

Regionaal advies: vooroeversuppletie Scheveningen



Regionaal advies: vooroeversuppletie Scheveningen

Auteur(s)

Ellen Quataert

Edwin Elias

Stuart Pearson

Regionaal advies: vooroeversuppletie Scheveningen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer S.R.P.M. Pluis
Referenties	
Trefwoorden	Scheveningen, vooroeversuppletie, strandhoofden, Beheer en Onderhoud Kust, Delft3D, SedTrails

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	20-12-2021
Projectnummer	11206794-001
Document ID	11206794-001-ZKS-0006
Pagina's	59
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ellen Quataert	
	Edwin Elias	
	Stuart Pearson	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Ellen Quataert	Marcel Taal	Bob Hoogendoorn	
	Edwin Elias			
	Stuart Pearson			

Samenvatting

Het brede strand bij Scheveningen is ontstaan na de in 2010 en 2011 uitgevoerde kustversterking (Zwakke Schakel – Hoogwaterbeschermingsprogramma, HWBP) en is onderhevig aan structurele erosie. Rijkswaterstaat overweegt een vooroeversuppletie tussen het havenhoofd (raai 10140) en het Zwarte Pad (raai 9925). Dit rapport beoogt meer inzicht te geven in het autonome kustgedrag bij Scheveningen, om vervolgens de effectiviteit van een vooroeversuppletie en de mogelijke impact hiervan op sedimenttransporten richting de haven van Scheveningen te bepalen. Dit is gedaan door analyse van meetdata en morfologische modellering (Delft3D) in combinatie met analyses van het sedimenttransport met behulp van SedTRAILS.

De structurele erosieve trend in de kustzone bij Scheveningen wordt veroorzaakt door een combinatie van de havenhoofden, de strandhoofden en de zeewaartse uitbouw ten gevolge van de HWBP-versterking. Er is een toenemende gradiënt in het sedimenttransport vanaf de havendammen van Scheveningen richting het noorden. Ter hoogte van raai 10025 zijn de verliezen maximaal. Deze raai ligt in het midden tussen de strandhoofden en de boulevard ligt maximaal ver vooruit, resulterend in een minimale strandbreedte. Door middel van strandsuppleties wordt de strandzone tussen de strandhoofden opgevuld. Dit gaat gepaard met de vorming van een zeer steil strandprofiel.

De HWBP versterking heeft ook een (klein) brekerbanksysteem gecreëerd op de vooroever. Het (onnatuurlijk) steile strandprofiel wordt in stand gehouden door de frequent terugkerende strandsuppleties. Het strandprofiel verflauwd door herverdeling van het suppletiezand, en resulteert in accumulatie van sediment in een kleine brekerbank rond de -4m NAP.

De vooroeversuppletie zorgt niet voor een significante initiële verandering van de residuele sedimenttransporten. De verliezen richting het noorden blijven vrijwel gelijk, terwijl er wel 500.000 m³ aan de kustzone wordt toegevoegd. Door aanleg van een vooroeversuppletie zal een bank-trog systeem ontstaan op de vooroever. Dit systeem zal voor langere tijd aanwezig blijven en langzaam uitdempen. De vooroeversuppletie is effectief in het reduceren van golfenergie bij hogere golfcondities. Dit effect zal waarschijnlijk niet direct effectief zijn in het reduceren van de verliezen bij raai 10025. De kustlangse gradiënten hier worden vooral gedreven door het havenhoofd.

Modelberekeningen, met (jaargemiddelde) morfologisch golfklimaat, geven geen aanwijzing dat de vooroeversuppletie leidt tot een verhoogde kans op sedimentatie van de havengeul. Een verhoogde kans op invulling van de vaargeul treedt in het bijzonder op bij een storm met hoge golven uit het noorden. Zo'n gebeurtenis en de gevolgen ervan zijn onafhankelijk van de uitvoering van een vooroeversuppletie.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstelling	8
1.3	Aanpak	8
1.4	Leeswijzer	9
2	Analyse van de kustontwikkeling bij Scheveningen	10
2.1	Overzicht	10
2.2	Suppleties en Ingrepen	10
2.2.1	Harde kustverdedigingswerken	10
2.2.2	Basiskustlijn	12
2.2.3	Overzicht uitgevoerde suppleties	13
2.3	Morfologische ontwikkeling bij Scheveningen	13
2.4	Detailanalyse van de kustindicatoren	19
2.5	Detailanalyse van de individuele kustlijnprofielen	21
2.5.1	Raai 10025	21
2.5.2	Raai 9975	24
2.5.3	Raai 10075	25
2.6	Samenvatting	26
3	Modellering van de vooroeversuppletie	27
3.1	Het Delft3D model	27
3.1.1	Rekenrooster	27
3.1.2	Randvoorwaarden	29
3.1.3	Golven	29
3.1.4	Sedimenttransport	30
3.2	Opzet modelsimulaties en suppletievariant	32
3.3	Modelresultaten T0-simulatie	33
3.3.1	Getij-gedreven stromingen en transporten	33
3.3.2	Invloed van golven	35
3.3.3	Getij- en golf-gedreven stromingen en transporten	36
3.3.4	Netto jaarlijks langstransport	39
3.4	Invloed van de vooroeversuppletie (T1-simulatie)	40
3.4.1	Golven	40
3.4.2	Sedimenttransport	41
3.4.3	Netto jaarlijks langstransport	44
3.4.4	Samenvatting en discussie van de modelresultaten	45
4	Conclusies en aanbevelingen	46
4.1	Synthese en conclusies	46

4.2	Aanbevelingen	47
5	Referenties	49
A	Meetdata	50
A.1	Jarkus grids	50
A.2	Lidar	51
A.3	Dwarsprofielen	52
B	Modelresultaten	53
B.1	Golfhoogte T0	53
B.2	Golfhoogte: verschil tussen T0 en T1	55
C	SedTRAILS resultaten	57

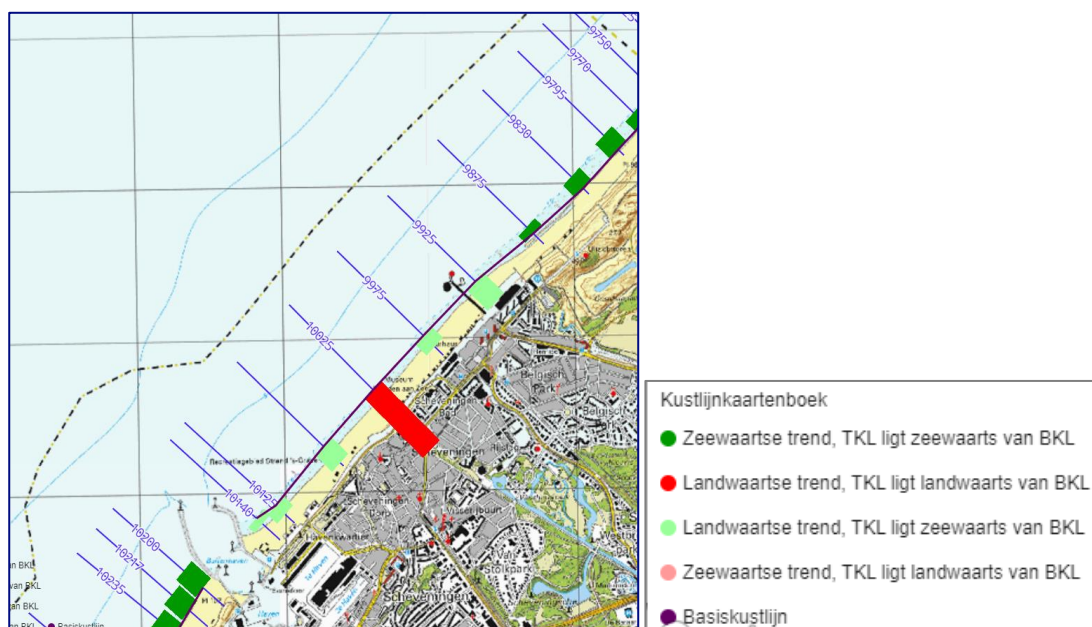
1 Introductie

1.1 Achtergrond

In het onderzoeksprogramma KPP B&O Kust worden kennis en tools door Deltares ontwikkeld die de 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 het KPP B&O Kust programma worden specifieke regionale vragen beantwoord. Dit rapport betreft een regionaal advies voor een mogelijke vooroeversuppletie bij Scheveningen.

Het brede strand bij Scheveningen is onderdeel van de in 2010 en 2011 uitgevoerde kustversterking (Zwakke Schakel - HWBP). Het aanwezige zandvolume vervult namelijk een rol in de beoordeling van de waterkering. Daarom is bij Scheveningen de Basiskustlijn zo vastgesteld dat dit zandvolume in stand blijft. Dit leidt tot het ontstaan van een 'kustbolwerk'. Kustbolwerken staan bekend om de optredende structurele erosie. In het geval van Scheveningen resulteert dit in regulier kustonderhoud die qua planning wordt gestuurd door enkele raaien, waarvan 10025 de meest sturende is en daar is ook nu een overschrijding van de BKL (Figuur 1-1). De huidige praktijk bestaat uit strandsuppleties om de kustlijn te onderhouden. Rijkswaterstaat overweegt nu een vooroeversuppletie langs deze kustlijn. Een vooroeversuppletie brengt extra zand in het kustprofiel en draagt wellicht bij aan een verhoging van het zandvolume in de rekenschijf en kan mogelijk de erosieve (golfgedreven) processen beïnvloeden. Echter, voor het uitvoeren van een vooroeversuppletie is meer inzicht in het autonome kustgedrag bij Scheveningen, de effectiviteit van een vooroeversuppletie en de mogelijke impact hiervan op sedimenttransporten richting de haven van Scheveningen nodig.

De raaien waarvoor kustlijnhandhaving een vooroeversuppletie nodig is zijn 9975, 10025 en 10075. Deze kan worden uitgebreid naar ruwweg het gebied tussen het havenhoofd (raai 10140) en het Zwarte Pad (raai 9925).



Figuur 1-1 – Overzicht van de MKL-trends bij Scheveningen zoals in het kustlijngaartenboek 1-1-2021. JarKus-toetsraaien zijn weergegeven in blauw.

1.2 Doelstelling

Deze studie beoogt meer inzicht in het autonome kustgedrag bij Scheveningen te krijgen, om vervolgens de effectiviteit van een vooroeversuppletie en de mogelijke impact hiervan op sedimenttransporten richting de haven van Scheveningen te bepalen.

In deze rapportage worden de volgende onderzoeksvragen beantwoordt:

- 1 Wat zijn de maatgevende processen die verantwoordelijk zijn voor de erosie rond raai 10025?
- 2 Wat is de autonome ontwikkeling van de kust bij Scheveningen voor en na versterking in het kader van het HWBP in 2010-11?
- 3 Wat is het initiële effect van het aanbrengen van een vooroeversuppletie op de maatgevende processen?
- 4 Zorgt een vooroeversuppletie voor extra zanduitwisseling tussen de kust en de haven van Scheveningen, en zo ja, kan een vooroeversuppletie in potentie de verzanding van de haven versnellen?

1.3 Aanpak

Het onderzoek had 2 delen. Het eerste deel is onderzoek van de morfologische ontwikkelingen en processen die een rol spelen in de autonome situatie (T0). Dit is uitgevoerd door een analyse van meetdata en analyse van morfostatische modellering m.b.v. Delft3D. Het tweede deel was een analyse van de processen direct na de vooroeversuppletie (T1-analyse). Deze is uitgevoerd met behulp van morfostatische modellering. Hieronder worden de verschillende analyses nader uitgewerkt.

T0-data analyse

Dit bestaat uit de onderdelen:

- 1 *Analyse van het studiegebied bij Scheveningen (van noordelijk havenhoofd t/m het Zwarte Pad).*
Met de Jarkusdata is de kustnabije zone tussen raai 10140 en 9925 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) zijn in kaart gebracht. Daarnaast is in kaart gebracht wat de invloed is van de kustverdedigingswerken en suppleties.
- 2 *Detail analyse van het lokale kustgedrag.*
De Jarkusdata zijn ook 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. Dit geeft mogelijk inzicht in het effect van een suppletie in de toekomst. Hierbij is 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 zijn de stromingen en transporten tussen het havenhoofd van Scheveningen en het Zwarte Pad in kaart gebracht voor de autonome situatie (T0). De aanpak is vergelijkbaar aan de studie die is uitgevoerd naar de vooroeversuppletie nabij Callantsoog (Elias et al. 2021). Er wordt een morfostatische model gebruikt waarbij hydrodynamica en sediment transport voor zowel het getij als voor golven worden gesimuleerd. Doel hiervan is het beter in kaart brengen van de stromingen en sedimenttransporten, met het oog op eventuele zanduitwisseling tussen de kust en de haven van Scheveningen. Analyses

van sedimenttransport met behulp van SedTRAILS model zijn uitgevoerd ter ondersteuning van het onderzoek.

T1-model analyse

Eenzelfde morfostatische aanpak wordt gevolgd voor de T1 situatie, waarbij de huidige morfologie inclusief het door RWS voorgestelde rekenontwerp van de vooroeversuppletie is gesimuleerd. Het doel is om de veranderingen in de stromingen en transporten ten opzichte van de T0-situatie te analyseren, met het oog op eventuele zanduitwisseling tussen de kust en de haven van Scheveningen.

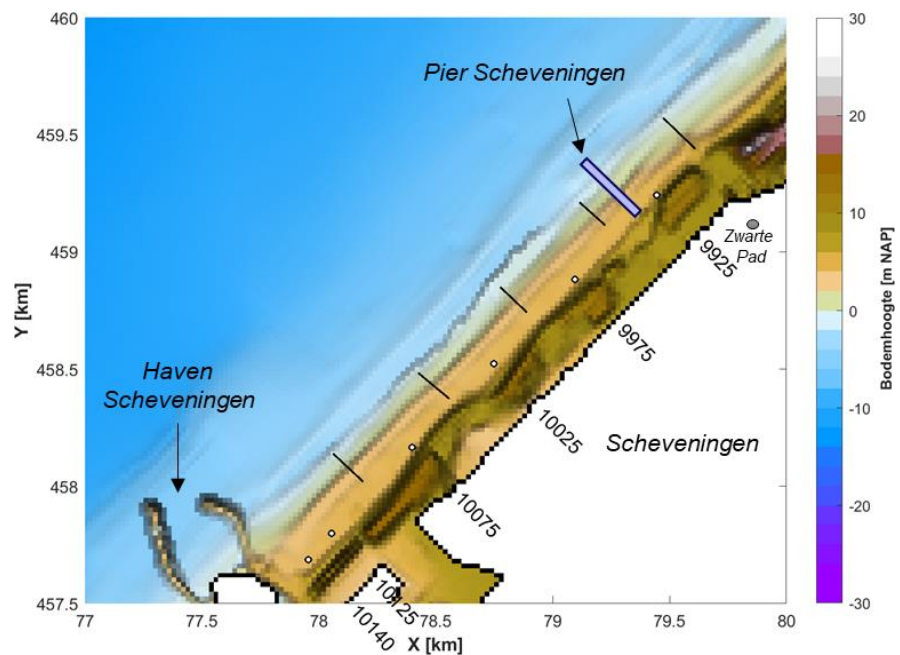
1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 zet de kustontwikkeling van het studiegebied bij Scheveningen (raai 10140-9975) uiteen. De analyses bestaan uit een beschrijving van de uitgevoerde ingrepen, morfologische ontwikkeling van het studiegebied en detailanalyses van de kustindicatoren en kustlijnprofielen. Tevens is de vooroeversuppletie aangelegd in 1999 geanalyseerd. Hoofdstuk 3 vat de resultaten van de modellering samen. Het beschrijft het model en de modelaanpak (H.3.1) en een overzicht van de suppletievarianten (H.3.2). Hoofdstuk 3.3 geeft de resultaten voor de T0 simulaties weer en in Hoofdstuk 3.4. worden de resultaten van de T1 simulaties beschreven. Hoofdstuk 4 geeft een samenvatting van de resultaten en conclusies van dit onderzoek.

2 Analyse van de kustontwikkeling bij Scheveningen

2.1 Overzicht

Het studiegebied ligt tussen Jarkus raaien 9925 en 10140 en is onderdeel van het kustvak Delfland (Figuur 2-1). Ten zuiden van raai 10140 liggen de dammen van de haven van Scheveningen en net ten zuiden van raai 9925 ligt de pier van Scheveningen. Daarnaast wordt de kust van Scheveningen beschermd door strandhoofden die om de 500 m op het strand liggen. Direct landwaarts van het strand ligt de boulevard van Scheveningen. Zo bevat dit deel van het kustvak geen natuurlijk duingebied. In het kustvak is de onderhoudsinspanning groot, al sinds 1953 worden er regelmatig suppleties uitgevoerd (paragraaf 2.2).



Figuur 2-1: Overzicht van het studiegebied bij Scheveningen. De onderliggende bodem kaart is gebaseerd op de Jarkus-grids van 2020.

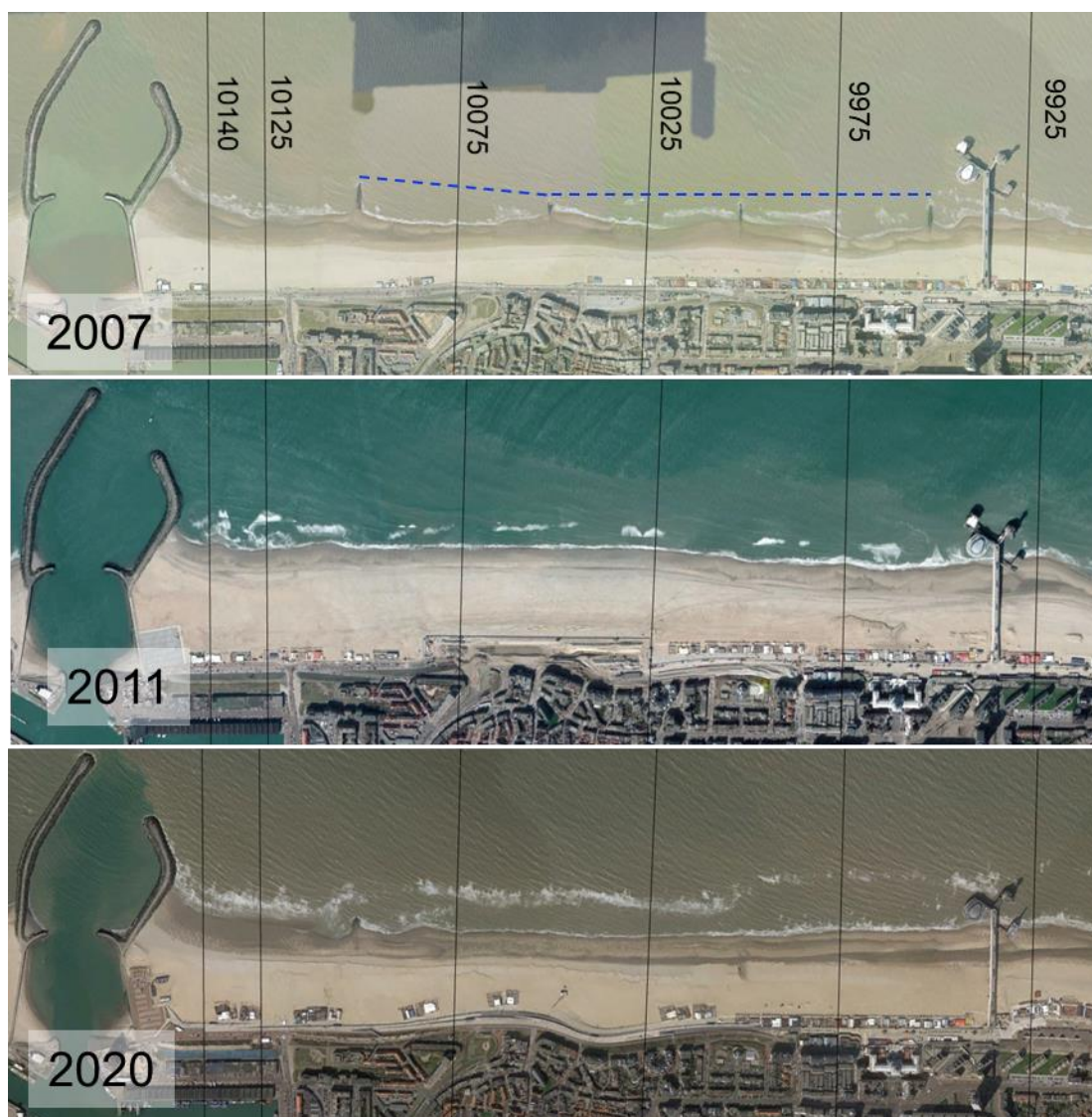
2.2 Suppleties en Ingrepen

2.2.1 Harde kustverdedigingswerken

De havendammen van Scheveningen zijn aangelegd in 1920. Binnen het HWBP programma “De Zwakke Schakels” is een Dijk-in-boulevard aangelegd ten noorden van de haven van Scheveningen tussen raaien 10075 en 9975 (Figuur 2-3). In 2011 is een versterking van het strand en het duin bij Scheveningen afgerond. Als onderdeel van de versterking is tussen raai 9875 en 10140 de boulevard opgehoogd en het strand verbreed. Figuur 2-2 laat aan de hand van satellietbeelden het effect van de versterking op de uitbouw van de kust en boulevard zien.

De Delflandse strandhoofden zijn vanaf 1791 aangelegd door Rijkswaterstaat. Bij Scheveningen liggen de Jarkus-toetsraaien telkens tussen twee strandhoofden in (Figuur 2-2). Het strandhoofd net ten noorden van de havendam (tussen raai 10125 en 10075) steekt verder de zee in dan de drie strandhoofden verder noordwaarts (blauwe stippellijn in Figuur 2-2, beeld 2007). Direct na aanleg van de Zwakke Schakel versterking in 2011 zijn de strandhoofden

volledig bedekt door het zand. In 2020 zijn de koppen van de strandhoofden weer zichtbaar, door erosie. Bij laag water zijn deze koppen van de strandhoofden te zien (Figuur 2-2, beeld 2020).



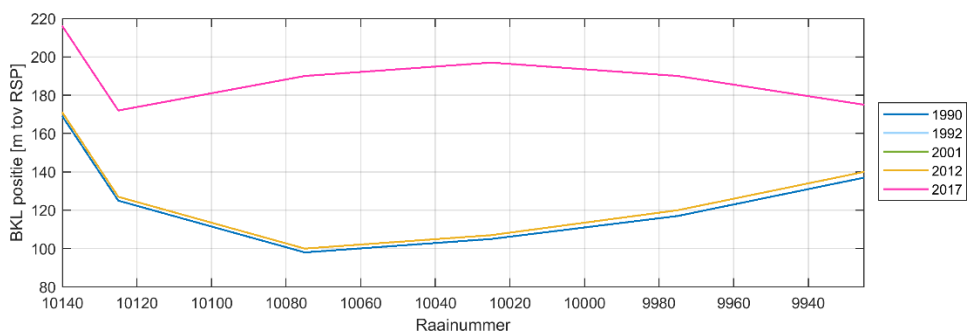
Figuur 2-2 – Satellietbeelden van Scheveningen, vóór aanleg van de dijk-in-boulevard in 2007, na aanleg in 2011 en de meest recente in 2020. Bron: Google Earth



Figuur 2-3 - Kustversterking Zwakke Schakel Scheveningen. Dijk-in-boulevard. Bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Harry van Reeken.

2.2.2 Basiskustlijn

In Figuur 2-4 zijn de vigerende (2017) en oude BKL-liggingen bij Scheveningen weergegeven. Om de zandige uitbouw, die deel is van de versterking, te handhaven, is de BKL zeewaarts verlegd in 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2018). De BKL is voor de raaien 9875-10140 zeewaarts verplaatst met 35-90 meter (Figuur 2-4, onder).



Figuur 2-4 – BKL-positie (roze lijn) voor Scheveningen bij raaien 10140 tot 9930, weergegeven op een satelliefoto. De locatie van de primaire water kering (landwaartse grens waterstaatswerk) is weergegeven met de rode lijn in de satelliefoto.

2.2.3 Overzicht uitgevoerde suppleties

Bij Scheveningen treedt erosie op waardoor onderhoud in de vorm van suppleties noodzakelijk is sinds 1953. Bij Scheveningen zijn voornamelijk strandsuppleties uitgevoerd en één vooroever-suppletie in 1999 (groen gearceerd in Tabel 2.1). De suppleties die onderdeel zijn van de Zwakke Schakel versterking zijn aangeduid met blauwe arcering. Sinds de aanleg van de Zwakke Schakel versterking in 2011 zijn twee strandsuppleties uitgevoerd in 2015 en 2019.

Tabel 2.1 – Overzicht van de uitgevoerde suppleties bij Scheveningen

Locatie	Jaar	Begin raai	Eind raai	Type	Volume [1000 m3]	Volume [m3/m]
Scheveningen	1953	10050	10150	strandsuppletie	70	70
Scheveningen	1969	10000	10150	strandsuppletie	45	30
Scheveningen	1975	9850	10150	strandsuppletie	700	233
Scheveningen	1981	9900	10100	strandsuppletie	10	5
Scheveningen	1982	9900	10100	strandsuppletie	15	8
Scheveningen	1985	9875	10125	strandsuppletie	250	100
Scheveningen	1985	9875	10125	strandsuppletie	80	32
Scheveningen	1987	9900	10100	strandsuppletie	8	4
Scheveningen	1991	9781	10139	strandsuppletie	1006	281
Scheveningen	1996	9700	10100	strandsuppletie	800	200
Scheveningen	1999	9773	10050	vooroeversuppletie	1426	515
Scheveningen	2004	9925	9965	strandsuppletie	100	250
Scheveningen (Keizerstraat)	2004	9970	10110	strandsuppletie	683	488
Scheveningen fase 1	2009	9900	10150	strandsuppletie	1364	546
Kijkduin-Scheveningen	2010	10200	10507	strand-duinsuppletie	2500	814
Scheveningen fase 2	2010	9900	10150	strandsuppletie	959	384
Scheveningen	2015	9925	10125	strandsuppletie	700	350
Scheveningen	2019	9925	10140	strandsuppletie	400	186
TOTAAL					11.115	

2.3 Morfologische ontwikkeling bij Scheveningen

Figuur 2-5 en Figuur 2-6 geeft een overzicht van de morfologische ontwikkeling van de kustzone bij Scheveningen tussen raai 9925 en 10140 voor jaren 1965 tot 2020. De bodemdata vertoont een drietal variaties. Deze zijn niet direct gekoppeld aan natuurlijke ontwikkelingen, maar aan de uitgevoerde ingrepen.

Periode 1965 – 1999: uniform kustprofiel

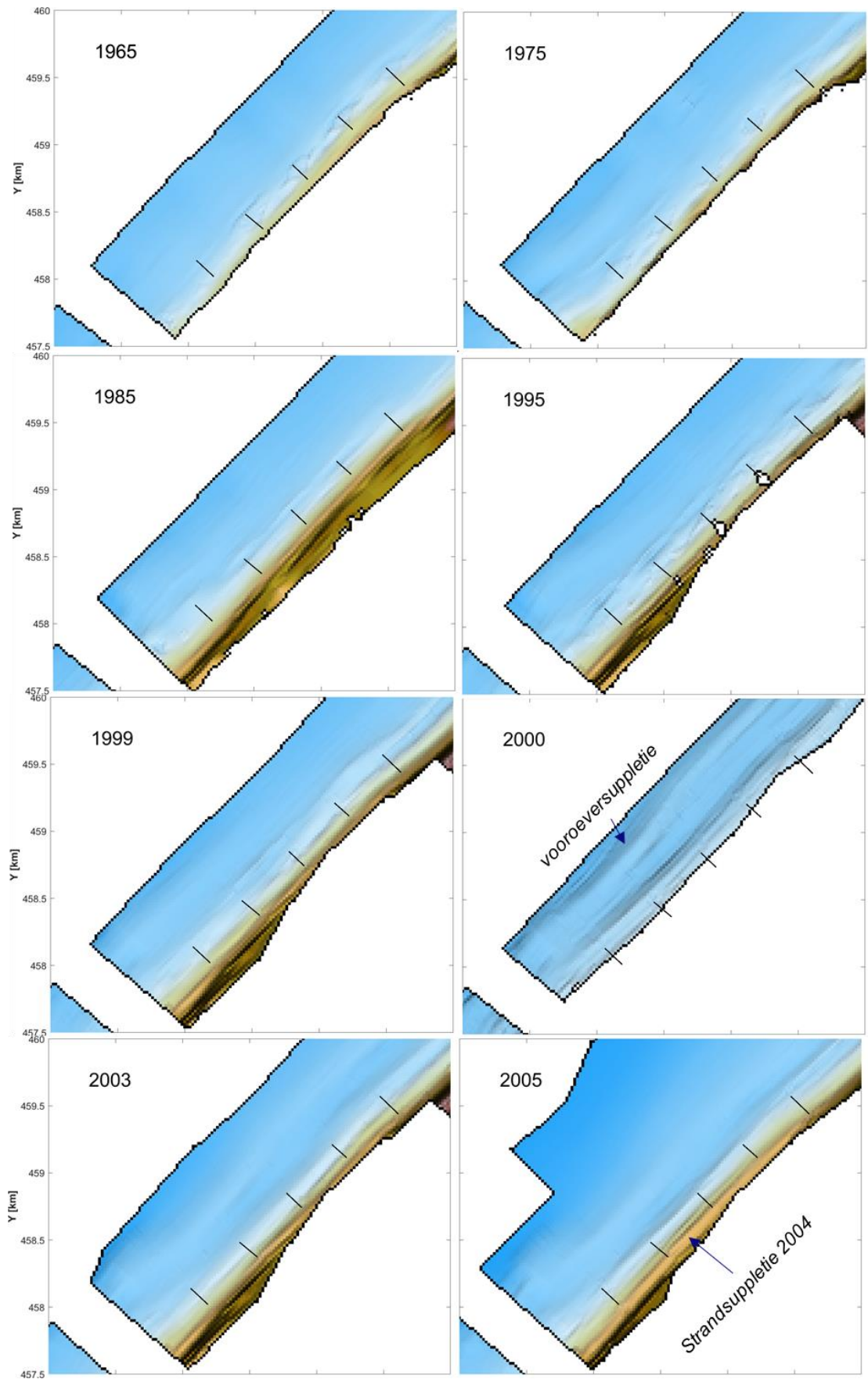
Tussen 1965 en 1999 overheerst in de diepe kustzone een uniform kustprofiel. Een duidelijke brekerbank is hierbij niet aanwezig. De dieptecontouren zijn over het algemeen regelmatig. Nabij het havenhoofd en de pier is het strand iets verder uitgebouwd dan in het gebied hiertussen. In deze periode zijn er meerdere (kleine) strandsuppleties uitgevoerd (Tabel 2.1), maar deze zijn niet direct in de JarKus-bodems te onderscheiden.

Over de hele periode is er ten noorden van de noordelijke havendam (raaien 10125 en 10140) een lokale verhoging van de bodem op de vooroever te zien. Deze lokale bodemverhoging is continu aanwezig in alle bodemmetingen (zowel JarKus als Vaklodingen), en stabiel in positie en hoogte (zie ook dwarsprofielen van raaien 10125 en 10140 in bijlage A.3). De precieze oorzaak voor de lokale verhoging is op basis van de meetdata niet af te leiden. Een hypothese is dat dit het gevolg is van een sterke gradiënt in het residuele transport rondom de havendammen, te zien in de modelresultaten van de T0 in Figuur 3-6. Het netto transport

langs de kustlijn is noordwaarts gericht. Rond de zuidelijke havendam nemen de stromingen en transporten lokaal sterk toe. De transporten nemen dan in noordelijke richting weer af. Deze afname van de transportcapaciteit kan mogelijk verklaren waarom er zich hier een ondiepte vormt.

Periode 1999 – 2009: vooroeversuppletie

Met de uitvoering van een vooroeversuppletie in 1999 ontstaat dan een duidelijk andere vooroever. In de bodemdata tussen 2000 en 2005 blijft dan een bank-trog systeem zichtbaar. In de bodem van 2000 is dan de vooroeversuppletie (aanleg in 1999) te zien ten noorden van raai 10075. De vooroeversuppletie neemt in de jaren erna af in hoogte, en is in de bodem van 2005 voor het laatst duidelijk te onderscheiden. In de jaren 2000-2008 heeft zich weer een uniform kustprofiel gevormd. De bodem van 2009, vóór aanleg van de dijk-in-boulevard versterking, lijkt in dit opzicht weer sterk op de oudere bodems zoals die voor aanleg van de vooroeversuppletie voorkwamen. Het strand is in 2009 ver teruggetrokken, waardoor de strandhoofden duidelijk zichtbaar zijn. Ook in 2009 is het strand tussen het havenhoofd en de 1^{ste} strekdam iets verder uitgebouwd dan de naastliggende stranden.



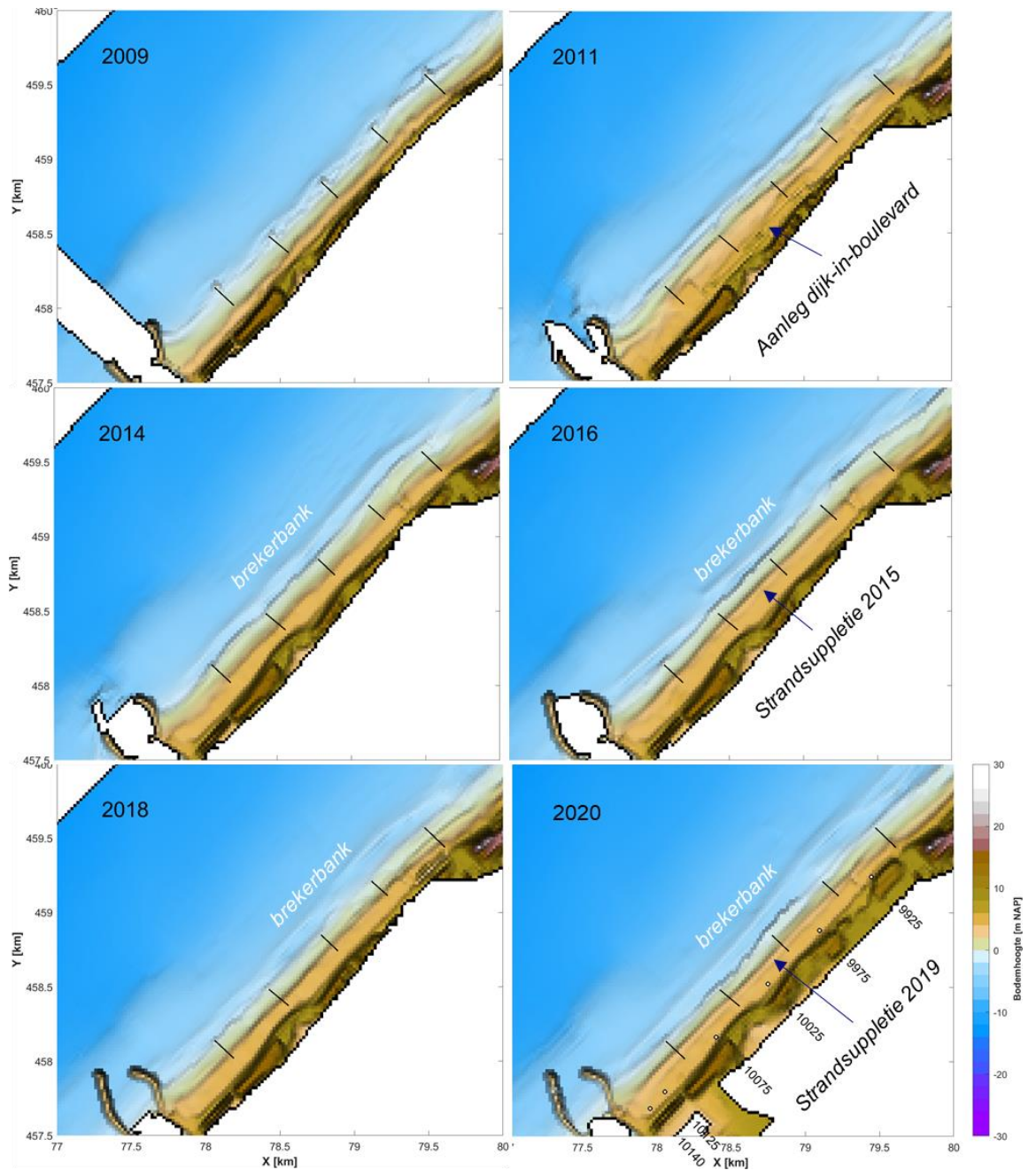
Figuur 2-5: Ontwikkeling van de kustzone tussen raai 9925 en 10140 aan de hand van de Jarkusgrids voor de jaren tussen 1965 en 2005.

Periode 2009 – 2021: dijk-in-boulevard versterking

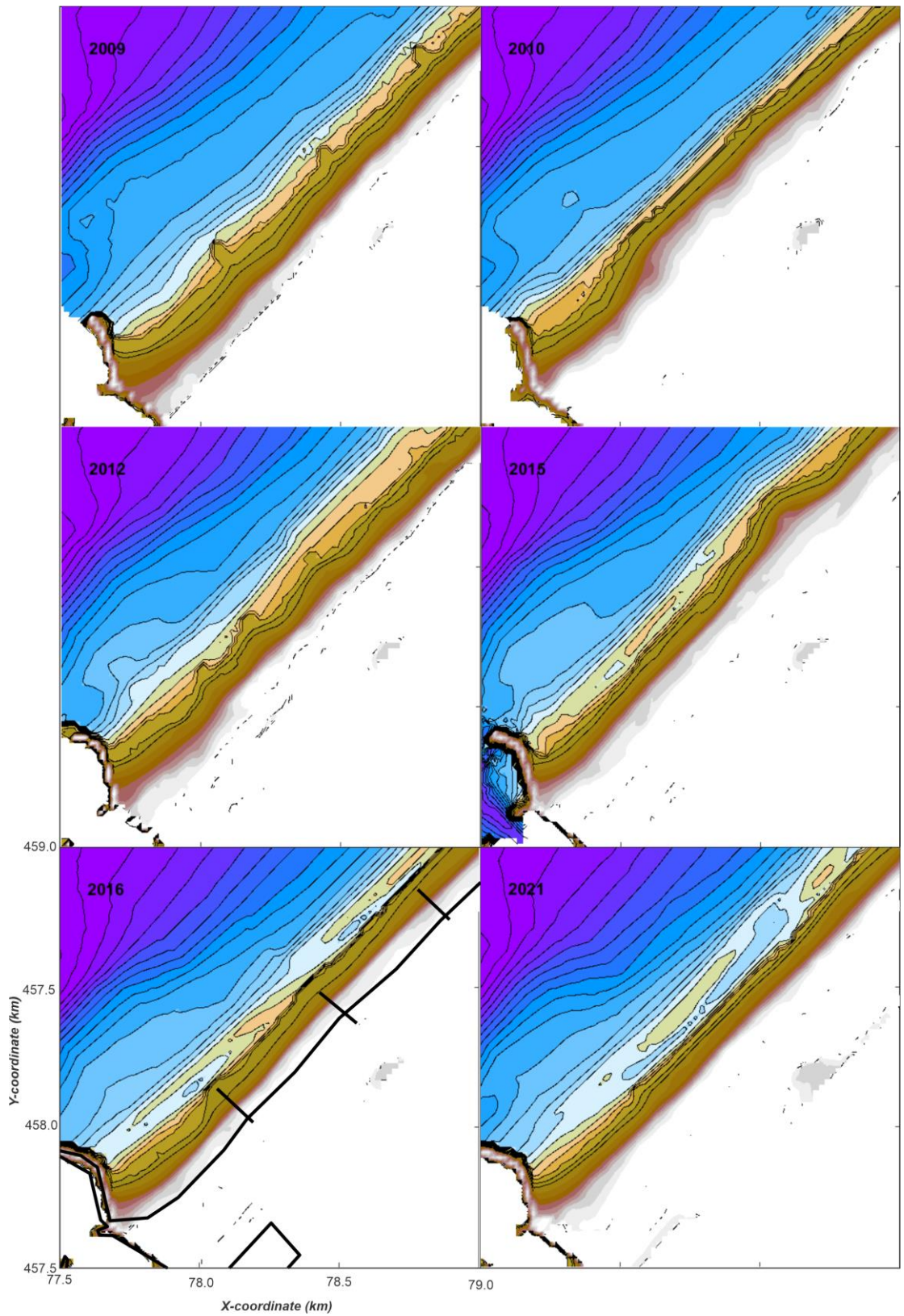
In de periode 2009-2011 is de dijk-in-boulevard versterking aangelegd. In de bodem is dit duidelijk zichtbaar. Ten noorden van de 1^{ste} strekdam is de kust nu sterk uitgebouwd. De strandhoofden zijn niet meer zichtbaar. Een vrijwel recht, doorlopend strand ontstaat. Dit strand gaat via een steile helling over in een ondiepe vooroever. De diepere vooroever is hier onveranderd.

In de jaren na de versterking domineert een grote erosie van het strand. De strandhoofden waren in 2011 niet zichtbaar in de bodem, maar zijn duidelijk zichtbaar in de 2012 opname. Een deel van het geërodeerde strand wordt initieel zeewaarts verplaatst. Hierdoor wordt de helling minder steil en er ontstaat een bank-trog systeem. Dit bank-trog systeem is niet een grote doorgaande brekerbank en trog zoals die langs de Hollandse kust wordt waargenomen, maar er ontstaan kleine bankjes en troggen. Deze bankjes zijn variabel in de tijd en locatie. In Figuur 2-7 zijn de JarKus-bodems tussen 2009 en 2021 weergegeven, maar nu met de bodemcontouren om de variabiliteit van de bankjes duidelijker te zien. In 2015 is er een bankje zichtbaar ter hoogte van raai 10025. In 2016 is het bankje hier aangeland en zijn er juist twee grote banken zichtbaar ten zuiden en ten noorden hiervan. De 2017, 2018 en 2020 bodems vertonen dan weer geen duidelijke bank. De tussenliggende jaren (2019 en 2021) wel.

Een belangrijke conclusie is dat de ondiepe kustzone na de versterking een veel grotere dynamiek vertoont dan voorheen. Het is goed mogelijk dat de strandsuppleties hieraan bijdragen. De grote verliezen uit de strandzone worden regelmatig gecompenseerd door strandsuppleties (2015, 2019). Deze suppleties zijn zichtbaar in de bodems van 2016 en 2020, waarna weer hetzelfde erosieve proces optreedt (zie bodem 2018 t.o.v. 2016). Na elke suppletie vervormt het dwarsprofiel, er verplaatst zand van het strand naar de ondiepe vooroever waar het een bank vormt.



Figuur 2-6: Ontwikkeling van de kustzone tussen raai 9925 en 10140 aan de hand van de Jarkusgrids voor de jaren 2009, 2011, 2014, 2016, 2018 en 2020.



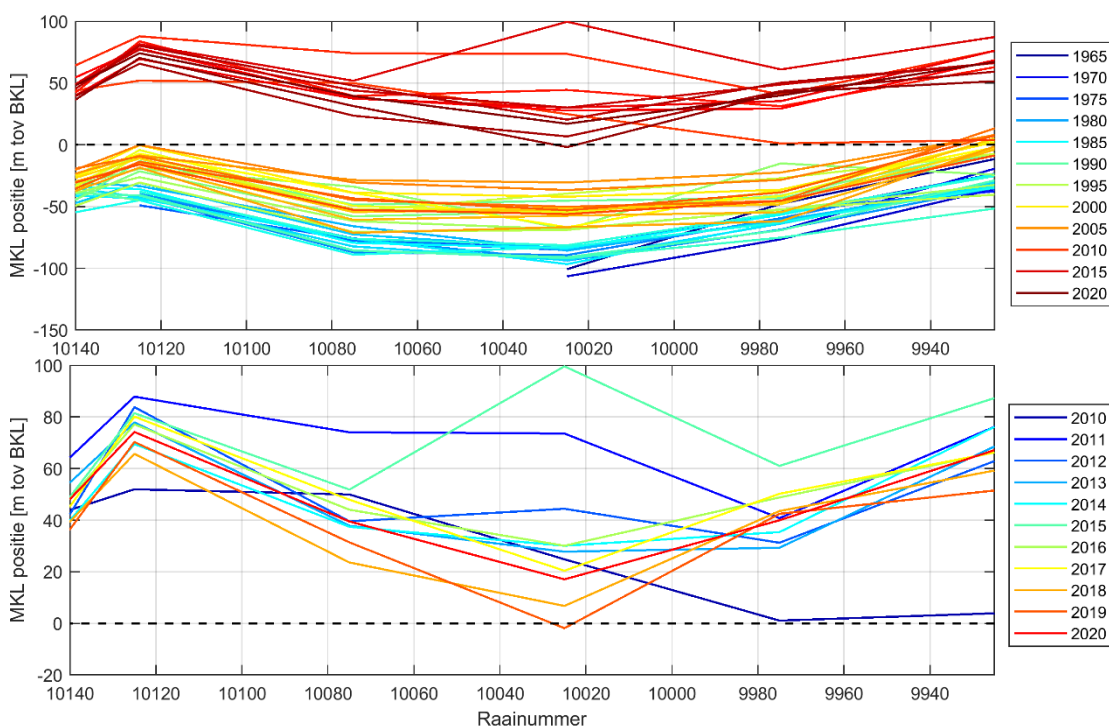
Figuur 2-7 Ontwikkeling van de kustzone tussen raai 9925 en 10140 aan de hand van de Jarkusgrids voor de jaren 2009, 2010, 2012, 2015, 2016 en 2021.

2.4 Detailanalyse van de kustindicatoren

De ontwikkeling van de kustlijn wordt ook uitgedrukt door middel van de kustindicatoren MKL (Momentane KustLijn), GLW (Gemiddeld LaagWaterlijn), GHW (Gemiddeld HoogWaterlijn), Duinvoet positie en de droge strandbreedte (duinvoet – GHW).

De ligging van de MKL is weergegeven tussen raaien 10140 en 9925 ten opzichte van de vigerende BKL positie (Figuur 2-8). Sinds 1965 heeft de MKL zich zeewaarts verplaatst, en vanaf 1990 fluctueert de MKL over een bandbreedte van ~30m. Na aanleg van de Zwakke Schakel versterking in 2011 is de MKL ~50m zeewaarts verplaatst. Sindsdien vertoont de MKL-positie een grillig verloop over de verschillende jaren, veroorzaakt door de erosieve trends en de strandsuppleties in 2015 en 2019 (onderste paneel in Figuur 2-8). Bij raai 10025 ligt de MKL dicht bij de BKL, en wordt de BKL in 2019 overschreden.

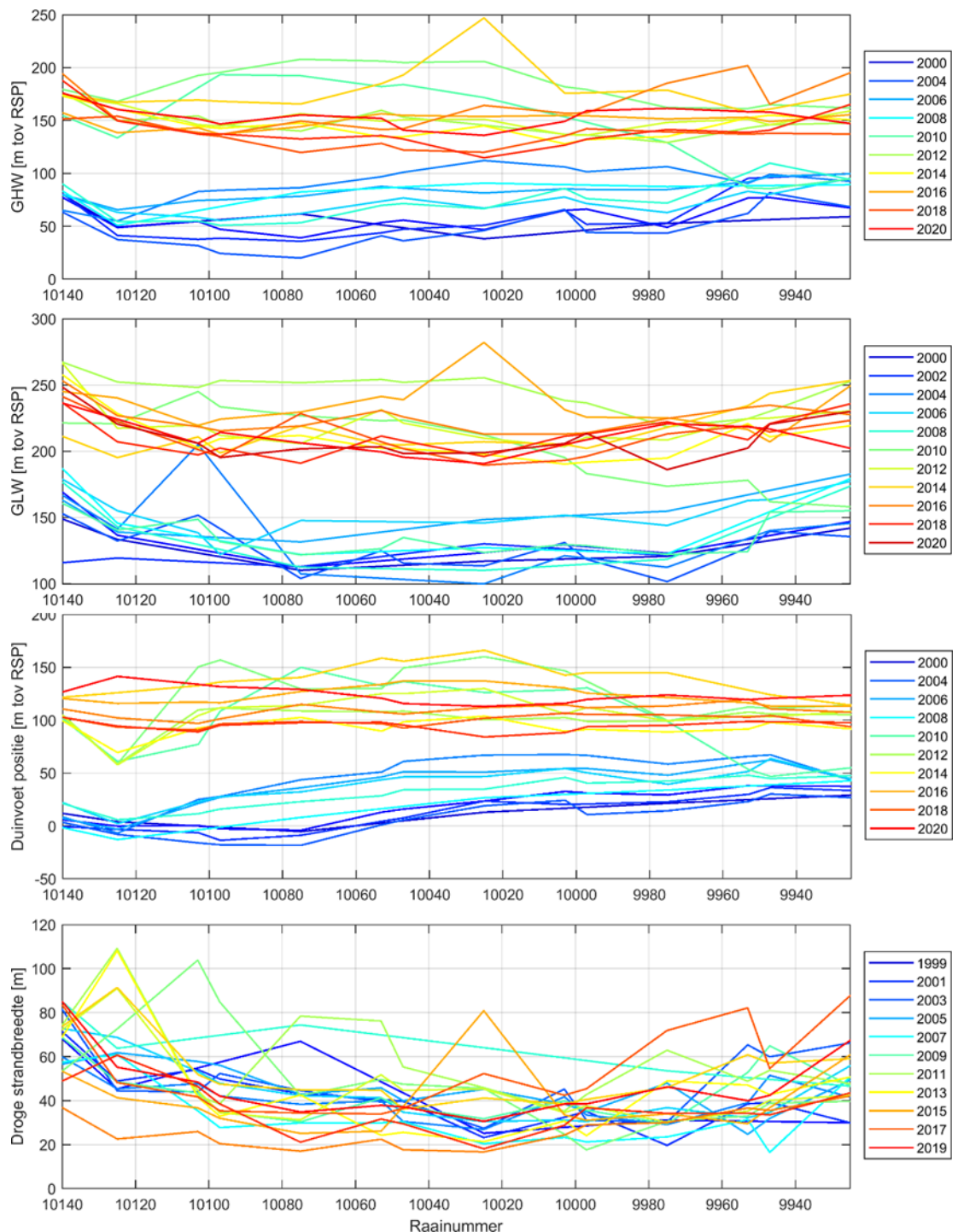
Zowel voor als na de Zwakke Schakel versterking vertoont de MKL een grote bandbreedte in variatie. De minimum MKL positie treedt bij beide op tussen raai 10040 en 10020. De Zwakke Schakel versterking heeft in dit opzicht geen effect op het MKL gedrag.



Figuur 2-8: Verloop van de MKL positie uitgedrukt ten opzichte van de BKL-positie voor het kustvak Scheveningen gelegen tussen raaien 10140 en 9925 over de periode 1965-2020 (boven) en 2010-2020 (onder).

De GHW en GLW geven een overeenkomstig beeld (Figuur 2-9). Na de zeewaartse verplaatsing ten gevolge van de dijk-in-boulevard versterking, fluctueert de GHW en GLW in de tijd. De Duinvoet (+3m NAP) is voor Scheveningen niet representatief voor een duinvoetpositie, omdat het strand bij Scheveningen hoger in het profiel ligt (max +4,5m NAP) door de boulevard. De Duinvoetpositie zoals weergegeven in Figuur 2-9 geeft slechts de kustlangse variatie van de +3m NAP positie op het strand aan, en laat over de laatste 5 jaar weinig kustlangse variatie zien. De Duinvoetpositie wordt sterk beïnvloed door de aangebrachte strandsuppleties in bijvoorbeeld 2015 en 2019, omdat deze zijn aangebracht tussen +4m en +3,5m NAP.

De droge strandbreedte, berekend als de afstand tussen de GHW en Duinvoetpositie, vertoont een grote variatie in tijd. De minimum strandbreedte ligt rond de 20m, terwijl er ook uitschieters tot meer dan 100m optreden. Er is geen duidelijk verschil in strandbreedte vóór en na aanleg van de dijk-in-boulevard in 2011, maar een groot deel van het droge strand boven +3m NAP wordt door de huidige Duinvoet definitie niet meegenomen in de berekening van de MKL-positie. De strandbreedte tussen havenhoofd en raai 10100 is over het algemeen groter dan ten noorden hiervan.



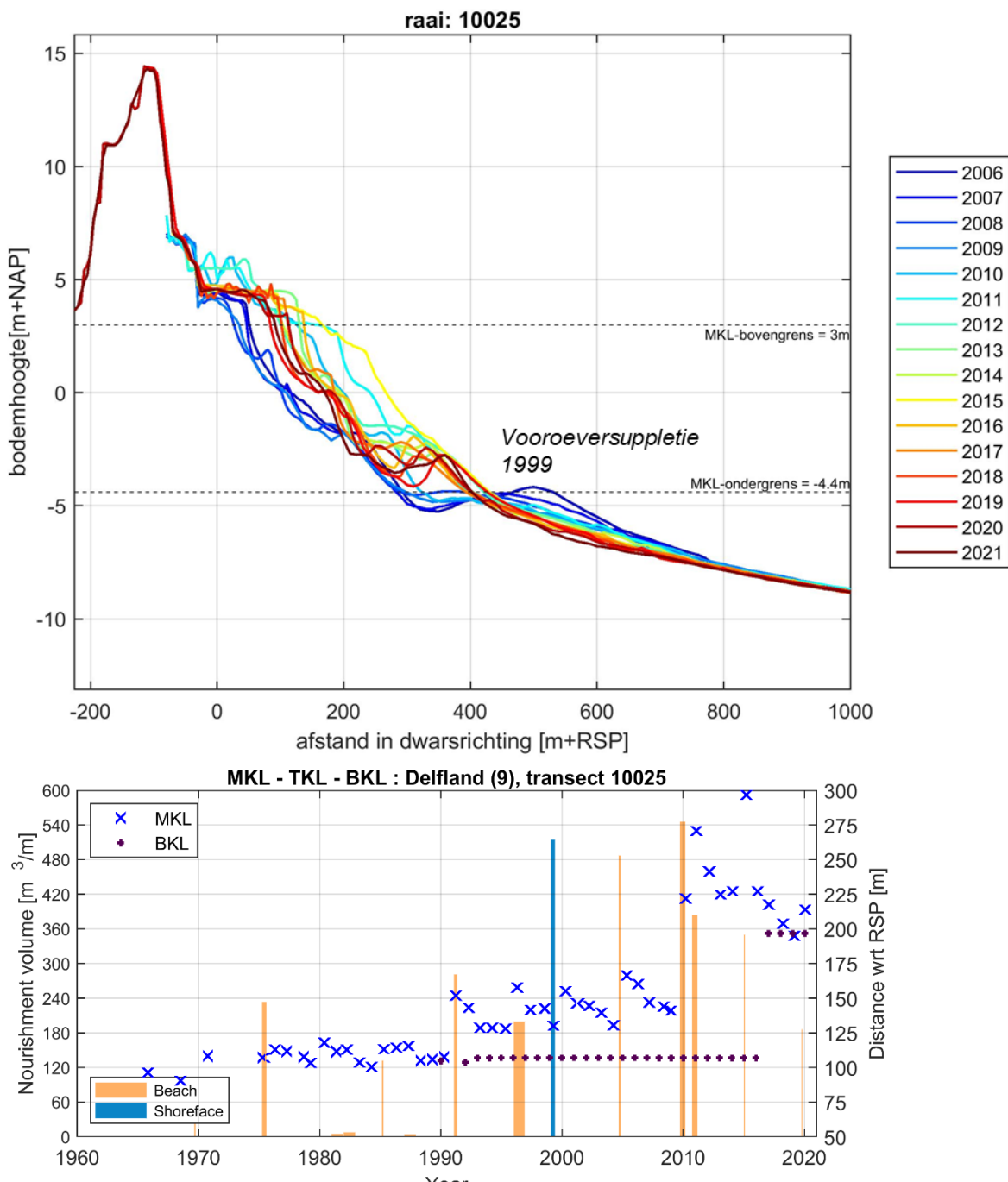
Figuur 2-9: Een overzicht van geselecteerde indicatoren voor het kustvak Scheveningen gelegen tussen raaien 10140 en 9925 sinds 2000. Van boven naar onder: gemiddeld hoogwaterlijn (GHW), gemiddeld Laagwaterlijn (GLW), de duinvoet (+3m) en de droge strandbreedte (afstand tussen GHW en de DV).

2.5 Detailanalyse van de individuele kustlijnprofielen

Eerst wordt de sturende erosieve raai 10025 geanalyseerd, vervolgens worden de geobserveerde trends ook afgeleid voor naastgelegen raaien 9975 en 10075.

2.5.1 Raai 10025

In de dwarsprofielen van raai 10025 (Figuur 2-10) is de uitbouw van het strand ten gevolge van de dijk-in-boulevard versterking in 2011 te zien. Hierna trekt het profiel zich telkens weer terug tussen de +4,5 en 0m NAP, en wordt in 2015 en 2019 weer aangevuld met een strandsuppletie van respectievelijk 700.000 en 400.000 m³. Er ontstaat een (onnatuurlijk) steil profiel met een hoog strand dat als een platform aan de boulevard ligt.

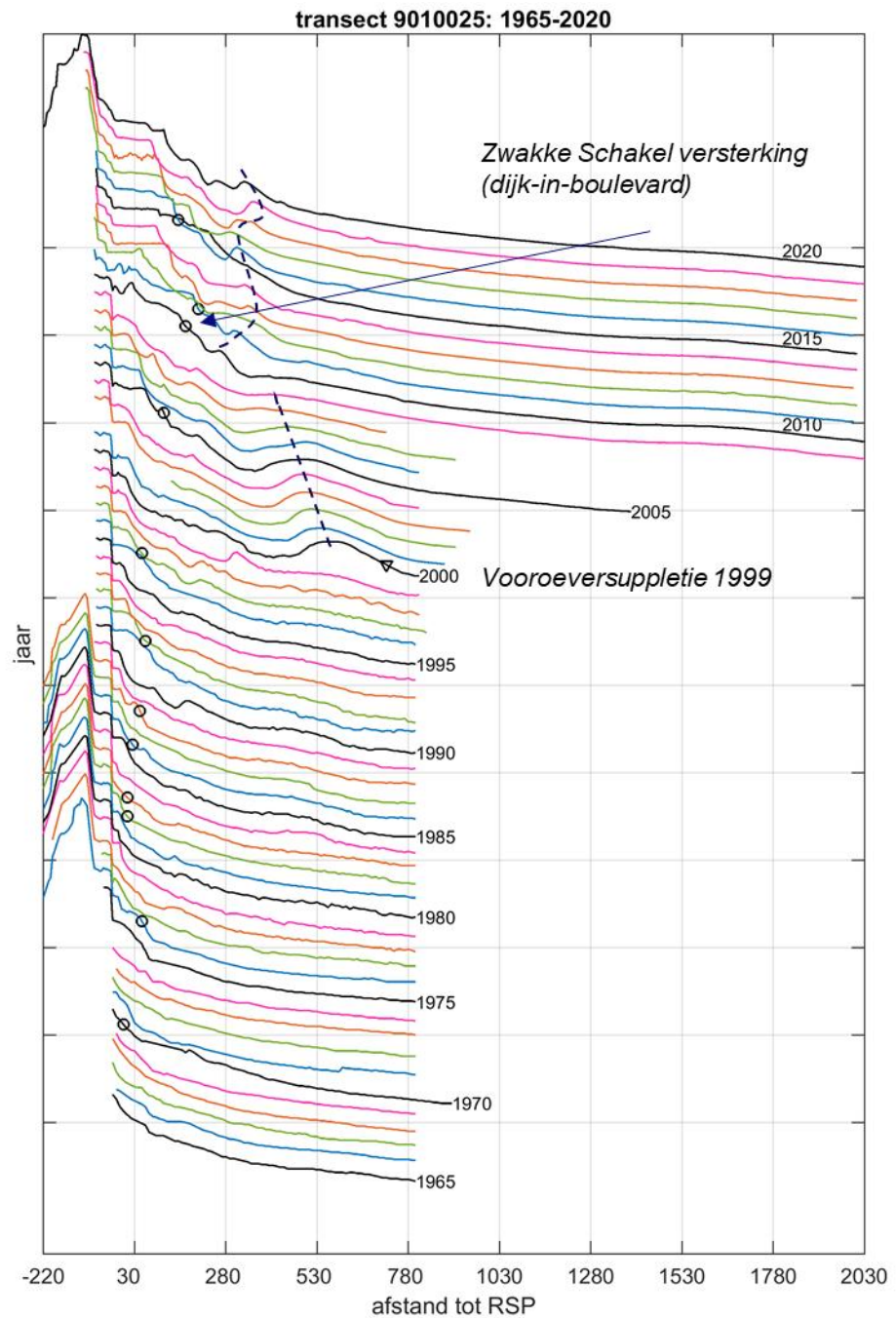


Figuur 2-10 – Ontwikkeling van dwarsprofiel 10025 (boven) en bijbehorende MKL-ontwikkeling (onder).

Lager in het profiel is te zien dat er een kleine bank ontstaat vanaf 2011 (Figuur 2-10), met een variërende positie rond 300m tot de RSP. Zoals ook geconcludeerd in de analyse van de JarKus-grids lijkt deze bank te ontstaan als respons op de uitgevoerde suppleties. De ontwikkeling van de bank wijkt sterk af van de natuurlijke banken elders langs de Hollandse kust: de vorming van de bank lijkt het resultaat van depositie van het geërodeerde strand. De strandsuppleties creëren een onnatuurlijk steil dwarsprofiel. De initiële respons van het systeem hierop is een herverdeling van het zand van het strand naar de ondiepe vooroever. De helling neemt dan af, hieruit ontstaat vervolgens een brekerbank. Deze bank is zeer variabel in tijd en de ruimte. Dat deze bank continue aanwezig lijkt te zijn in dit dwarsprofiel komt waarschijnlijk door het frequent uitvoeren van strandsuppleties. Hierdoor blijft dit proces zie herhalen. Ook voor de versterking was er tijdelijk een brekerbank zichtbaar. Deze bank ontstond toen echter uit de 1999 vooroeversuppletie en was vrijwel uitgedempt toen de versterking werd aangelegd (Figuur 2-11).

De ontwikkeling van de MKL-positie voor raai 10025 (Figuur 2-10) laat zien dat de MKL positie zich sinds 1965 zeewaarts heeft verplaatst, met een grote sprong in 2011 ten gevolge van de dijk-in-boulevard versterking. De MKL-trends kunnen worden verdeeld in drie periodes met karakteriserend gedrag: 1) Tot 1990 is er weinig variatie in de MKL positie, waarschijnlijk veroorzaakt doordat het strand vast ligt tussen de strandhoofden. Het strandvolume wordt op peil gehouden door frequent terugkerende kleine suppleties. 2) Tussen 1990 en 2010 worden de suppletievolumes groter, en dit resulteert in een vrij constante terugtrekking in de MKL-positie van ~6,5 m/jaar, na steeds een uitbouw door de suppletie. 3) Vanaf 2011, na aanleg van de zwakke schakel versterking, vertoont de MKL trend grotere fluctuaties. De trend in de laatste 5 jaar lijkt wat groter (~10 m/jaar) ten opzichte van de periode 1990-2010. Voor raai 10025 is het moeilijk om de MKL zeewaarts van de BKL te houden, mede door de zeewaartse verlegging van de BKL in 2017. De (relatief) kleine strandsuppletie van 2019 heeft een beperkt effect gehad op de MKL positie.

Op basis van deze analyse kan geconcludeerd worden dat het dwarsprofiel een sterke respons vertoont op de suppleties en eigenlijk de laatste decennia nooit een natuurlijk evenwicht heeft bereikt. Het uitdempen van de in 1999 aangelegde vooroeversuppletie werd gevolgd door de versterking van de Zwakke Schakel versterking. Deze versterking heeft voor een zeer steil, onnatuurlijk profiel gezorgd met een hoog platform aan de boulevard. Herverdeling van het strand naar de ondiepe vooroever veroorzaakt veel verlies en frequent terugkerende suppleties zijn noodzakelijk. Deze suppleties houden echter ook het steile kustprofiel (en het grote verlies) in stand.

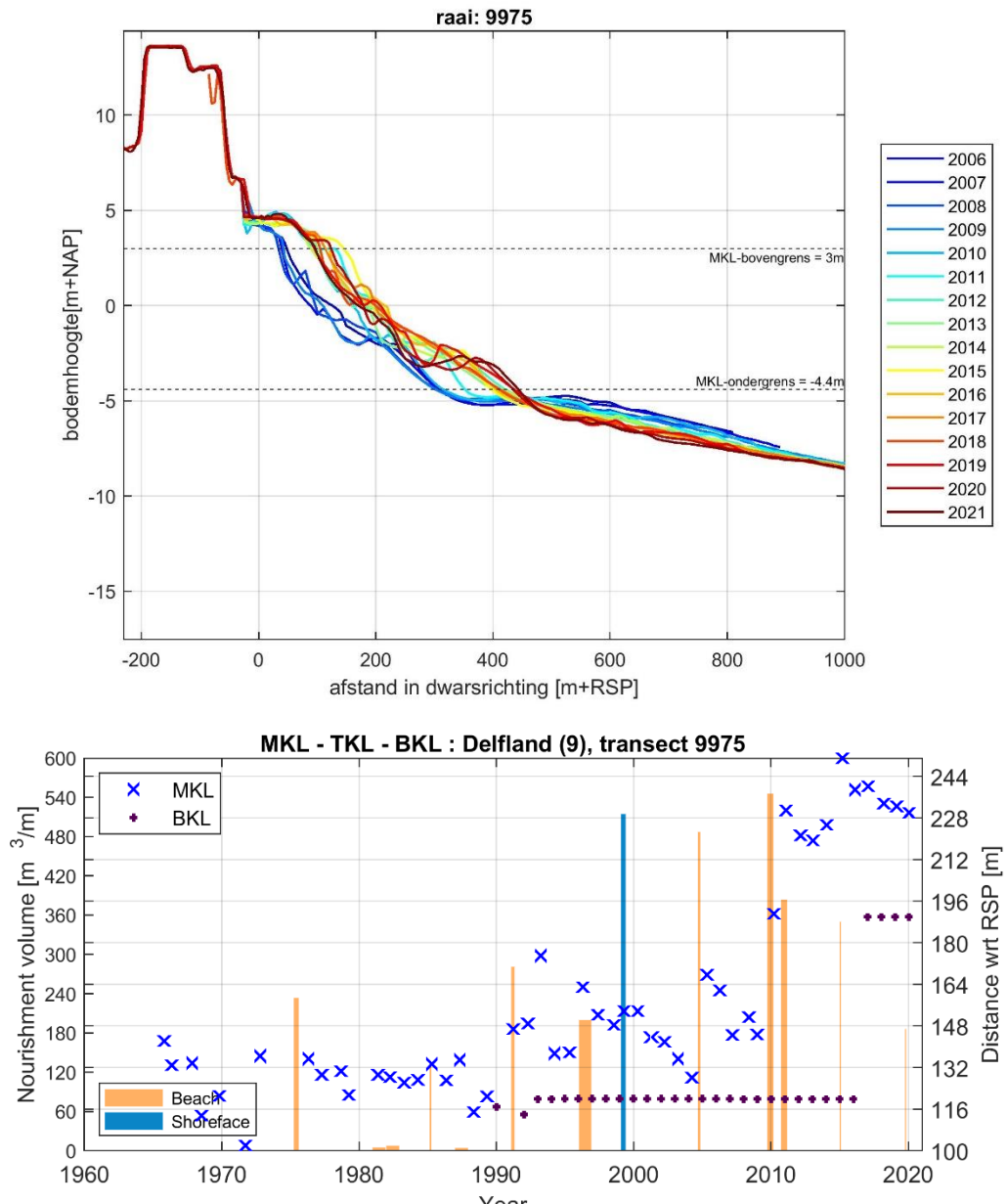


Figuur 2-11 – Timestack van dwarsprofielen van raai 10025. ∇ en O geven respectievelijk het tijdstip van uitgevoerde vooroever- en strandsuppleties aan, de gestreepte lijnen de ontwikkeling van de bank

2.5.2 Raai 9975

Raai 9975 ligt ten noorden van raai 10025, en vertoont dezelfde trends als raai 10025. In de dwarsprofielen van raai 9975 is de sterke uitbouw door de dijk-in-boulevard versterking in 2011 te zien (Figuur 2-12). Ook hier trekt het profiel zich weer terug na de strandsuppleties in 2015 en 2019, en vormt er een bank na 2011.

De MKL-ontwikkeling is wederom op de delen in drie periodes. Voor 1990 is de MKL positie vrijwel stabiel, en tussen 1990 en 2010 is er een gemiddelde terugtrekking na elke suppletie van $\sim 6,7$ m/jaar. Deze trend blijft ongeveer gelijk na aanleg van de zwakke schakel versterking in 2011. In tegenstelling tot raai10025 ligt de MKL hier nog voldoende zeewaarts van de BKL. Dit komt enerzijds omdat de MKL-afname iets kleiner is en anderzijds omdat de BKL hier iets meer landwaarts ligt.

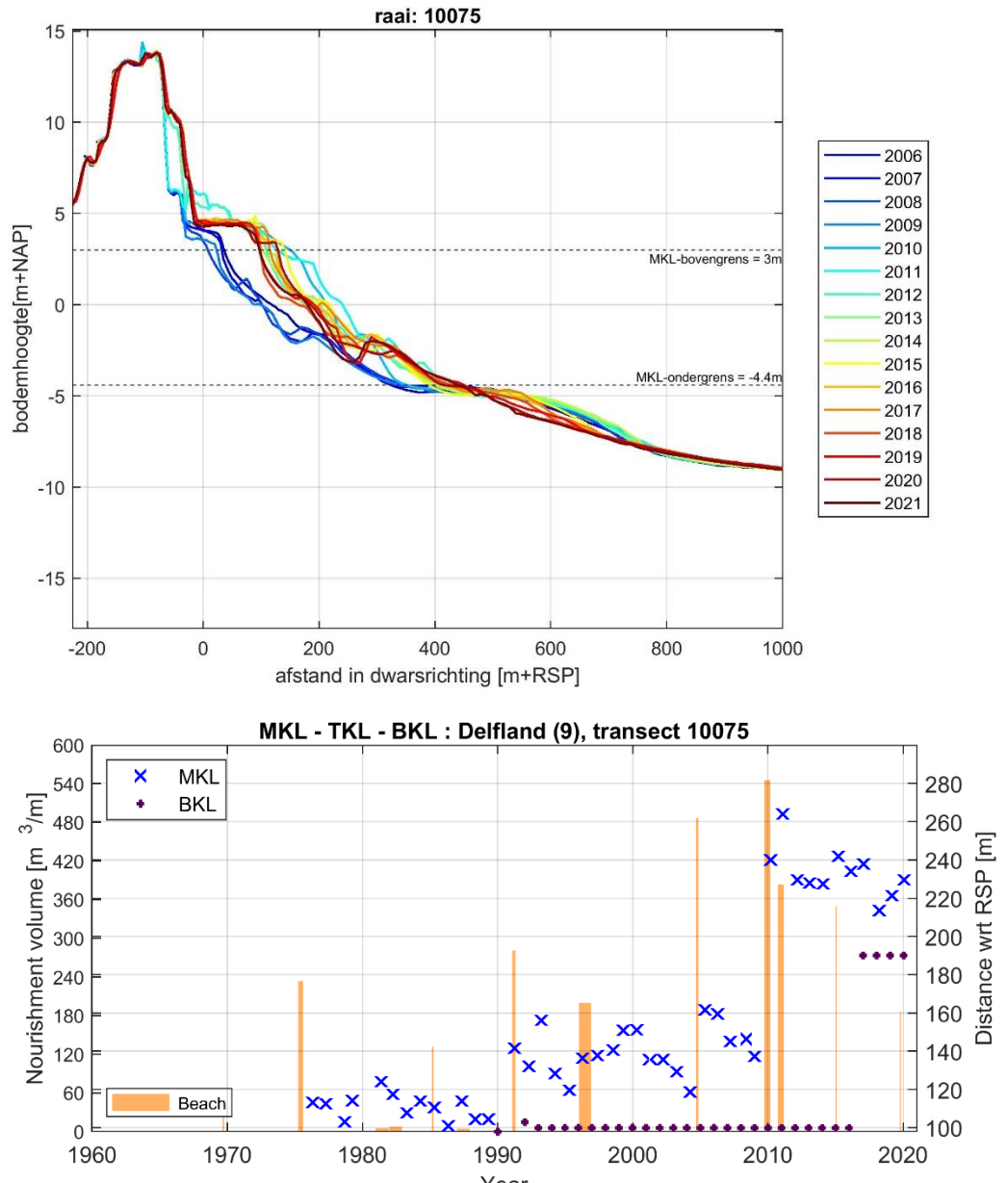


Figuur 2-12 – Ontwikkeling van dwarsprofiel 9975 (boven) en bijbehorende MKL-ontwikkeling (onder).

2.5.3 Raai 10075

Raai 10075 ligt ten zuiden van raai 10025 en vertoont vergelijkbare trends in profiel ontwikkeling als raai 10025 (Figuur 2-13). Het profiel vertoont een sterke respons op de supplementies, waarbij het strandprofiel naar een evenwicht lijkt toe te willen werken. De MKL-trends laten eenzelfde drie karakteriserende periodes zien: een stabiele MKL-ligging voor 1990, een MKL-terugtrekking tussen 1990-2010 van ~6,3 m/jaar, en na 2011 een sterk fluctuerende MKL-positie met trends variërend tussen de -6 en -11 m/jaar.

Ook in deze raai wordt de MKL niet overschreden. Het verschil met raai 10025 ligt hier in de laatste 3 metingen. Tot 2018 verplaatst de MKL landwaarts. Sinds 2018 is er echter een zeewaartse trend zichtbaar en vindt hier geen overschrijding van de BKL plaatst.



Figuur 2-13: Ontwikkeling van dwarsprofiel 10075 (boven) en de bijbehorende MKL ligging.

2.6 Samenvatting

Op basis van de meetdata is de conclusie dat het morfologische gedrag van de ondiepe kustzone bij Scheveningen sinds 1999 gedomineerd wordt door ingrepen.

De vooroeversuppletie in 1999 geeft een relatief grote verstoring van het morfologische gedrag. Voor aanleg van de vooroeversuppletie was er geen brekerbank aanwezig in het profiel. De suppletie zorgt ervoor dat er een brekerbank ontstaat. De brekerbank en trog blijven een aantal jaar behouden, maar zijn vrijwel uitgedempt voor de dijk-in-boulevard versterking die in 2010 is uitgevoerd.

Sinds 2010 is met name het morfologische gedrag van de ondiepe vooroever verstoord. De versterking creëert een zeer steil strandprofiel. Dit profiel is ver uit het natuurlijke evenwicht en wordt snel herverdeelt. Een deel van dit geërodeerde sediment accumuleert in een (kleine) brekerbank die zo rond de -4 m NAP ontstaat. Deze bank vormt geen continue doorgaan de bank, maar is zeer variabel in tijd en ruimte.

De herverdeling van het steile strandprofiel zorgt voor een grote kusterosie, waardoor frequent terugkerende suppleties nodig zijn. Deze suppleties houden het onnatuurlijke steile profiel in stand, waardoor ook de brekerbank weer wordt gevormd.

3 Modelling van de vooroeversuppletie

3.1 Het Delft3D model

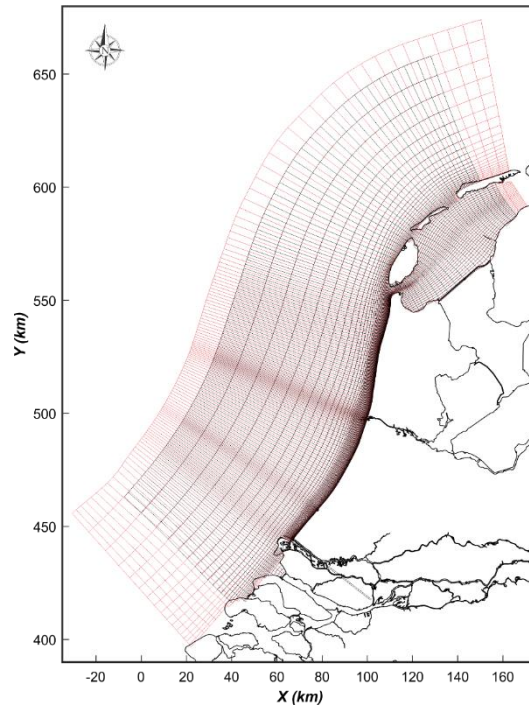
3.1.1 Rekenrooster

Voor de modellering is gebruik gemaakt van het 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 200 x 233 roostercellen. Het bijbehorende rooster voor het golfmodel is in essentie identiek aan het stromingsmodel, maar aan de zeezijde met een aantal roostercellen uitgebreid. De belangrijkste aanpassing door Van der Hout et al. (2009) was implementatie van de toen nieuwe Delft3D Online Morphology aanpak (deze aanpak is nu de standaard optie). Van der Hout concludeert dat bij deze omzetting de transporten op diep water niet nauwkeurig gerepresenteerd werden. Deze tekortkomingen zijn met verdere doorontwikkeling van Delft3D opgelost.

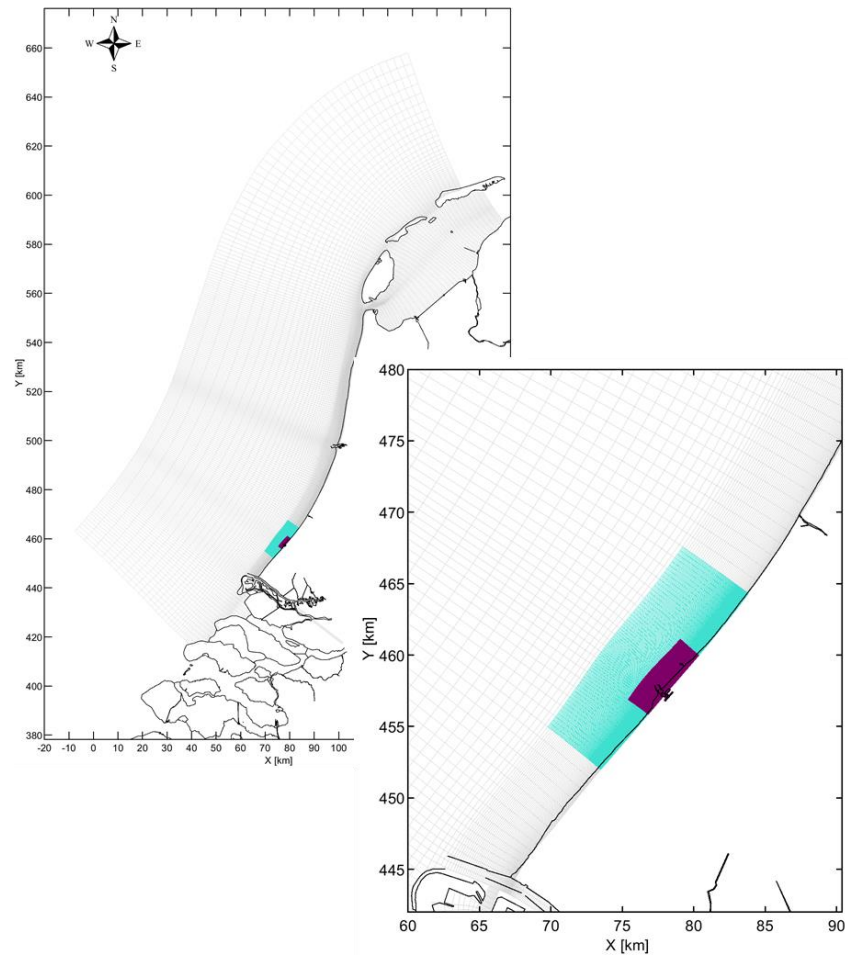
Het HCZ model is uitvoerig gekalibreerd en gevalideerd met meetdata (Roelvink et al. 2001a). De waterstanden hebben een rms fout van kleiner dan 6% in amplitude en kleinere dan 10° in de M2 component. De rms fout van de debieten in Marsdiep is kleiner dan 10%. Een vergelijking met de gemeten residuele stromingen in Noordwijk geeft een residuele fout die kleiner is dan 0,01 m/s. Gezien de uitvoerige validatie en kalibratie met metingen langs de centrale kust lijkt dit model dan ook geschikt 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. De resolutie is echter niet voldoende om de transporten bij Scheveningen 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 tussen de haven van Scheveningen en het Zwarte Pad is dan een resolutie van ongeveer 20 m in langsrichting en 3 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.



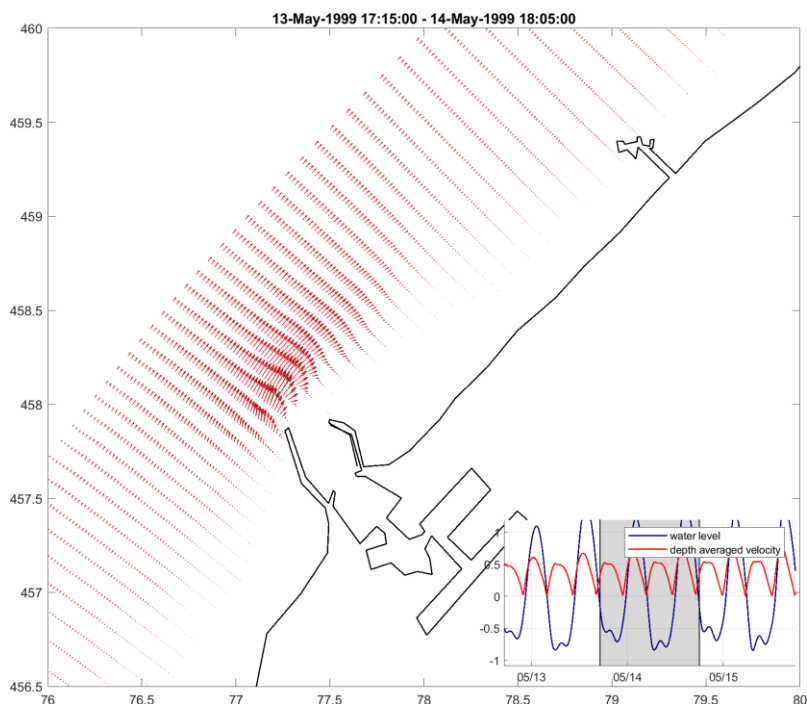
Figuur 3-1: Grootchalige stromingsrooster (zwart) en golfrooster (rood) van het originele HCZ model.



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 doortij-springtij cycli (van der Hout et al., 2009). Op basis van deze maandsimulatie is dan een morfologisch representatief getij bepaald. Dit morfologische getij is verkregen door het HCZ model te draaien over een springtij- doortij cyclus en het residuele (getijgemiddelde) transport te bepalen over de gehele periode. Tijdens deze simulatie worden ook de getijgemiddelde transporten voor ieder afzonderlijk dubbeldaags getij weggeschreven. Er ontstaat zo een tijdserie van getijgemiddelde transporten. De transporten van de verschillende, afzonderlijke dubbeldaags getijden worden daarna vergeleken met het totale residuele transport over de gehele springtij-dooortij cyclus (Figuur 3-3). Op basis van een optimale ruimtelijk correlatie wordt dan de meest representatieve periode geselecteerd. In dit geval is dat het dubbeldaags getij dat begint op 13 mei 1999 17:15 en loopt tot en met 14 mei 1999 18:05.



Figuur 3-3 Vectorvelden van tijdsgemiddelde residuele transporten in het kustvak Scheveningen op basis van de volledige springtij-dooortij cyclus (zwart) en op basis van het morfologische getij (rood). De tijdserie (rechtsonder) geeft de gekozen periode weer: 13 mei 1999 17:15 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 roosterzellen.

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

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 advection-diffusie vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korrel diameter van 250 μm .

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

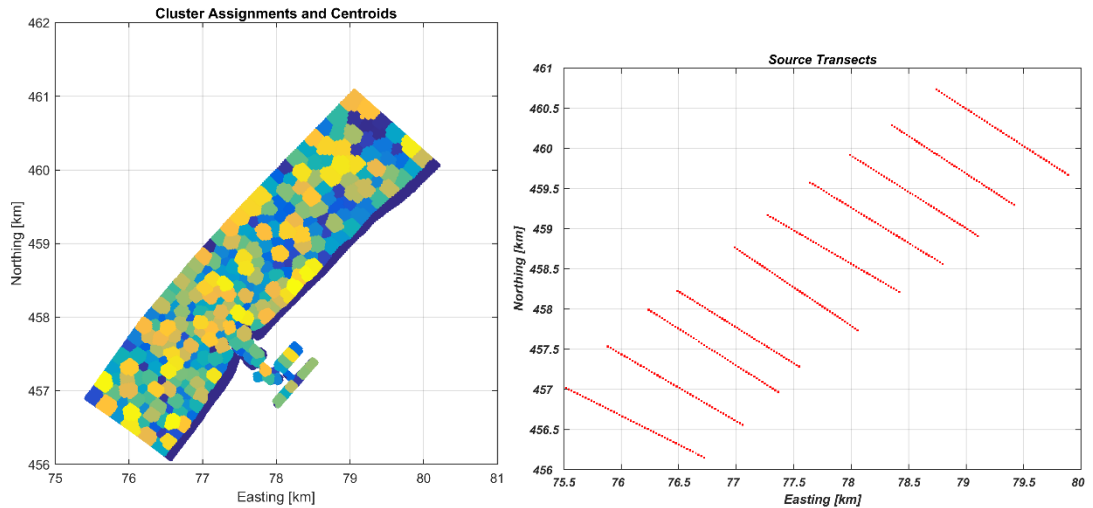
manier kunnen op eenvoudige en efficiënte wijze schattingen van de jaargemiddelde transporten worden verkregen. Een bijkomend voordeel van de morfostatische simulaties is dat de golfcondities onafhankelijk van elkaar kunnen worden gedraaid. De bodem blijft immers gelijk. Door gebruik te maken van een rekencluster kunnen de sommen efficiënt in termen van numerieke rekentijd worden opgelost.

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

Een nieuwe, alternatieve methode om een beter inzicht te krijgen in de grootschalige effecten van een ingreep is de SedTRAILS methode. *SedTRAILS* (*Sediment TRANsport visualization & Lagrangian Simulator*) is geen nieuwe of apart uit te voeren modelsimulatie maar een nabewerking op de resultaten van al uitgevoerde sedimenttransportmodellering. Op basis van de berekende (instantane) sedimenttransportvectoren worden transportpaden berekend. De transportpaden visualiseren de beweging van de deeltjes door het kuststelsel. Door analyse van de transportpaden vóór en ná suppletie kan inzicht worden verkregen hoe de transportpaden veranderen en hoever die veranderingen zich uitstrekken. Als de transportpaden alleen lokaal beïnvloed worden is het niet waarschijnlijk dat de suppletie een grootschalige invloed uitoefent. Als de transportpaden in de omliggende morfologische gebieden wel veranderen na suppletie geeft dit aan dat de suppletie het systeem wel grootschalig kan beïnvloeden. In dat geval zou er aanvullend onderzoek met bijvoorbeeld uitgebreide morfologische modellering noodzakelijk zijn om deze beïnvloeding te onderzoeken. Een aanvullende beschrijving kan worden gevonden in Elias en Pearson (2020). Binnen het KPP B&O Zeegaten onderzoek is SedTRAILS toegepast voor de analyse van systeemsuppleties bij Texel en Ameland (Elias et al., 2021b), het Bankje van Zoutelande (Elias et al., 2021a) en het in kaart brengen van transportpatronen in het Friesche Zeegat (Elias en Oost, 2021) en de Put van Hansweert in de Westerschelde (Elias et al. 2020).

De SedTRAILS-analyse is alleen uitgevoerd op de modelresultaten van het kleinste domein van het DD model. Dit domein beslaat het gehele kustvak in hoge resolutie. Door op het kleine model te concentreren is het mogelijk een hoge resolutie van de SedTRAILS bronlocaties te gebruiken (Figuur 3.4). Karakterisering van de transportpaden in het gehele kustvak is gebaseerd door het aanbrengen van 300 sedimentbronnen verdeeld over het gehele rekenrooster (Figuur 3.4, links). Naast deze grootschalige analyse zijn de sedimentverplaatsingen in detail doorgerekend door de 300 sedimentbronnen te herschikken in representatieve raaien (Figuur 3.4, rechts).

De verplaatsing van de sedimentdeeltjes wordt over 1 jaar gevolgd door het jaarlijks-gemiddeld morfologische getij 365 keer te herhalen. Deze tijdsduur is voldoende lang om voldoende ontwikkelde transportpaden te creëren.



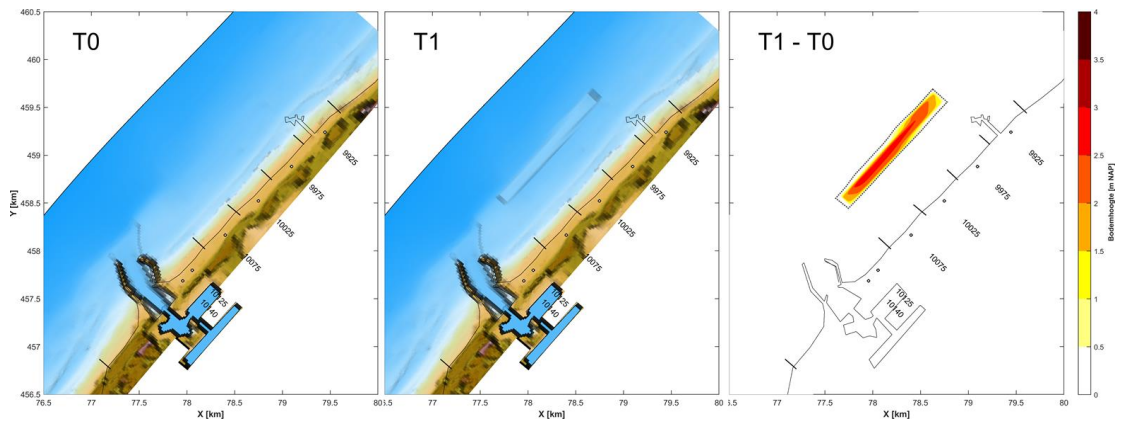
Figuur 3.4 Locaties van 500 sedimentbronnen verdeelt over het gehele kustvak (links) of in geselecteerde raaien (rechts).

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

3.2 Opzet modelsimulaties en suppletievariant

Het HCZ-DD model is gebruikt om een T_0 simulatie, de 2020 bodem vóór suppletie door te rekenen (Figuur 3-5). Voor de T_0 bodem is de bodemhoogte in de vaargeul van Scheveningen is overgenomen uit Leijnse & Huisman (2019). De strandhoofden bij Scheveningen zijn meegenomen in de simulaties als harde obstakels ('weirs' in Delft3D) om het effect van de strandhoofden op de stroming mee te nemen. De locatie van de strandhoofden in de simulaties is aangegeven in Figuur 3-5 (zwarte lijnen). De diepte van de strandhoofden is, bij gebrek aan meetgegevens, geschat op basis van de observatie dat de kop van strandhoofden bij laagwater zichtbaar zijn. GLW bij Scheveningen is -0,63 m NAP, en gegeven dat alleen de koppen van de strandhoofden zichtbaar moeten zijn, is gekozen voor een diepte van -0,2 m NAP.

Vervolgens is er een identieke simulatie uitgevoerd, maar nu met een bodem die is aangepast op het door Rijkswaterstaat aangeleverde suppletieontwerp (T_1). De suppletie is ontworpen aan de zeezijde van de al aanwezige brekerbank en strekt zich uit over drie raaien: 9975, 10025 en 10075. De aanlegdiepte ligt tussen de -5 m en -9 m en de kruinhoogte van de suppletie ligt op -5 m NAP. In totaal geeft dit in het rekenontwerp een volume van 500.000 m³.



Figuur 3-5 – Modelbodern voor de T0 en T1 simulatie, en het verschil tussen beide bodems (T1 - T0).

Beide simulaties, T0 en T1, 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) en de SedTRAILS transportpaden worden bepaald.

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

3.3 Modelresultaten T0-simulatie

3.3.1 Getij-gedreven stromingen en transporten

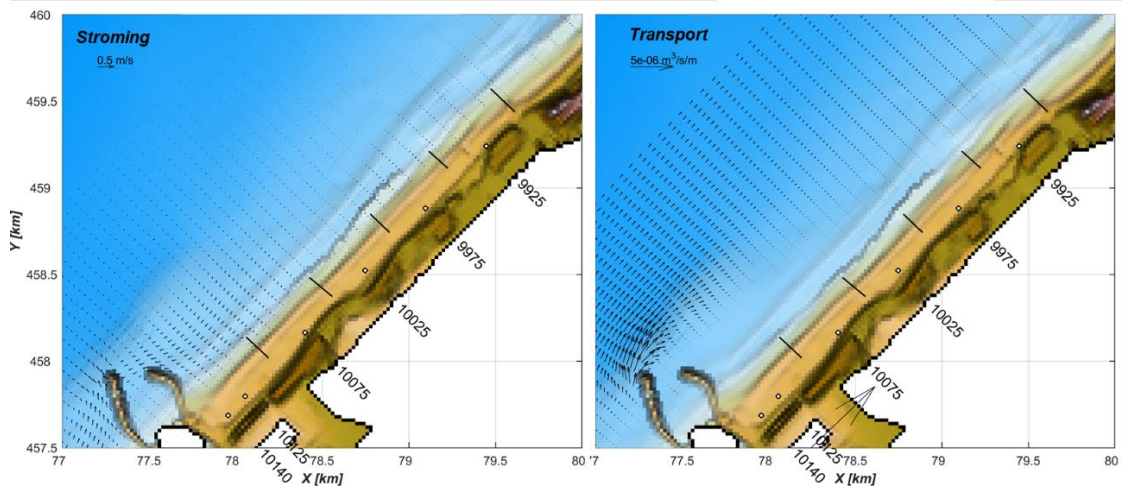
De instantane getijgedreven stromingen bij Scheveningen zijn weergegeven voor vier tijdstappen in de T0-simulatie (Figuur 3-7). De stromingen bij Scheveningen worden bepaald door de havendammen. Bij laagwater (06:35, Figuur 3-7) is de stroming zuidwaarts gericht en zijn de stromingen langs de kust kleiner dan zeewaarts. Bij het opkomend getij draait de stroomrichting om richting het noorden (11:35, Figuur 3-7) en nemen de stroomsnelheden toe tot maximaal 1 m/s (13:55, Figuur 3-7). Bij hoogwater treedt de sterkste stroming op bij de kop van de zuidelijke havendam door contractie van de stromingen rondom de havendammen. Ook treedt er bij de kust een circulatiepatroon op tussen de noordelijke havendam en de eerste strandhoofd ten noorden hiervan. De circulatiestroming verdwijnt wanneer het getij kentert (ebstroming), en de stromingsrichting weer zuidwaarts is. Bij de zuidwaartse stroming treedt wederom een versnelling rondom de havendammen op.

De residuele stromingen (gemiddeld over het morfologisch getij, Figuur 3-6 links) zijn beperkt, met een maximale stroomsnelheid van 0,1 m/s langs de havendammen.

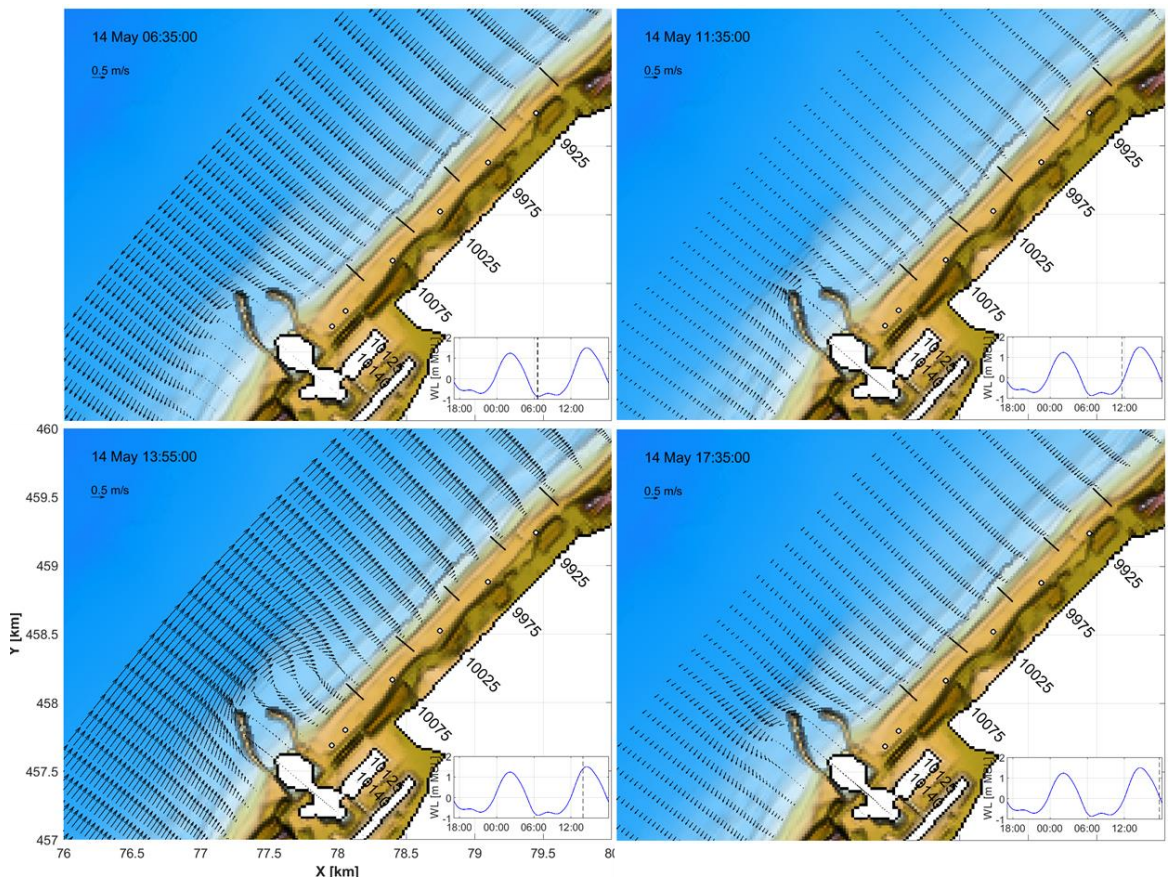
De instantane getijgedreven sedimenttransporten zijn weergegeven voor dezelfde vier tijdstappen (Figuur 3-8). De transporten worden bepaald door de maximale snelheden rondom de havendammen bij vloedstroming (13:55, Figuur 3-8). Het patroon van de circulatiestroming is niet terug te zien in de transportvectoren. Dit wordt veroorzaakt door de relatief grote asymmetrie tussen de maximale eb- en vloedtransporten. Het residueel transportpatroon is vrijwel gelijk aan de transporten tijdens maximale vloed (Figuur 3.9c). Tijdens eb liggen de snelheden rond de kritische snelheid voor sedimentverplaatsing (Figuur 3.9b). 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 ook waarom de residuele snelheden en transport vectoren zich zo anders gedragen.

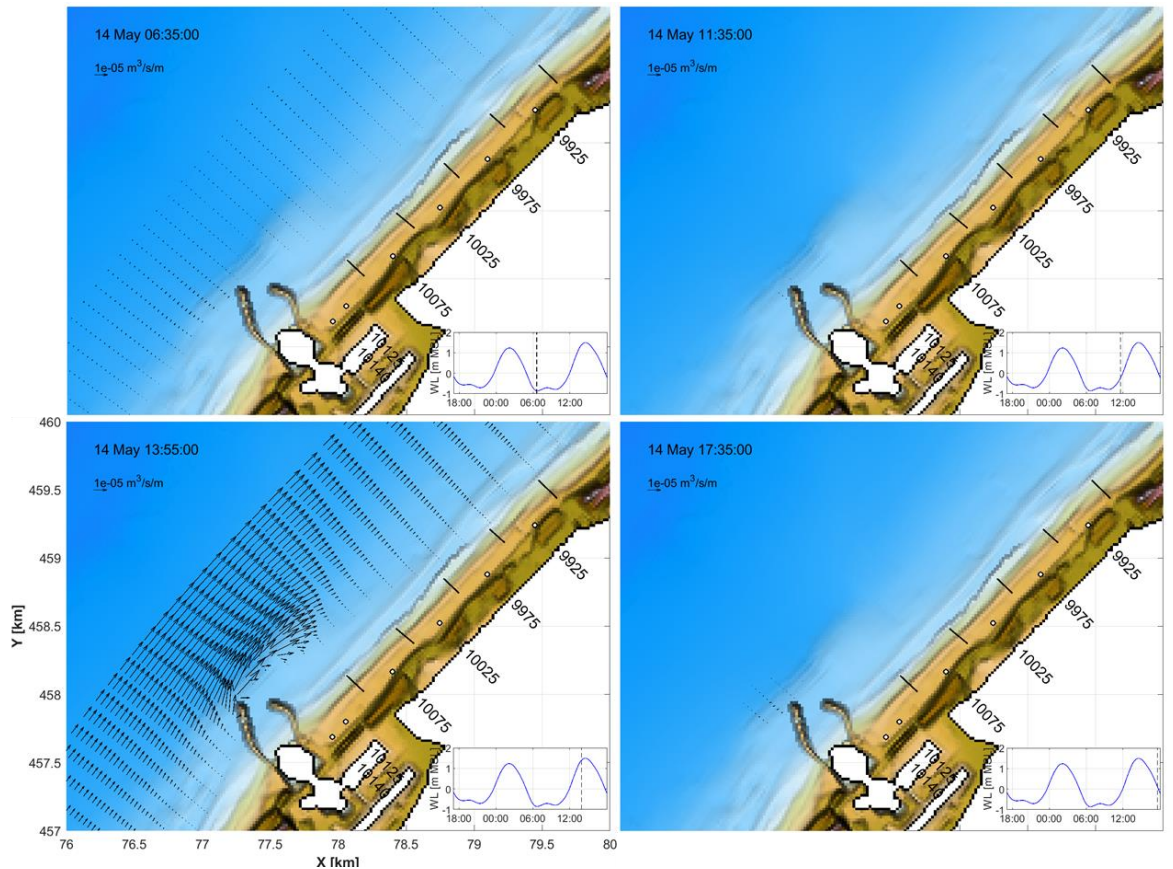
Deloedgedomineerde transporten zijn groter dan de eb-gedomineerde transporten. Dit is terug te zien in het residuele transport (gemiddeld over het morfologisch getij, Figuur 3-6 rechts), dat wordt gekarakteriseerd door noordwaarts gericht (vloedstroming) transport. In het algemeen zijn de gesimuleerde getijgedreven transporten bij de kust in het model minimaal.



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



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

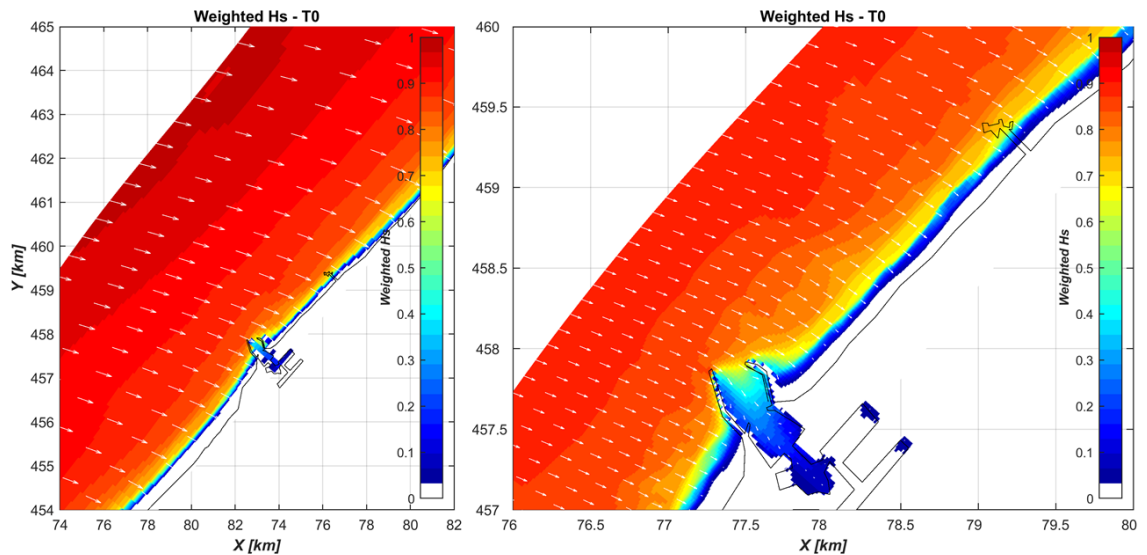


Figuur 3-8 – Sedimenttransporten voor 4 tijdstappen over de getijperiode op basis van de T0 bodem.

3.3.2 Invloed van golven

De jaargemiddelde golfhoogte op grotere schaal en bij Scheveningen 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. De getijgemiddelde golfhoogte per individuele golfconditie zijn te vinden in Appendix B.1.

Op grote schaal is er weinig kustlangse variatie in de golfhoogte te zien. Richting de kust neemt de golfhoogte af door golfbreking. Nabij de noordelijk havendam van Scheveningen is wel duidelijk de golf afscherpende werking van de havenhoofden terug te zien. Over een afstand van 200 m nemen hier de golven nabij de kust af. De jaargemiddelde golfrichting komt uit het westen.

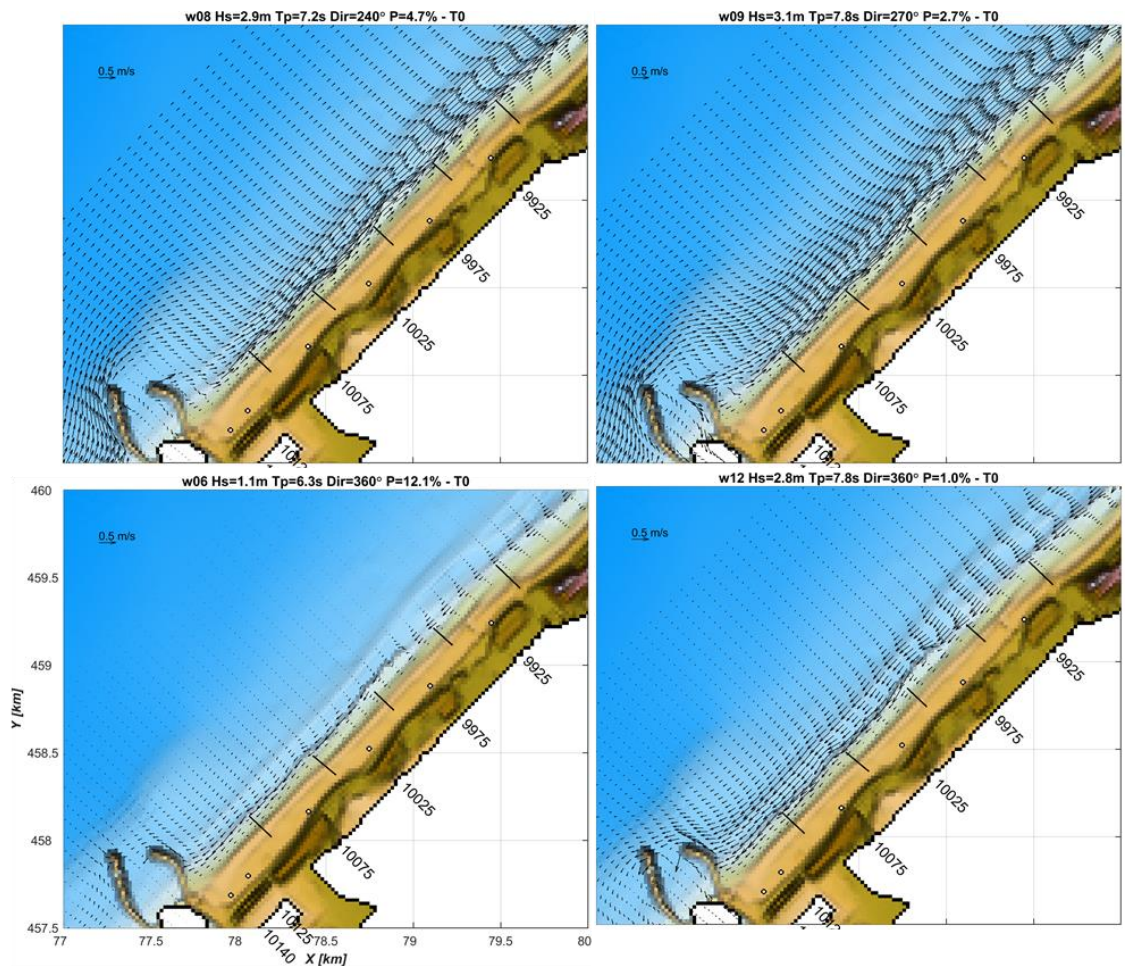


Figuur 3-9 – Jaargemiddelde golfhoogte en -richting (witte vectoren) voor het grootschalige domein (links) en bij Scheveningen (rechts). De locatie van de suppletie is weergegeven door de polygoon.

3.3.3 Getij- en golf-gedreven stromingen en transporten

Het effect van de golven op de sedimenttransporten is weergegeven door middel van de residuele (getijgemiddelde) stromingen en transporten voor vier golfcondities. De golfcondities zijn representatief voor hoge golven uit het noorden (w06 en w12, Figuur 3-10 en Figuur 3-11 onderste panelen) en hoge golven uit het westen (w08 en w09, Figuur 3-10 en Figuur 3-11 bovenste panelen).

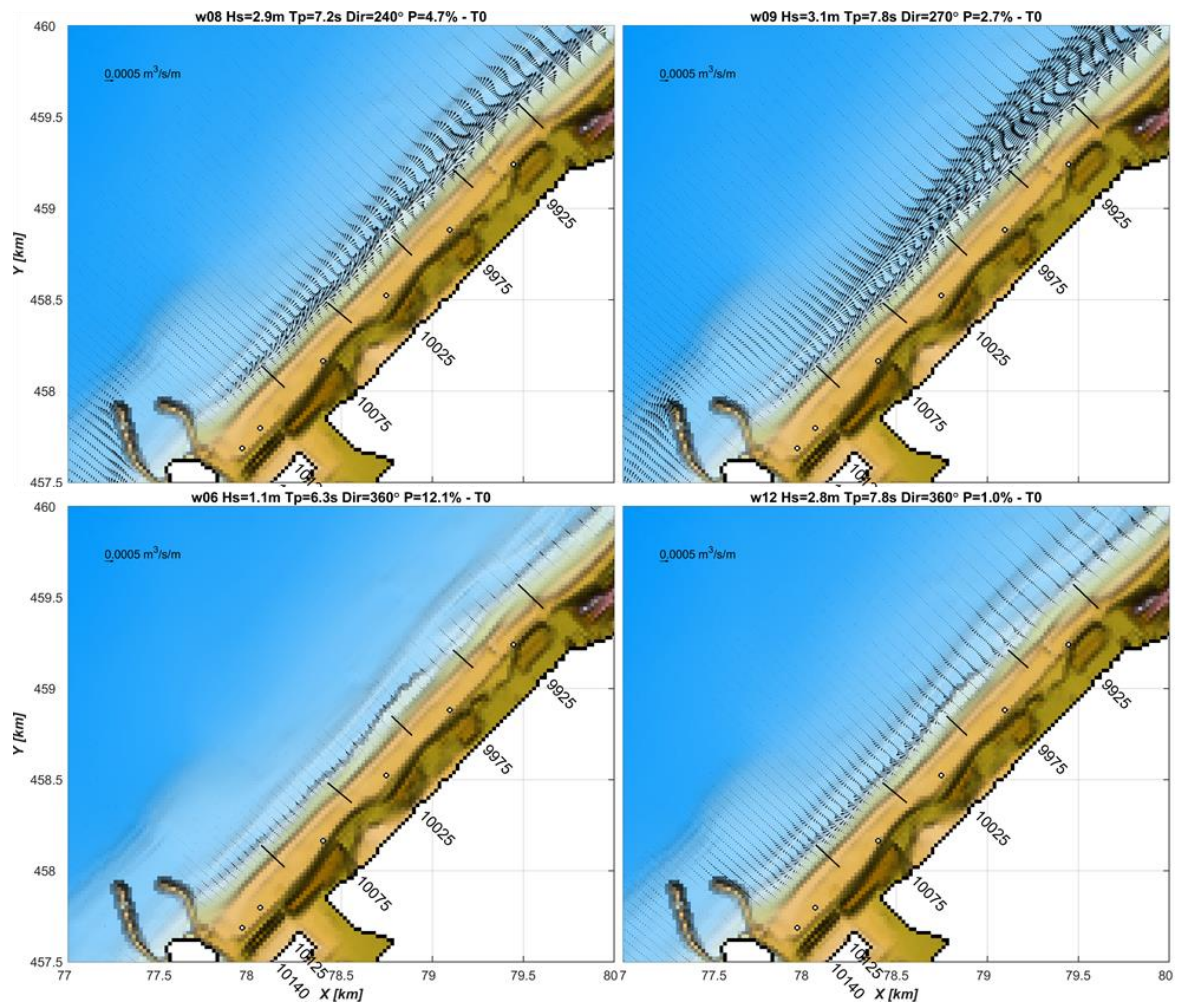
De golven resulteren in een sterke residuele stroming bij de kust (Figuur 3-10), en laat zien dat de residuele stroming wordt gedomineerd door golven (vergelijk met de getijgedreven stroming in Figuur 3-6 links). Golfcondities uit het noorden resulteren in een zuidwaarts gerichte stroming, en golfcondities uit het westen resulteren in noordwaarts gerichte stroming. De kustlangse variatie in de stromingen worden veroorzaakt door een combinatie van strandhoofden met kustlangse bodemvariaties. De sterkste stroming vindt voor alle golfcondities plaats bij het strand, voor de hogere golfcondities treedt er ook een sterke stroming op de brekerbank op.



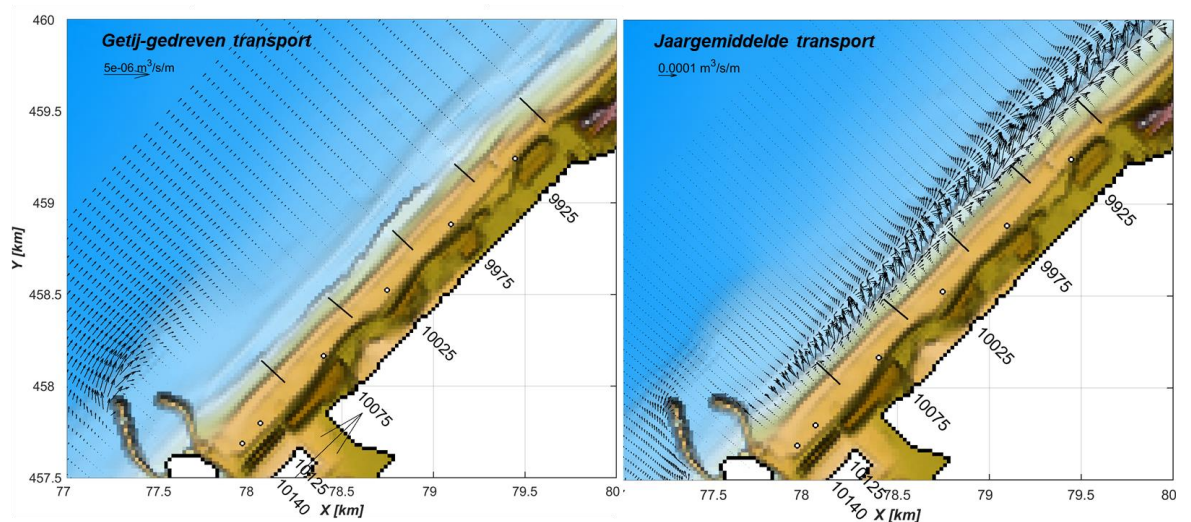
Figuur 3-10 – Residuele (getijgemiddelde) stroming voor golfcondities uit het westen (boven, 8 en 9), uit het noorden (midden, 6 en 12).

De grote stromingen in de kustzone komen ook tot uitdrukking in de sedimenttransporten. In Figuur 3-11) worden de getijgemiddelde sedimenttransporten samengevat voor de 4 golfcondities. De residuele transporten bij de kust zijn golf-gedomineerd, de transporten zijn groter voor de golfcondities uit het westen en het transport op de brekerbank neemt toe voor hogere golven. Ook is te zien dat de voor de golfcondities uit het westen (Figuur 3-11, bovenste panelen) het transport toeneemt richting het noorden. Let op het verschil in schaalvector in vergelijking met Figuur 3-8. Het transport dat is gedreven door alleen getij is 10 ordes kleiner dan voor de simulaties inclusief golven.

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 jaargemiddelde sedimenttransport (Figuur 3-12, rechts) laat zien dat de residuele transporten noordwaarts zijn gericht. Ook worden de transporten groter richting het noorden, zowel op de brekerbank als bij het strand. Ook is te zien dat wanneer er alleen getij-stroming wordt berekend er voornamelijk transport optreedt rondom de havendammen, het meenemen van golven resulteert in transport bij het strand en brekerbank.



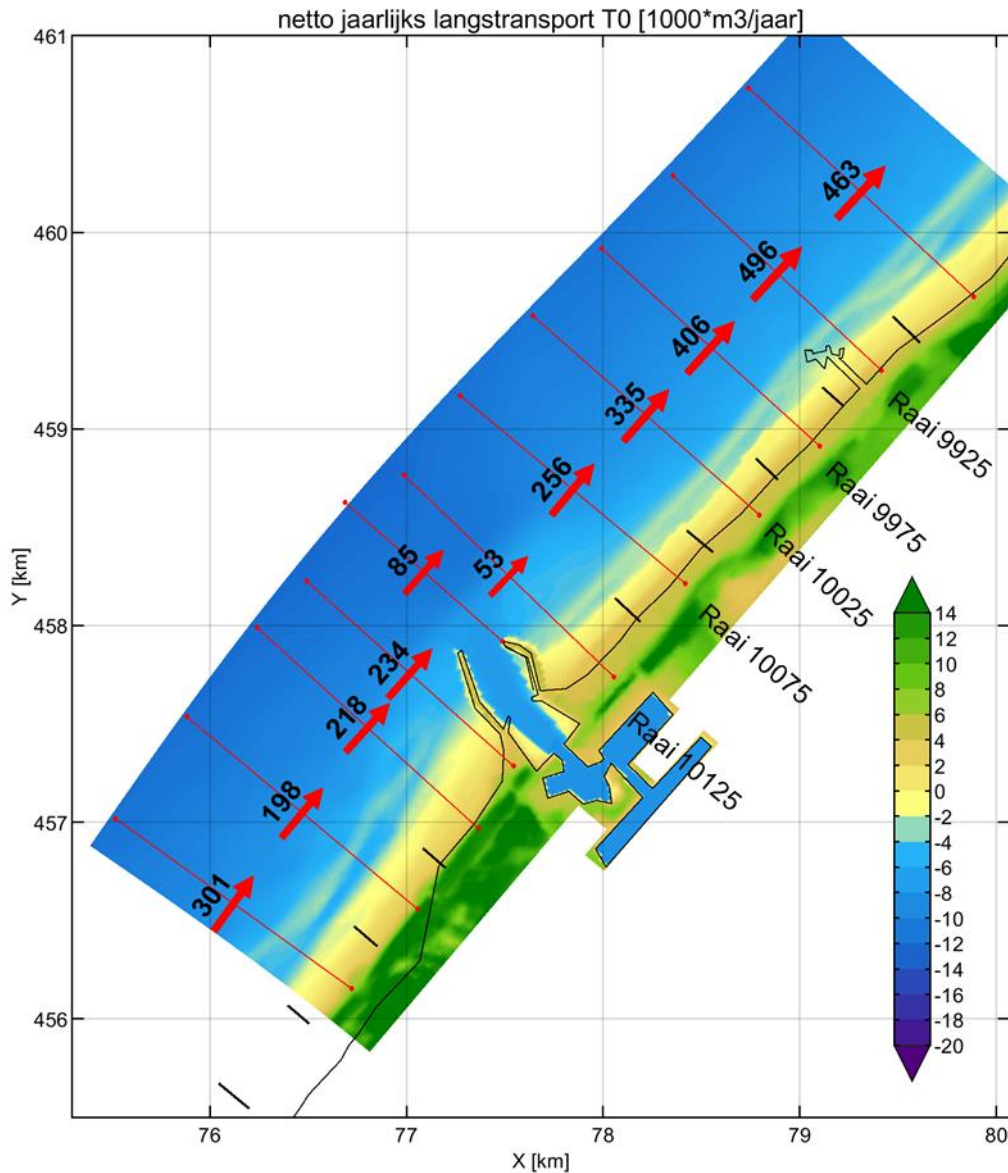
Figuur 3-11 – Residuele (getijgemiddelde) transporten voor golfcondities uit het westen (boven, 8 en 9), uit het noorden (midden, 6 en 12)



Figuur 3-12: Residuele transport over de getijperiode (links) en jaargemiddelde transport (inclusief golven, rechts) bij Katwijk op basis van de T0-bodem.

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 10 Jarkus raaien en bij de noordelijke havendam (rode lijnen). De T0 simulatie berekend een brandingstransport tussen 0,05 en 0,5 miljoen m³/jaar. Net ten noorden van de havendammen is het netto transport het laagst, en het neemt toe richting het noorden. Een toenemend sedimenttransport betekent dat hier sediment wordt opgepikt. Deze resultaten laten zien dat het strandvak tussen de haven en de Pier erosief is. Het meeste sediment wordt opgepikt net ten noorden van de haven.



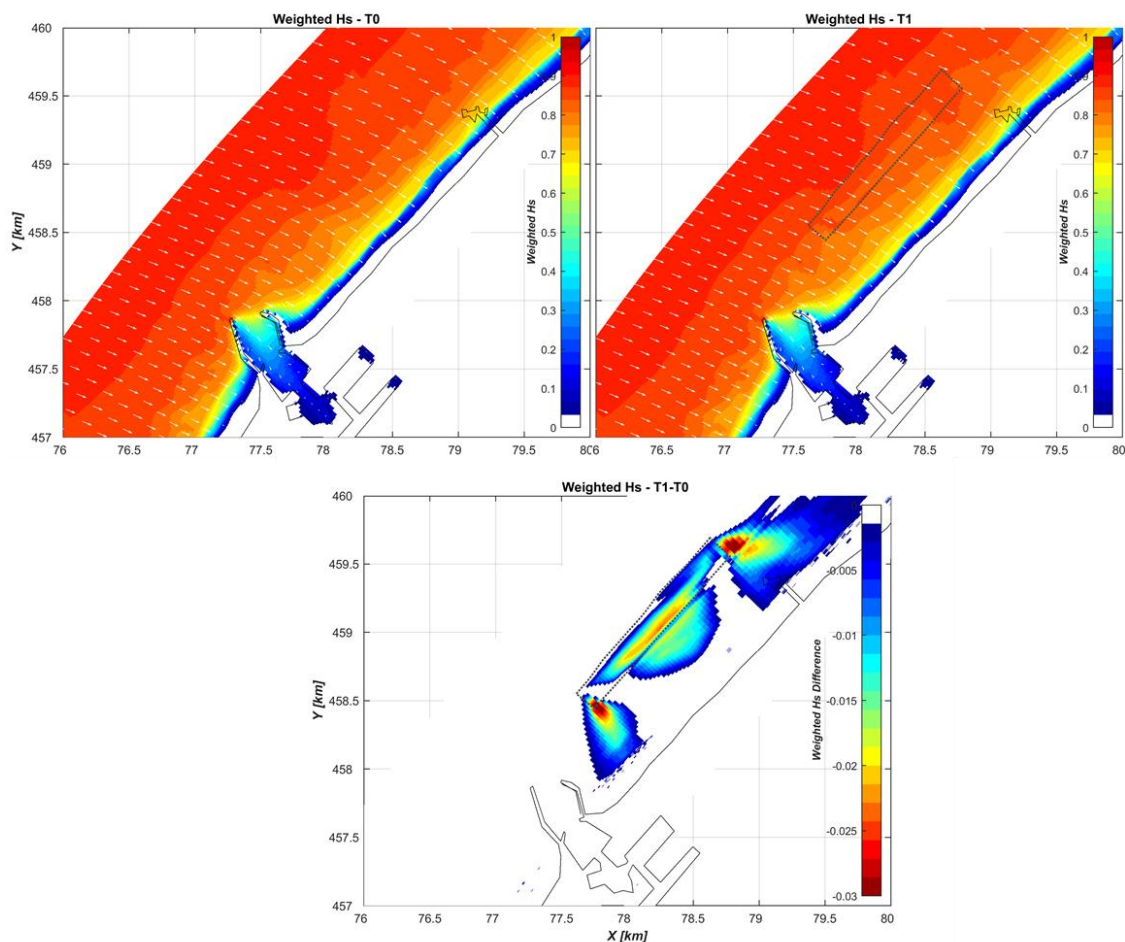
Figuur 3-13 – Berekende jaarlijks-gemiddelde langtransporten ter hoogte van de Jarkus raaien (rode lijnen), op basis van het morfologische getij en golfklimaat.

3.4 Invloed van de vooroeverstapeling (T1-simulatie)

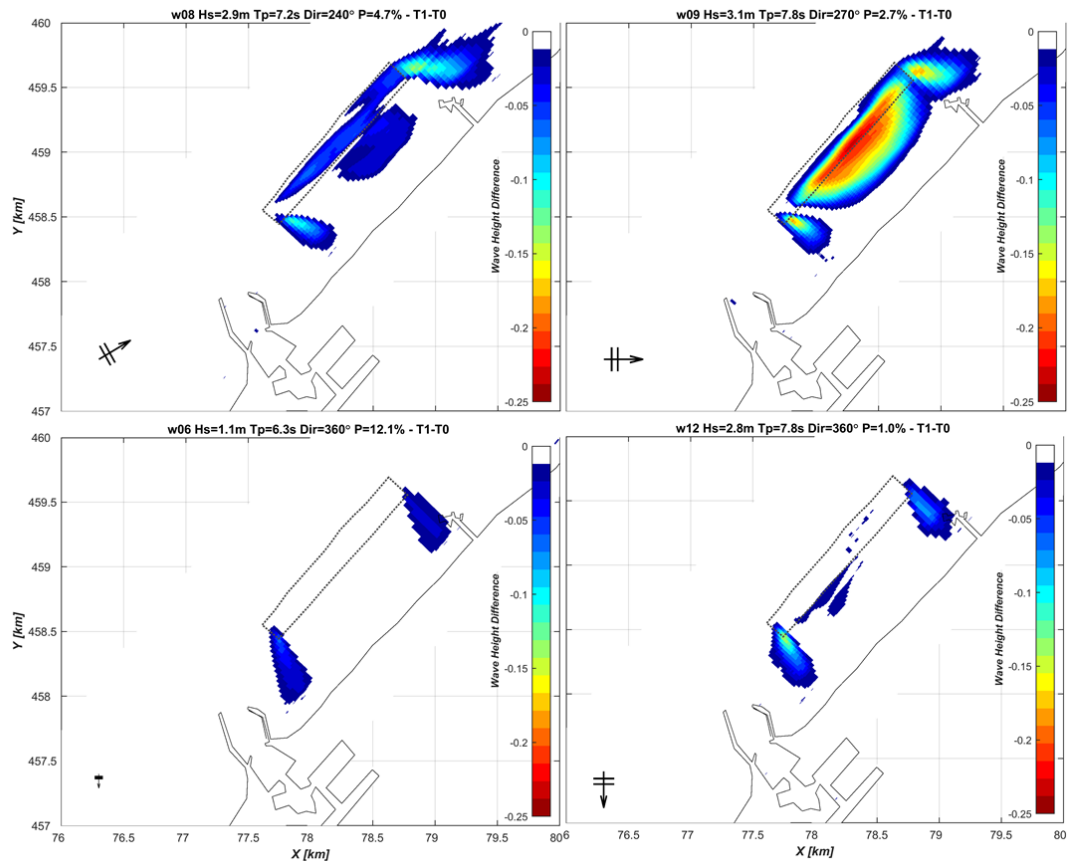
3.4.1 Golven

Het effect van de vooroeverstapeling op het jaargemiddelde golfhoogte is beperkt (Figuur 3-14). De golfhoogte reductie is maximaal ~3 cm, en vindt plaats op de vooroeverstapeling. Dit komt doordat golfbreking op een vooroeverstapeling op ~5m 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.

De reductie in golfhoogte is ook weergegeven voor de vier verschillende golfcondities, wederom representatief voor hoge golven uit het noorden (w06 en w12, Figuur 3-15 onderste panelen) en hoge golven uit het westen (w08 en w09, Figuur 3-15 bovenste panelen). Hierin is te zien dat voor de golfconditie uit het westen met de hoogste golfhoogte ($H_s = 3,1$ m, w09) de golfhoogte met 0,25 m afneemt ten gevolge van golfbreking op de vooroeverstapeling. De golfconditie uit het noorden met een hoge golfhoogte ($H_s = 2,8$ m, w12) resulteert in aanzienlijk minder golfhoogtereductie. Dit wordt veroorzaakt door de relatief sterkere refractie van golven uit het noorden, resulterend in een hogere reductie van de golfenergie voordat de golven de (relatief diepe) vooroeverstapeling bereiken. Bij golfconditie w11 komen de golven meer uit het noordwesten, en hierbij wordt ook een afname van de golfhoogte van 0,25 m berekend ten gevolge van de vooroeverstapeling (zie Bijlage B.2).



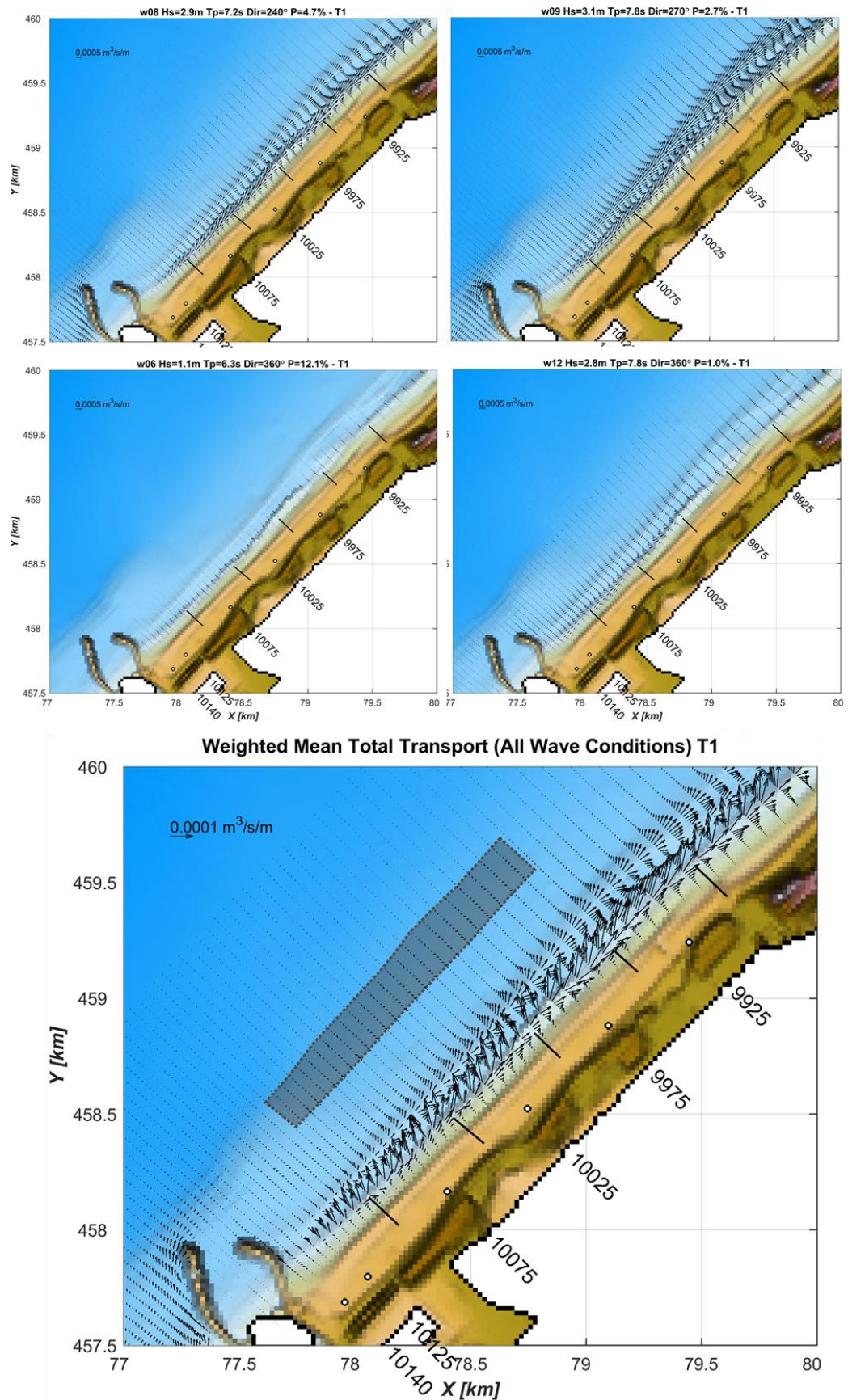
Figuur 3-14 – Jaargemiddelde golfhoogte voor de T0 (links boven), T1 (rechts boven) en het verschil tussen T1 en T0 (onder).



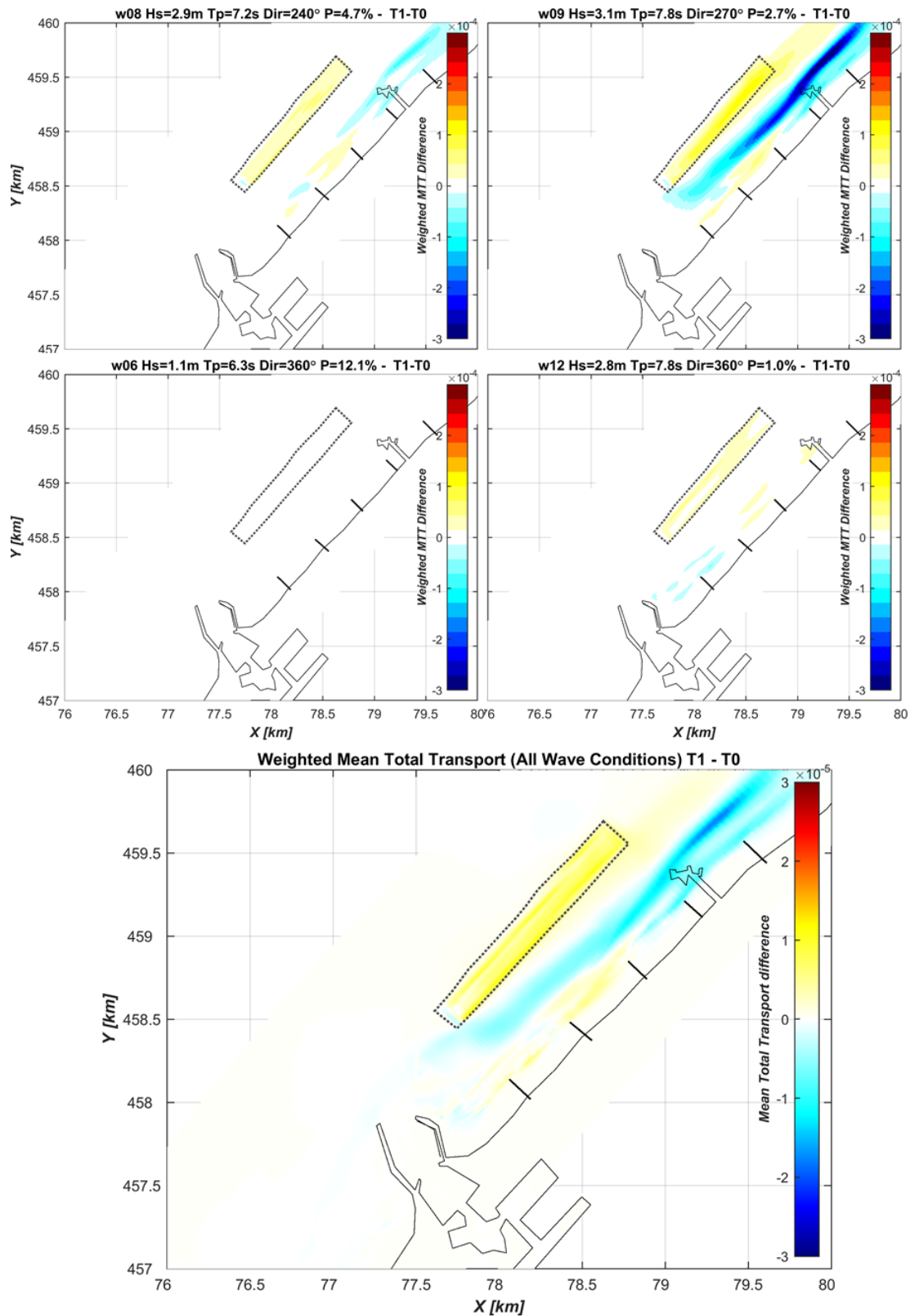
Figuur 3-15 – Getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities uit het westen (boven, 8 en 9), uit het noorden (onder, 6 en 12).

3.4.2 Sedimenttransport

De residuele (getijgemiddelde) sedimenttransporten in de T1 simulatie voor de vier golfcondities (Figuur 3-16) zijn vergelijkbaar met de T0 simulatie. De richting van de residuele transportvectoren voor zowel de individuele golfcondities als het jaargemiddelde transport veranderen niet ten gevolge van de vooroeveroppletie. De verschillen in de grootte van de residuele transporten tussen T1 en T0 zijn gekwantificeerd in Figuur 3-17. Bij de hoge golfcondities is een toename van het transport (gele kleur) te zien op de vooroeveroppletie, veroorzaakt door golfbreking. Ook bij het jaargemiddelde residuele transport (het gewogen transport over alle golfcondities, Figuur 3-17 onderste paneel) is deze toename van het transport op de vooroeveroppletie te zien, maar de kleurschaal is een factor 10 kleiner t.o.v. van de individuele golfcondities. Landwaarts van de suppletie is vervolgens een afname van het residuele transport, voornamelijk gedreven door de westelijke golfcondities.



Figuur 3-16 – Residuele (getijgemiddelde) transporten voor golfcondities uit het westen (boven, 8 en 9), uit het noorden (midden, 6 en 12) en het jaargemiddelde residuele transport (onder). Let op: er is een verschil in de schaalvector tussen de vier bovenste figuren en de onderste figuur



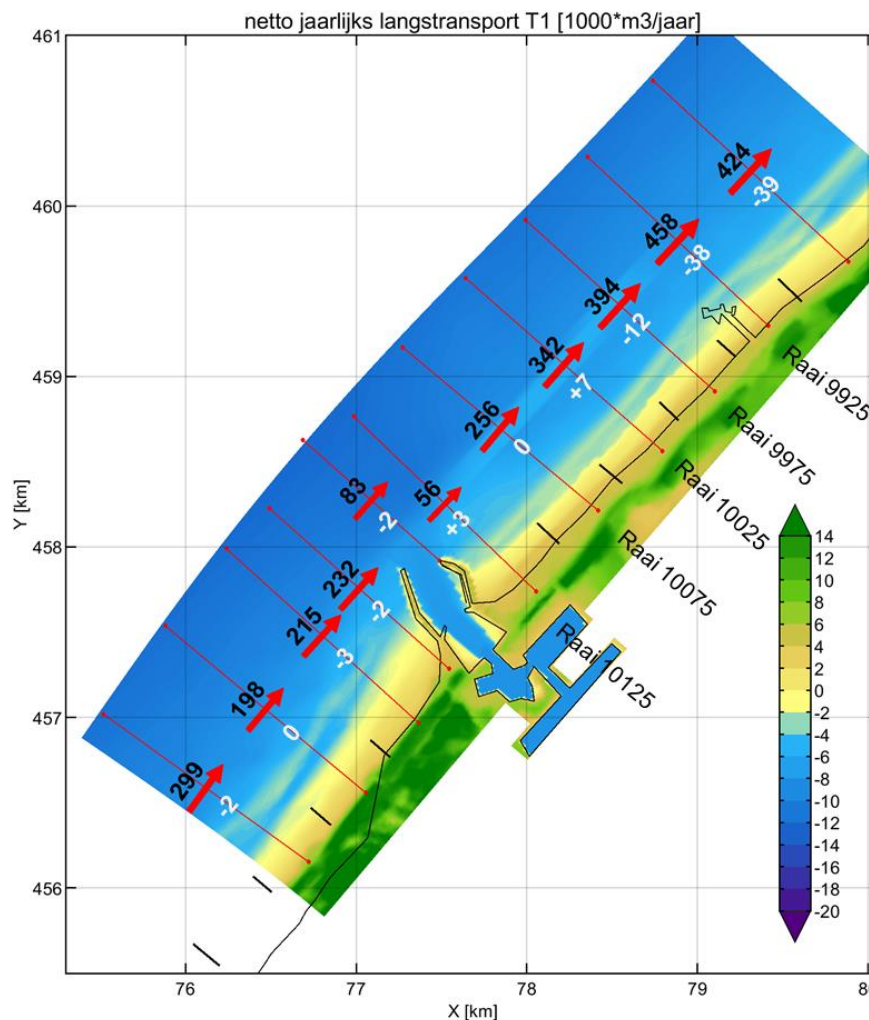
Figuur 3-17 – Verschil tussen T1 en T0 in residuele (getijgemiddelde) transporten voor golfcondities uit het westen (boven, 8 en 9), uit het noorden (midden, 6 en 12) en het jaargemiddelde residuele transport (onder). Let op dat de kleurschaal voor het jaargemiddelde transport (onder) een factor 10 lager is dan bij de individuele golfcondities.

3.4.3 Netto jaarlijks langtransport

Net zoals voor de T0-simulatie, is het netto jaarlijks langtransport berekend 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 trends zien als de T0. Ten noorden van de havendammen is het netto transport het laagst en het neemt toe richting het noorden.

De absolute verschillen tussen T1 en T0 zijn weergegeven met de witte getallen, waarbij een '+' staat voor een netto toename in het langtransport in T1 vergeleken met T0, en een '-' voor een afname. De grootste verandering in netto langtransport treedt op bij de noordelijke raaien, hier is een afname van het netto langtransport berekend ten gevolge van de vooroeveroppletie. Bij de raai ter hoogte van de noordelijke havendam wordt een afname van het netto transport richting het noorden gegeven van 2000 m³/jaar.

Een belangrijke conclusie op basis van de gemodelleerde transporten is dat de vooroeveroppletie niet zorgt voor een significante verandering van de sedimenttransporten. Er is 500.000 m³ sediment toegevoegd, maar de verliezen uit het kustvak blijven vrijwel gelijk aan de T0. Op basis van raai 9875 (Figuur 3-18) zou geconcludeerd kunnen worden dat er iets minder sedimentverlies optreedt, met name in de ondiepe vooroever / strand (Figuur 3-18). De netto transporten nemen met 1% af. Hierbij is het wel de vraag of dit niet in de nauwkeurigheid van de modelresultaten zit.



Figuur 3-18 – Berekende jaarlijks-gemiddelde langtransporten voor T1 (zwarte cijfers) ter hoogte van de JarKus raaien (rode lijnen), op basis van het morfologische getij en golfklimaat. Verschil tussen T1 en T0 netto jaarlijks langtransport waarden weergegeven met de witte cijfers.

3.4.4 Samenvatting en discussie van de modelresultaten

Vóór aanleg van de vooroeversuppletie (T0) laat de modelberekening zien dat de getijgedreven stroming en transporten klein zijn en vooral plaatsvinden rondom de havendammen. Golven domineren de stroming en transporten in bij de brekerbank en het strand, en het residuele transport is noordwaarts gericht. Vanaf de noordelijke havendam neemt het residuele transport toe richting het noorden, met de sterkste gradiënt net ten noorden van de havendam. Dit verklaart de structurele erosieve trend in de kustzone bij Scheveningen.

Aanleg van de vooroeversuppletie (T1) geeft geen significante beïnvloeding van de langtransporten. Zowel de grootte als de richting verandert niet. Het is dan ook niet de verwachting dat grootschalige verliezen in de kustlangse richting gaan optreden. Het transport neemt toe op de vooroeversuppletie door golfbreking en landwaarts van de suppletie is er een afname in transport, voornamelijk gedreven door de hoge golfcondities. Dit laat zien dat de vooroeversuppletie goed zal werken in het reduceren van golfenergie tijdens stormcondities.

Op basis van de modelberekeningen lijkt de vooroeversuppletie niet te resulteren in een verhoogde kans op invulling van de havengeul. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor jaargemiddelde golfcondities, en specifieke stochastische gebeurtenis met een lage kans van voorkomen zijn hierin niet meegenomen. Bijvoorbeeld, onder stormcondities met extreme golfhoogtes uit het noorden kan een sterk zuidelijk transport ontstaan dat invulling van de vaargeul kan veroorzaken. Een belangrijke factor dat de kans op invulling van de vaargeul bepaald, is de timing van de storm ten opzichte van het aanlegmoment van de suppletie. Wanneer de vooroeversuppletie er al ~2-3 jaar ligt, heeft de initiële vervorming en verliezen van het suppletiezand al plaatsgevonden en heeft het zich naar een evenwicht gevormd. Een storm zal dan waarschijnlijk in minder transport resulteren dan wanneer de suppletie net is aangebracht. Een andere belangrijke opmerking is dat onder deze omstandigheden ook zonder suppletie grootschalige morfologische veranderingen en invulling van de vaargeul zal optreden. Invulling van de vaargeul ten gevolge van een stochastische gebeurtenis hoeft dus niet per definitie worden veroorzaakt door de vooroeversuppletie.

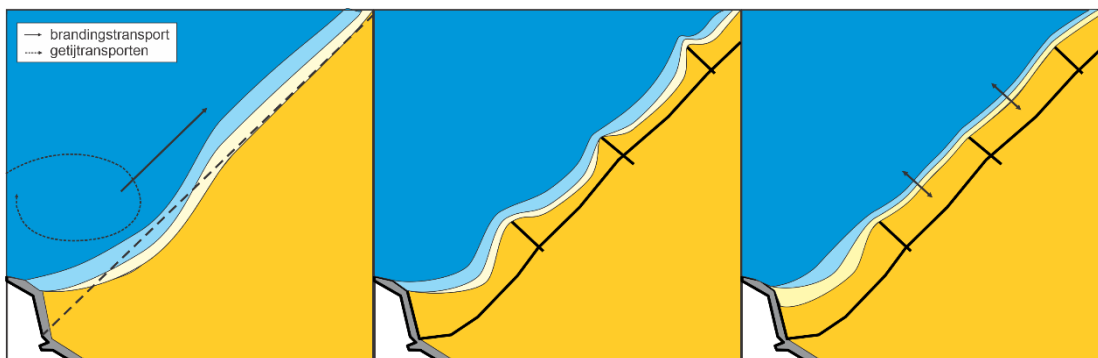
4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Synthese en conclusies

Voor het uitvoeren van een vooroeversuppletie bij Scheveningen is meer inzicht in het autonome kustgedrag, de effectiviteit van een vooroeversuppletie en de mogelijke impact hiervan op sedimenttransporten richting de haven van Scheveningen nodig. Conclusies van deze rapportage worden gegeven door middel van het beantwoorden van de onderzoeksvragen:

- 1 Wat zijn de maatgevende processen die verantwoordelijk zijn voor de erosie rond raai 10025?

Een aantal processen zijn verantwoordelijk voor de erosie van raai 100025. Deze zijn geschematiseerd weergegeven in Figuur 4-1. Onderliggend aan de structurele erosie bij Scheveningen zijn het havenhoofd en de boulevard. Scheveningen ligt zeewaarts ten opzichte van de natuurlijke kustlijn. In principe zorgt dit voor gradiënten in de kustzone waardoor erosie optreedt. Dit effect is echter niet direct zichtbaar door het aanwezige havenhoofd. Het havenhoofd blokkeert de brandingsstroom (die van nature kustlangs, van zuid naar noord is gericht). Bij Scheveningen moet deze brandingsstroom weer oppikken. Dit geeft een toenemend brandingstransport (volgt uit de modelstudie), waardoor erosie optreedt. Wanneer alleen het havenhoofd aanwezig zou zijn, zou een kustlijn ontstaan zoals weergegeven in Figuur 4-1 (links). Ter hoogte van Scheveningen zou dan een sterke kustachteruitgang ontstaan. Deze achteruitgang is tegengegaan door aanleg van strandhoofden (Figuur 4-1, midden). Deze strandhoofden zorgen ervoor dat lokaal de kustlijn minder terugtrekt. Wel strekt het erosieve gebied zich dan veel verder noordwaarts uit. Tussen de strandhoofden ontstaan evenwichtsliggingen van het strand, waarbij het strand het smalst is in het midden van de strandhoofden.



Figuur 4-1: Conceptuele weergave van de processen bij Scheveningen.

Een evenwichtsligging tussen de strandhoofden is in Scheveningen ook niet mogelijk. Hierdoor zou de strandbreedte te smal worden en er mogelijk ondermijning van de boulevard optreden. Door strandsuppleties worden de kustvakken opgevuld. Dit gaat wel gepaard met de vorming van een zeer steil strandprofiel (Figuur 4-1, rechts). Dit steile strandprofiel vormt geen natuurlijk evenwicht en een herverdeling van het sediment vindt plaats. De strandprofiel erodeert en een kleine brekerbank vormt. Een deel van het materiaal wordt ook kustlangs afgevoerd. De structurele verliezen door kustlangse gradiënten in het sedimenttransport ten gevolge van de grootschalige processen blijven hier ook aanwezig.

Kustlangse variaties in de erosiesnelheden zullen aanwezig zijn. Net ten noorden van het Havenhoofd, tot de 1^{ste} strekdam, zal iets minder erosie aanwezig zijn. In de directe luwte van het havenhoofd kan het strand iets verder zeewaarts uitbouwen en kan een flauwer (meer natuurlijk) dwarsprofiel worden bereikt. Ten noorden van de 1^{ste} strekdam zijn grote langs gradiënten aanwezig. Ter hoogte van raai 10025 zijn de verliezen maximaal. Deze raai ligt in het midden tussen de strandhoofden en de boulevard ligt maximaal ver vooruit. Hierdoor is de strandbreedte minimaal. Dit resulteert waarschijnlijk ook in een steile strandhelling waardoor de verliezen ook maximaal zijn.

2 Wat is de autonome ontwikkeling van de kust bij Scheveningen voor en na versterking in het kader van het HWBP in 2010-11?

Ook in de jaren voor aanleg van de HWBP was de ontwikkeling van de kustzone niet geheel natuurlijk. Door aanleg van een vooroeversuppletie in 1999, werd er tijdelijk een brekerbank-trog systeem gecreëerd. Dit bank-trog systeem is niet representatief voor de natuurlijke ontwikkeling van het kustprofiel. Een brekerbanksysteem is hier van nature niet aanwezig.

De HWBP versterking creëert ook een (klein) brekerbanksysteem in de vooroever. De systeem ontstaat door herverdeling van het suppletiemateriaal. Door de strandsuppletie ontstaat een zeer steil onnatuurlijke strandhelling. Verflauwing van dit profiel resulteert in accumulatie van sediment in een kleine brekerbank rond de -4m NAP. Deze bank is dynamisch in de tijd en ruimte. De frequent terugkerende strandsuppleties zorgen ervoor dat deze bank in stand wordt gehouden.

3 Wat is het initiële effect van het aanbrengen van een vooroeversuppletie op de maatgevende processen?

Door aanleg van een vooroeversuppletie zal een bank-trog systeem ontstaan op de vooroever. Dit systeem zal voor langere tijd aanwezig blijven en langzaam uitdempen. Zolang de suppletie aanwezig is, zal deze lokaal de golfenergie reduceren. Dit effect zal waarschijnlijk niet direct effectief zijn in het reduceren van de verliezen bij raai 10025. De kustlangse gradiënten hier worden vooral gedreven door het havenhoofd (Figuur 4-1).

4 Zorgt een vooroeversuppletie voor eventuele zanduitwisseling tussen de kust en de haven van Scheveningen, en zo ja, kan een vooroeversuppletie in potentie de verzanding van de haven versnellen?

De vooroeversuppletie lijkt niet te resulteren in een verhoogde kans op invulling van de havengeul. Dit antwoord is gebaseerd op modelberekeningen met het (jaargemiddelde) morfologisch golfklimaat. Een verhoogde kans op invulling van de vaargeul treedt in het bijzonder op bij een storm met hoge golven uit het noorden. Zo'n gebeurtenis en de gevolgen ervan zijn onafhankelijk van de uitvoering van een vooroeversuppletie.

Om de verliezen naar de vaargeul te minimaliseren, is het aan te raden om de vooroeversuppletie niet in het gebied tussen het havenhoofd en de 1^{ste} strekdam aan te leggen.

4.2 Aanbevelingen

De erosie bij Scheveningen wordt veroorzaakt door een samenloop van factoren. Het havenhoofd, de strandhoofden en dijk-in-boulevard (en de zeewaartse uitbouw ten gevolge hiervan) zorgen gezamenlijk voor de maatgevende processen. Dit maakt het lastig om op voorhand te zeggen wat het (langetermijn-) gedrag en effectiviteit van een vooroeversuppletie bij Scheveningen zal zijn. Ook is er nu te weinig informatie beschikbaar om dit te voorspellen. Er is één vooroeversuppletie eerder uitgevoerd, en dit was in de periode vóór de HWBP

versterking. Het is de aanbeveling om een vooroeveroppletie bij Scheveningen na aanleg goed en meer frequent (dan de huidige jaarlijkse JarKus-meting) te monitoren. Aanvullende gedetailleerde analyses van dergelijke metingen zou aanvullend inzicht in kunnen verschaffen.

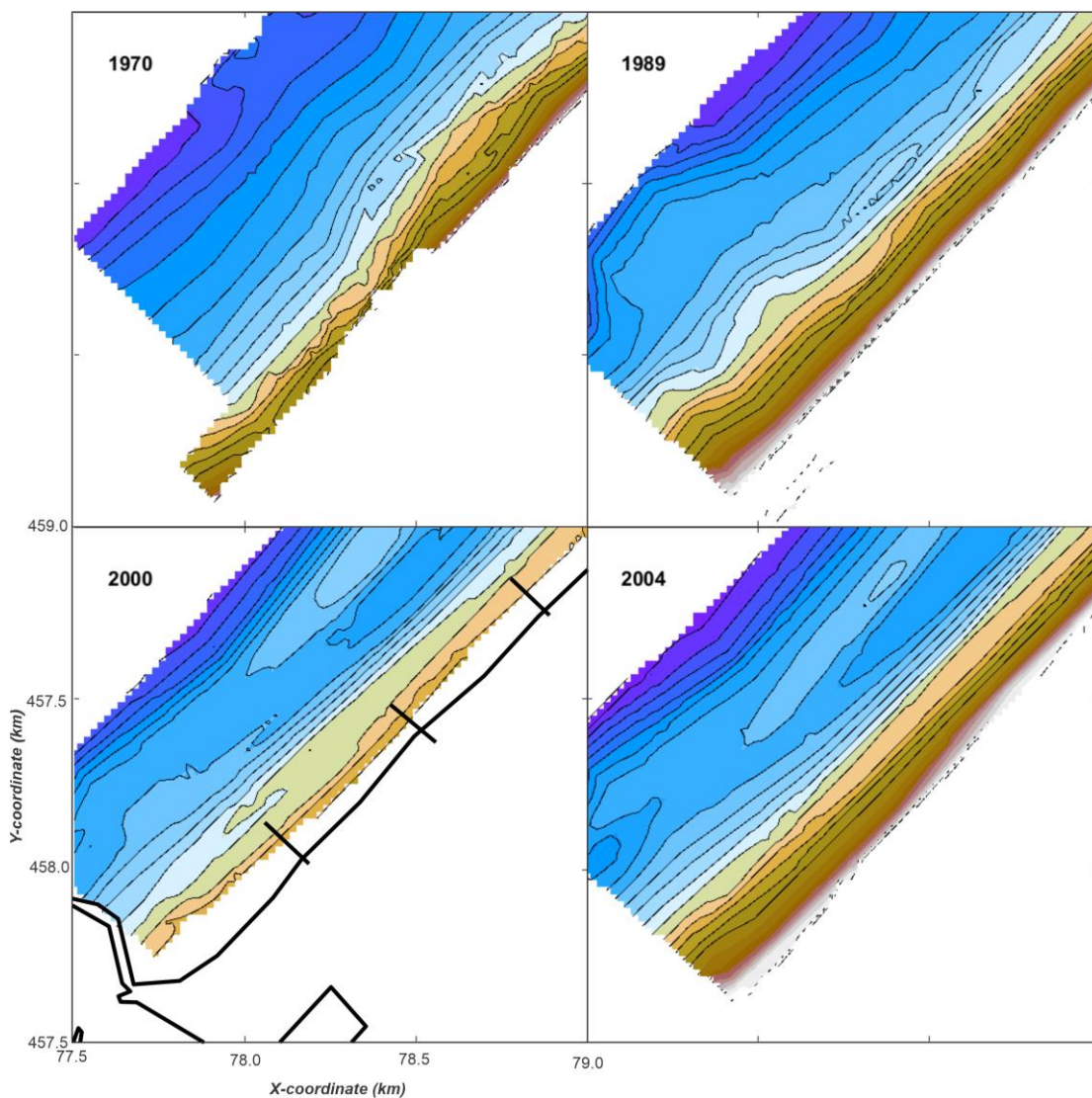
Op basis van deze studie is het niet de verwachting dat de huidige erosieve trend bij Scheveningen op korte termijn zal veranderen. Voortzetting van het huidige reguliere kustonderhoud bij Scheveningen zal nodig zijn. Als er behoefte is aan meer structurele (en langetermijn-) oplossingen, zal er een uitgebreide studie nodig zijn in verband met de complexe processen.

5 Referenties

- Elias, E., & Pearson, S. 2020. SedTRAILS - Sediment TRANsport vizualization & Lagrangian Simulator . Rapport 11205236-003-ZKS-0002, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S., Huisman, B. 2020. Investigation of Sediment Pathways in the Put Van Hansweert. Morphological effects of dumping in a deep pit of the Western Scheldt. Report 1210301-001-ZKS-0010, Deltares, Delft.
- Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. Van Kester, and G. S. Stelling., 2004, Development and validation of a three-dimensional morphological model, Coastal Eng., 51, 883–915, doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.014
- Leijnse, T. en Huisman, B. (2019). Morfologie vaargeul van Scheveningen. Sedimentatie in relatie tot suppleties en natuurlijke condities. Deltares rapport 11201431-000-ZKS-0015
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2012): Basiskustlijn 2012.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2018): Basiskustlijn 2017. Herziening van de ligging van de basiskustlijn. 29 p.
- 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 Meetdata

A.1 Jarkus grids



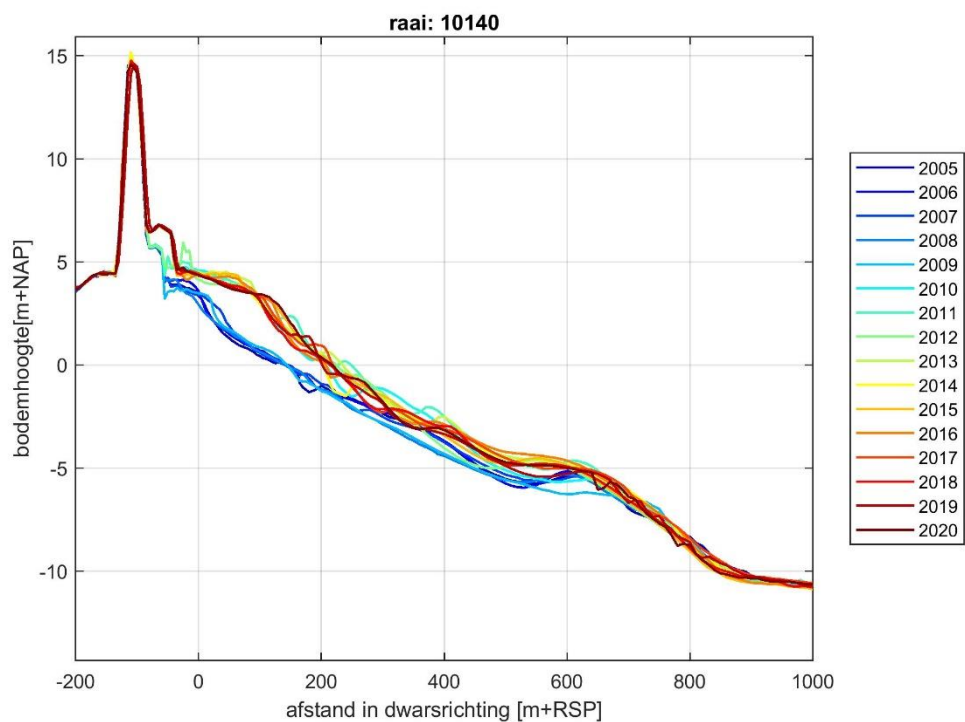
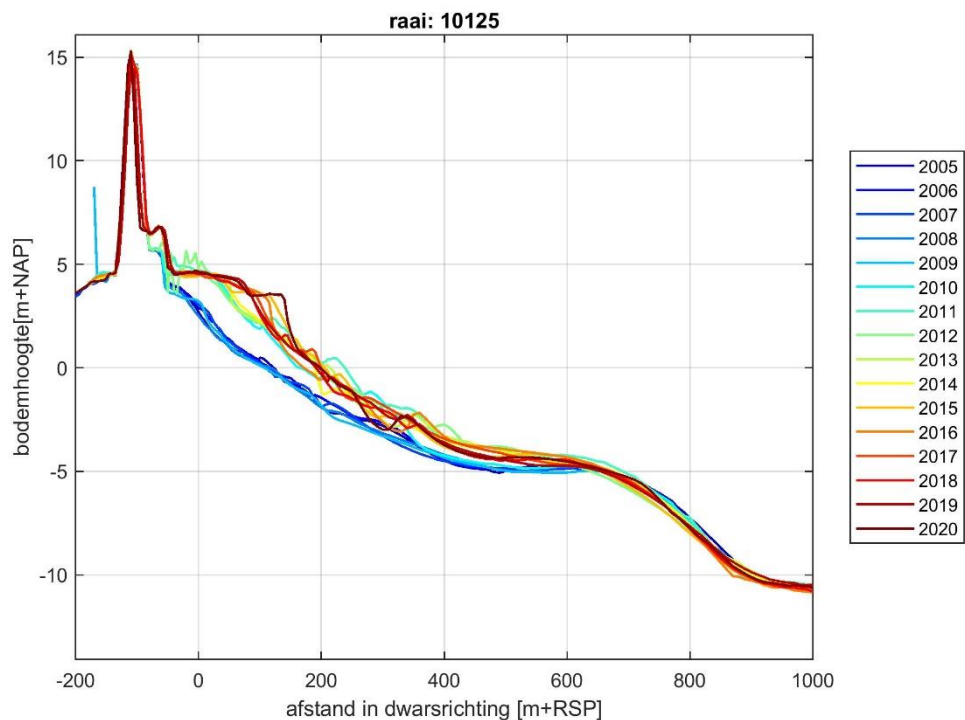
Figuur A- 1: Geselecteerde Jarkusgrids over de periode 1970-2004

A.2 Lidar



Figuur A- 2 Bodemhoogte van het strand en duin op basis van de Lidarmetingen, voor jaren 2009, 2011, 2013, 2015, 2017 en 2020.

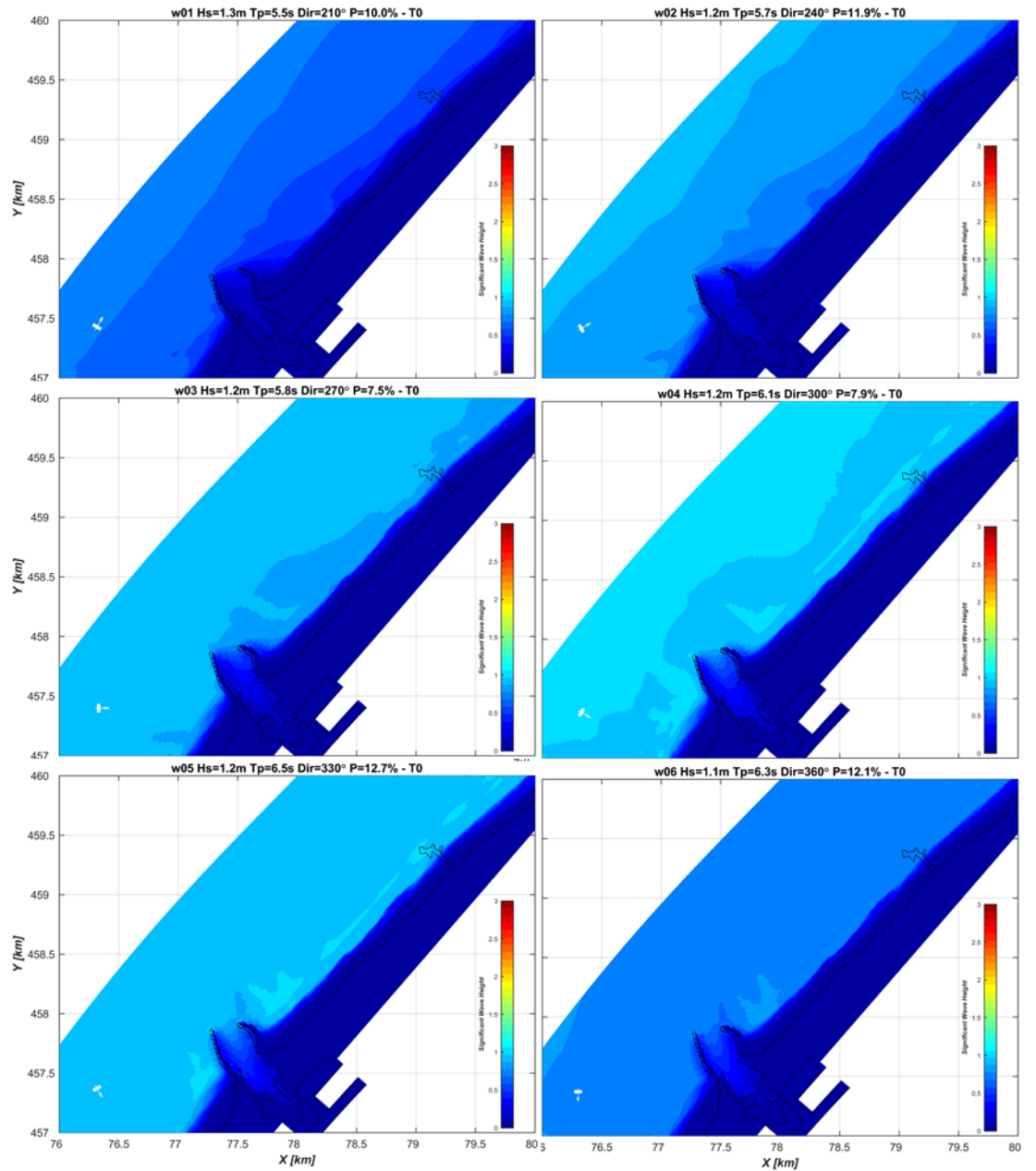
A.3 Dwarsprofielen



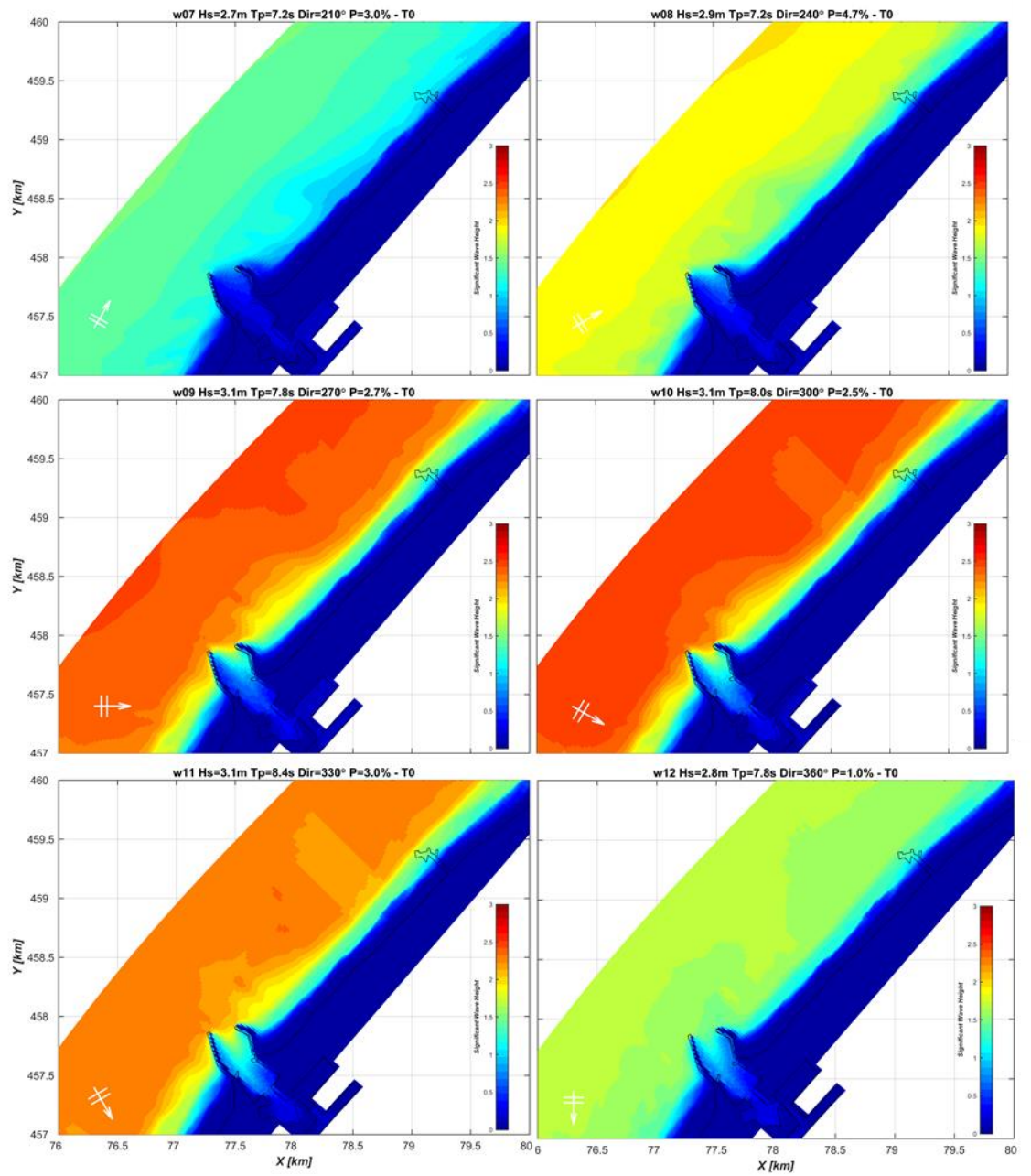
Figuur A- 3: Dwarsprofiel 10125 en 10140

B Modelresultaten

B.1 Golfhoogte T0

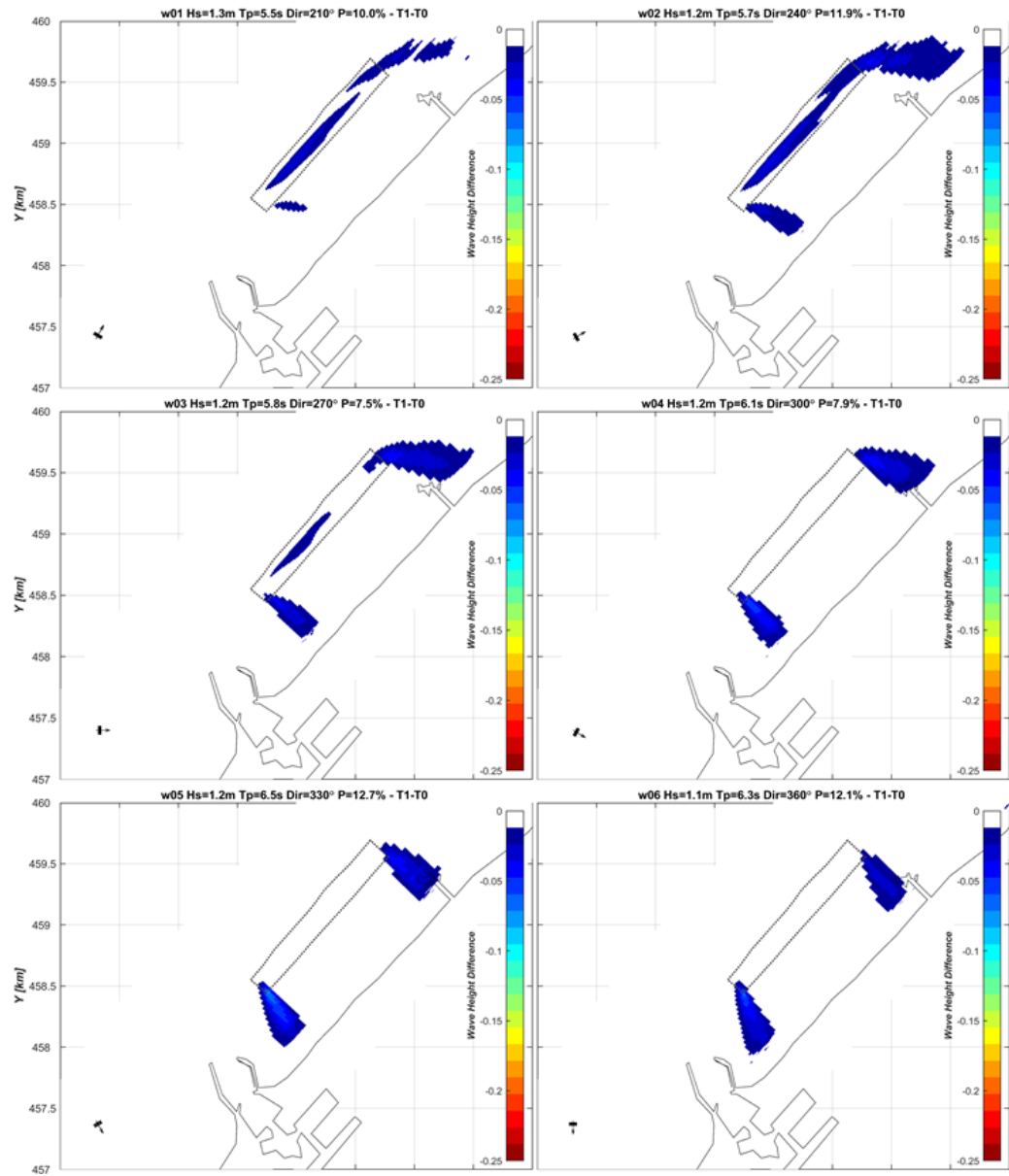


Figur B 1 - Getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities 1-6

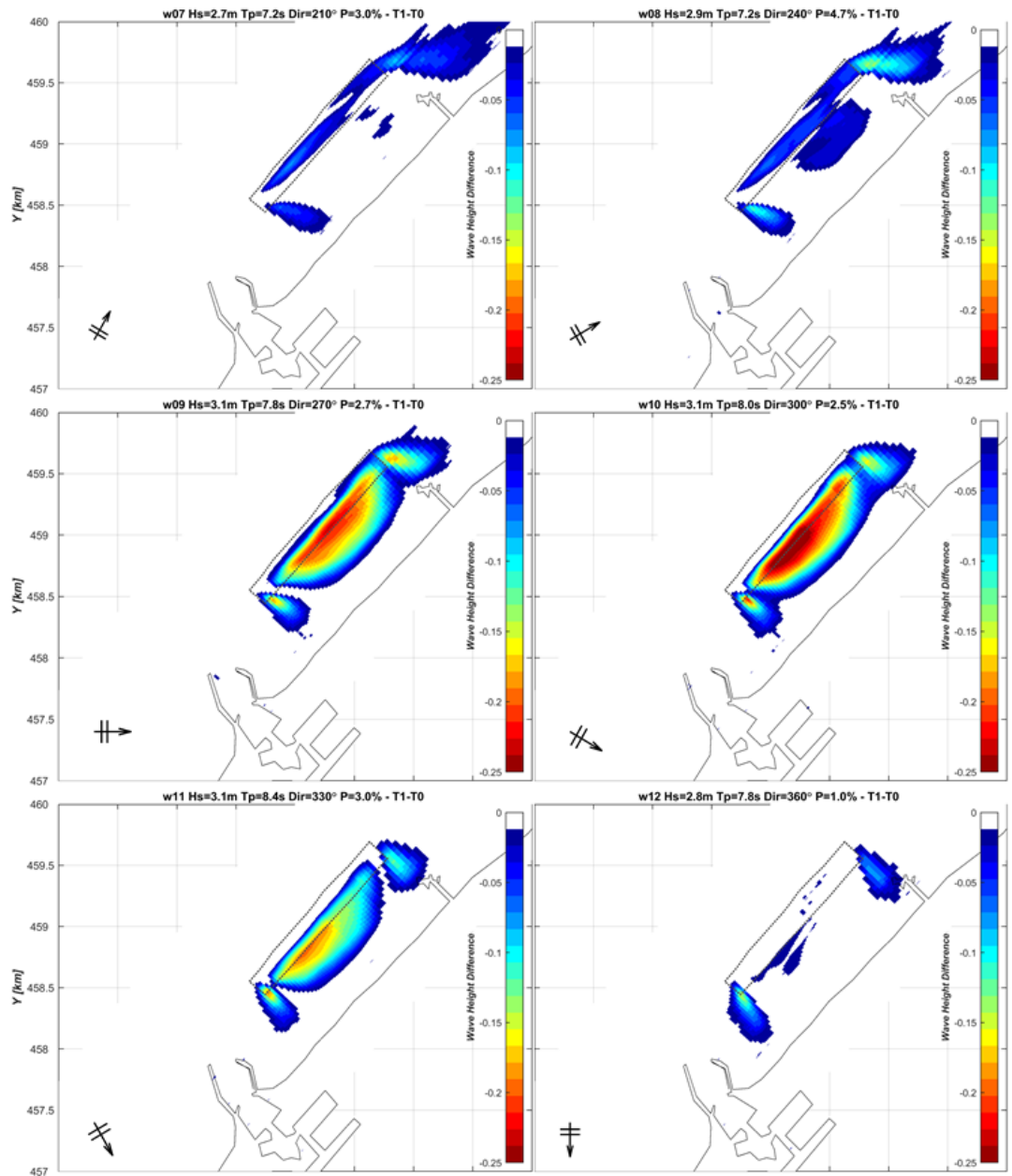


Figuur B 2 – Getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities 7-12

B.2 Golfhoogte: verschil tussen T0 en T1

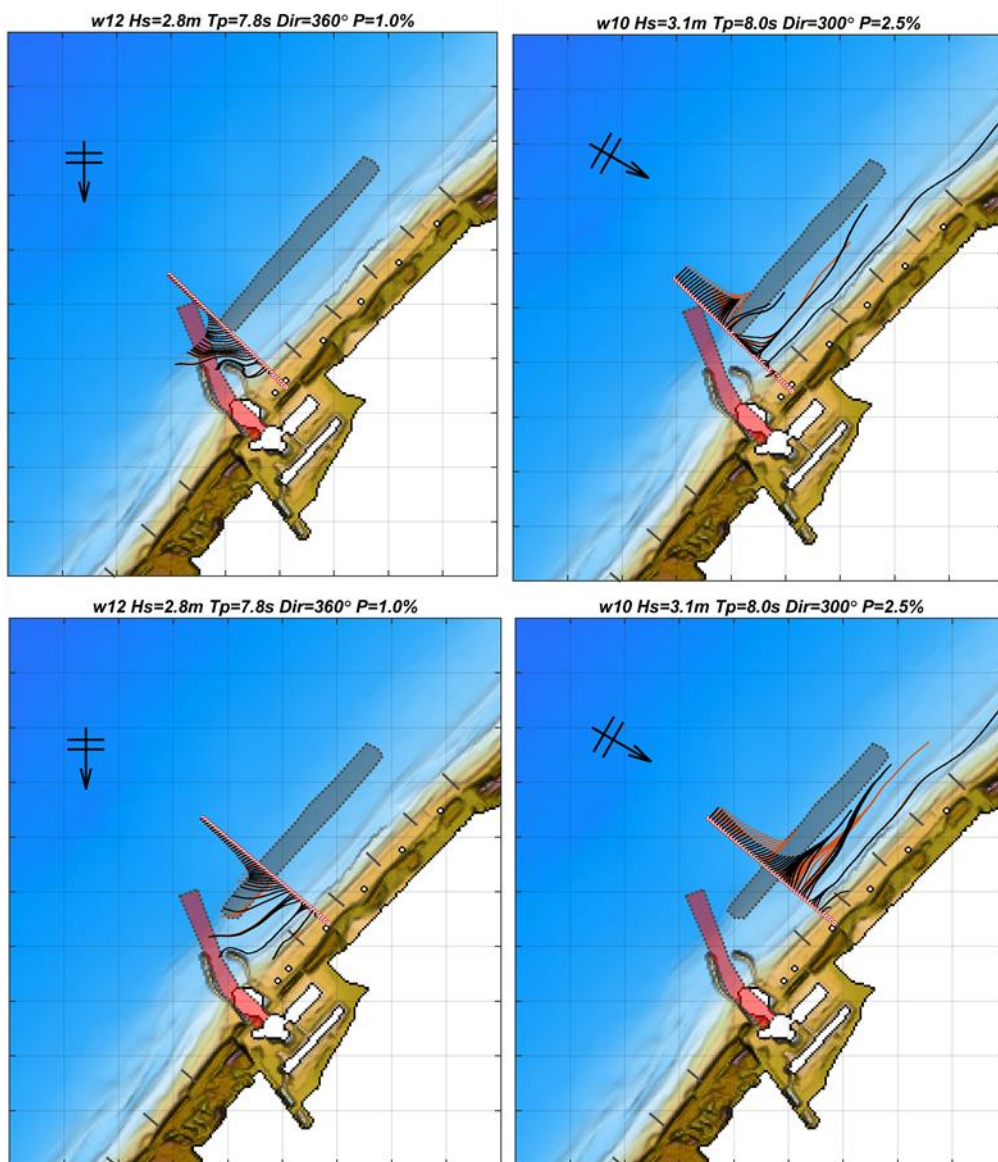


Figuur B 3 – Verschil tussen T1 en T0 in getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities 1-6

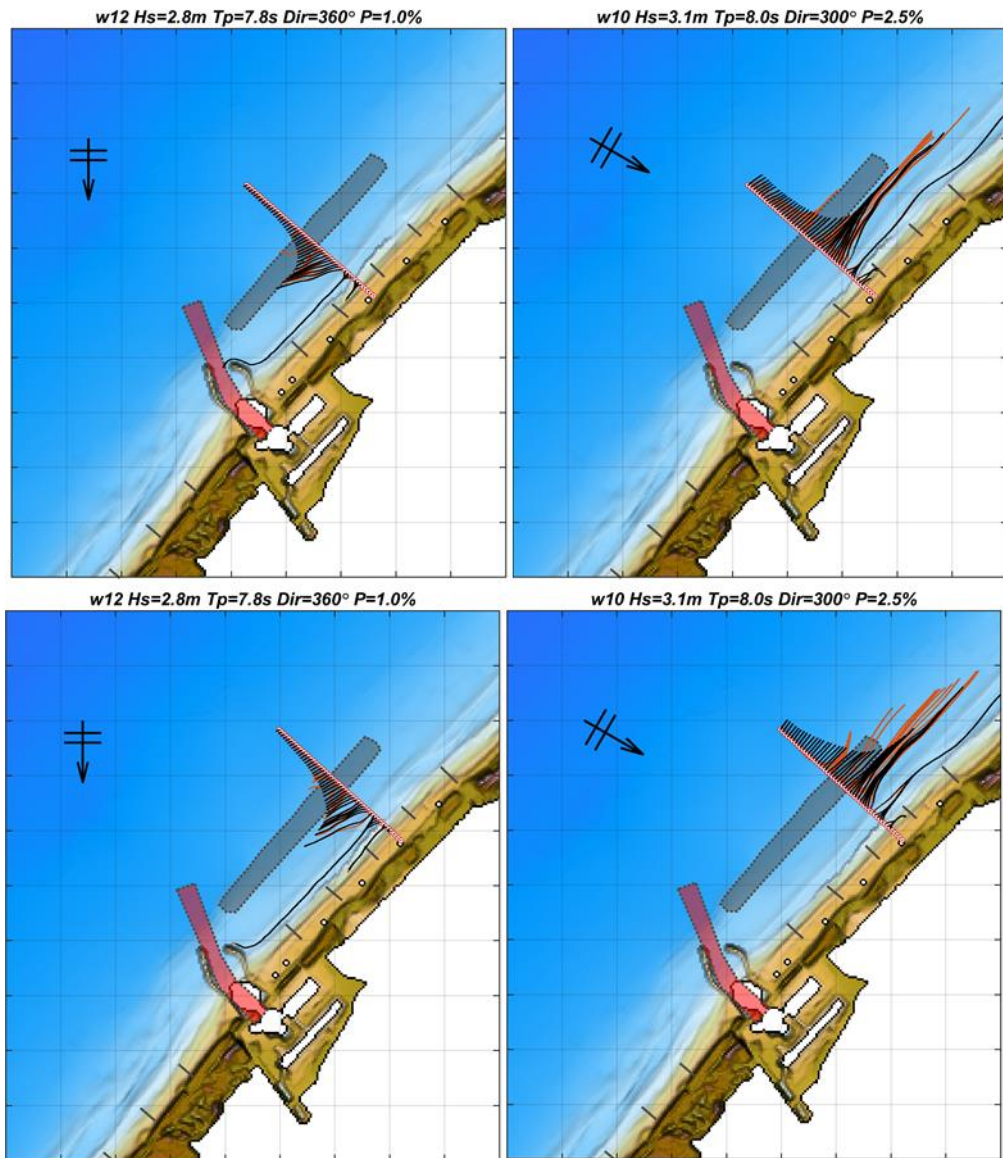


Figuur B 4 – Verschil tussen T1 en T0 in getijgemiddelde golfhoogte voor golfcondities 7-12

C SedTRAILS resultaten



Figuur C- 1: SedTRAILS visualisatie van de transporten vanaf de locatie van de suppletie voor 2 golfcondities golfcondities. Zwart = T_0 en rood = T_1 (inclusief suppletie).



Figuur C- 2: SedTRAILS visualisatie van de transporten vanaf de locatie van de suppletie voor 2 golfcondities golfcondities. Zwart = T0 en rood = T1 (inclusief suppletie).

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

Deltares

www.deltares.nl