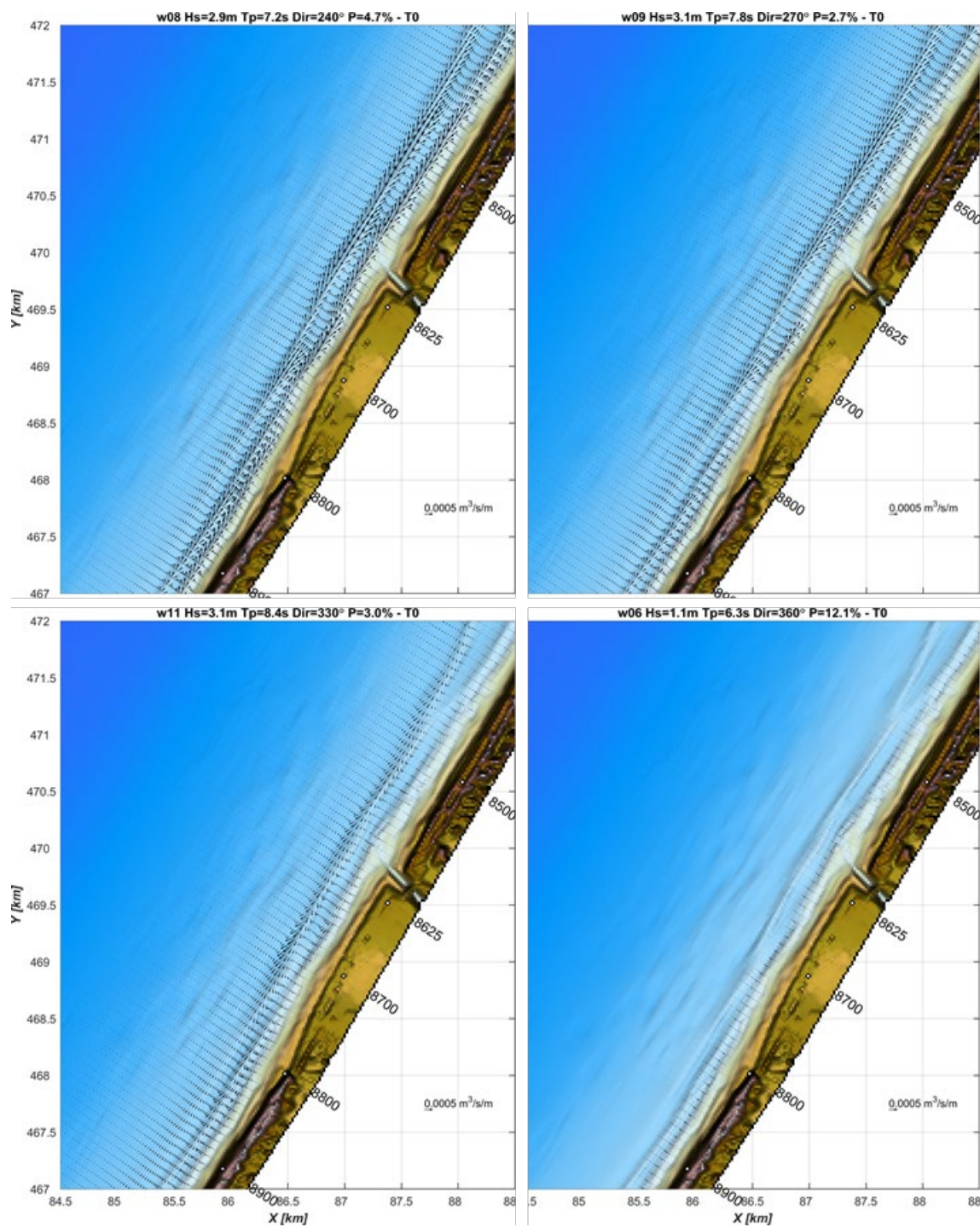
De invloed van golven op de sedimenttransporten wordt geïllustreerd aan de hand van de getijgemiddelde stromingen en transporten voor 4 geselecteerde golfcondities in Figuur 3-10 en Figuur 3-11. Deze golfcondities zijn representatief voor de patronen die optreden bij golven uit zuidwestelijke (w08 en w09) en uit noordelijke (w11 en w06) 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. Golfcondities uit het noorden resulteren in een zuidwaarts gerichte stroming, en golfcondities uit het westen resulteren in noordwaarts gerichte stroming.

Het verschil in grootte tussen de residuele stroming door golven versus de residuele stroming door alleen getij (Figuur 3-6 links en Figuur 3-10) 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 3-6 rechts en Figuur 3-11). 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.



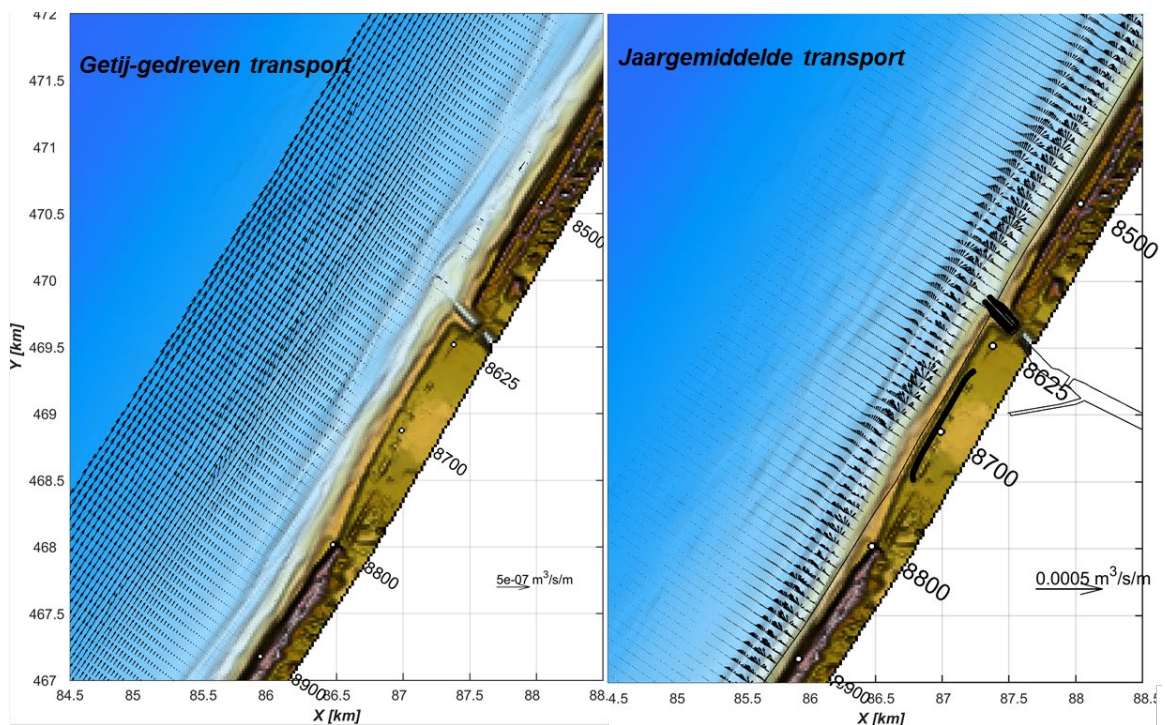
Figuur 3-10: Residuele (getijgemiddelde) stroming voor golfcondities representatief voor hoge en lage golven uit westzuidwest (boven, 8 en 9) en noordnoordwest (onder, 11 en 6).



Figuur 3-11: Residuele (getijgemiddelde) transporten voor golfcondities representatief voor hoge en lage golven uit westzuidwest (boven, 8 en 9) en noordnoordwest (onder, 11 en 6).

Het jaargemiddelde transport weergegeven in Figuur 3-12. Bij vergelijking tussen de transportpatronen door alleen getij (Figuur 3-12, links) versus het jaargemiddelde transport, dus inclusief de invloed van golven, (Figuur 3-12 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.

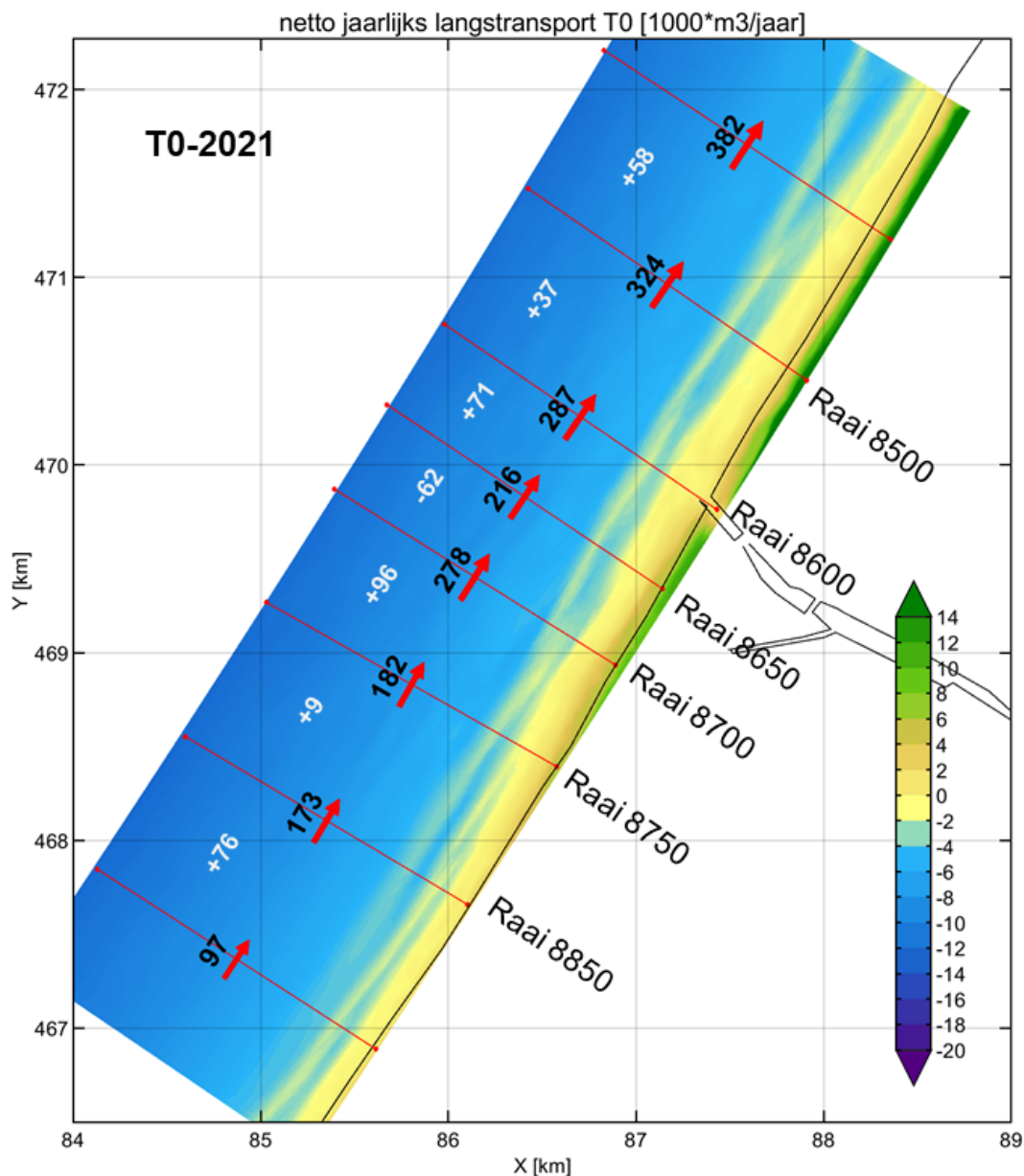
De modelresultaten worden gedomineerd door kustlangse transporten. Deze transporten zijn groter op de brekerbank en direct langs de kust. Bij de uitwateringssluis volgen de residuele transportpatronen de oriëntatie van de kustlijn. Er is hier geen duidelijke invloed van de uitwateringssluis op de transporten te zien. Er kan geconcludeerd worden dat de aanwezigheid van de uitwateringsgeul slechts een minimaal (geen) aantoonbaar effect op de transporten geeft. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de simulaties gedraaid zijn zonder spuidebiet. Het effect van het spuidebiet is hier dus niet meegenomen.



Figuur 3-12: Residuele transport over de getijperiode (links) en jaargemiddelde transport (inclusief golven, rechts) bij Katwijk op basis van de T0-2021 bodem. Locatie van de dijk-in-duin constructie en uitwateringssluis is weergegeven in zwart.

### 3.3.4 Netto jaarlijks langtransport

Een overzicht van het netto jaarlijks langtransport op basis van het getij en morfologisch golfklimaat is weergegeven in Figuur 3-13. De langtransporten zijn bepaald ter hoogte van 8 JARKUS raaien. De T0-2021 simulatie berekend een brandingstransport tussen 0,10 en 0,38 miljoen m<sup>3</sup>/jaar richting het noorden. Ten zuiden van de Zwakke Schakel versterking is het netto transport het laagst, en de transporten nemen toe in noordelijke richting. Een toenemend sedimenttransport (positieve witte getallen in Figuur 3-13) betekent dat hier sediment wordt opgepikt. Tussen raaien 8700 en 8650 vindt er wat depositie plaats, waarna het netto sedimenttransport weer toeneemt langs de uitwateringssluis richting het noorden.



Figuur 3-13: Berekende jaarlijkse gemiddelde langtransporten ter hoogte van de JARKUS raaien (rode lijnen), op basis van het morfologische getij en golfklimaat. De witte getallen geven de toename (+) of afname (-) in het netto sedimenttransport weer, en geeft aan of er respectievelijk sedimentatie of erosie plaatsvindt.

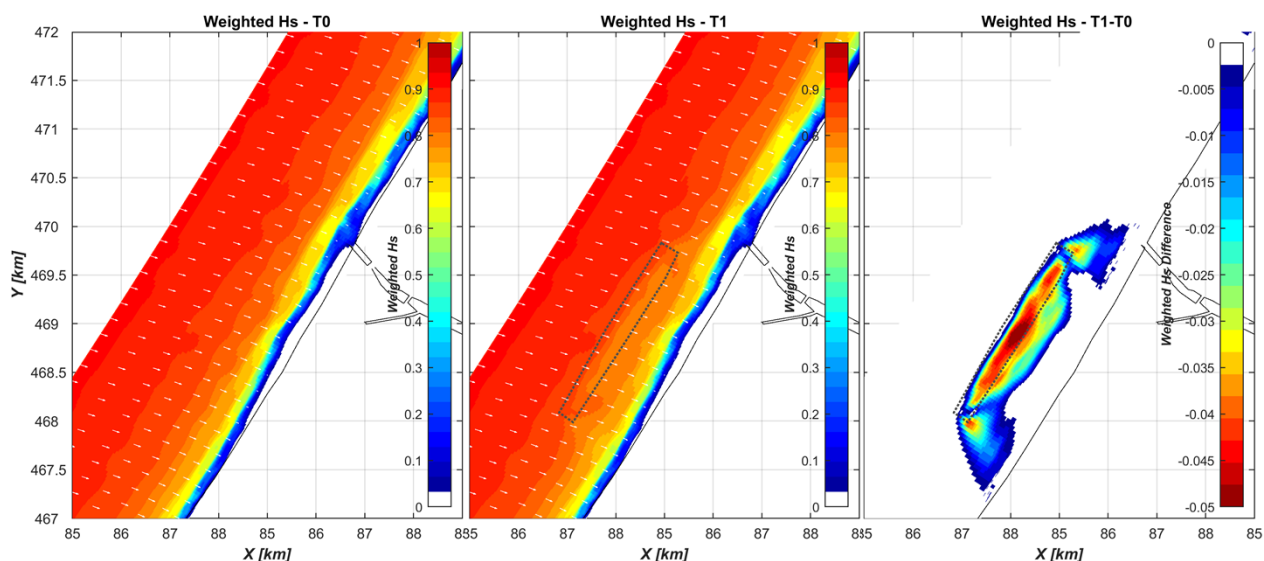


## 3.4 Invloed van de vooroeveroppletie (T1-2021)

### 3.4.1 Golven

Het effect van de vooroeveroppletie op het jaargemiddelde golfhoogte is beperkt (Figuur 3-14). De reductie in golfhoogte is maximaal ~5 cm, en vindt plaats op de vooroeveroppletie. De oppletie is zeewaarts van de bestaande brekerbank aangelegd. Golven breken nu iets verder zeewaarts op de vooroeveroppletie in plaats van op de brekerbank.

Het beperkte effect op de golfhoogtereductie wordt veroorzaakt doordat golfbreking op een vooroeveroppletie op ~4m water diepte alleen optreedt bij hoge golven. In het morfologisch golfklimaat hebben de hoogste golfcondities de laagste weging, waardoor deze het minst bijdragen aan de reductie in het jaargemiddelde golfhoogte. In paragraaf 3.4.4 wordt nog bekeken wat het effect van de vooroeveroppletie onder meer extreme golfcondities.

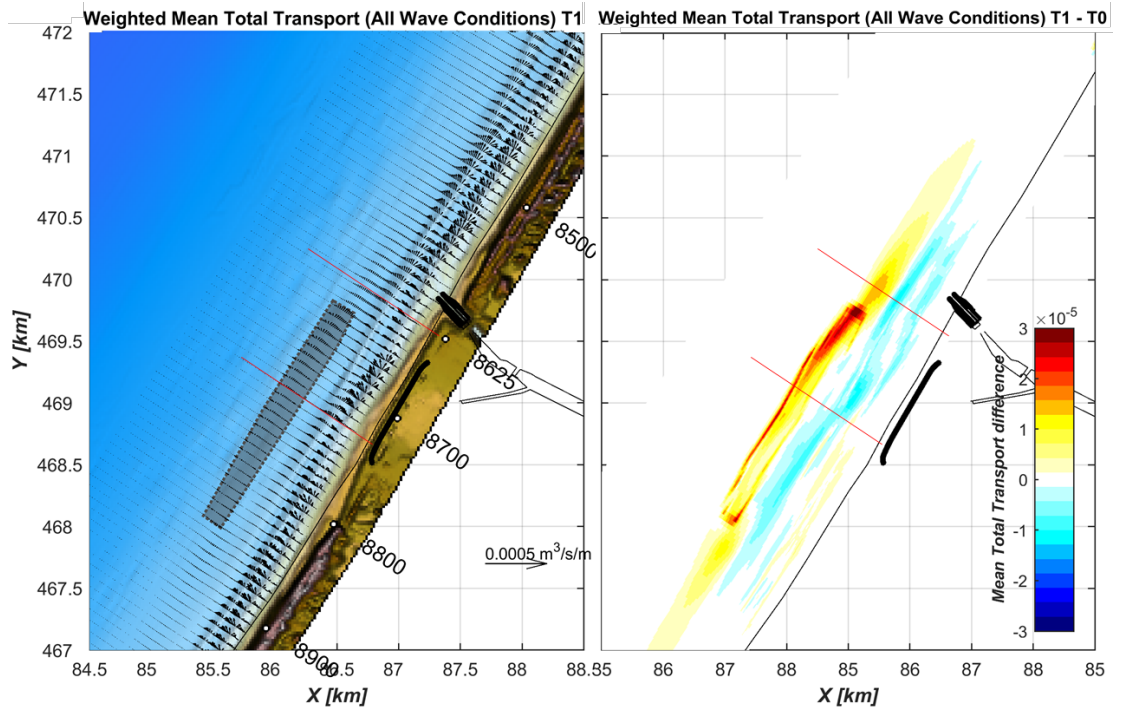


Figuur 3-14: Jaargemiddelde golfhoogte voor de T0-2021 (links), T1-2021 (midden) en het verschil tussen T1 en T0 (rechts). Let op het verschil in kleurschema.

### 3.4.2 Sedimenttransport

De verschillen in stroming en sedimenttransport tussen T0-2021 en T1-2021 zijn beperkt. Een samenvatting van de invloed van de vooroeveroppletie op het jaargemiddelde sedimenttransport (het gewogen transport over alle golfcondities) is gegeven in Figuur 3-15. De residuele (getijgemiddelde) sedimenttransporten per individuele golfconditie zijn te vinden in Appendix A.2.

De residuele transportvectorvelden voor de T0-2021 en T1-2021 vertonen grote overeenkomsten (Figuur 3-12 rechts en Figuur 3-15 links). In beide simulaties vindt er een netto noordwaarts transport langs de kust plaats en op de voorliggende brekerbank. De verschillen in de grootte van de residuele transporten tussen T1-2021 en T0-2021 (Figuur 3-15 rechts) laten een toename van het transport (rood en gele kleur) op de vooroeveroppletie zien, veroorzaakt door golfbreking. Tussen de oppletie en het strand is vervolgens een afname van het residuele transport.

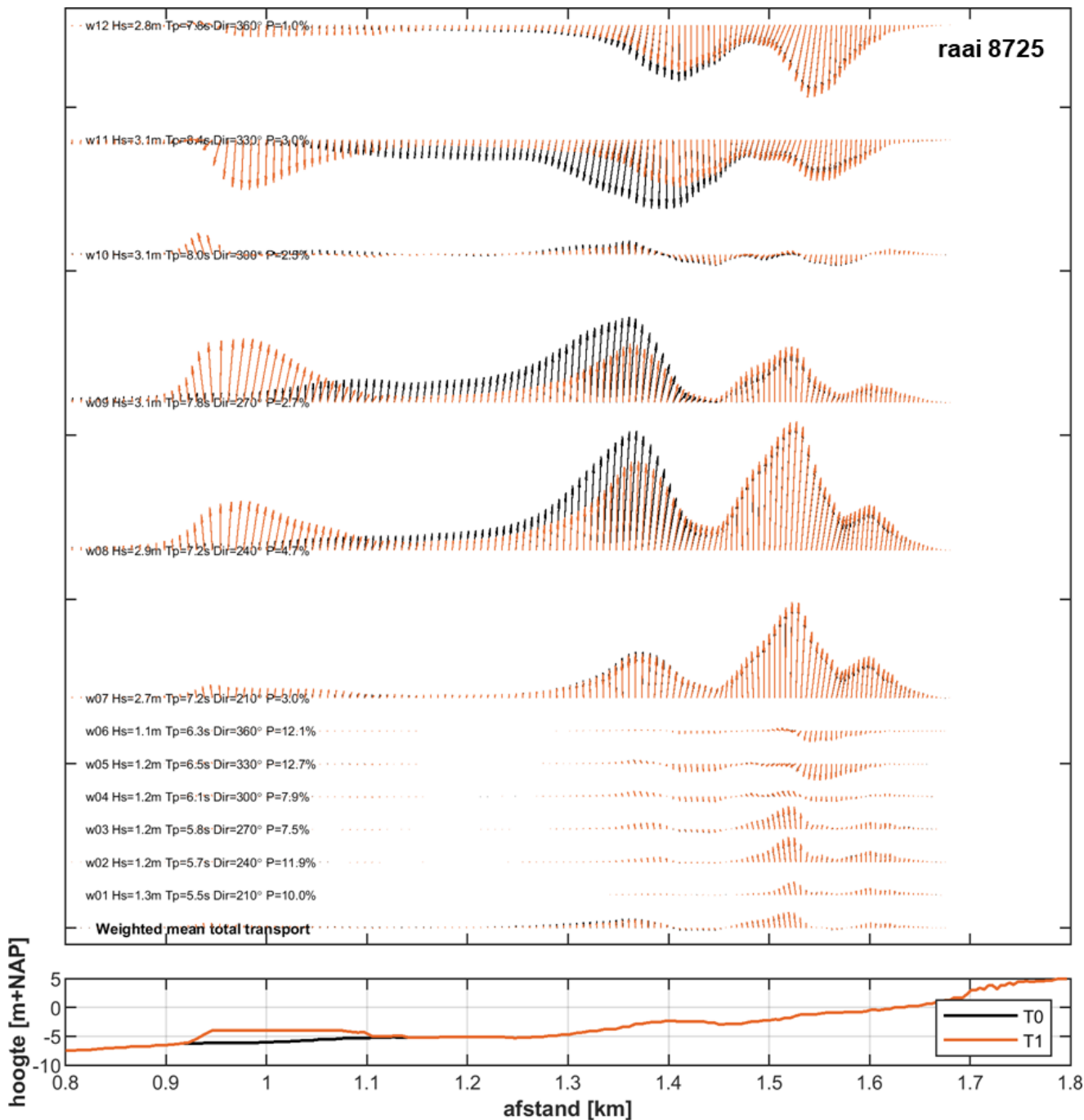


Figuur 3-15: Residuele jaargemiddelde sedimenttransporten inclusief vooroeversuppletie (links) en het verschil in tussen T1-2021 en T0-2021 in residuele transport.

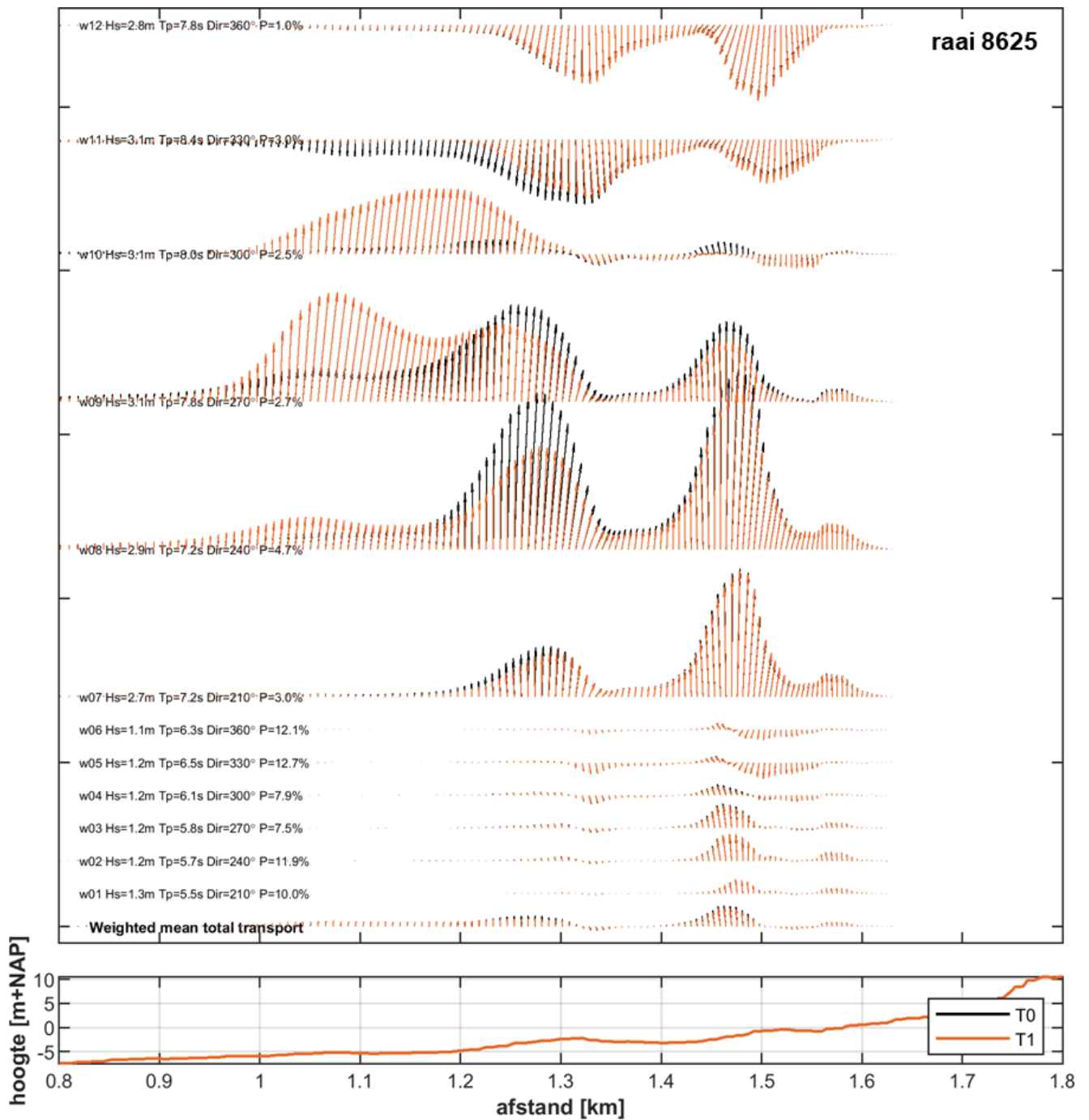
Om het effect van de individuele golfcondities op de transportvectoren ter hoogte van de vooroeversuppletie en bij de uitwateringssluis beter in kaart te brengen, zijn de transportvectoren langs raaien 8625 en 8725 weergegeven in Figuur 3-16 en Figuur 3-17.

Bij raai 8725 (Figuur 3-16) is te zien dat de transportvectoren voor de T1-2021 simulatie sterk toenemen ter hoogte van de vooroeversuppletie bij KM 1 (zie afstand langs het dwarsprofiel), vooral door golfbreking onder de hoge golfcondities (w07 tot w12). Dit zorgt ervoor dat de transportvectoren in de T1-2021 simulatie kleiner worden ter hoogte van de al aanwezige brekerbank (KM 1.3 tot 1.4). De vooroeversuppletie verlegt eigenlijk de brekerbank zeewaarts. Onder lage golven (w01 tot w06) is golfbreking op de bank en ook op de vooroeversuppletie beperkt. In de kustzone zijn de transporten voor de T0-2021 en T1-2021 vrijwel identiek.

Raai 8625 ligt net ten zuiden van de uitwateringssluis (Figuur 3-15). De vooroeversuppletie ligt niet in dit profiel, maar heeft wel een effect op de transportvectoren in de T1-2021 simulatie (Figuur 3-17). De vooroeversuppletie zorgt voor een toename van de transportvectoren op dieper water (KM 1.0 – 1.1) voor de hoge golven uit zuidwestelijke richting (w028, w09 en w10). Het transport op de bestaande brekerbank (KM 1.3) neemt hier ook af in de T1-2021 simulatie. Op het strand is er een kleine afname van de transportvectoren te zien voor de hoge golfcondities uit zuidwestelijke richting. Het jaargemiddelde sedimenttransport (gewogen transport over alle golfcondities) voor deze raai laat ook een kleine afname van het transport ter hoogte van de brekerbank en strand zien voor de T1 simulatie ten opzichte van de T0 simulatie. Er is geen duidelijke verandering in de transportrichting te zien tussen de T0-2021 en T1-2021 simulatie.



Figuur 3-16 Residuele (getijgemiddelde) transporten voor alle golfcondities (individuele condities en jaargemiddelde condities) ter hoogte van raai 8725 (locatie aangegeven in Figuur 3-15 met een rode lijn). T0-2021 vectoren in zwart, T1-2021 vectoren in oranje.



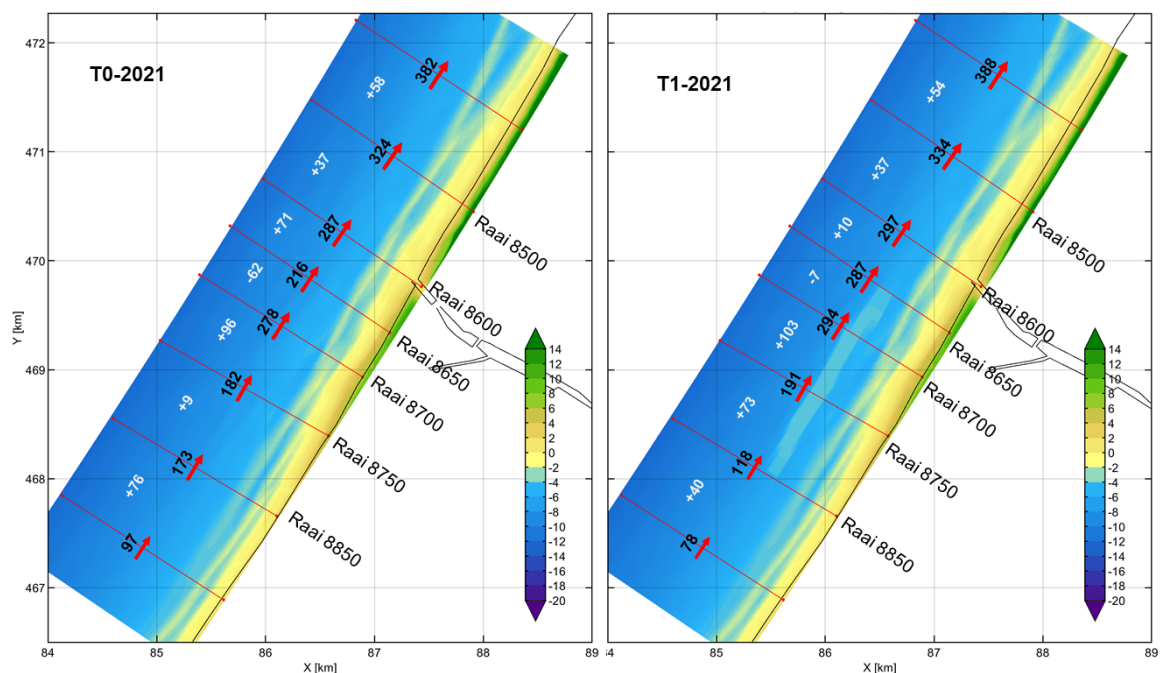
Figuur 3-17 Residuele (getijgemiddelde) transporten voor alle golfcondities ter hoogte van raai 8625 (locatie aangegeven in Figuur 3-15 met een rode lijn). T0-2021 vectoren in zwart, T1-2021 vectoren in oranje.

### 3.4.3 Netto jaarlijks langtransport

Net zoals voor de T0-2021 simulatie, is het netto jaarlijks langtransport berekend voor de T1-2021 simulatie op basis van het getij en morfologisch golfklimaat (Figuur 3.18). De netto jaarlijkse langtransporten per raai voor de T1-simulatie (zwarte getallen) laten dezelfde grootschalige trends zien als de T0; ten zuiden van de Zwakke Schakel versterking is het netto transport het laagst, en het neemt toe richting het noorden.

De grootste verandering in netto langtransport ten gevolge van de vooroeversuppletie treedt op ter hoogte van de vooroeversuppletie, tussen raaien 8850 en 8700 wordt een toename van het netto langtransport (positieve witte getallen in Figuur 3.18) berekend ten gevolge van de vooroeversuppletie. Er wordt hier dus meer (~71.000 m<sup>3</sup>/jaar) sediment opgepikt na aanleg van de vooroeversuppletie. Bij de uitwateringssluis treden er relatief kleine veranderingen op in de trends, maar ten noorden van de uitwateringssluis is het netto jaarlijks transport voor de T0-2021 en T1-2021 simulatie nagenoeg gelijk.

Een belangrijke conclusie op basis van de gemodelleerde transporten is dat de vooroeversuppletie niet zorgt voor een significante verandering van de sedimenttransporten. Er is ~600.000 m<sup>3</sup> sediment toegevoegd, maar de verliezen uit het kustvak blijven vrijwel gelijk aan de T0-2021. Rondom de vooroeversuppletie zijn er wel veranderingen in de netto langtransporten te zien, maar uit de transportvectoren in Figuur 3-16 en Figuur 3-17 volgt dat de grootste veranderingen in het transport tussen de T0-2021 en T1-2021 voornamelijk optreden op de vooroever. Op basis van deze modelresultaten is er geen indicatie dat de uitwateringssluis direct zal verzanden ten gevolge van de vooroeversuppletie onder jaargemiddelde condities.

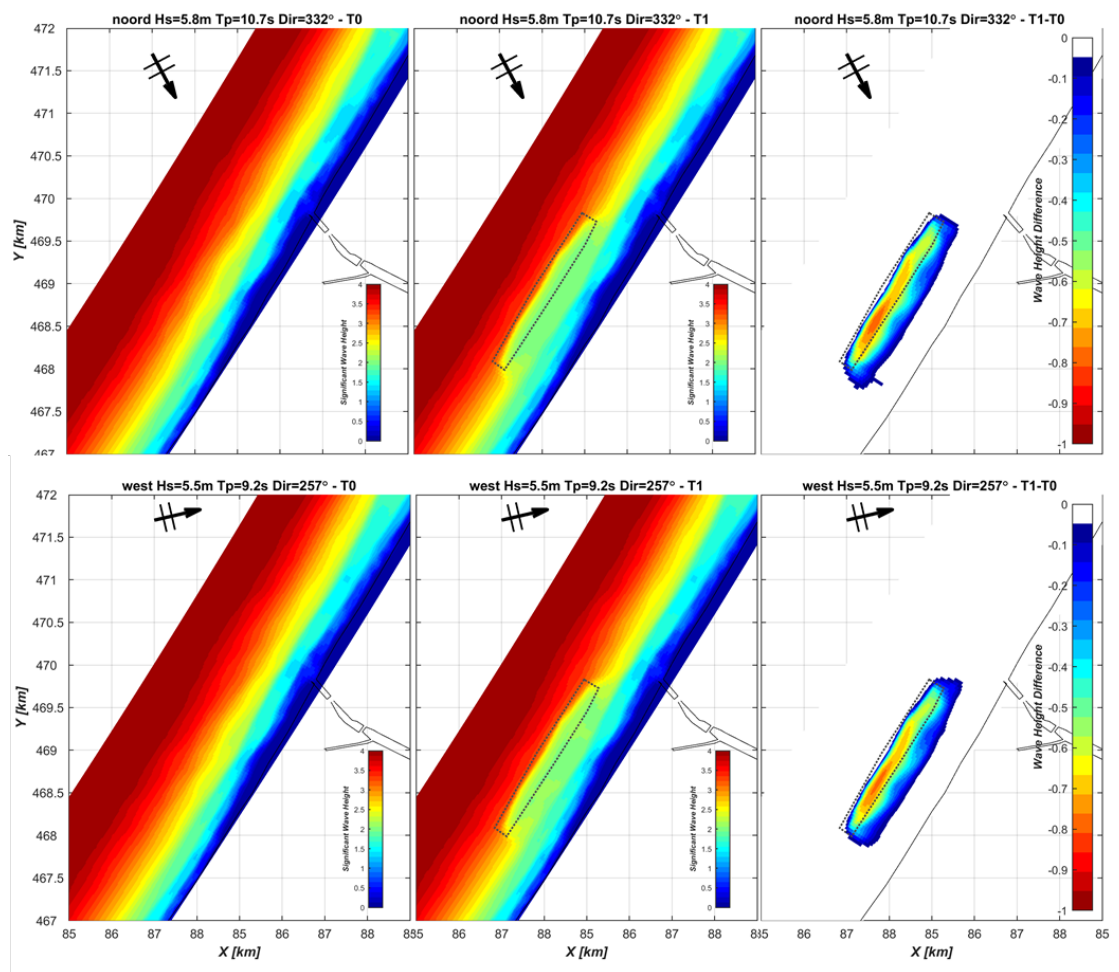


Figuur 3.18 – Berekende jaarlijks-gemiddelde langtransporten [1000 m<sup>3</sup>/jaar] voor T0-2021 (links, gelijk aan Figuur 3.13) en T1-2021 (rechts) ter hoogte van de JARKUS raaien (rode lijnen), op basis van het morfologische getij en golfklimaat. De witte getallen geven de toename (+) of afname (-) in het netto sedimenttransport weer, en geeft aan of er respectievelijk sedimentatie of erosie plaatsvindt.

### 3.4.4 Invloed van stormcondities

De berekeningen in de voorgaande paragrafen zijn uitgevoerd voor jaargemiddelde golfcondities, en laten zien dat de veranderingen in het residuele sedimenttransport ten gevolge van de vooroever-suppletie voornamelijk worden bepaald door de hogere golfcondities. Het effect van de vooroever-suppletie op de sedimenttransporten tijdens meer extreme golfcondities (met een lage kans van voorkomen) is ook onderzocht door de simulaties uit te voeren voor twee representatieve stormcondities, i.e. één uit noordelijke richting en westelijke richting (Tabel 3-2).

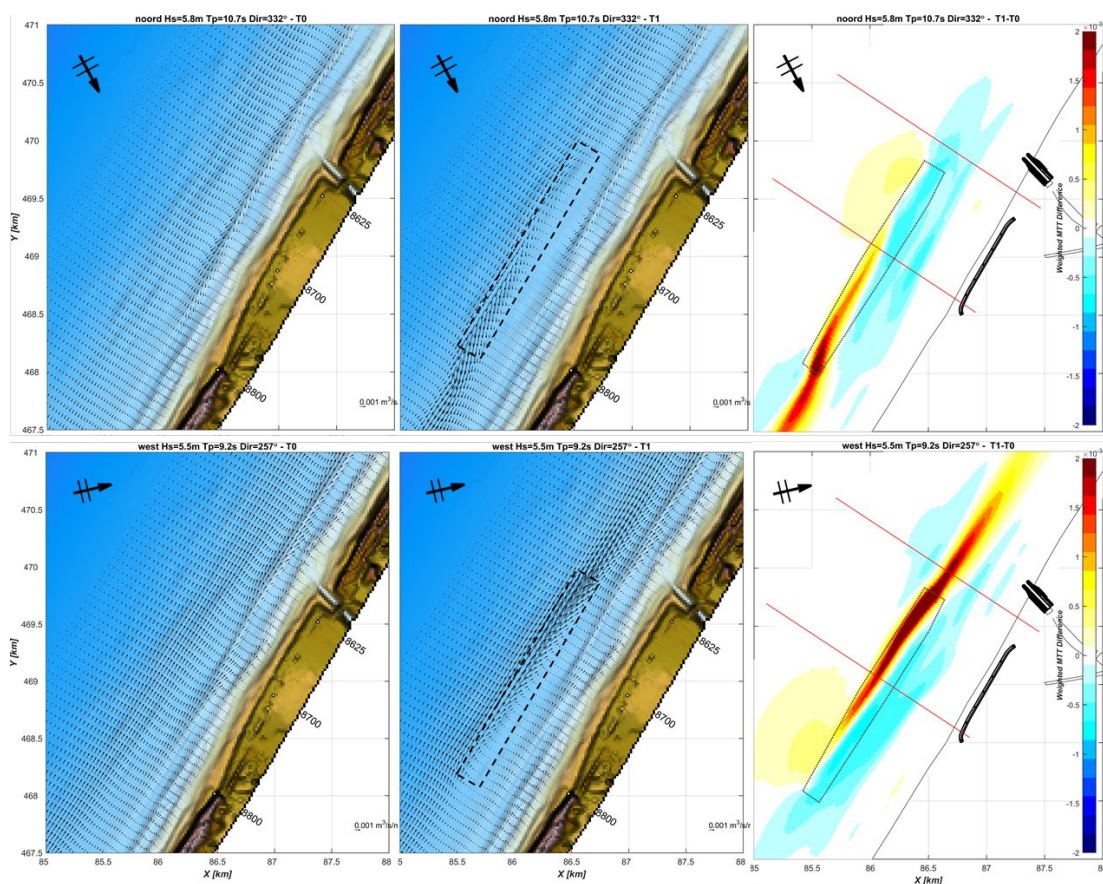
Het effect van de vooroever-suppletie de golfhoogte aanzienlijk groter bij stormcondities (Figuur 3-19). De golfhoogte reductie op de vooroever-suppletie is maximaal 1 m, onder de jaargemiddelde golfcondities was dit maximaal ~5 cm. De golven breken bij de T1-2021 simulatie verder zeewaarts op de vooroever-suppletie in plaats van op de brekerbank in T0-2021, dit zorgt voor een afname van de golfhoogte in de ondiepe kustzone direct landwaarts van de suppletie.



Figuur 3-19 – Golfhoogte ontwikkeling bij een stormconditie uit noordelijke richting (boven) en westelijke richting (onder) voor de T0-2021 (links), T1-2021 (midden) en het verschil tussen T1 en T0 (rechts).

De invloed van de vooroever-suppletie op het residuele sedimenttransport onder de twee representatieve stormcondities is weergegeven in Figuur 3-20. Voor de stormconditie met golven uit het noorden vindt er een zuidwaarts transport plaats voor zowel de T0-2021 en T1-2021, overeenkomend met de golfrichting. De verschillen in de grootte van de residuele transporten tussen T1-2021 en T0-2021 (Figuur 3-20, rechtsboven) laten een toename van het

transport (rood en gele kleur) op de zuidelijke helft van de vooroeverstapeling zien, veroorzaakt door golfbreking. Voor de stormconditie met golven uit het westen is een vergelijkbaar patroon in transport te zien, alleen nu richting het noorden en met de grootste verschillen in transport op de noordelijke helft van de stapeling. Voor beide stormcondities is er een duidelijke afname van het transport in de ondiepe kustzone (tussen de stapeling en het strand) te zien ten gevolge van de vooroeverstapeling (blauwe kleur in Figuur 3-20, rechtsonder).



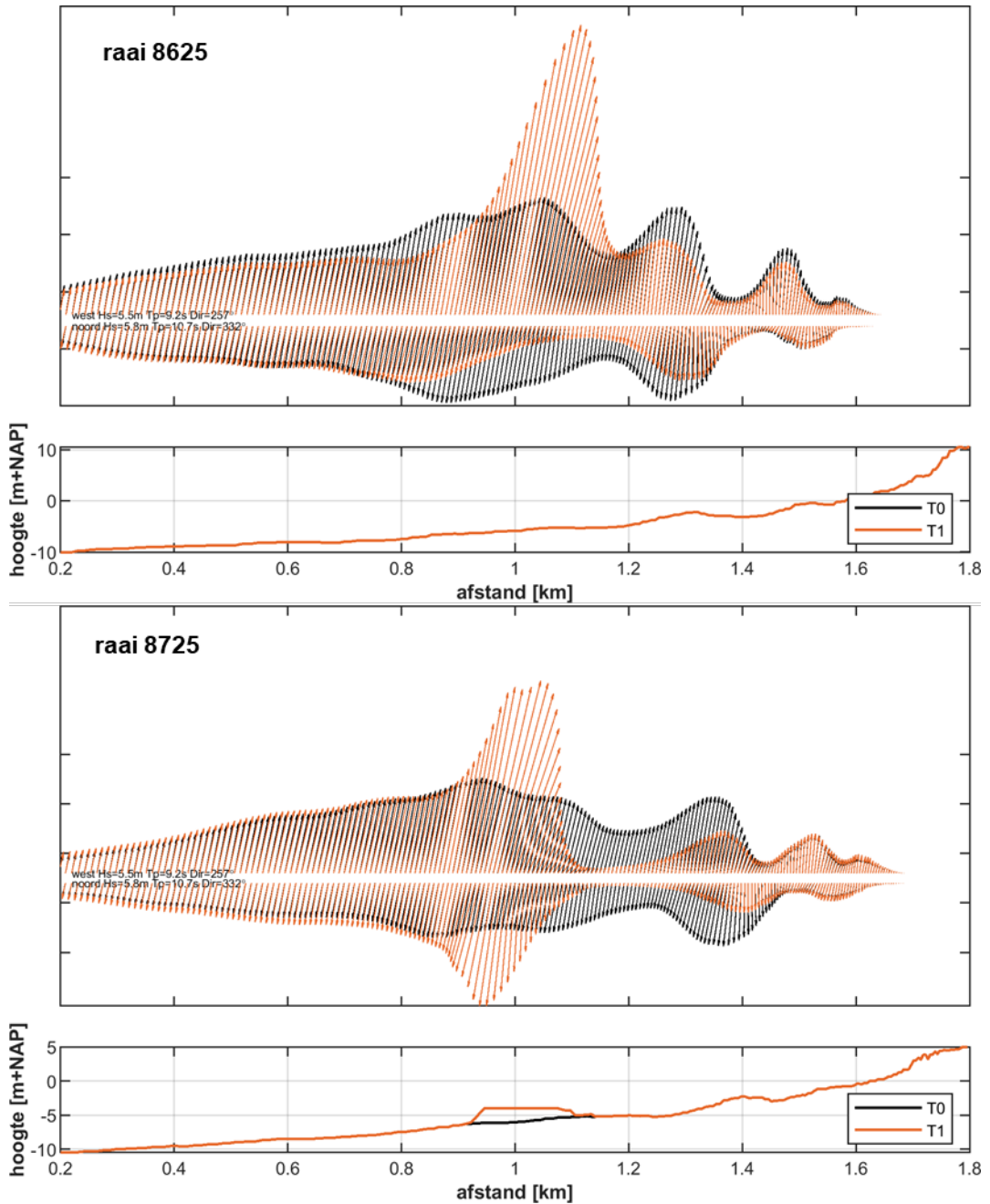
*Figuur 3-20: Residuele sedimenttransporten voor een representatieve stormcondities uit het noorden (boven) en westen (onder) bij de T0-2021 bodem (links), T1-2021 bodem (inclusief vooroeverstapeling, midden) en het verschil tussen T1-2021 en T0-2021 in residuele transport (rechts).*

Het effect van de vooroeverstapeling op de transportvectoren langs raaien 8625 en 8725 voor de twee stormcondities is weergegeven in Figuur 3-21. Raai 8725 ligt bij de vooroeverstapeling en laat zien dat de transportvectoren voor de T1-2021 simulatie sterk toenemen op de vooroeverstapeling (KM 1) voor beide stormcondities. Door de sterke golfbreking op de vooroeverstapeling neemt het transport bij de brekerbank sterk af in de T1-2021 simulatie. Bij het strand zijn de transportvectoren voor de T0-2021 en T1-2021 vrijwel identiek.

Bij raai 8625, net ten zuiden van de uitwateringsslus, heeft de vooroeverstapeling het grootste effect bij een westelijke storm. Het transport op de vooroeverstapeling neemt sterk toe, en bij de brekerbank en het strand neemt het transport weer wat af. Net zoals bij de jaargemiddelde condities, treden de grootste veranderingen in het transport op bij de vooroever. De vooroeverstapeling lijkt niet te resulteren in significante zanduitwisseling met de kust en de uitwateringsslus bij Katwijk.

Op basis van deze modelresultaten kan geconcludeerd worden dat een vooroeverstapeling niet leidt tot meer verzanding van de uitwateringsslus dan al in de T0-2021 situatie plaatsvindt.

Een belangrijke kanttekening is wel dat met de huidige model-aanpak geen morfologische veranderingen zijn gesimuleerd, alleen de sedimenttransporten bij een ontwerp vooroeversuppletie met een statische bodem. Uit de T0-analyse van de JARKUS-data volgt dat beide voorgaande vooroeversuppleties al snel na aanleg in hoogte afnam, en dat dezelfde ontwikkeling te verwachten is bij een volgende vooroeversuppletie. Dit betekent dat de modelresultaten in dit rapport representatief zijn voor de initiële ontwikkelingen na aanleg van de vooroeversuppletie.



Figuur 3-21 Residuele (getijgemiddelde) transporten voor de representatieve stormconditie uit het noorden en westen ter hoogte van raai 8625 (boven) en raai 8725 (onder, locatie aangegeven in Figuur 3-20 met een rode lijn). T0-2021 vectoren in zwart, T1-2021 vectoren in oranje.

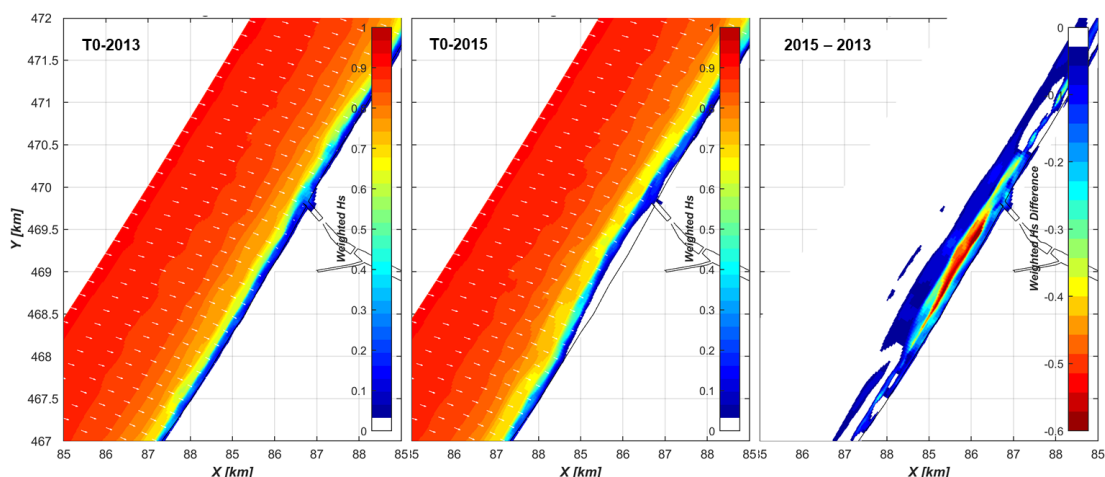


## 3.5 Invloed van de Zwakke Schakel versterking

### 3.5.1 Golven

Het effect van de Zwakke Schakelversterking op het jaargemiddelde golfhoogte is beperkt (Figuur 3-22). De golfhoogte reductie is maximaal ~60 cm, maar dit is ter hoogte van de het zeewaarts uitgebouwde strand en ligt in de T0-2015 bodem niet onder water. Wel breken de golven in de T0-2015 simulatie iets verder zeewaarts op de vooroever ten opzichte van de T0-2013 simulatie, dit wordt veroorzaakt door het zeewaarts verplaatsen van het strand- en vooroeverprofiel.

Net zoals bij het simulaties met een vooroeversuppletie (T1-2021) wordt het beperkte effect op de golfhoogtereductie veroorzaakt doordat golfbreking alleen optreedt bij hoge golven. In het morfologisch golfklimaat hebben de hoogste golfcondities de laagste weging, waardoor deze het minst bijdragen aan de reductie in het jaargemiddelde golfhoogte.



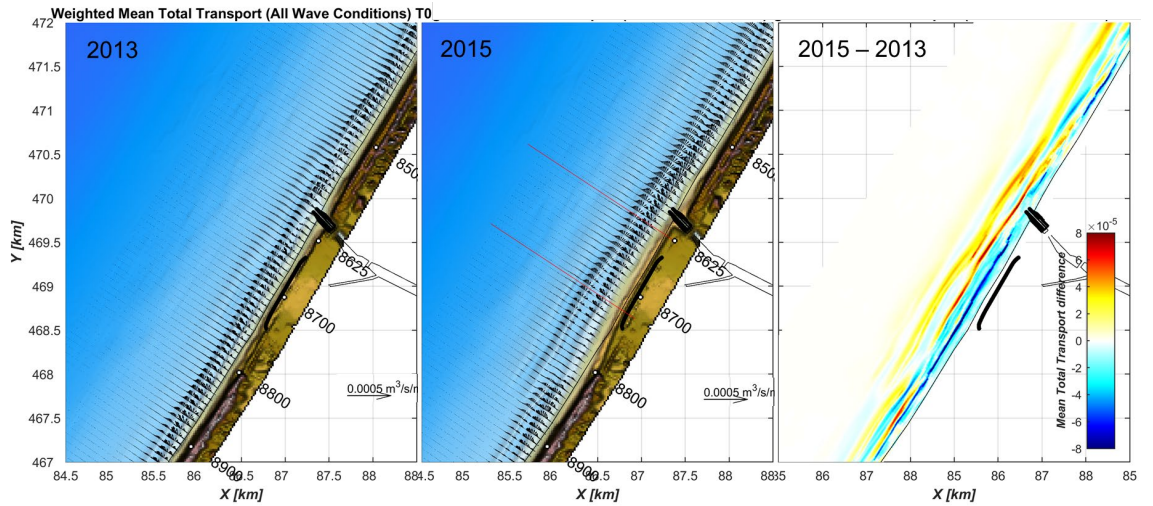
Figuur 3-22 – Jaargemiddelde golfhoogte voor de T0-2021 (links), T1-2021 (midden) en het verschil tussen T1 en T0 (rechts).

### 3.5.2 Sedimenttransport

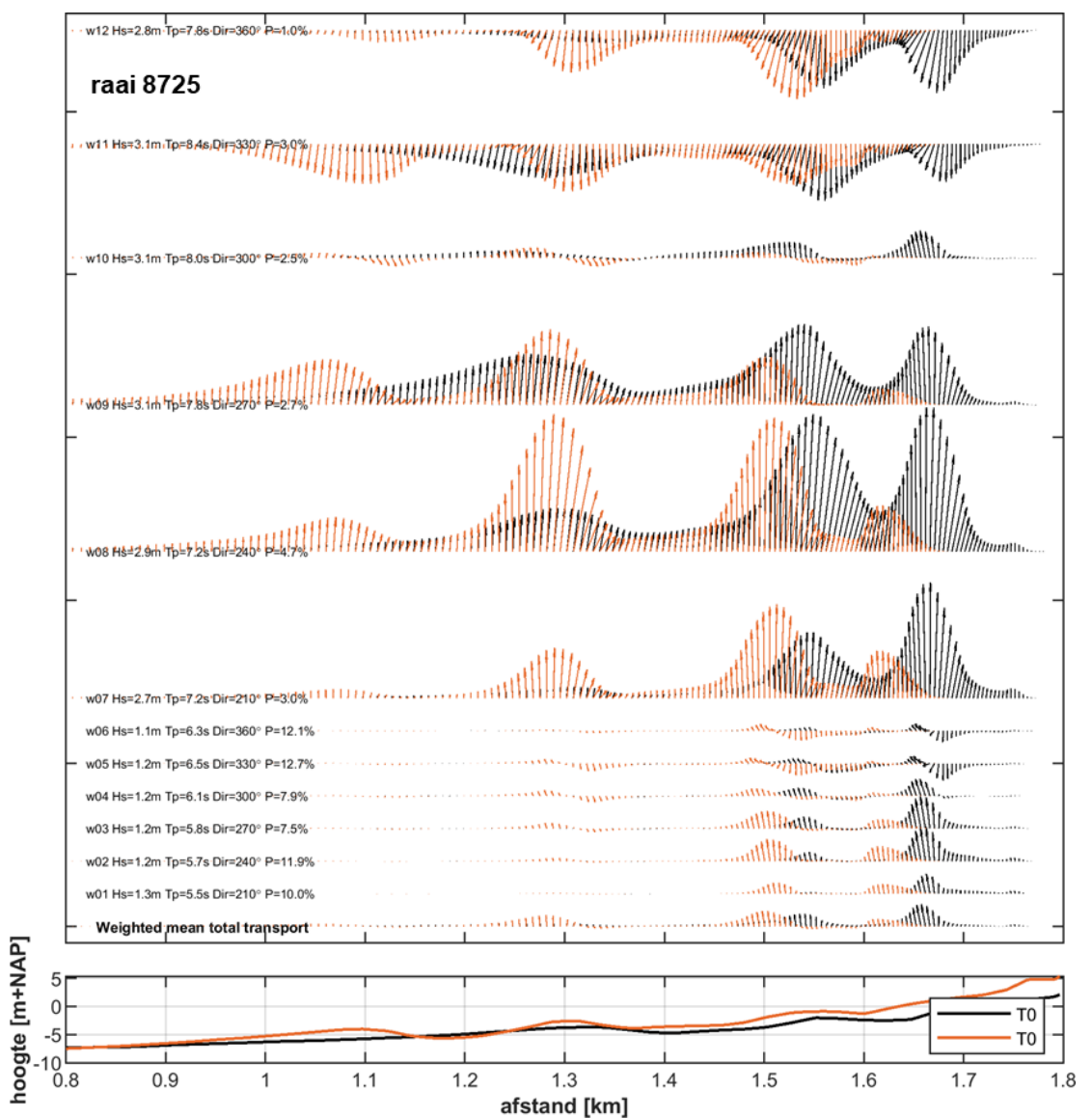
Het jaargemiddelde sedimenttransport (het gewogen transport over alle golfcondities) voor T0-2013 en T0-2015 is weergegeven in Figuur 3-23. De jaargemiddelde transporten domineren de brandingszone (op de brekerbank en direct langs de kust) en zijn noordelijk gericht. De verschillen tussen T0-2013 en T0-2015 worden gekarakteriseerd door het zeewaarts uitbouwen van het kustprofiel in de T0-2015 bodem (Figuur 3-23 rechts), het residuele transportpatroon verschuift zich zeewaarts.

Het zeewaarts verschuiven van het transportveld is goed te zien in de transportvectoren langs raai 8725 (Figuur 3-24). In T0-2013 (zwarte vectoren) vindt het transport vooral plaats op het strand (KM 1.65) en de brekerbank (KM 1.55). Na aanleg van de versterking (T0-2015, oranje vectoren in Figuur 3-24) verschuift het strandprofiel zeewaarts, en de transportvectoren ook. Ook is te zien dat de transportvectoren groter worden ter hoogte van de nieuwe locatie van de brekerbank (KM 1.3 en 1.5) en de vooroeversuppletie aangelegd in 2014 (KM 1.1).

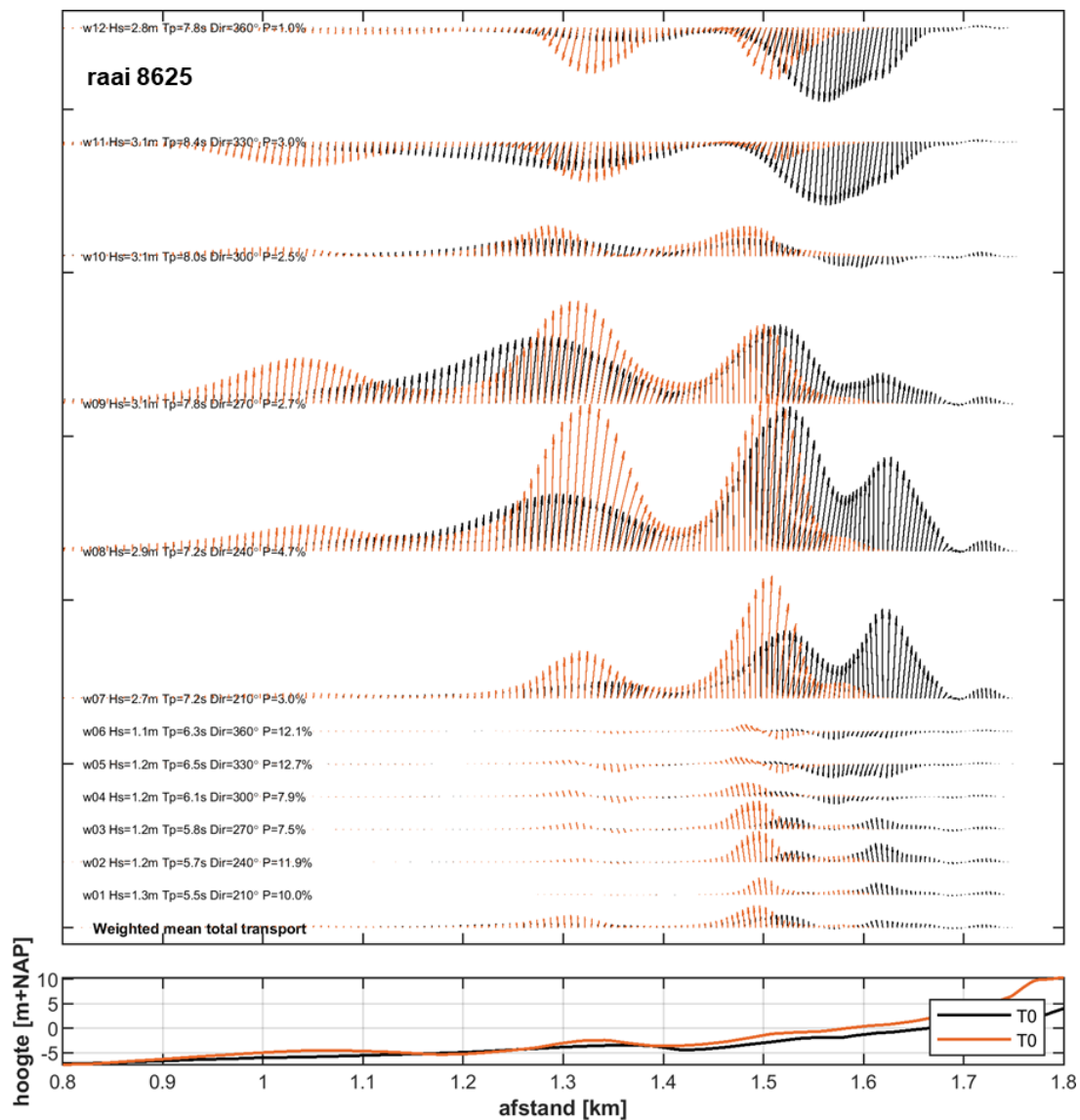
De transportvectoren langs raai 8600 laten dezelfde zeewaartse verschuiving zien na aanleg van de Zwakke Schakel versterking (Figuur 3-25). Als onderdeel van de Zwakke Schakel versterking is het kanaal van de uitwateringssluiss verlengd met 50m, en is het strandprofiel zeewaarts verplaatst.



Figuur 3-23: Residuele jaargemiddelde sedimenttransporten inclusief vooroeversuppletie (links) en het verschil in tussen T0-2015 en T0-2013 in residuele transport.



Figuur 3-24 Residuele (getijgemiddelde) transporten voor alle golfcondities ter hoogte van raai 8725 (locatie aangegeven in Figuur 3-23 met een rode lijn). T0-2013 vectoren in zwart, T1-2015 vectoren in oranje.



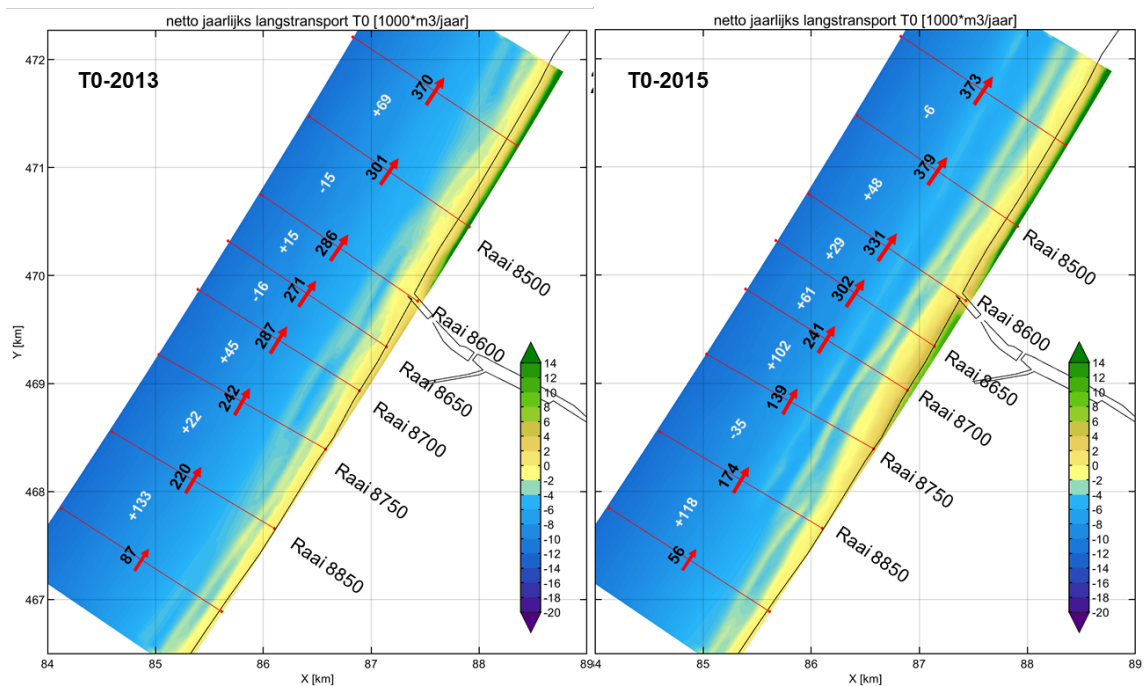
Figuur 3-25 Residuele (getijgemiddelde) transporten voor alle golfcondities ter hoogte van raai 8625 (locatie aangegeven in Figuur 3-23 met een rode lijn). T0-2013 vectoren in zwart, T1-2015 vectoren in oranje.

### 3.5.3 Netto jaarlijks langstransport

Het netto jaarlijks langstransport is berekend voor de T0-2013 en T0-2015 simulatie op basis van het getij en morfologisch golfklimaat (Figuur 3.26). Hieruit volgt dat het netto jaarlijks langstransport ter hoogte van de Zwakke Schakel versterking is toegenomen, van +45, -16, +15 \*10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/jaar tussen raaien 8750 en 8600 in T0-2013 naar +102, +61 +29 \*10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/jaar in de T0-2015 simulatie. Er is tussen deze raaien sediment toegevoegd aan het kustvak voor de versterking, en dus wordt meer sediment opgepikt in het model.

Over het hele gebied gezien blijven de algemene trends hetzelfde, ten zuiden van de Zwakke Schakel versterking is het netto transport het laagst, en het neemt toe richting het noorden. Het netto jaarlijks langstransport in de meest noordelijke raai blijft vrijwel gelijk voor de T0-2013 en T0-2015 simulatie. In de meest zuidelijke raai neemt het netto transport in de T0-2015 af met 31.000 m<sup>3</sup>/jaar ten opzichte van de T0-2013. Dit wordt veroorzaakt doordat er door de golfcondities uit het noorden meer transport richting het zuiden plaatsvindt na het toevoegen van sediment bij de versterking. Het zuidelijk gerichte component van het bruto transport neemt dan toe, waardoor het netto noordelijk gerichte transport afneemt.

Op basis van de modelresultaten is te zien dat de Zwakke Schakel versterking heeft geresulteerd in een toename van het netto jaarlijks langstransport uit het kustvak van ~30.000 m<sup>3</sup>/jaar. Voor de versterking is in totaal 4,7 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd (2,5 miljoen m<sup>3</sup> versterking en 2,2 miljoen m<sup>3</sup> vooroeversuppletie), dus het jaarlijks verlies is relatief klein ten opzichte van het totaal aangebrachte volume sediment. Dit komt redelijk overeen met de geobserveerde (relatief) stabiele MKL-ontwikkeling na aanleg van de versterking, zie Hoofdstuk 2.4.



Figuur 3.26 – Berekende jaarlijks-gemiddelde langstransporten [1000 m<sup>3</sup>/jaar] voor T0-2013 (links) en T0-2015 (rechts) ter hoogte van de JARKUS raaien (rode lijnen), op basis van het morfologische getij en golfklimaat. De witte getallen geven de toename (+) of afname (-) in het netto sedimenttransport weer, en geeft aan of er respectievelijk sedimentatie of erosie plaatsvindt.

### 3.5.4 Discussie van de modelresultaten

Uit de modelering volgt dat een netto noordwaarts transport overheerst nabij de kust van Katwijk. Dit transport neemt van zuid naar noord toe. Het transportpatroon is daarbij relatief simpel. De maximale transporten treden op, waar golfbreking optreedt. In de T0 is dit op de natuurlijke brekerbank en direct op de kust. Door aanleg van de vooroeversuppletie vindt er golfbreking op de suppletie plaats en ontstaat hier dan ook een gebied met sedimenttransport. De transporten op de natuurlijke brekerbank nemen dan iets af. De transporten worden op dieper water over een groter gebied uitgesmeerd. De transporten op diep water hebben geen invloed op de uitwateringskanaal. De transporten bij het uitwateringskanaal worden alleen beïnvloed door de transporten die direct langs de kust plaatsvinden. Deze transporten worden nauwelijks beïnvloed door aanleg van de suppletie. Het is dan ook niet de verwachting dat de uitwateringsgeul een ander gedrag vertoont na aanleg van de suppletie of dat de sedimentatie hier sterk gaat toenemen.

De modelsimulaties zijn gebaseerd op een morfostatische aanpak, gebruikmakend van de T1 bodem direct na aanleg. De T1 simulatie representeert dus een situatie die maximaal uit evenwicht is met de natuurlijke processen. Dit is de meest ongunstige situatie die kan optreden. Uit de data-analyse blijkt dat de vooroeversuppletie waarschijnlijk snel opgenomen zal worden in het natuurlijke systeem. Er zullen nieuwe natuurlijke banken vormen waardoor verstoring van de sedimenttransporten slechts een beperkte tijd aanwezig zal zijn. De resultaten van de modelering tonen aan dat zelfs in de meest ongunstige configuratie er geen aantoonbaar effect op de aanzanding van de uitwateringsgeul zal optreden.

Een aantal aanvullende gevoeligheidssommen geeft nog aanvullend inzicht in de werking van het morfologische systeem. De vooroeversuppletie heeft slechts een beperkt effect onder jaargemiddelde condities. De suppletie kan echter wel voor een significante reductie van de golfenergie zorgen onder (zware) stormcondities. Vanuit dit oogpunt kan de suppletie bijdragen aan de kustveiligheid van de achterliggende kust. Golfbreking op de suppletie zorgt onder deze omstandigheden voor een significante reductie van de transporten landwaarts van de suppletie.

Modelering van de Zwakke Schakel versterking laat zien dat de veranderingen in het kustprofiel ervoor zorgen dat de netto transporten zijn toegenomen. De berekende toename ligt op ~30.000 m<sup>3</sup>/jaar. Dit transport is klein ten opzichte van de 4.7 miljoen m<sup>3</sup> die is toegevoegd aan het gebied voor de versterking.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

De conclusies van deze studie zijn dat:

- De kust van Katwijk wordt gekarakteriseerd door een enkele brekerbank. Deze bank vertoont tot de jaren negentig een cyclisch gedrag van landwaartse aangroei, zeewaartse verplaatsing en vervolgens uitdoving. Het huidige kuststelsel vertoont ander gedrag: een stabiele bank die rond de 500m tot de RSP aanwezig is.
- Na aanleg, in respectievelijk 1998, 2006 en 2013, nemen de zeewaarts (rond 800m tot de RSP) van de brekerbank aangebrachte vooroeversuppleties snel in hoogte af. De brekerbank landwaarts ervan neemt juist sterk in hoogte toe en de MKL verplaatst zeewaarts. De hoogtetoename van de brekerbank is waarschijnlijk rechtstreeks gerelateerd aan de aanleg van de vooroeversuppletie omdat een landwaartse herverdeling van het sediment plaatsvindt. De toename van de brekerbankhoogte valt binnen de MKL-rekenschijf en zorgt voor een zeewaartse verplaatsing van de MKL in de jaren na aanleg van de vooroeversuppletie.
- De aanleg van de uitwateringssluis heeft een directe respons in de MKL en de strandlijnen. Vrijwel alle profielen vertonen sinds de aanleg een zeewaartse verplaatsing van zowel de MKL als de strandlijnen. Vanuit dit gezichtspunt heeft de uitwateringssluis een positieve invloed gehad op het ondiepe deel van het kustprofiel. Het diepere deel, waar de brekerbank aanwezig is, lijkt niet te zijn beïnvloed door de sluis. Zowel in kustlangs- als dwarse richting blijven de banken voor en na aanleg gehandhaafd.
- Modelonderzoek leert dat het netto noordwaarts gerichte sedimenttransport toeneemt van 0,1 miljoen m<sup>3</sup> ten zuiden van Katwijk naar 0,3 miljoen m<sup>3</sup> ten noorden van de uitwateringssluis. Aanleg van een vooroeversuppletie verandert dit niet significant. De verliezen uit het kustvak blijven nagenoeg gelijk. Lokaal, op de suppletie zelf, zijn wel veranderingen in transport zichtbaar en zand verplaatst zich van de suppletie naar de achterliggende brekerbank. In ondiep water, direct langs de kust zijn de verschillen beperkt.
- De toekomstige vooroeversuppletie lijkt geen negatieve effecten op het functioneren van de uitwateringsgeul (sluis) te veroorzaken. Er wordt geen toename van de verzanding voorspeld door het modelonderzoek. Het is de verwachting dat de toekomstige vooroeversuppletie snel (binnen enkele jaren na aanleg) opgenomen zal worden in het natuurlijke bankensysteem en daar bijdraagt aan het behoud van het sedimentvolume in dit kustvak. In de periode dat de geplande vooroeversuppletie aanwezig is kan deze voor golfafscherming van de achterliggende kust zorgen. Dit effect is met name zichtbaar onder (zware) stormcondities en kan bijdragen tot de reductie van sedimentverliezen vanuit de Zwakke Schakel.
- In 2013-2015 worden in het kader van de Zwakke Schakel versterking een grote strandduinsuppletie (2,5 miljoen m<sup>3</sup>) en vooroeversuppletie (2,2 miljoen m<sup>3</sup>). Dit resulteerde in een zeewaartse verplaatsing van het kustprofiel, en een grote (~120m) zeewaartse sprong in MKL positie. Modelonderzoek laat ook zien dat de veranderingen in het kustprofiel door de Zwakke Schakel versterking ervoor zorgen dat de netto transporten zijn toegenomen met ~30.000 m<sup>3</sup>/jaar. Dit transport is klein ten opzichte van de 4.7 miljoen m<sup>3</sup> die is toegevoegd aan het gebied voor de versterking.

## 4.2 Aanbeveling

Op basis van de data uit JARKUS en Lidar is niet af te leiden of er verzanding van de uitwateringssluis heeft plaatsgevonden. Het kan zijn dat deze wel regelmatig verzandt, maar dat het kanaal door menselijk ingrijpen wordt opengehouden<sup>1</sup>. Aanbevolen wordt informatie te verzamelen over verwijderen van zand bij de uitwateringssluis en de frequentie hiervan.

---

<sup>1</sup> (pers. comm. Joost Veer, Hoogheemraadschap Rijnland): Voor de Zwakke Schakel versterking bij Katwijk is uitgezocht of een verlenging van de uitwateringskanaal het reguliere spuien nog wel voldoende stroomsnelheid zouden hebben om het kanaal schoon te spoelen, of dat het water een eigen weg over het strand zou gaan zoeken. Conclusie was dat het reguliere (deels) dicht stuiven van het kanaal geen echte problemen zou opleveren met een 2x zo lang kanaal. Wij hebben sinds de aanleg voor zover ik heb gezien ook geen problemen gehad met het spuien, en voeren ook geen preventieve zandverplaatsingen uit. (er ligt regelmatig een flinke bak zand in het kanaal, soms kan je zelfs droog naar de overkant toe). NB het uitwateringskanaal is natuurlijk voorzien van een basalt bekleding (van voldoende hoogte) en met stortsteen rondom de hoofden. Het water wat wij spuien kan dus eigenlijk ook normaliter geen kant op anders dan via het kanaal richting zee.

# Literatuur

Arcadis (2013). Projectplan Kustversterking Katwijk. Hoogheemraadschap van Rijnland. 11 januari 2013. 076878076: A - Definitief C03021.000106.0100

Kustwerk Katwijk, 2015. Kustwerk Katwijk. Available at: <http://www.kustwerkkatwijk.nl/public/index.php?id=12> .

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)

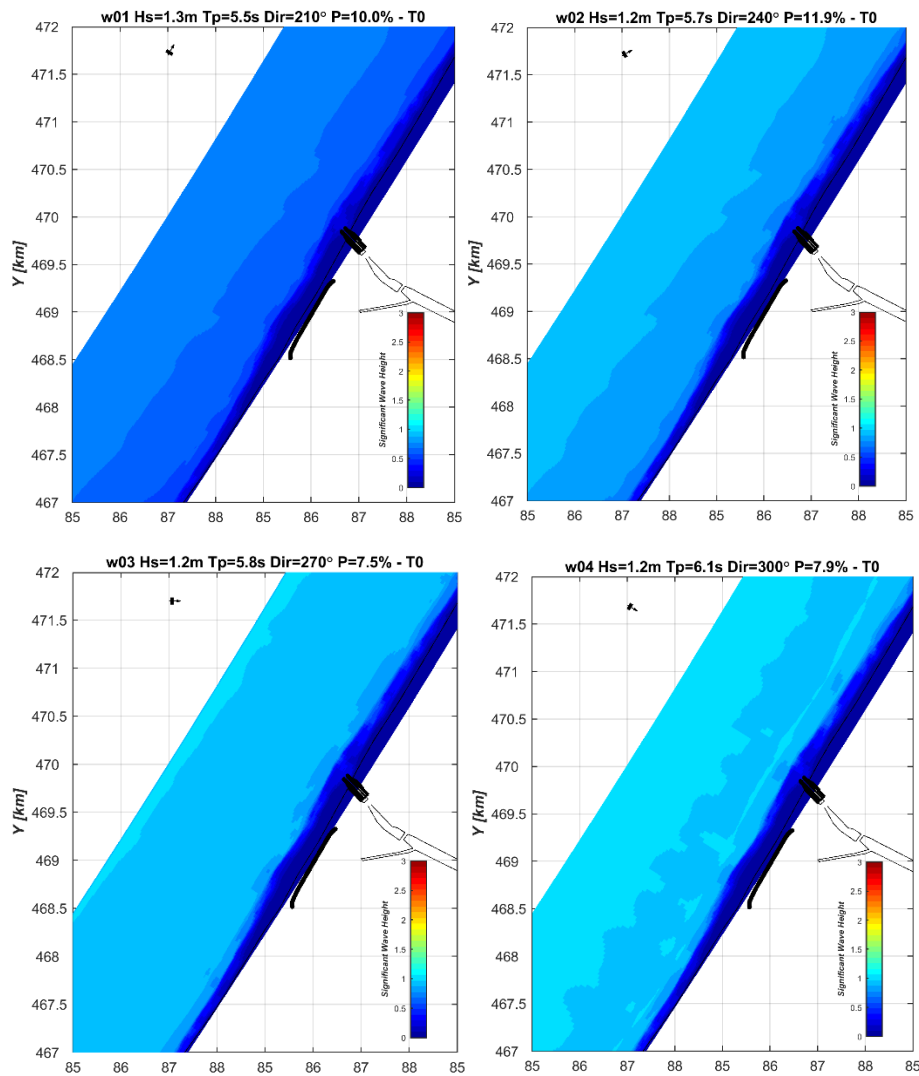
Roelvink, J.A., van der Kaaij, T., Ruessink, B.G. and Bos, K.J., 2001b. Reference scenarios and design alternatives, MARE consortium report no. Z3029.12, ONL Coast and Sea studies.

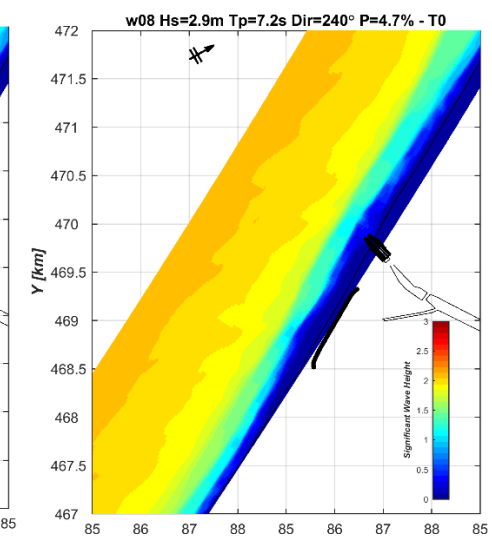
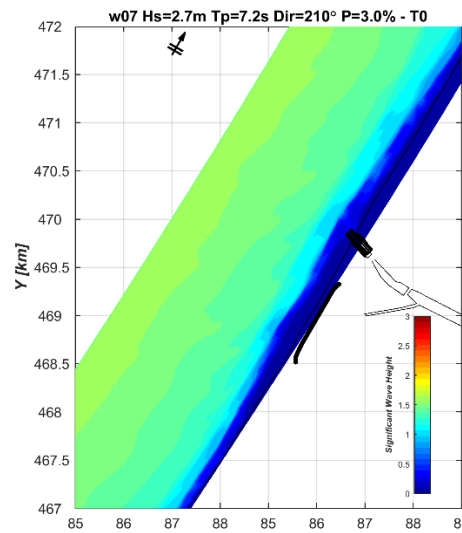
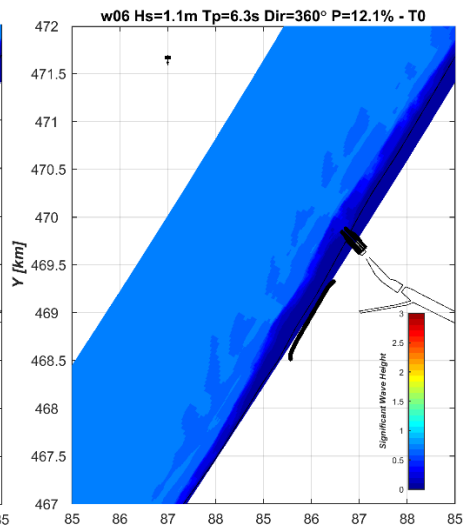
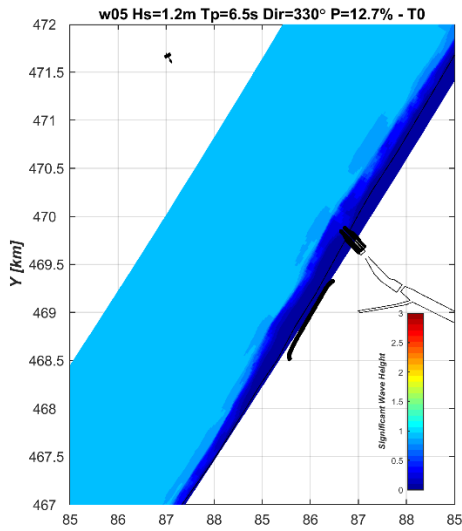
Van der Hout, C.M., Tonnon, P.K., de Ronde, J.G., 2009. Morphological effects of mega-nourishments. Deltares rapport 1200659-000.

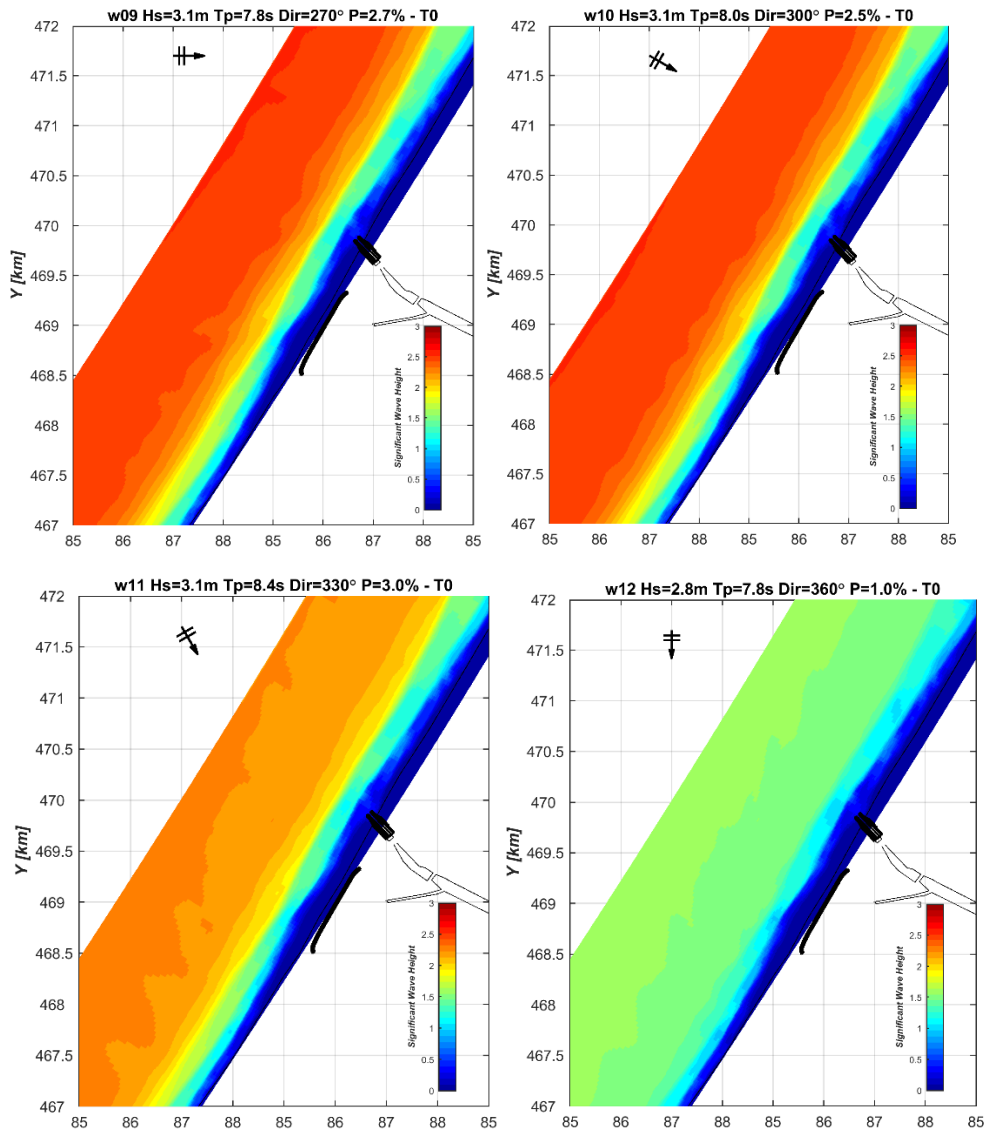


# A Modelresultaten

## A.1 Golfhoogte T0

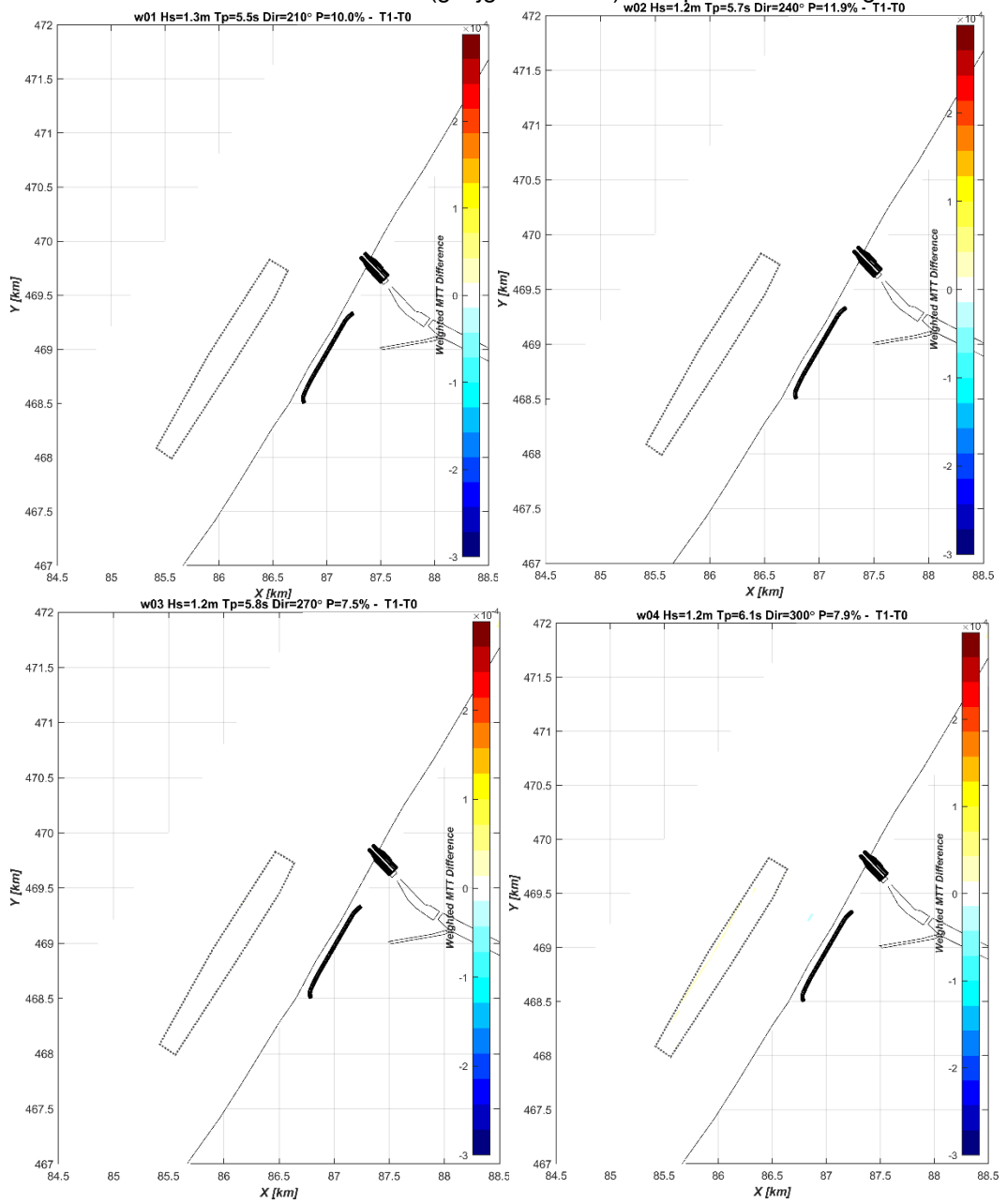


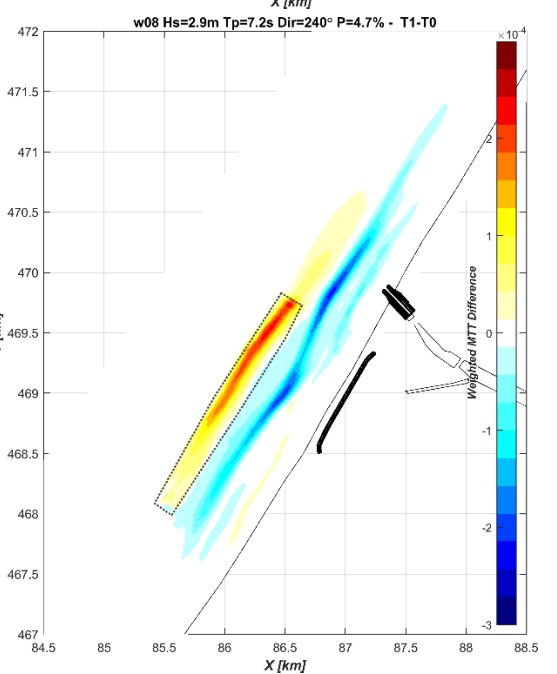
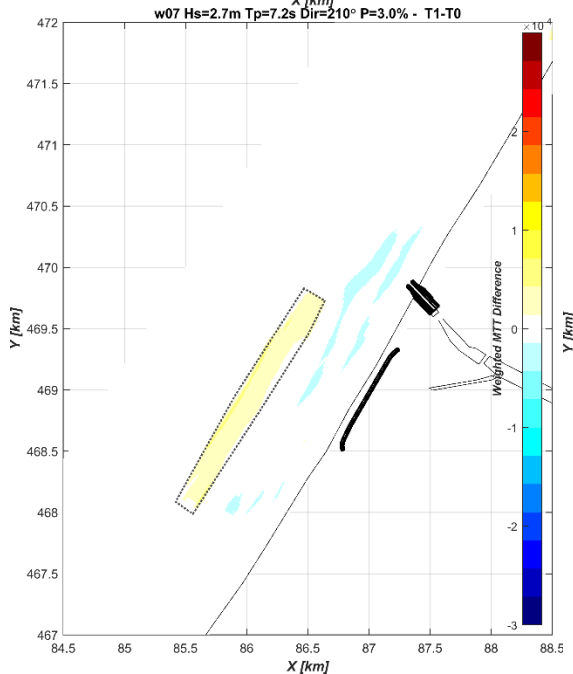
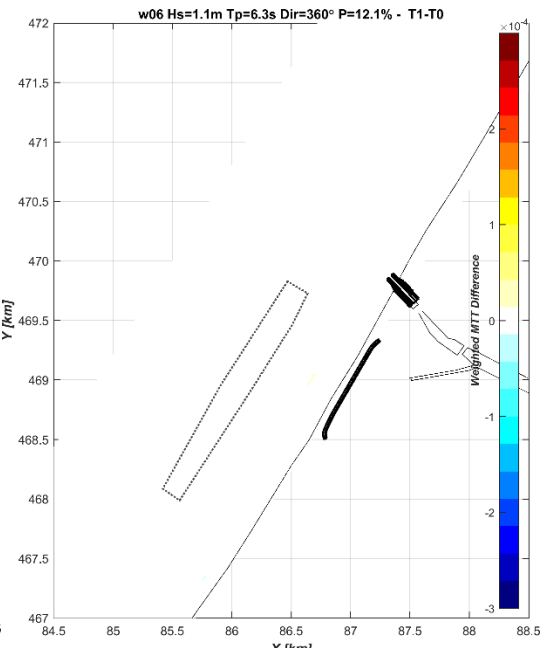
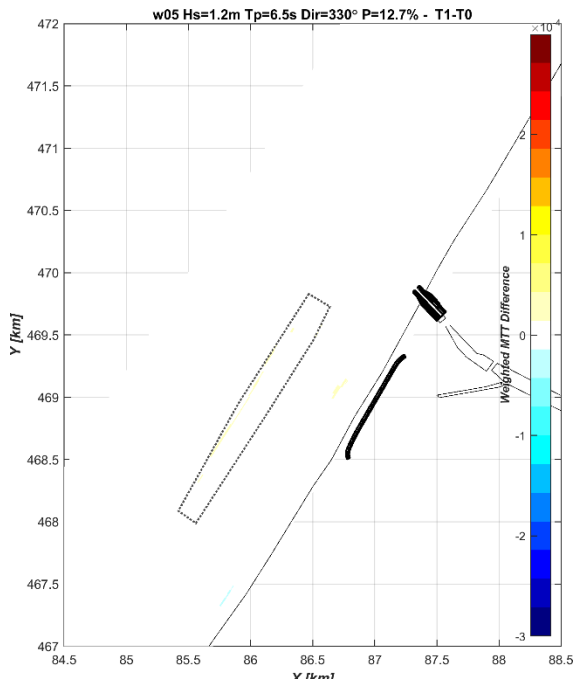


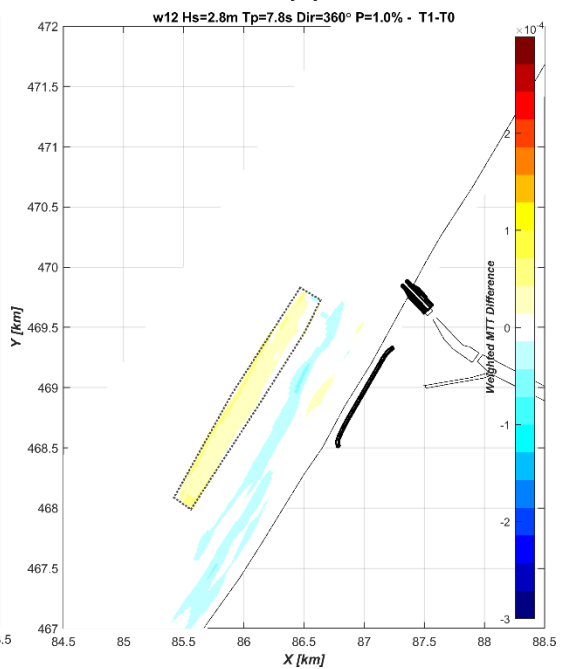
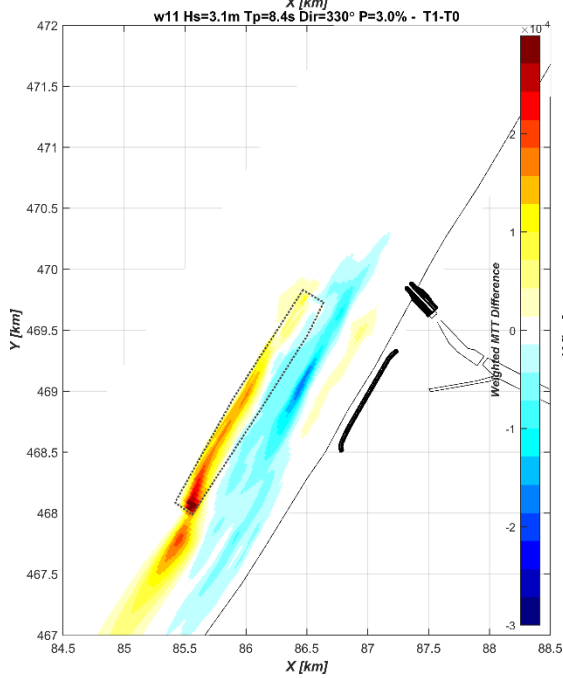
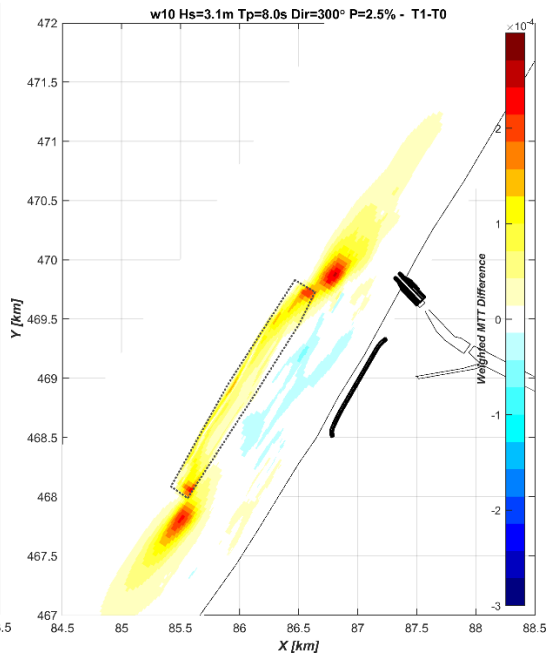
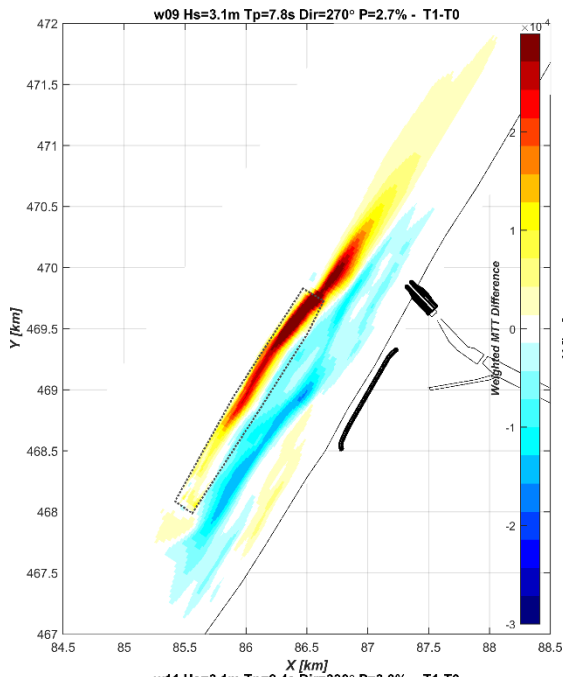


## A.2 Residuele transporten T1-2021 – T0-2021

Vershil tussen T1 en T0 in residuele (getijgemiddelde) transporten voor alle golfcondities.







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)