

**Verkenning morfologische
effecten (geulwand)suppletie
Paal 10, Texel**



Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Paal 10, Texel

Edwin Elias

1230043-001

Titel

Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Paal 10, Texel

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
KPP-B&O Kust. Regionaal Advies	1230043-001	1230043-001-ZKS-0014	59

Trefwoorden

Verkenning, suppletie, Texel, Zeegat van Texel

Samenvatting

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL) en Deltares hebben binnen het KPP-programma ruimte gereserveerd om quickscans uit te voeren naar regiospecifieke, vraagstukken over het gedrag of de ontwikkeling van het regionale kuststelsel. In dit rapport wordt een analyse uitgevoerd naar de erosie rond strandpaal 10 bij Texel en worden de mogelijke effecten van verschillende suppletievarianten doorgerekend.

In het verleden (tot ruwweg 2006) werd de erosie van de zuidwestkust van Texel gedomineerd door de opdringende buitendelta; de vorming en landwaartse verplaatsing van een langgerekte spit en het opdringen van de aanliggende geul Molengat. De erosie van het kustvak wordt dan ook vaak toegeschreven aan dit geleidelijk oostwaarts verplaatsende Molengat. In dit gedrag is een duidelijke kentering opgetreden. In de recente bodems 2012-2015 zijn grote veranderingen in de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks en Molengat zichtbaar. Deze veranderingen treden met name op ten zuiden van strandpaal 8. Voor Paal 10 geeft de grootschalige beschouwing geen duidelijke oorzaak van de erosie. Deze erosie wordt veroorzaakt door de lokale vormveranderingen van de voorliggende noordpunt van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks. Het ontstaan van gradiënten in de transporten door kleine versnellingen, dit kan zijn door geulvorming of door het golfklimaat, geven hier lokaal zogenaamde 'hotspot' (lokale) erosie.

Op basis van deze modelsimulaties kan ook worden geconcludeerd dat:

- (1) Het strandvak rond Paal 10 niet direct in de hoofdcirculatie van het zeegat ligt. Rond paal 10 zijn de stroomsnelheden relatief klein ten opzichte van de stroomsnelheden in het Molengat nabij het Marsdiep. In termen van processen zal het gedrag van deze suppletie meer overeenkomsten vertonen met een reguliere suppletie dan bijvoorbeeld met een geulwandsuppletie zoals uitgevoerd aan de zuidkant van het zeegat ter plaatse van het Nieuwe Schulpengat.
- (2) Alle suppletievarianten vertonen slechts een beperkte (lokale) invloed op de stromingen. Er doen zich geen grootschalige veranderingen, op de schaal van het zeegat, voor. Zelfs bij gedeeltelijke opvulling van de uitstroom van het Molengat is het niet de verwachting dat de stroming naar het zeegat significant wordt verstoord. Een grootschalige respons op de schaal van het zeegat wordt dan ook niet verwacht.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Dec. 2016	Dr. ir. E.P.L. Elias		ir. P.K. Tonnon		Drs. F.M.J. Hoozemans	

Status

definitief

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 Doelstelling (overgenomen uit Opdrachtoomschrijving Quicksan Texel).	1
1.2 Studiegebied	2
1.3 Beheer en onderhoud van de kust	3
2 Werking van het Morfologische Systeem	7
2.1 Achtergronden van het Morfologische Systeem	7
2.2 Ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks en het Molengat in detail.	9
2.3 Recente ontwikkelingen van het kustvak	11
2.4 Conceptuele beschrijving van de zandtransporten	14
3 Modelsimulaties	17
3.1 Inleiding.	17
3.2 Model schematisatie	17
3.3 Modelsimulaties; Bepaling effecten suppletievarianten.	22
3.3.1 Bodemschematisaties.	22
3.3.2 Model resultaten; Effect van suppleren op stroomsnelheden	25
3.4 Model resultaten; Begrijpen van maatgevende processen.	38
3.4.1 Getijsimulaties	38
3.4.2 Getij en Golven	41
4 Discussie en conclusies	47
4.1 Discussie	47
4.2 Conclusies	49
5 Literatuur	51
 Bijlage(n)	
A Detailbeschrijving van representatieve profielen rond strandpaal 10	A-1

1 Inleiding

1.1 Doelstelling (overgenomen uit Opdrachtomschrijving Quicksan Texel).

Het kustvak Texel zuidwest (raaivak 900-1190) is opgenomen in het meerjarenplan 2016-2019 vanwege de structurele erosie die hier optreedt. Daarnaast was er niet in alle raaien een volledig herstel van de BKL door de in 2012 uitgevoerde suppletie.

Bij strandpaal 10 is sterke insnoering ontstaan, waarvan de exacte oorzaak nog onbekend is. Vanuit de huidige kennis is bekend dat de buitendelta van het Marsdiep zich op dit moment landwaarts verplaatst, waardoor het Molengat opschuift richting de kust. Deze vervorming van de Noorderhaaks en het Molengat hebben een effect op de processen die erosie veroorzaken. De erosie van het kustvak wordt vaak toegeschreven aan de invloed van de getijdegeul het Molengat, die vlak onder de kust van zuidwest Texel loopt en die geleidelijk naar het oosten opschuift.

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL) en Deltares hebben binnen het KPP-programma ruimte gereserveerd om quickscans uit te voeren naar, regio specifieke, vraagstukken over het gedrag of de ontwikkeling van het regionale kuststelsel. Dit onderwerp valt binnen onderdeel 1: Toegesneden specialistische advisering RWS deel C Regionaal advies op maat van het KPP project.

Het doel van dit onderzoek is om inzichtelijk te krijgen wat de primaire oorzaken van het insnoeringseffect van het strand bij Paal 10 op Texel zijn? We richten ons met name op de deelvragen:

- Wat zijn de dominante processen in relatie tot de insnoering?
- Wat zijn de achterliggende hydrodynamische processen?
- Wat zijn de achterliggende morfologische processen?
- Welke onzekerheden/risico's zijn er?
- Hoe ontwikkelt de getijdegeul het Molengat zich verder?
- Zal het Molengat oostwaarts blijven verplaatsen?
- Zal de Noorderhaak aansluiten aan Texel, zo ja op welke termijn?

Daarnaast wordt gevraagd om een advies dat antwoord geeft op de vraag welke suppletievariant de minste risico's vormt voor de aanwezige gebruiksfuncties op het strand of in de geul. Hiervoor proberen we met behulp van modelsimulaties de morfologische gevolgen van de voorgestelde suppletievarianten op korte- en lange termijn in kaart te brengen. Zijn er overgangssituaties die onwenselijk zijn (zoals door zanddruk tijdelijke diepe geul die voor extra erosie zorgt?) en wordt dit versterkt als de geul wordt afgesloten doordat het water wel tussen de kust en de Noorderhaaks wil stromen? En hoe vertalen deze morfologische gevolgen door naar risico's op de aanwezige gebruiksfuncties als strandrecreatie (strandbreedte), eventueel gebruik van de geul (verdwijnen van de geul), effecten op duinnatuur (aangroei of afslag duin).

Na een introductie in het studiegebied (paragraaf 1.2) en een beknopt overzicht van het uitgevoerde kustbeheer (paragraaf 1.3) volgt in het tweede hoofdstuk van dit rapport een beschrijving van het morfologische systeem. Deze beschrijving is overgenomen uit de BeheerBibliotheek en verder aangevuld met de meest recente bodemdata. In hoofdstuk 3

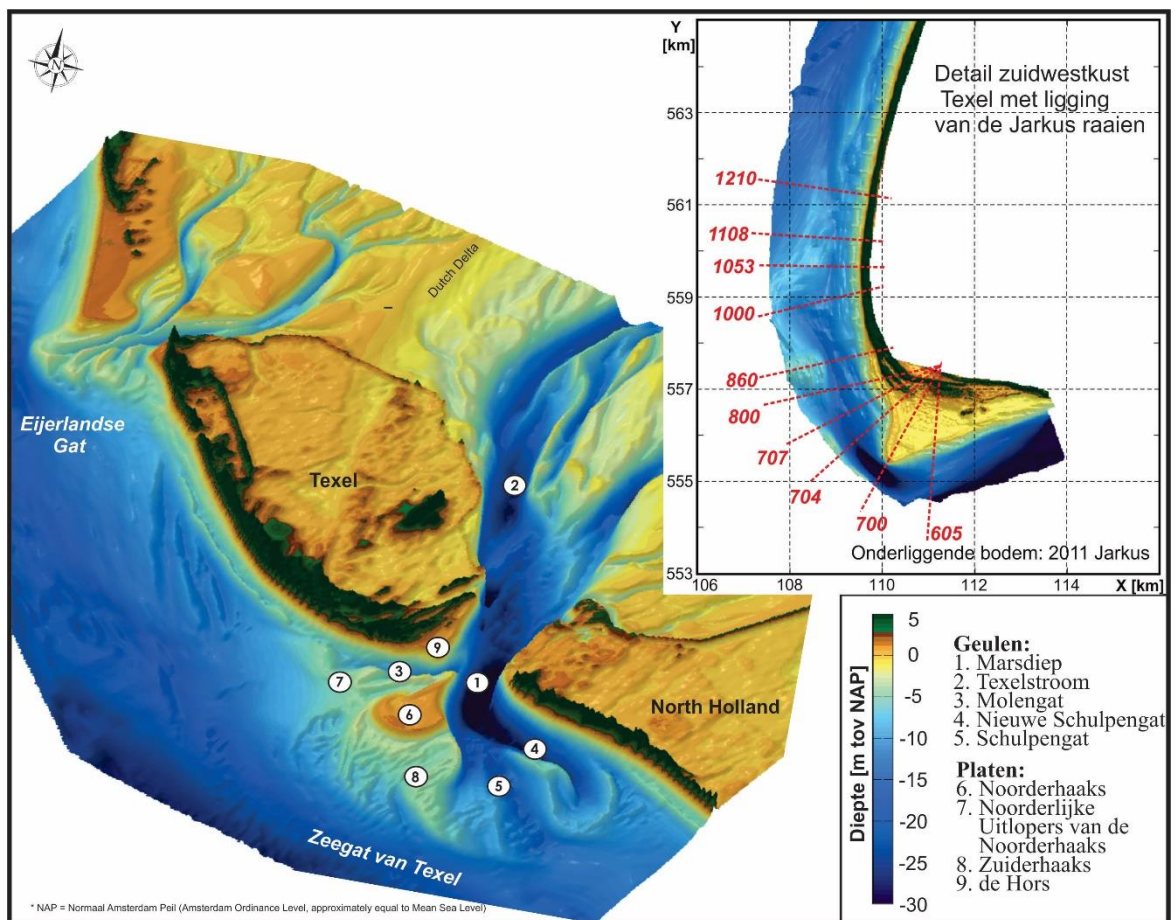
volgen de resultaten van modelsimulaties waarin de veranderingen in stroombeeld worden weergegeven voor verschillende varianten van de geulwandsuppletie. Daarnaast zijn de residuele sediment transportpatronen over de periode 1990-2012 berekend en geanalyseerd en zijn er simulaties met een morfologisch golfklimaat gemaakt. Deze analyses verschaffen ons inzicht in de vraag of de erosie gerelateerd kan worden aan veranderingen in de getijcirculatie of golven. Het laatste hoofdstuk bestaat uit de samenvatting en discussie waarbij ingegaan wordt op de verwachte morfologische ontwikkelingen rond paal 10 en de mogelijke effecten van de geulwandsuppletie hierop.

1.2 Studiegebied

Strandpaal 10 ligt nabij de zuidpunt van Texel, net ten noorden van de grote zandvlakte *de Hors* (zie Fig. 1.1, 9). De buitendelta van het zeegat van Texel domineert hier de vooroever met de geul *Molengat* en de zandplaat of bank *Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks* (NUN) als belangrijkste morfologische elementen. Zoals in figuur 1.1 al duidelijk is te zien, zijn de ontwikkelingen van de geulen en platen mede bepalend voor het gedrag van de kustlijn daarachter.

Figuur 1.1 geeft een beeld van de huidige bodemligging van de buitendelta en de keel van het *Zeegat van Texel*. De keel van het zeegat, ingesloten door het eiland Texel en de kop van Noord-Holland, heeft een minimale breedte van 2,5 km. In de keel ligt de geul Marsdiep. Het gemiddelde getijprisma is circa $1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ met maximale eb- en vloednelheden tussen de 1 en 2 m/s. Debietmetingen geven aan dat er in het Marsdiep een zeewaarts gericht restdebiet optreedt. Dit restdebiet wordt veroorzaakt door uitwisseling tussen de achterliggende bekkens van het Vlie en van het Marsdiep. De omvang van het restdebiet is ongeveer 10% van het getijprisma (Ridderinkhof et al., 2002). Een belangrijk onderdeel in de keel van het zeegat is de Helderse Zeewering. Deze zeewering stabiliseert de zuidelijke oever, de kop van Noord-Holland. Grote stroomsnelheden en versnelling van de stroming om de noordwestelijke punt van de Helderse Zeewering hebben het Marsdiep lokaal tot dieptes van meer dan 50m uitgeschuurd. Deze ontgrondingskuil wordt de Helsdeur genoemd. Het Marsdiep verbindt de hoofdgeulen in het bekken via het Breewijd met de hoofdgeulen op de buitendelta: Schulpengat en Nieuwe Schulpengat. Tussen de Noorderhaaks en de kust van Texel bevindt zich nog een derde geul: het Molengat.

De buitendelta strekt zich ongeveer 10km zeewaarts en 25km kustlangs uit. De Noorderhaaks vormt het middelpunt, ondiepste gedeelte, van de buitendelta. De oostzijde van de Noorderhaaks bevindt zich tijdens normale omstandigheden boven water en wordt de Razende Bol genoemd. Aan de noordkant bevindt zich een langgerekte spit: de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN). Door het landwaarts verplaatsen van deze spit is de geul het Molengat na afsluiting van de Zuiderzee (1932) dieper geworden en ook richting de kust verplaatst. Het opdringen van het Molengat is een belangrijke reden waarom er in het verleden grote zandverliezen in het aangrenzende kustvak plaatsvonden (Cleveringa, 2001). De recente veranderingen in het Molengat, waarbij de NUN vrijwel tegen de kust van Texel is gedrukt (zie Hoofdstuk 2 en Elias et al. 2014) zijn mede de oorzaak van de insnoering nabij strandpaal 10.



Figuur 1.1: Ligging van de belangrijkste geulen en platen in het Zeegat van Texel. In de detailfiguur wordt de zuidwestkust van Texel in detail weergegeven inclusief de ligging van de JARKUS-raaien.

1.3 Beheer en onderhoud van de kust

Een overzicht van de huidige problematiek langs de zuidwest kust van Texel kan worden verkregen door analyse van de Basiskustlijn (BKL) en de te toetsen kustlijnen (TKL) (zie Figuur 1.2). Sinds 2010 is er een structurele erosie in het kustvak rond strandpaal 10 aanwezig. Tot 2010 was er juist een positieve trend in de kustlijnligging, in ieder geval in het gedeelte meegenomen in de toetsing. Op de vooroever doen zich al over langere tijd grote veranderingen voor door de vorming en verplaatsing van het Molengat. Dit wordt in meer detail behandeld in Hoofdstuk 2.

Onderstaande samenvattingen uit de recente kustlijnkaartenboeken geven een goede indicatie van de kustlijnproblematiek:

2005 (Kustlijnkaartenboek 2006)

Texel (kaarten 31 t/m 34)

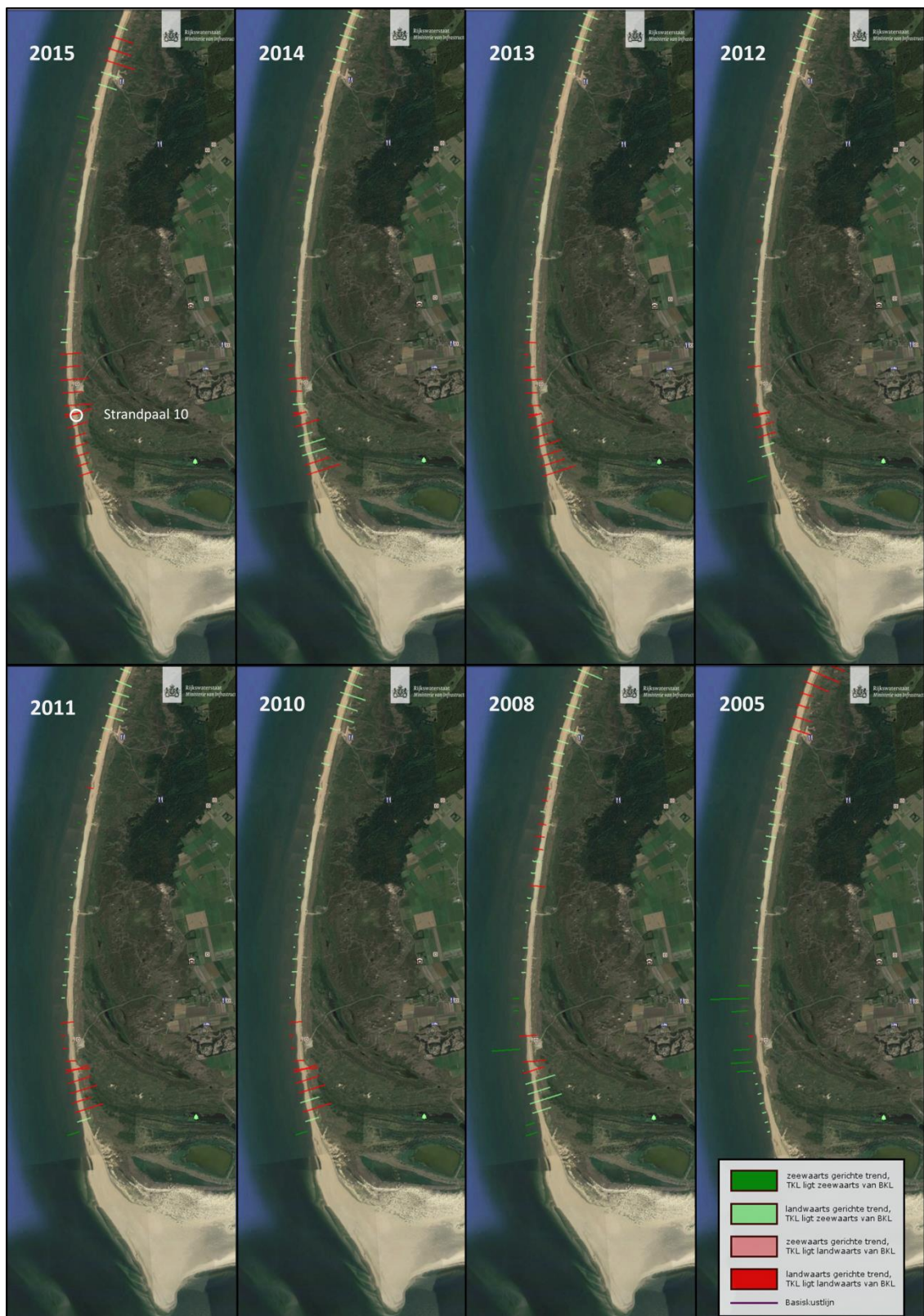
De zuidwest kust (raai 900 - 1400). In 2003 is een geulwandsuppletie uitgevoerd aan de landzijde van het Molengat. Hiermee werd getracht de gevolgen van een matig negatieve trend in het kustvak te compenseren. Na verloop van tijd is gebleken dat het strand rondom de Hoornderslag aanzienlijk verslechterde, mogelijk door een negatieve bijwerking van de geulwandsuppletie. In 2005 is gekozen om de kustlijn te verbeteren met een strandsuppletie tussen raai 880 en 1063. De Toetsmethodiek schrijft voor dat hier dan niet getoetst wordt.

Ten noorden van de Hoornderslag is ook sprake van een verslechterende kustlijn. Tussen raai 1073 en 1392 is de TKL-waarde ten opzichte van vorig jaar bij 14 van de 18 raaien afgenomen, waarbij twee overschrijdingen van de BKL worden geconstateerd. In de periode tot en met 2007 komen daar naar verwachting 4 overschrijdingen bij. Verder zien we dat de noordelijke uitlopers van de Noordhaaks nog steeds richting Texel migreren en dat het Molengat plaatselijk smaller en ondieper wordt.

2015 (Kustlijnkartenboek 2016);

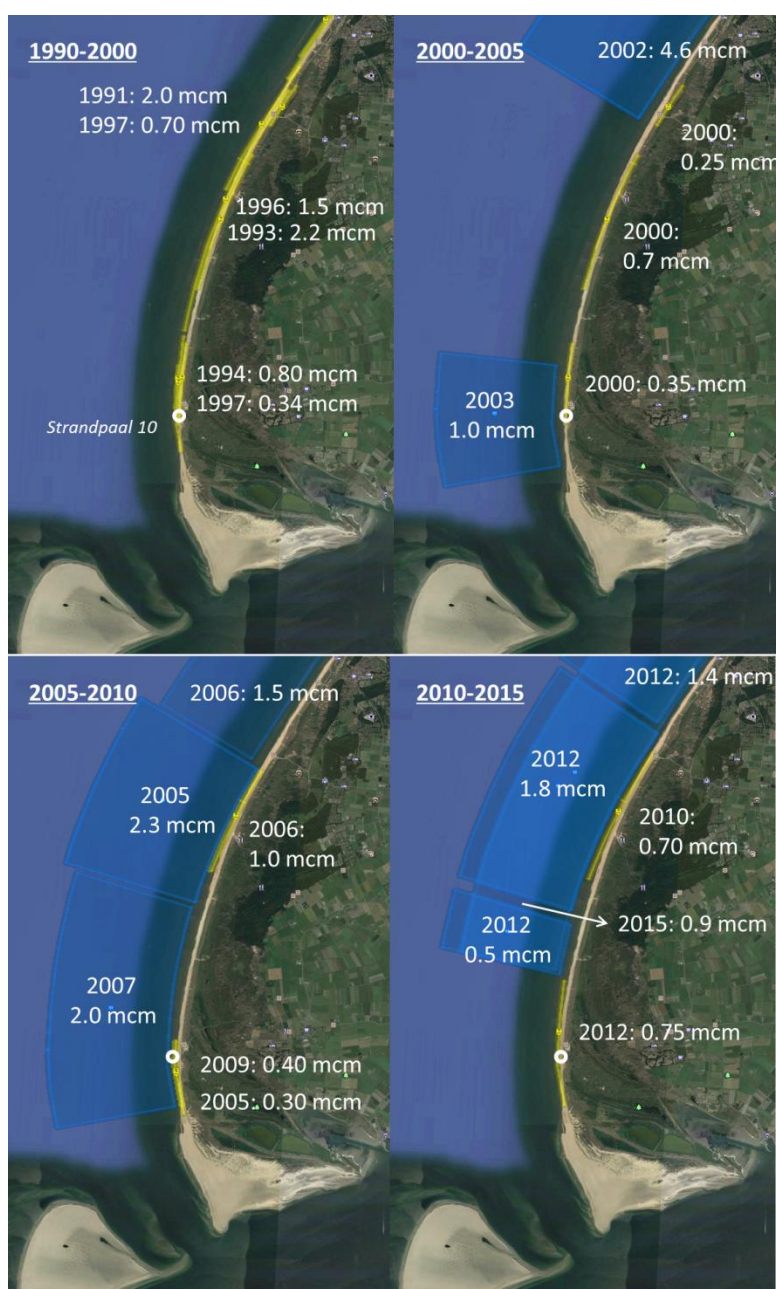
Westerduinen - Zuidwest kust (raai 1410 - 900)

De noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks bewegen zich nog steeds richting Texel. Het Molengat beweegt zich hierdoor landwaarts en wordt plaatselijk smaller en ondieper. Als gevolg van het oprukken van de Noorderhaaks wordt de geul van het Molengat de kust ingedrukt. Hierdoor treedt erosie van de kustlijn op. Door lokaal maatwerk (strandsuppleties) wordt geprobeerd de kustlijn te handhaven, zonder het natuurlijk verzandingproces van de vaargeul te versnellen. In 2009 is voor het zuidelijke deel (raai 900 t/m 1070) een strandsuppletie uitgevoerd om de erosie te compenseren. In 2012 is er een vooroeversuppletie aangebracht (tussen raai 1200 en 1312). Tevens is er een strandsuppletie uitgevoerd tussen raai 900 en 1200. De uitgevoerde suppleties hebben de BKL overschrijdingen en de mate van overschrijding teruggedrongen. Ondanks deze maatregelen is de BKL voor de raaien 900 t/m 1093 al overschreden en zullen de raaien 1108 en 1128 worden overschreden in 2018. Dit hangt samen met een sterk landwaarts gerichte trend tussen raai 900 t/m 1128. Een herhaling van de strandsuppletie uit 2012 staat gepland voor 2016/2017 vanuit het meerjarenprogramma 2016 - 2019. Raaien 1148 t/m 1410 hebben, op raai 1190 na, een zeewaarts gerichte trend. Er zijn hier geen BKL overschrijdingen. Naar verwachting zal op lange termijn de zandplaat van de Noorderhaaks versmelten met de kust. De zandplaat zal daarmee de ligging van de kustlijn positief beïnvloeden.



Figuur 1.2: Overzicht ontwikkeling BKL Noordwest Goeree over de periode 1990-2014 (de lengte van de TKL lijnen geeft de grootte van de trend).

Een overzicht van de uitgevoerde suppleties langs de westkust van Texel wordt gegeven in Figuur 1.3. Elias en van der Spek (2013) geven aan dat vrijwel de gehele Noordzeekust van Texel gesuppleerd wordt. De suppletiehoeveelheden nemen in noordelijke richting vrijwel lineair toe van 2000 m³/m bij km-raai 9 tot 4500 m³/m nabij km-raai 30. Suppleties werden in dit kustvak al ruim voor 1990 toegepast. In de periode 1979-1990 is er al 11 miljoen m³ gesuppleerd tussen km 24 en 30. Sinds 1990 wordt er vrijwel jaarlijks een gemiddelde van 1.6 miljoen m³ gesuppleerd. In totaal is er ruim 48 miljoen m³ gesuppleerd. De meeste suppleties zijn uitgevoerd ten noorden van strandpaal 10. In het strandvak grenzend aan strandpaal 10 zijn 6 strandsuppleties uitgevoerd, waarvan de laatste in 2012 met een volume van 0,75 miljoen m³. Naast de strandsuppleties is er in 2007 ook een grote vooroeversuppletie uitgevoerd van 2 miljoen m³.



Figuur 1.3 Overzicht van de uitgevoerde suppleties en volumes in miljoen m³ (mcm).

2 Werking van het Morfologische Systeem

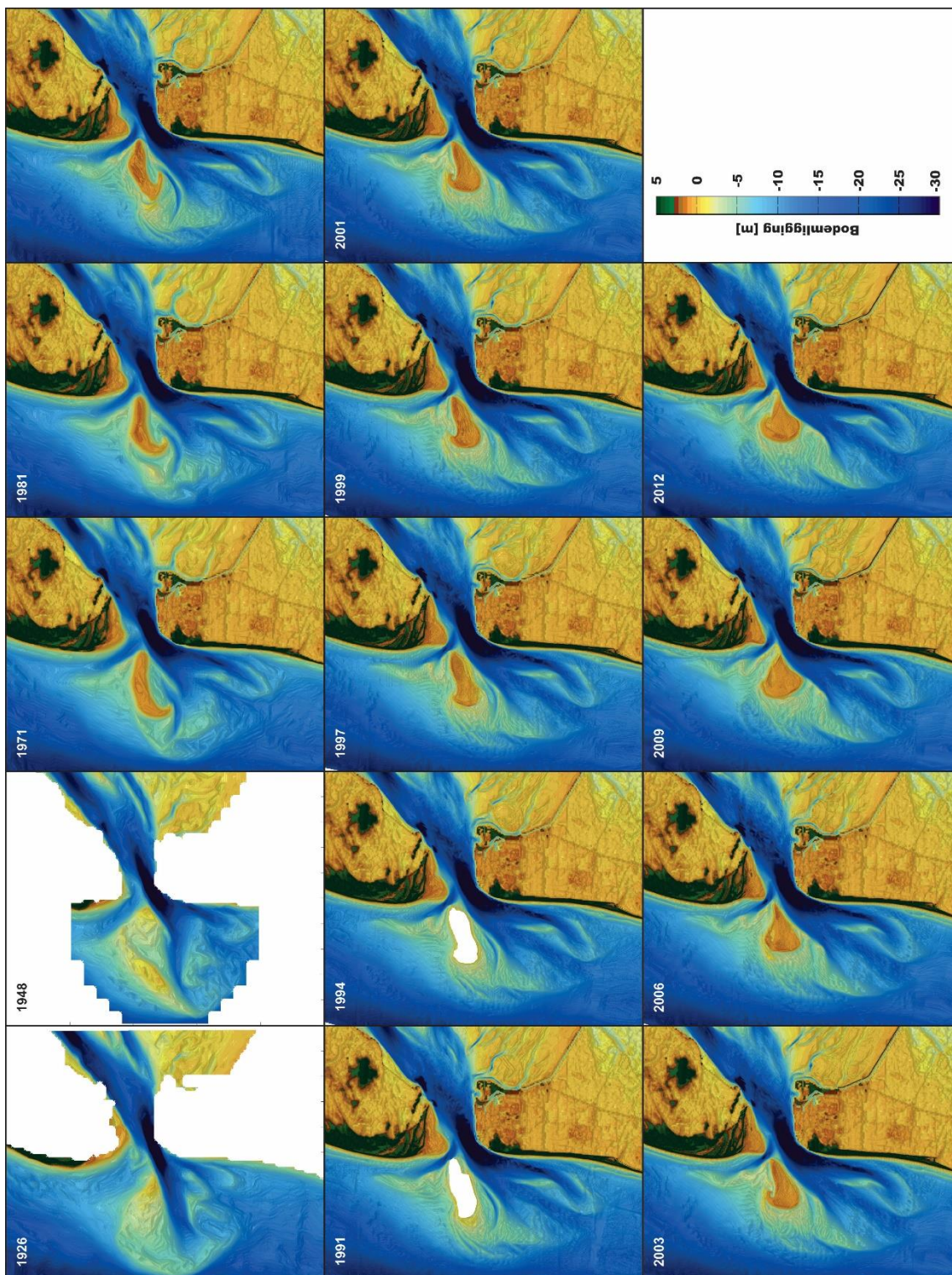
Dit hoofdstuk is een samenvatting uit de rapportage “Morfologie van Texel” door Elias et. al. (2014). Deze rapportage vormt de basis van het morfologische deel van de BeheerBibliotheek Texel. In paragraaf 2.3 is dit verder aangevuld met de recente bodems over de periode 2012-2015.

2.1 Achtergronden van het Morfologische Systeem

De afsluiting van de Zuiderzee (1925 - 1932) is van grote invloed geweest op de ligging van geulen en platen op de buitendelta van het zeegat van Texel. Voor de afsluiting bestond het bekken uit de westelijke Waddenzee en het IJsselmeer (de voormalige Zuiderzee). Het bekken had een totaal oppervlak van rond de 4000 km² en een lengte van 130 km. Na afsluiting reduceerde dit oppervlak tot ongeveer 712 km² en een lengte van slechts 30 km. Deze inkrimping in bekkenomvang had tot gevolg dat de getijkarakteristieken sterk veranderden. De getijgolf transformeerde van een lopende getijgolf naar een golf met een meer staand karakter. Door resonantie en reflectie tegen de Afsluitdijk nam de getijslag in Den Helder toe van 1.2 tot 1.4 m en de getijprisma's in het Marsdiep vergrootten met ongeveer 26% (Rietveld, 1962; Thijsse, 1972). De veranderde getijkarakteristieken en getijvoortplanting, de aangepaste bekkengeometrie en het afsluiten van de hoofdgeulen hadden grote sedimentatie in het bekken tot gevolg (Elias et al., 2012).

In de periode volgend op de afsluiting van de Zuiderzee, tot ongeveer 1975, was de ontwikkeling van het Nieuwe Schulpengat en Schulpengat langs de Noord-Hollandse kust maatgevend. Het Schulpengat ontwikkelde zich hierdoor als de hoofdgeul op de buitendelta, terwijl de voormalige westelijk gerichte hoofdgeul (het Westgat) verzandde (zie Figuur 2.1). Rond 1956 splitste het Schulpengat zich op in het huidige twee-geulen systeem bestaand uit het Schulpengat en Nieuwe Schulpengat. Sinds 1975 blijft deze 2-geulen configuratie vrijwel stabiel aanwezig op de buitendelta.

Gelijktijdig met het zuidwaarts ontwikkelen van de geulen, zien we dat het platengebied Noorderhaaks zich langzaam naar de kust toe beweegt en noordwaarts verlengd. Vóór afsluiting van de Zuiderzee was de Noorderhaaks een gebied waarin de zeewaartse zandtoevoer door het Westgat naar alle waarschijnlijkheid een dynamisch evenwicht had met het landwaarts sedimenttransport door golven. Met het verzanden van het Westgat reduceerde ook de zandtoevoer naar de Noorderhaaks en het landwaarts transport door golven werd hierdoor dominant. De Noorderhaaks migreerde landwaarts en vervormde. Aan de noordzijde van de Noorderhaaks ontstond een spitvormige zandbank genaamd de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks. De uitwisseling tussen deze spit en de geul het Molengat bepaalt ook in grote mate de ontwikkeling van de achterliggende kustlijn van Texel. Door landwaartse verplaatsing van de spit verkleint het doorstroomoppervlakte van de geul, waardoor deze lokaal dieper wordt en gelijktijdig naar de kust verplaatst. Deze verdieping en verplaatsing is één van de belangrijkste oorzaken van de structurele erosie die langs de achterliggende kust is opgetreden (Cleveringa, 2001).



Figuur 2.1 Ontwikkeling van het zeegat van Texel over de periode 1926 – 2012.

2.2 Ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks en het Molengat in detail.

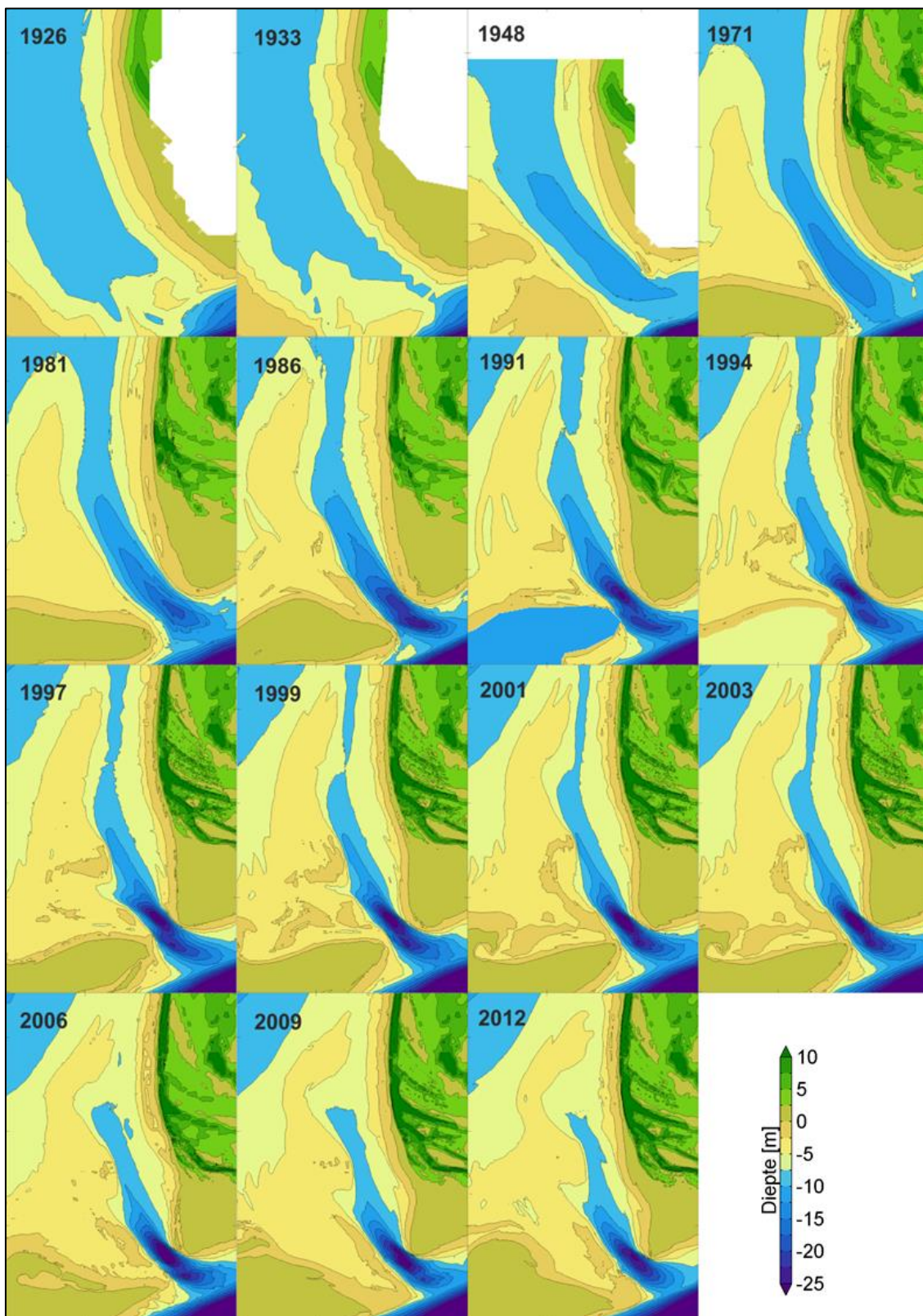
Zoals ook beschreven in vorige paragraaf bestaat het noordelijke gedeelte van de buitendelta uit twee belangrijke morfologische eenheden. De zandbank of spit Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) en de geul Molengat. De veranderingen in de vorm en ligging van de NUN en Molengat worden in Figuur 2.2 in detail weergegeven. Het Molengat is veranderd van ondiepe brede geul (zie bijvoorbeeld 1926), naar een smalle maar diepe geul. Na een initiële sterke groei en kromming van de NUN (1933 - 1991), was het de verwachting dat deze spit zich snel met de kust van Texel zou verhelen. Deze verheling bleef echter lange tijd uit. Vooral gedurende de periode 1991-2003 bleef de geul-plaat configuratie opmerkelijk stabiel (Figuur 2.2).

In de meer recente bodems (2006-2012) is echter weer een duidelijke, doorgaande vervorming van de NUN te zien en ook neemt de maximale hoogte van de NUN af (Figuur 2.1 en 2.2). Ter hoogte van raaien 1000 tot 1210 bevond zich tot 2004 nog een kleine geul die de NUN scheidt van de kust. Sinds 2004 is deze geul dan duidelijk aan het invullen. In de laatste opname (2012) is er van een geul eigenlijk al geen sprake meer en vormen de kust en NUN een ondiep platform met een diepte van ongeveer -5 m NAP. Een opmerkelijke verandering treedt ook op langs de kust van Texel (de Hors) en op de Noorderhaaks. Tot ruwweg 1986 had de zuidwestkust nog een vloeiende boogvorm. Sinds 1991 is er een knikpunt zichtbaar. Dit komt vooral door lokale erosie van de Hors ten noorden van dit knikpunt, terwijl ten zuiden de Hors zich juist iets zeewaarts verplaatst. De ontstane 'punt van de Hors' lijkt recentelijk weer sterk in omvang te reduceren.

De tegenoverliggende Noorderhaaks vertoont hier recentelijk (2006-2012) eveneens een grote vormverandering. Tussen het Molengat en de Noorderhaaks vormt zich een nieuwe vloedgeul waardoor de afstand tussen Noorderhaaks en de Hors juist toeneemt. Dit is een duidelijke trendbreuk met voorgaande observaties. De Noorderhaaks verschuift sinds zijn droogvallen in de jaren '50 al langzaam naar het oosten toe. In de periode 1991 – 2003 blijft dan de oostpunt opmerkelijk stabiel. Met het opdringen van de Noorderhaaks vervormde het Molengat van zeer breed en ondiep naar een smalle diepe geul. Sinds 2006 is de trend echter omgekeerd. De Noorderhaaks erodeert aan de oostzijde en het Molengat reduceert in diepte.

Vervormingen van de Noorderhaaks en het Molengat kunnen grote gevolgen hebben voor de naastliggende kustlijn. Een direct gevolg van verheling van de NUN is dat een (groot) zandvolume aan de kust geleverd wordt welke erosie tijdelijk kan compenseren. Daarnaast hebben veranderingen in het Molengat en Noorderhaaks een effect op de processen die erosie veroorzaken. De erosie van het kustvak wordt vaak toegeschreven aan de invloed van de getijdegeul Molengat die geleidelijk naar het oosten opschuift. Een deel van de erosie wordt ook veroorzaakt door brandingstransport langs de kust. Een verandering in de voorliggende ondiepte kan enerzijds resulteren in een veranderd langstransportpatroon. Ook al is er veel zand beschikbaar in de NUN, de lokale gradiënten in de langtransporten kunnen dan nog steeds kustlijnerosie veroorzaken. Daarnaast wordt de balans tussen geulen en platen beïnvloed. Het evenwicht tussen geul, bank en kust verandert en dit kan resulteren in grote (zowel positieve als negatieve) veranderingen langs de kust. Vooral de erosie van de Hors lijkt versterkt door te zetten door een verflauwing van de landwaartse geulwand.

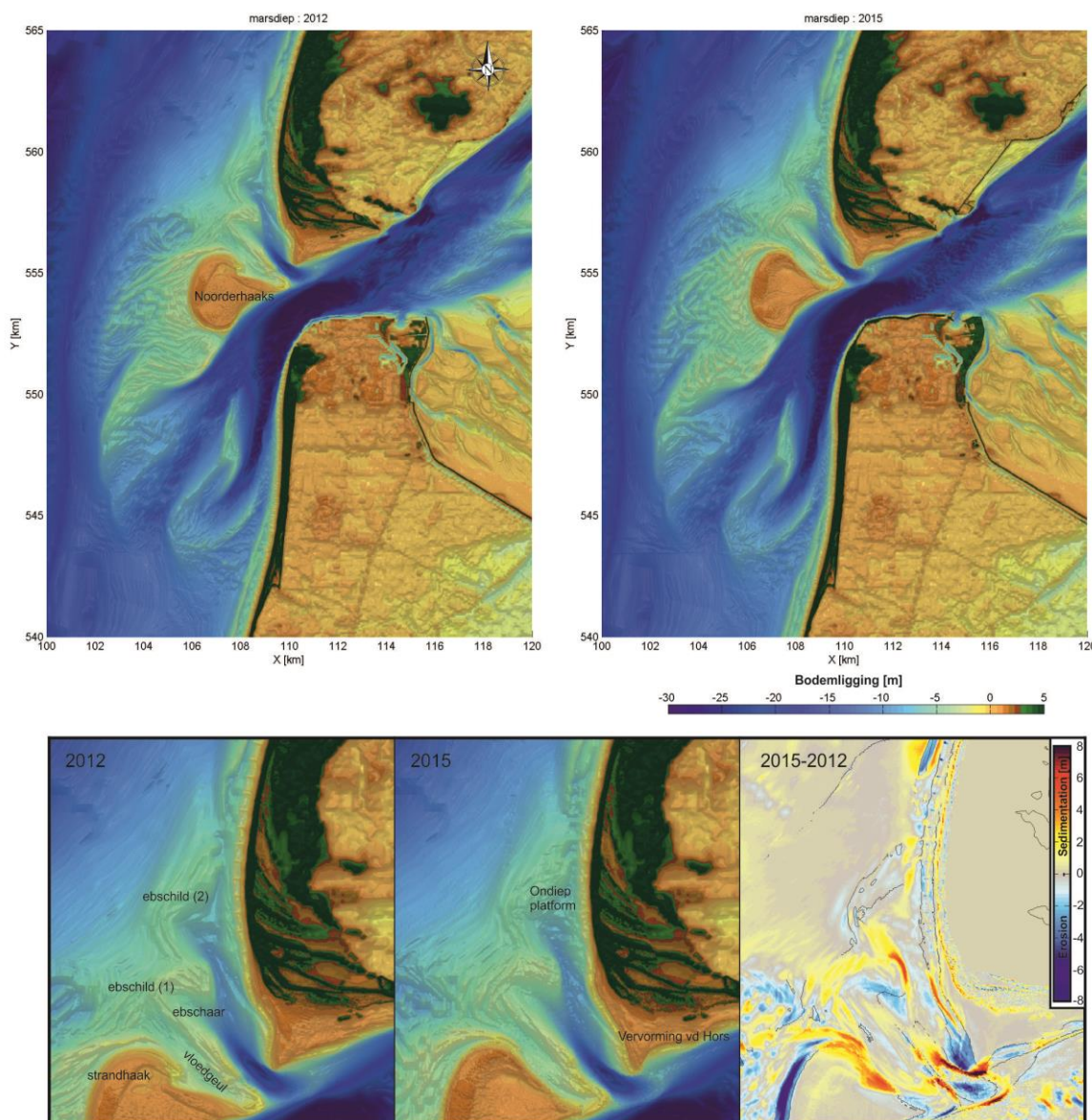
Zie Appendix A voor een gedetailleerde beschrijving van representatieve JARKUS-raaien.



Figuur 2.2 Detailweergave van de vorming en landwaartse verplaatsing van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks op de periode 1926-2012.

2.3 Recente ontwikkelingen van het kustvak

De analyse van Elias et al. (2014) is gebaseerd op de bodemdata tot 2012. In de laatste jaren zijn er weer nieuwe bodemdata beschikbaar gekomen voor de jaren 2013, 2014 en 2015. Deze data worden in Figuur 2.3 (voor Vaklodingen) en Figuur 2.4 (voor de JARKUS metingen) gepresenteerd.



Figuur 2.3 Recente bodems op basis van de Vaklodingen voor het zeegat (boven) representatief voor 2012 (links) en 2015 (rechts) en een detailweergave van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (onder) inclusief de bodemverandering.

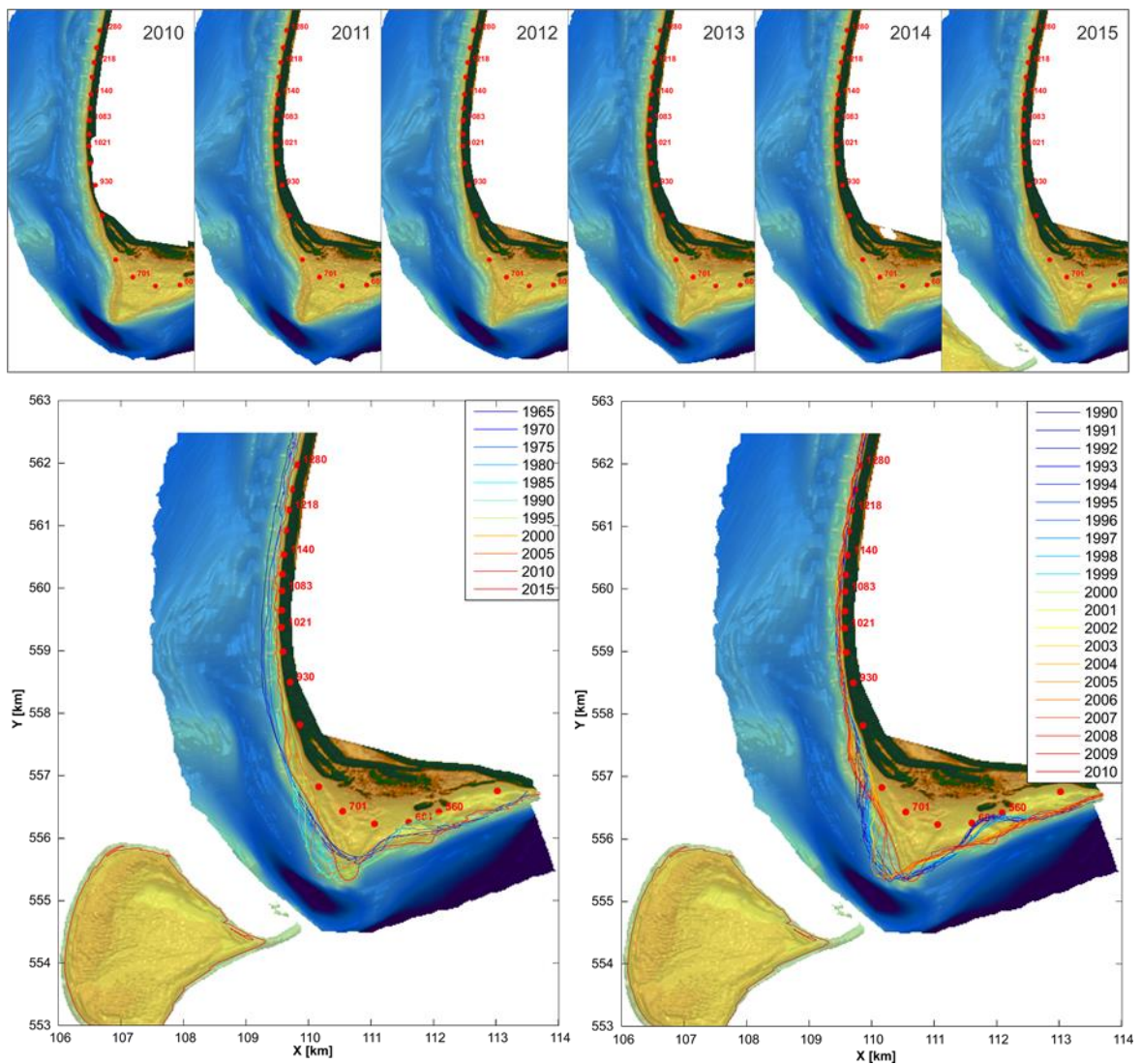
In Figuur 2.3 worden de 2 meest recente Vaklodingen (2012 en 2015) met elkaar vergeleken. Op de schaal van de buitendelta (Fig. 2.3, bovenste 2 deelfiguren) zijn de veranderingen relatief klein; in beide figuren blijven de dominante geulen en platen behouden. Dit is ook wel de verwachting, veranderingen op deze schaal doen zich voor op langere tijdschalen.

Op een wat kleinere schaal kunnen we toch wel een aantal doorgaande veranderingen observeren. De onderste 3 deelfiguren geven de veranderingen van het noordelijke gedeelte van de buitendelta in detail weer. Op grote schaal blijven de morfologische kenmerken behouden (zie de uitleg in de Figuur). Wel kunnen we zien dat in 2015 de noordelijke punt van de NUN zich duidelijk heeft vastgezet aan de kust van Texel. Hierbij is een ondiep platform ontstaan. De morfologische veranderingen zijn hier echter wel klein ten opzichte van de veranderingen op bijvoorbeeld de Hors en op de Noorderhaaks. De Noorderhaaks vertoont een doorgaande erosie aan de zeezijde en een grote aangroei aan de noordoostkant, waar een grote bank in de vorm van een strandhaak zich heeft aangehecht aan de Noorderhaaks.

Een belangrijk detail op de NUN zijn de 2 boogvormige ondiepten (in Figuur 2.3 gekenmerkt als ebschild 1 en 2). Ebschild 1 bevindt zich dicht op de Noorderhaaks en tussen dit ebschild en de Noorderhaaks ligt in beide bodems een vloedgeultje. Ebschild 1 vertoont een sterke sedimentatie (groei) tussen 2012 en 2015. In voorgaande jaren leek de hoogte juist iets af te nemen. Dit is wel een belangrijke ontwikkeling. De groei aan de noordoostzijde van ebschild 1 zorgt ervoor dat het doorstroomoppervlak tussen de NUN en de kust hier lokaal afneemt, maar ook de stroming de kust in wordt gedrukt. Dit kan een mogelijke oorzaak zijn van de kustlijnerosie. Hoewel de bodem wel een gelijke vorm laat zien is ebschild 2 niet geheel de juiste benaming voor de ondiepte ten noorden van ebschild 1. Het noordelijke gedeelte van de spit vervormt waarschijnlijk meer door de belemmering van de stroming t.g.v de ondiepte van ebschild 1 dan door aandrijving van ebstroming vanuit het zeegat. Ebschild 2 ligt in de 2012 bodem al dicht op de kust en in 2015 is de ondiepte vrijwel tegen de kust aangedrukt. Het is de verwachting dat dit een positieve invloed heeft op het totale zandvolume in het kustvak. Dit wil niet zeggen dat dit direct een positieve invloed heeft op de kustlijn. Daarvoor ligt het zandvolume eigenlijk nog iets te diep.

De veranderingen in de vooroever, het aanlanden van de NUN en de erosie van de kustlijn bij paal 10 zijn waarschijnlijk wel gerelateerd. Een afname van de maximale hoogte van de NUN kan er toe bijdragen dat de golven hier juist iets hoger worden. Daarnaast kunnen de grote, kustlangse, verschillen in ligging en hoogte van de vooroever juist gradiënten in golfhoogte veroorzaken, die op hun beurt weer sediment transport aandrijven. Gradiënten in de golfhoogten zorgen voor lokale divergentie- (erosie) en convergentie- (sedimentatie) punten. Gezien de volumeverliezen bij paal 10 is hier waarschijnlijk een divergentiepunt aanwezig.

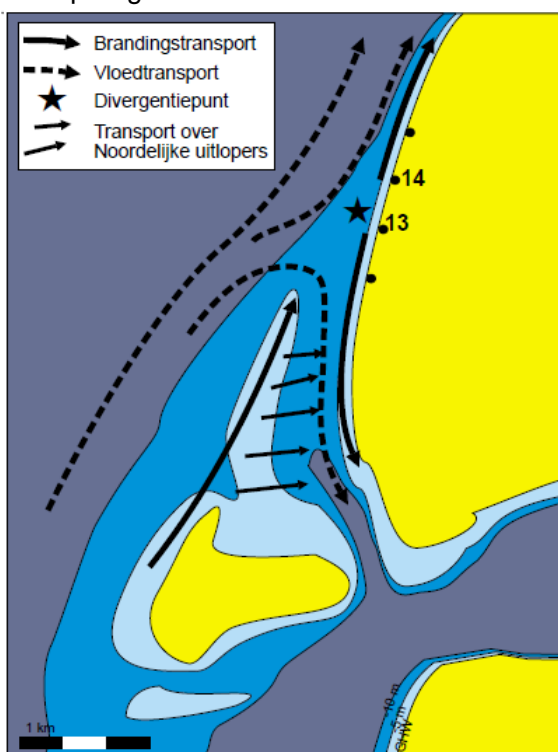
De invloed van de veranderingen in NUN en Molengat worden in meer detail weergegeven in Figuur 2.4 aan de hand van de JARKUS metingen. Kijken we naar de contourlijnen (0m NAP) dan zien we een tweedeling in gedrag. Ten noorden van km 8 is de kustlijn sinds 1965 duidelijk landwaarts verplaatst. Deze verplaatsing gebeurt vooral tot 1990. Sinds 1990 ligt de contour vrijwel stabiel. Een duidelijk zichtbare erosie rond paal 10 is hierin niet zichtbaar. Dit komt mede door de uitvoering van suppleties die de negatieve trend weer opheffen. Let wel op dat dit alleen de ligging van de 0m contour weergeeft en niet een volume zoals eigenlijk het geval is met de MKL. Ten zuiden van km 8 zien we initieel een groei van de Hors (1965-1995) maar met name de laatste jaren is hier de kustlijn dan weer sterk landwaarts verplaatst. De veranderingen in Molengat hebben hier duidelijk een grote invloed.



Figuur 2.4 Detailweergave van de ontwikkeling van de zuidwestkust van Texel op basis van de JARKUS opnamen over de periode 2010-2015 (boven, van links naar rechts). Onder: verplaatsing van de 0m contour sinds 1965 in een interval van 5-jaar (links) en jaarlijkse verplaatsing sinds 1990 (rechts). De onderliggende bodem is gebaseerd op de 2015 JARKUS meting.

2.4 Conceptuele beschrijving van de zandtransporten

Cleveringa (2001) geeft een conceptuele beschrijving van de werking van het kuststelsel aan de zuidwestzijde van Texel. Deze beschrijving is representatief voor de periode tot 2001 en samengevat in de conceptuele beschrijving van de transporten in Figuur 2.5 en de tekst in deze paragraaf.



Figuur 2.5 Conceptueel sedimenttransport model van de kust van zuidwest Texel, het Molengat en de Noorderhaaks. Onder invloed van het gemiddelde jaarlijkse golfklimaat vindt langs de kust ten noorden van strandpaal 14 brandingstransport naar het noorden plaats en ten zuiden van strandpaal 13 brandingstransport naar het zuiden. Langs de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks vindt brandingstransport naar het noorden plaats en er vindt ook golfgedreven transport over de Noordelijke uitlopers naar de kust plaats. De vloedstroom divergeert voor de kust van zuidwest Texel, een deel gaat verder noordelijk langs de kust en een deel gaat door het Molengat. Uit: Cleveringa (2001)

De natuurlijke morfologische ontwikkelingen van de zuidwestkust van Texel worden bepaald door de zandtransporten langs de kust en op de buitendelta van het naastgelegen zeeget. Maatgevend voor de opgetreden veranderingen zijn: (1) de druk op de kust door het Molengat, (2) golfgedreven zandtransport naar het noorden én het zuiden en (3) zandtransport naar het noorden en het zuiden door een stuwpunt in de vloedstroom.

(1) Druk op de kust door het Molengat

In eerdere onderzoeken naar de oorzaken van de erosieproblemen bij zuidwest Texel is er altijd vanuit gegaan dat de druk van het Molengat op de kust een zeer belangrijke rol speelt (Beckerling Vinkers, 1951, Ringma, 1954, Battjes, 1961, Joustra, 1971, de Reus, 1980, Waterloopkundig Laboratorium, 1996). De druk op de kust door het Molengat is niet het gevolg van de doorgaande zandtransporten door het getij. De druk op de kust wordt veroorzaakt door de verplaatsing van de gehele geul naar het oosten (zie Figuur 2.4 en Figuur 2.5) en deze verplaatsing wordt veroorzaakt door het zandtransport vanaf de Noordelijke uitlopers naar het oosten. Dit zandtransport over de Noordelijke uitlopers wordt veroorzaakt door golfwerking in combinatie met de vloedstroom.

(2) Golfgedreven zandtransport naar het noorden én het zuiden

Langs de kust van zuidwest Texel vindt golfgedreven zandtransport langs de kust plaats. De richting van dit transport wordt bepaald door de richting die de golven hebben ten opzichte van de kustlijn. De richting van de golven in het gebied wordt bepaald door de golfrichting op de Noordzee en door de afbuiging van golven als ze zich voortplanten over de ondieptes zoals de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks. De kustlijn van zuidwest Texel is bol.

De combinatie van afbuiging van golven over de buitendelta met de bolle kustlijn van zuidwest Texel levert gemiddeld over het jaar zandtransport naar het noorden ten noorden van strandpaal 13 tot 14 en naar het zuiden ten zuiden van strandpaal 13 tot 14 (Steijn en Jeuken, 2000). Van strandpaal 13 tot 14 ligt dus een splitsingspunt of divergentiepunt in het brandingstransport (Figuur 2.5). De consequentie van een dergelijk divergentiepunt is dat er rond dit gebied alleen zand verdwijnt met het brandingstransport en er niets wordt aangevoerd. Met andere woorden, er vindt bij het divergentiepunt erosie plaats. De ligging van het divergentiepunt is mede afhankelijk van de afbuiging van de golven over de Noordelijke uitlopers. Met de uitbouw van de Noordelijke uitlopers naar het noorden is ook het divergentiepunt naar het noorden opgeschoven.

Zeewaarts van zuidwest Texel vindt langs de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks brandingstransport naar het noorden plaats. Ook vindt over de Noordelijke uitlopers zandtransport plaats door de getijdestromingen. Het netto resultaat van het brandings- en getijdetransport over de Noordelijke uitlopers is zandtransport naar het noorden. Dit noordwaartse zandtransport leidt tot doorgaande uitbouw in noordelijke richting, langs de kust van zuidwest Texel. Hoewel dit zandtransport naar de kust van zuidwest Texel is gericht, komt het zand niet ten goede aan de eilandkust. Het Molengat scheidt de noordelijke uitlopers van de kustlijn en voorkomt transport van zand naar de kust.

(3) Zandtransport naar het noorden en het zuiden door een stuwpunt in de vloedstroom

In het Molengat loopt de stroming met vloed naar het zuidoosten in de richting van de Waddenzee. Langs de buitendelta en langs de eilandkust is de vloedstroom naar het noorden gericht. Ter hoogte van strandpaal 11 verdwijnt een deel van de vloedstroom het Molengat in en stroomt de rest door langs de eilandkust. Rond strandpaal 11 ligt dus een splitsingspunt in de vloedstroom (Steijn en Jeuken, 2000). Ten zuiden van dit splitsingspunt, of "stuwpunt" wordt zand door de getijdestromingen naar het zuidoosten getransporteerd en ten noorden wordt zand langs de kust naar het noorden getransporteerd. Rond strandpaal 11 wordt dus alleen zand afgevoerd door de vloedstroom; er vindt geen aanvoer plaats. Er vindt bij strandpaal 11 dus erosie plaats door de vloedstroom. Dit stuwpunt in de vloedstroom ligt iets ten zuiden van het divergentiepunt in het brandingstransport. Overigens gebeurt tijdens eb het omgekeerde; er bevindt zich dan een punt waar de ebstroom naar het noorden uit het Molengat de ebstroom naar het zuiden langs de eilandkust tegenkomt, ter hoogte van strandpaal 12. Bij dit convergentiepunt wordt door de ebstroom zand aangevoerd en dit leidt waarschijnlijk tot sedimentatie. Er vindt in het gebied van strandpaal 11 tot 14 dus erosie plaats door het brandingstransport en is ook een mogelijke erosie door de vloedstroom, hoewel niet duidelijk is hoe die zich verhoudt tot de sedimentatie door de ebstroom.

3 Modelsimulaties

3.1 Inleiding.

Het Delft3D 4 (Online Morphology) model is gebruikt voor het simuleren van de waterbeweging, golven en sedimenttransporten in het zeegat van Texel en langs de aanliggende kusten. Voor een beschrijving van de onderliggende formuleringen en oplossingschema's wordt verwezen naar Lesser et al. (2004). De basis van het model wordt gevormd door de onderliggende stromings- en, indien geactiveerd, golvenmodule SWAN. Voor deze studie zijn echter alleen de getijgedreven stromingen berekend.

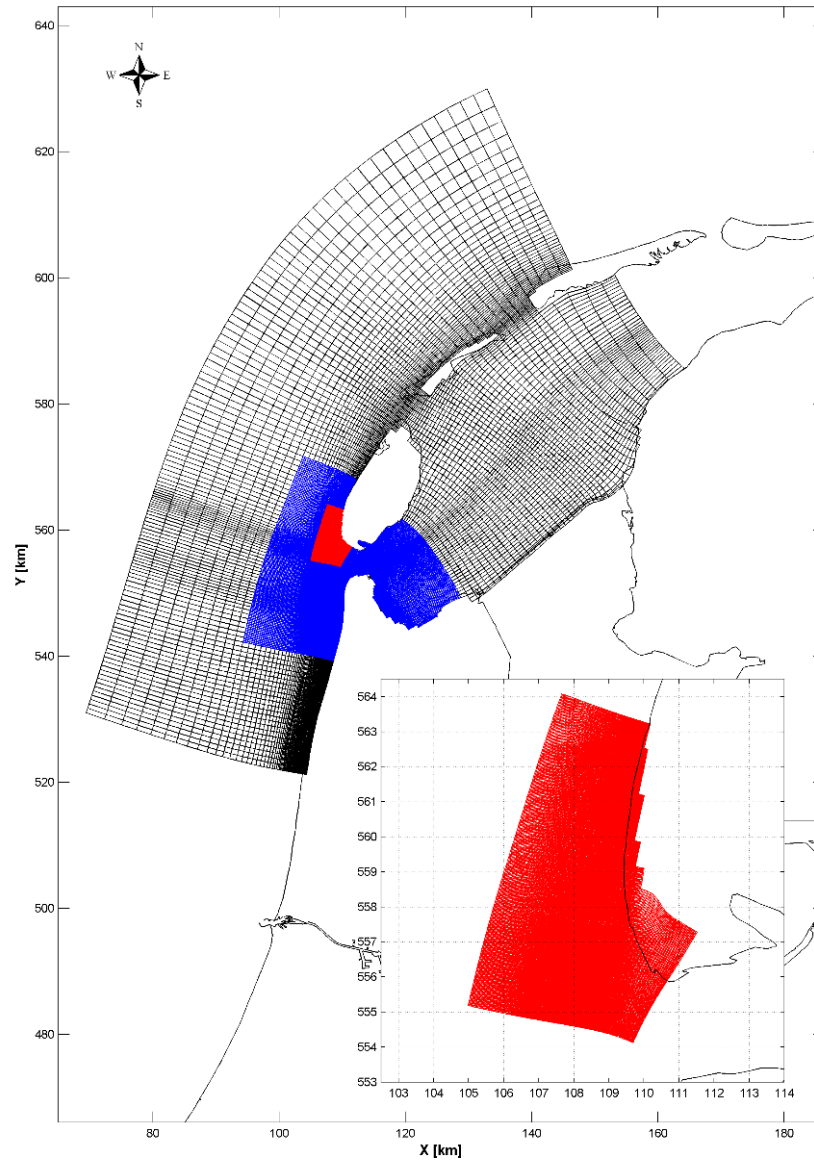
De uitgevoerde modelsimulaties bestaan uit 2 onderdelen. In hoofdstuk 3.3 worden de simulaties voor het in kaart brengen van de effecten van verschillende suppletievarianten op de stromingen beschreven. Vanwege de doorlooptijd van deze studie zijn hier alleen hydrodynamische simulaties uitgevoerd. Hoofdstuk 3.4 richt zich op het begrijpen van de processen. Hiervoor zijn de getijstromingen en de bijbehorende sedimenttransporten over de recente bodems (1991-2012) berekend. Daarnaast zijn er simulaties met een morfologisch golfklimaat uitgevoerd.

De uitgevoerde modelsimulaties zijn niet bedoeld als uitvoerige modelstudie naar de effecten van de suppletievarianten of voor het ontwerp hiervan. Dit valt niet binnen de opdracht, maar met behulp van bestaande modellen kan wel worden gekeken naar de initiële effecten van de verschillende suppletievarianten op de lokale stroombeelden ter plaatse van strandpaal 10. Dus in dat opzicht kunnen ze wel goed gebruikt worden om een beter inzicht in het gedrag van de suppletievarianten te krijgen en kan er een betere schatting gemaakt worden naar wat de lokale effecten van de verschillende suppletievarianten zullen zijn (bijv. de risico's op de gebruikersfuncties van het strand door morfologische veranderingen geïnduceerd door de suppletie). Een belangrijk aspect dat hierin onderzocht wordt is of de suppletie aantoonbare veranderingen op een grotere schaal, buiten het directe suppletiegebied, veroorzaakt. Dit kan in de complexe buitendelta omgeving, waar de vele verschillende morfologische elementen met elkaar samenhangen, grootschalige en verstrekkende gevolgen hebben.

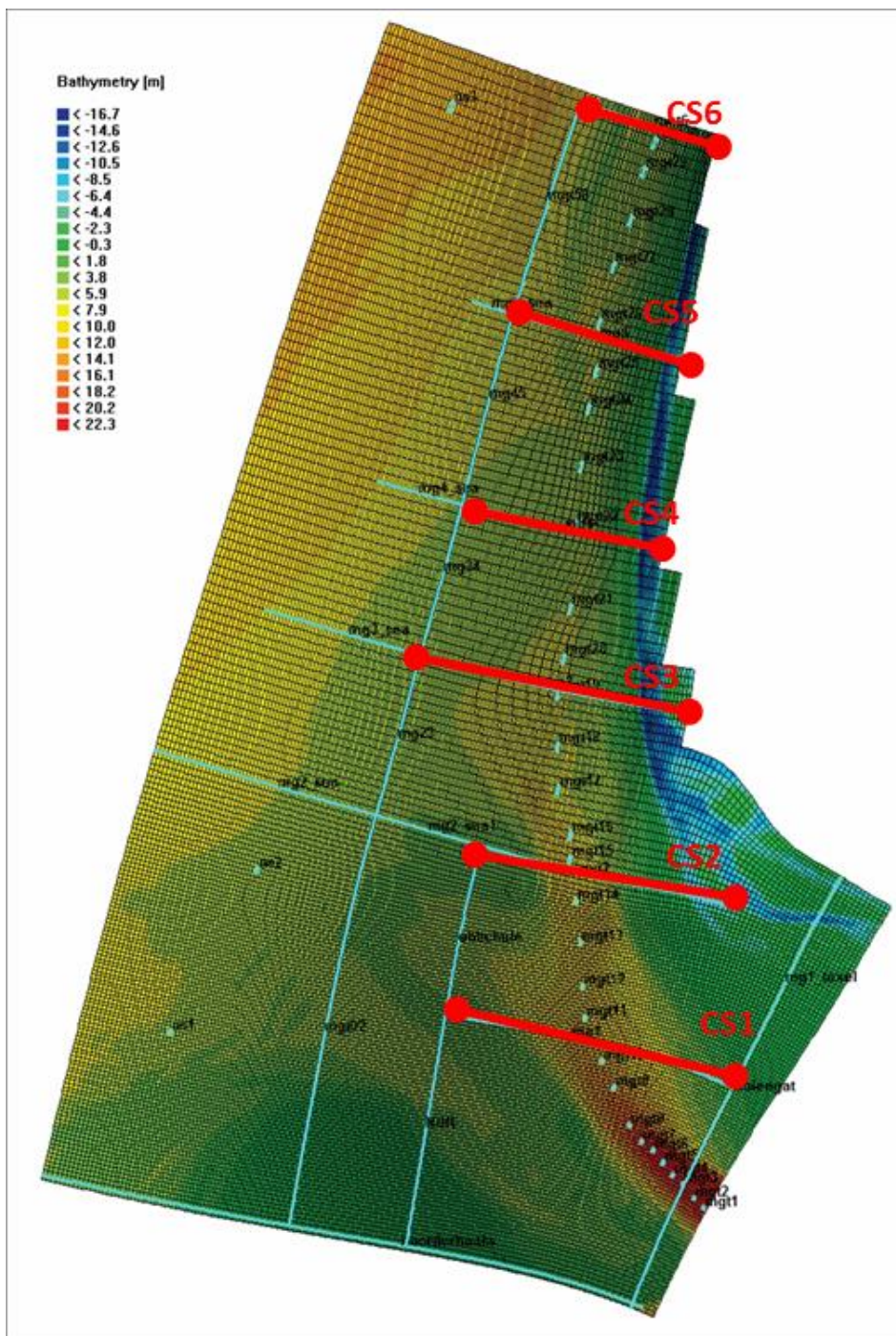
3.2 Model schematisatie

Figuur 3-1 geeft een overzicht van de gebruikte rekenroosters. Deze rekenroosters omvatten het zeegat van Texel en de naastliggende zeegaten Eierlandse Gat en Vlie. Dit is noodzakelijk om de belangrijke uitwisseling tussen Vlie en Texel mogelijk te maken. Het rekenrooster is gebaseerd op het TOD (Texel Outer Delta model zoals gepresenteerd in Elias 2006 (Hfst. 6)). Het oorspronkelijke curvilineaire rooster (zwarte grid in Figuur 3.1) heeft een kleine 40.000 roosterpunten met een maximale resolutie van 80x120 m ter plaatse van het Marsdiep. De zeewaartse begrenzingen zijn zo gekozen dat ze ver buiten de directe invloed van het zeegat liggen. De open-zee randvoorwaarden (getij) zijn voorgeschreven als waterstanden. Deze waterstanden zijn gekalibreerd en gevalideerd op de harmonische componenten van de waterstanden in de stations Texel Noordzee, Den Helder, Harlingen en Vlie Haven. Het horizontale getij is gevalideerd met behulp van de NIOZ veerboot data op een correcte weergave van de belangrijkste harmonische componenten (zie details in Elias 2006). Een aanname binnen deze studie is dat deze randvoorwaarden ook representatief zijn voor de huidige periode. Ten behoeve van deze studie is het rooster lokaal verfijnd naar een maximale resolutie van 15x30m (rode grid) rond de kop van zuidwest Texel en een resolutie

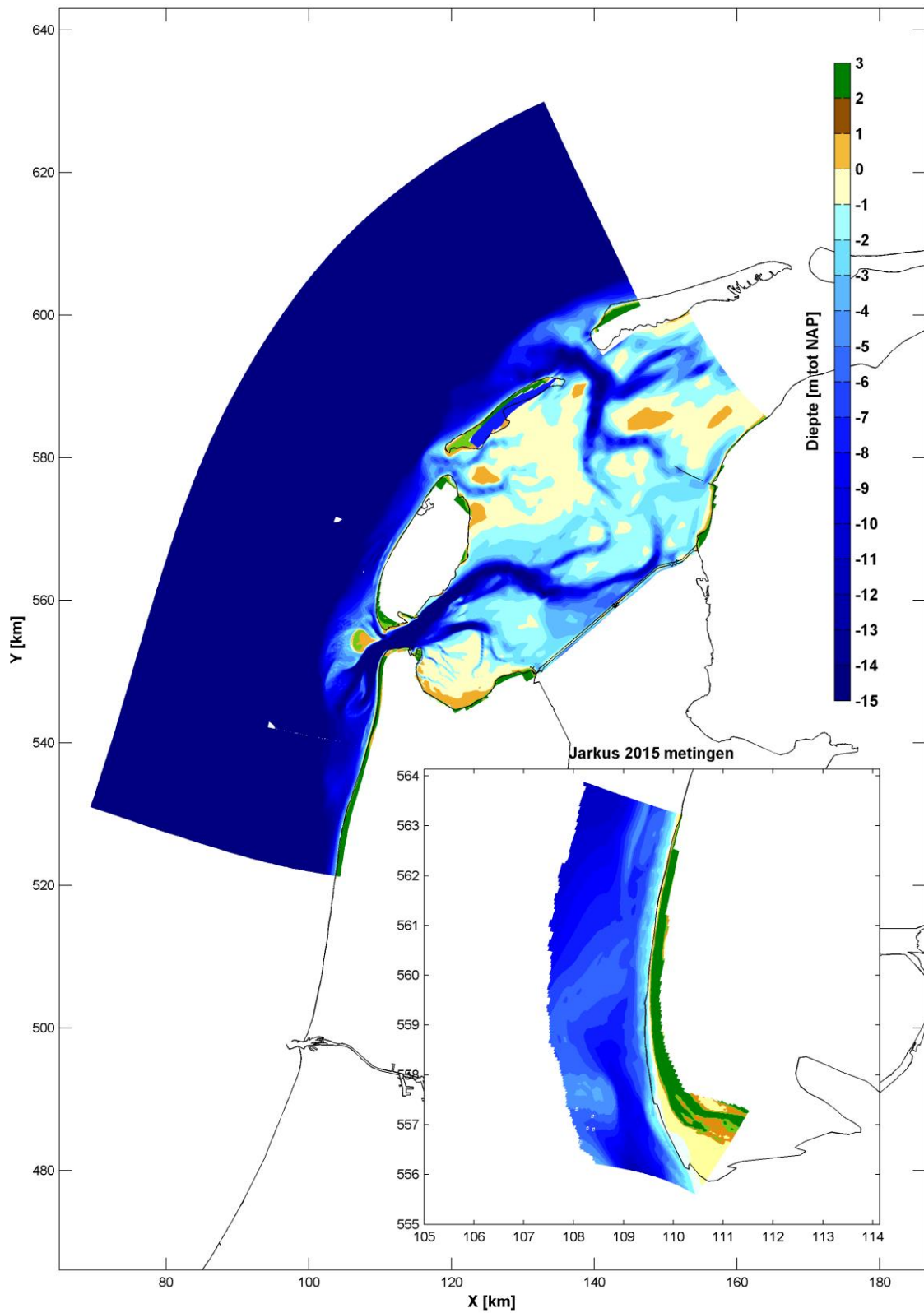
van ongeveer 30x60m op de buitendelta (blauwe grid). Modelresultaten worden weggeschreven met lage tijdsresolutie (elk uur) voor het totale rooster. Daarnaast wordt data in 10-minuten intervallen weggeschreven voor een aantal geselecteerde punten en dwarsdoorsneden (Figuur 3.2). De bodem in het grootste domein is representatief voor de bodemligging in 2000. Dit is de oorspronkelijke bodem in het TOD model. Door deze gelijk te houden is het de verwachting dat ook de modelrandvoorwaarden op orde blijven. Analyse van de berekende stroombeelden bevestigen deze aanname. De buitendelta bodem en de vooroever langs de kust van zuidwest Texel (Figuur 3.3), zijn gebaseerd op de binnen Deltares meest recent beschikbare vaklodingen (2012) en JARKUS metingen (2015). Een morfologisch getij, zoals vaak gebruikt in deze studies, is voor deze modelschematisatie helaas nog niet beschikbaar. Het model wordt daarom aangestuurd door middel van de afgeregelde astronomische getijcomponenten op de zeerand. Iedere modelsimulatie rekent vervolgens over 14 dagen zodat de invloed van een springtij – doortij getijcyclus in de resultaten wordt meegenomen.



Figuur 3.1: Rekenroosters van het stromingsmodel. De verschillende kleuren geven de 3 domeinen van het model weer. Het rode domein heeft een maximale resolutie van 15x30m ter plaatse van Paal 10. Het blauwe domein is benodigd voor een nette overgang tussen het grote en kleine rooster.



Figuur 3.2: Overzicht van de bodemligging in het model en de aanwezige observatiepunten en dwarsdoorsneden in het model. De in de analyse gebruikte dwarsdoorsneden (Figuur 3.9) zijn met rode lijnen aangegeven.



Figuur 3.3: Overzicht van de bodem in de referentiesimulatie (representatief voor 2015 langs de kust van zuidwest Texel).

3.3 Modelsimulaties; Bepaling effecten suppletievarianten.

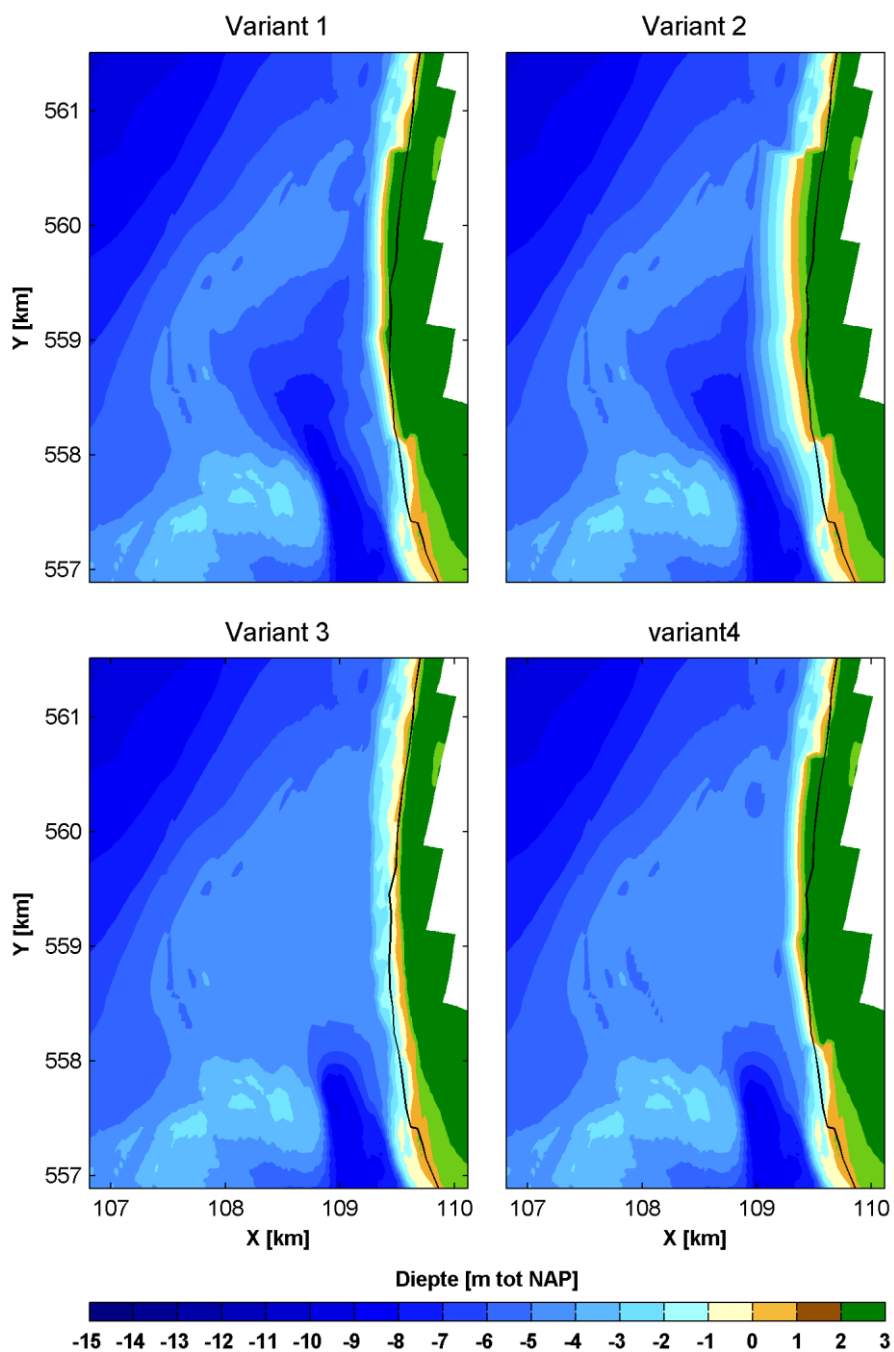
3.3.1 Bodemschematisaties.

Naast de referentiesimulatie representatief voor lokale stroming in 2015 zijn er modelbodems gecreëerd voor de verschillende suppletievarianten. De ontwerpen hiervan zijn gebaseerd op het door WVL aangeleverde bestand: Ontwerp suppletie Texel ZW 900-1128_V1.3.xlsm en ingepast in de 2015 bodemschematisatie.

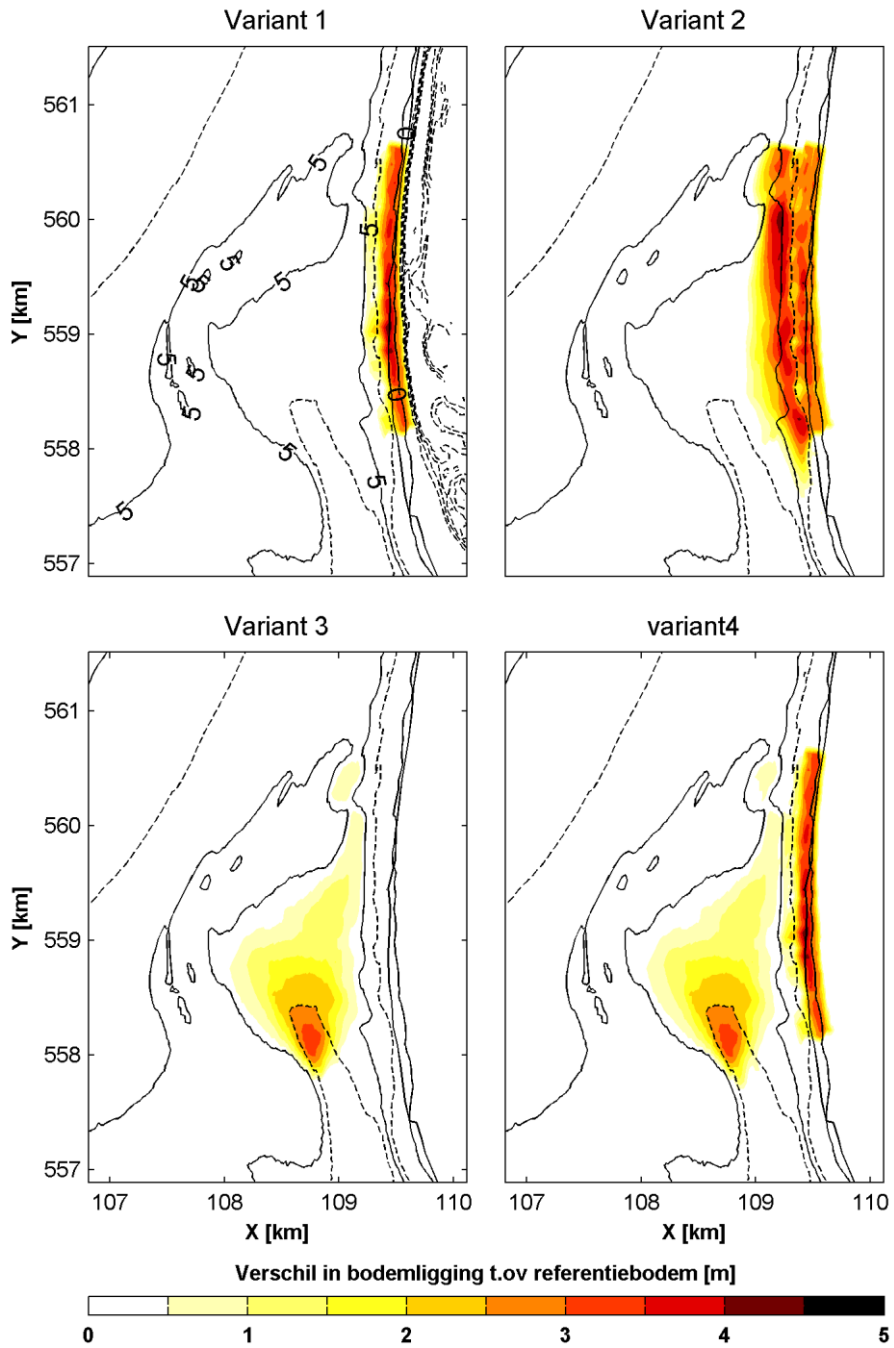
Figuur 3.4 en Figuur 3.5 geven een overzicht van de gebruikte bodems in het model:

- Variant S1 is een reguliere strandsuppletie in het kustvak tussen raai 900 en 1128. De kruin van de suppletie ligt hier op +3 m NAP. Het benodigde volume volgens gebaseerd op het verschil tussen deze variant en de referentiebodembodem is 1.58 miljoen m³.
- Variant S2 is gebaseerd op een suppletie met natuurlijke helling. Deze suppletie strekt verder zeewaarts het Molengat in. Het totale suppletievolume benodigd in de modelsimulatie is hiervoor 4.01 miljoen m³.
- Variant S3 geeft een suppletie waarbij de geul aan de noordoostzijde van de NUN dicht is gesuppleerd tussen de NAP -5m contour. Hierbij ontstaat een doorlopend platform vanaf de kust naar de NUN. Het benodigde volume hiervan is 2.21 miljoen m³.
- Variant S4 is een combinatie van variant 1 en 3. De geulafsluiting tussen de -5m contour en de strandsuppletie worden hier gecombineerd. Het totale volume van deze variant bedraagt 3.62 miljoen m³.

De volumes van de suppleties zoals gebruikt in het model wijken iets af van de door Rijkswaterstaat aangeleverde waarden. Dit komt, enerzijds doordat de bodem in het model nauwkeuriger is (het volume wordt over kleinere roosterafstanden bepaald) dan de bodem gebruikt in het aangeleverde ontwerp van WVL. Daarnaast zijn in het model de kop en staart van de suppletie aangepast, zodat er een vloeiende overgang ontstaat tussen suppletie en omliggende kust.



Figuur 3.4: Overzicht van de 4 suppletiealternatieven rond strandpaal 10.



Figuur 3.5: Overzicht van het verschil in bodemligging van de 4 suppletiealternatieven t.o.v. de referentiebodembodem.

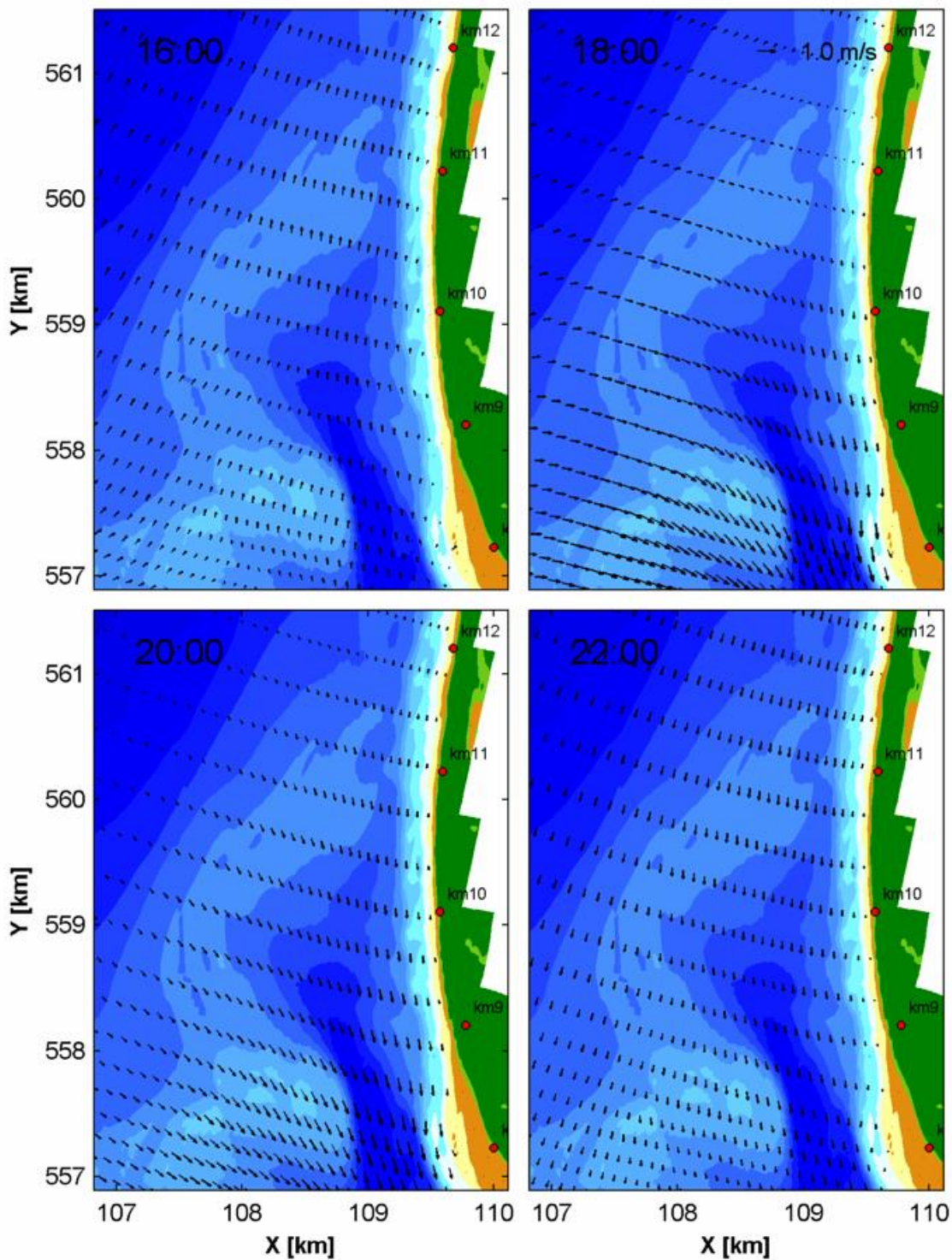
3.3.2 Model resultaten; Effect van suppleren op stroomsnelheden

Het doel van deze studie is niet het uitgebreid analyseren en optimaliseren van de suppletievarianten, maar inzicht te verkrijgen in de mogelijke effecten van de suppletie op de stroomsnelheden. Met behulp van deze kennis kan, op basis van expert judgement, een schatting gemaakt worden van de wenselijkheid van de suppletievariant ten aanzien van de neveneffecten op de naastgelegen kusttraaien.

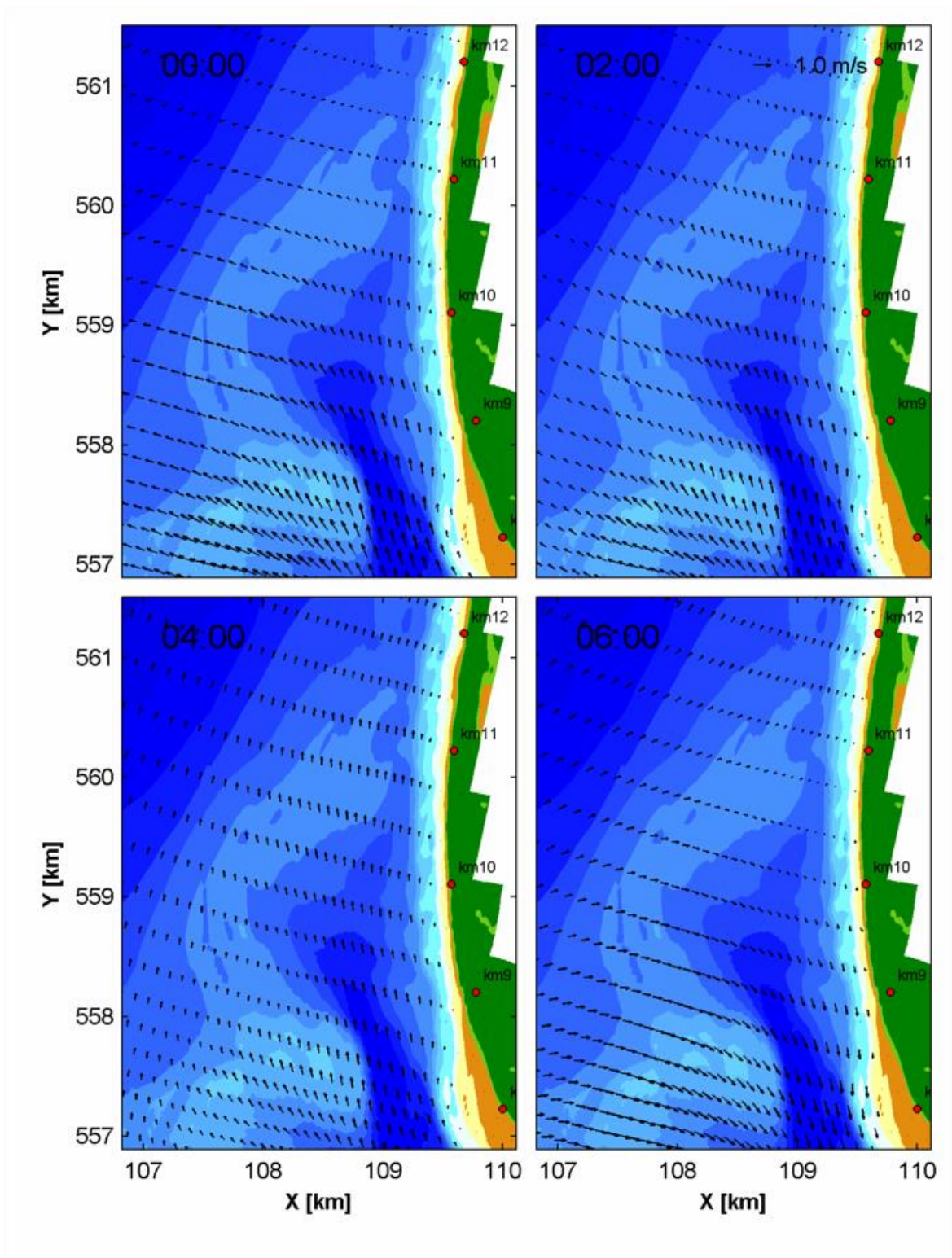
De modelresultaten worden hiervoor weergegeven door animaties van de stromingen door twee getijcycli (bijgevoegd aan dit rapport). Figuren 3.6 en 3.7 vatten de animatie voor de referentie simulatie samen door middel van representatieve stroombeelden genomen tijdens een gemiddeld getij (zie Figuur 3.9 voor tijdreeksen van de waterstand en het debiet gedurende dit getij).

Een belangrijke conclusie die hier al gemaakt kan worden is dat Paal 10 niet direct in de hoofdcirculatie van het zeegat ligt. Rond Paal 10 zijn de stroomsnelheden relatief klein ten opzichte van de stroomsnelheden in het Molengat nabij het Marsdiep. Het stroombeeld is gedurende het getij vrij constant over de dwarsdoorsnede waarbij de stromingen in het diepere gedeelte van het Molengat hoger zijn dan vlak langs de kust en op zee. Complexe stroombeelden of grote versnellingen zijn eigenlijk niet aanwezig over de geanalyseerde getijperiode. Een duidelijke samenhang tussen de complexe vooroever (NUN) en de achterliggende kust is hier moeilijk te onderscheiden. Het is niet zo dat bijvoorbeeld de snelheden tussen NUN en de kust een duidelijk geulpatroon, met hogere stroomsnelheden in het diepere gedeelte, laten zien.

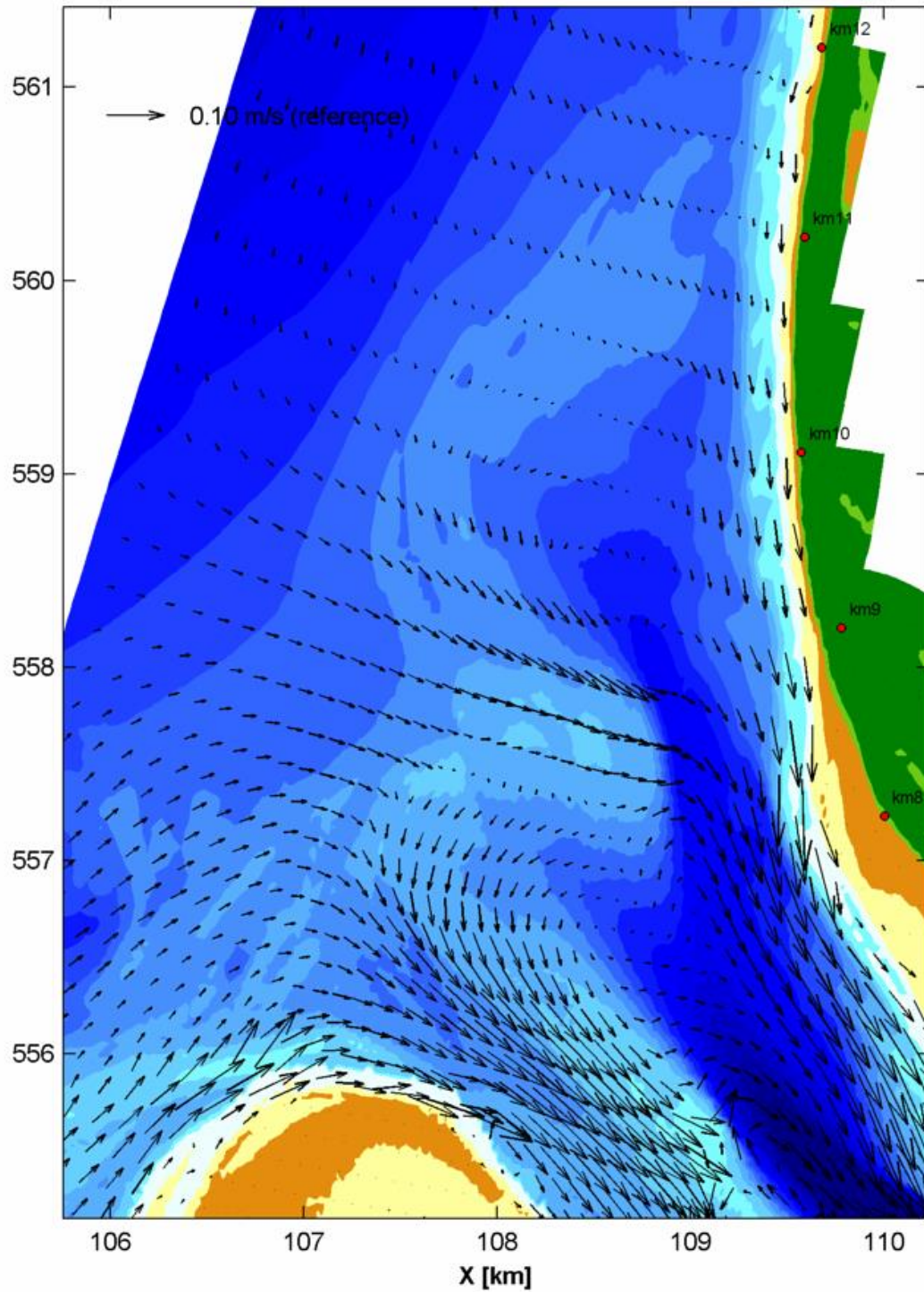
Het residuele stromingsbeeld, de optelsom van de stroming over de 2-weken van modelsimulatie, laat al een wat complexer beeld zien (zie Figuur 3.8). De residuele stroming is over het algemeen vloedgedomineerd. Deze vloeddominantie is het sterkst langs de Noorderhaaks en langs de zuidwest kust van Texel. De residuele stromingen lijken ten zuiden van km 12, richting het zeegat, duidelijk in grote toe te nemen. Dit geeft al een mogelijke oorzaak van de erosie langs deze kust. Dit wordt aan de hand van de sedimenttransporten verder uitgewerkt in Hoofdstuk 3.5. Dit hoofdstuk richt zich alleen op de mogelijke beïnvloeding van de stroming door de verschillende suppletievarianten.



Figuur 3.6: Representatieve stroomvectoren over een getijcyclus voor de referentiesimulatie: 14-1 16:00 – 22:00 (zie figuur 3.8 (rechtsboven) voor de ligging van deze getijden binnen de getijcyclus. Vectoren zijn met een factor 5 uitgedund.



Figuur 3.7: Representatieve stroomvectoren over een getijdencyclus voor de 2014 referentiesimulatie: 15-1 00:00 – 06:00. Vectoren zijn met een factor 5 uitgedund.



Figuur 3.8: Residuele stroming voor het referentiescenario (gemiddeld over een tijdsperiode van 2 weken). Vectoren zijn met een factor 5 uitgedund.

De effecten van de suppleties op de stroming worden weergegeven in Figuur 3.9 t/m 3.15. Een belangrijke conclusie die kan worden getrokken is dat de suppletie varianten vooral een lokale (kleine) verandering in de stromingen geven. Er doen zich geen grootschalige veranderingen op de schaal van het zeegat voor. Kijken we bijvoorbeeld naar de debieten door het Molengat (Figuur 3.9), dan zien we dat bij iedere suppletievariant, de invloed beperkt is. De grootste verandering is te zien bij het opvullen van het Molengat. Waarbij de aanleg van de strandsuppletie de effecten nog wat versterkt. Met name de kleine veranderingen in CS1 zijn belangrijk. Deze laten namelijk zien dat het debiet nabij het zeegat eigenlijk onveranderd is voor elke suppletievariant.

Een goed beeld van de effecten van deze ingreep kan worden verkregen door bestudering van de bijgeleverde animaties (animation_SOS4 en animation_S0S4_detail). In deze animaties zijn de dieptegemiddelde stroming voor de referentie simulatie (zwarte pijlen) en voor de S4 suppletievariant (rode pijlen) gegeven. De onderliggende bodem is die van suppletievariant S4. Kijken we naar het grotere beeld dan zien we dat de stroombeelden niet wezenlijk veranderen door aanleg van de suppletie; de zwarte en rode vectoren liggen vrijwel op elkaar. Dit bevestigt de belangrijke conclusie dat de suppletie geen grootschalige effecten in de waterbeweging van het zeegat te weeg brengt. Lokaal geeft de suppletie wel wat veranderingen. Ter plaatste van de suppletie reduceren de snelheden natuurlijk tot nul. Zeewaarts hiervan nemen de snelheden juist iets toe. Enerzijds door contractie van de stroming rond de strandsuppletie en wat verder zeewaarts nemen de snelheden iets toe door de afgenomen waterdiepte in het opgevulde Molengat. Een vrijwel gelijk debiet moet door een iets kleiner doorstroomoppervlakte en dit geeft dan wat hogere stromingen. De toename van deze stroming is echter zeer beperkt en de richtingsvector van de stroompijlen blijft vrijwel gelijk. De grootste veranderingen in de richtingsvector doen zich eigenlijk net iets ten zuiden van de suppletie voor, op de overgang van Molengat naar de suppletie toe. Dit laatste is waarschijnlijk het gevolg van een klein verschil in bodemligging tussen de S0 en S4 variant. In het model is er een geleidelijke overgang gecreëerd tussen de oorspronkelijke geul en de suppletie, waardoor ook de bodem tussen de S0 en S4 variant hier afwijkt.

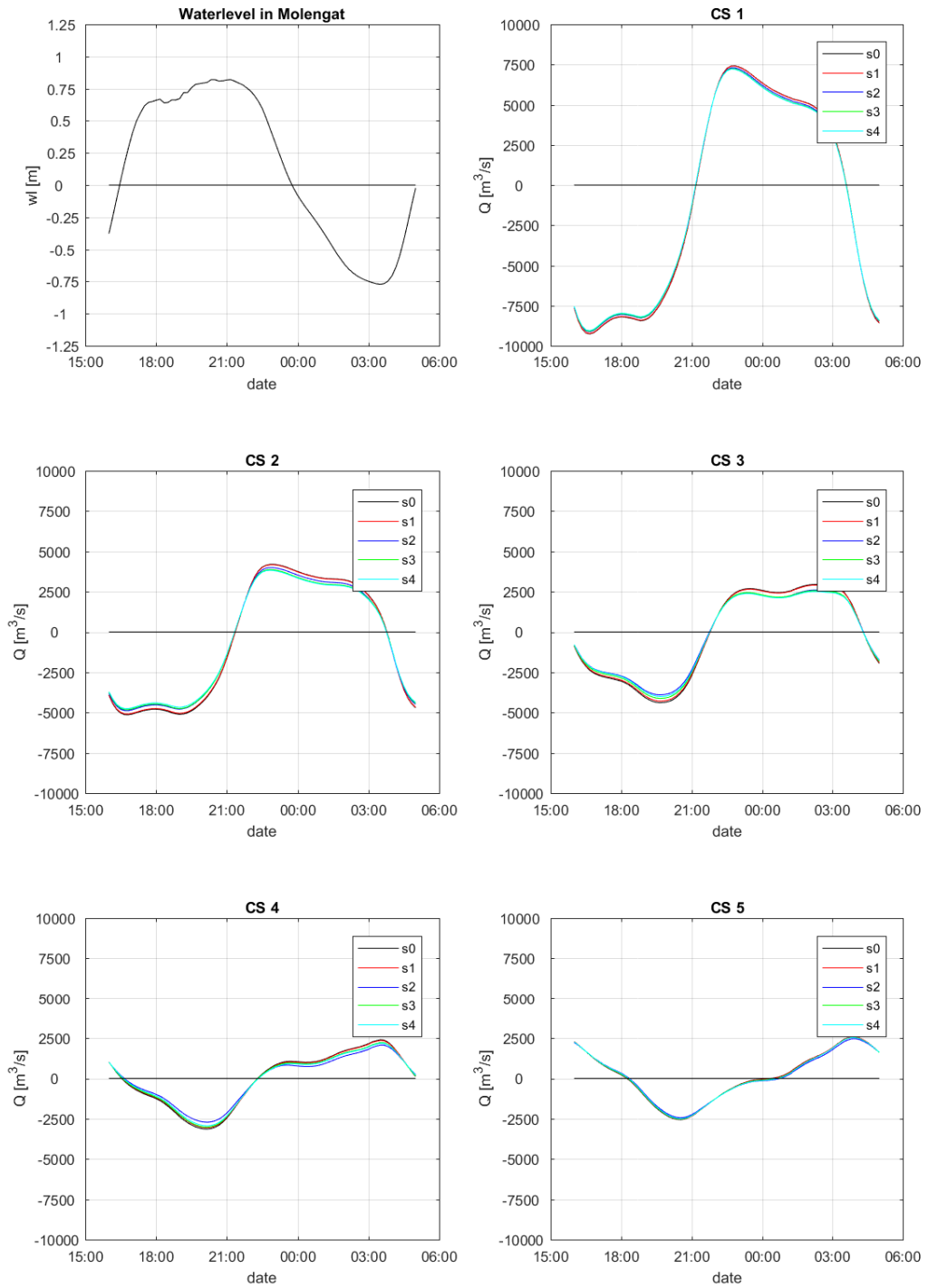
De resultaten van de animatie worden goed samengevat in Figuur 3.10 en Figuur 3.11. In deze figuren wordt de invloed van de suppleties tijdens maximale eb- en vloedstroming weergegeven. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat tijdens maximale eb en vloed de verschillen ook het grootst zijn en dus in dit opzicht niet geheel representatief zijn over de getijperiode heen. In deze figuren is duidelijk te zien dat de beïnvloeding van de stroming het grootst is bij de S4 variant. Toepassing van alleen een strandsuppletie (variant S1 en S2) geeft een kleine beïnvloeding van de stroming. Een tweede effect dat duidelijk naar voren komt is dat de beïnvloeding tijdens vloed groter is dan tijdens eb. In de S2 variant is deze beïnvloeding van de ebstroming iets groter dan in de S1 variant. In de S1 variant is het stromingsverschil in vergelijking tot de referentie simulatie < 0.02 m/s wat eigenlijk verwaarloosbaar is ten opzichte van de totale stroming. De S2 variant strekt zich iets verder zeewaarts uit, waardoor de invloed ook toeneemt. De beïnvloeding van de stroming ligt hier ter plaatse van de suppletie op 0.04 m/s. Dit is in de orde 5-10% van de lokale stroming (zie Figuur 3.12).

De effecten op de stroming tijdens vloed zijn groter dan tijdens de ebstroming. Op zich is dit wel verklaarbaar. Tijdens de eb wordt de stroming vanuit het Marsdiep het Molengat in geperst. In de beperkte opening tussen de Noorderhaaks en Texel (de Hors) versnellen de stromingen. Deze stroming wordt het Molengat ingestuwd en 'waaiert' dan uit over de NUN. De suppletie ligt relatief ver van de versnelling en beïnvloedt daardoor slechts een klein gedeelte van de uitwaaiering. Tijdens vloed is dit echter omgekeerd. De suppletie beïnvloedt nu de getijstroming voordat deze het zeegat bereikt. Dit heeft dus meer invloed op de aandrijvende krachten achter de stromingen die het zeegat in beweegt. Wat duidelijk te zien is, is dat er een directe beïnvloeding is ter plaatse van de suppletie. Maar er is ook een

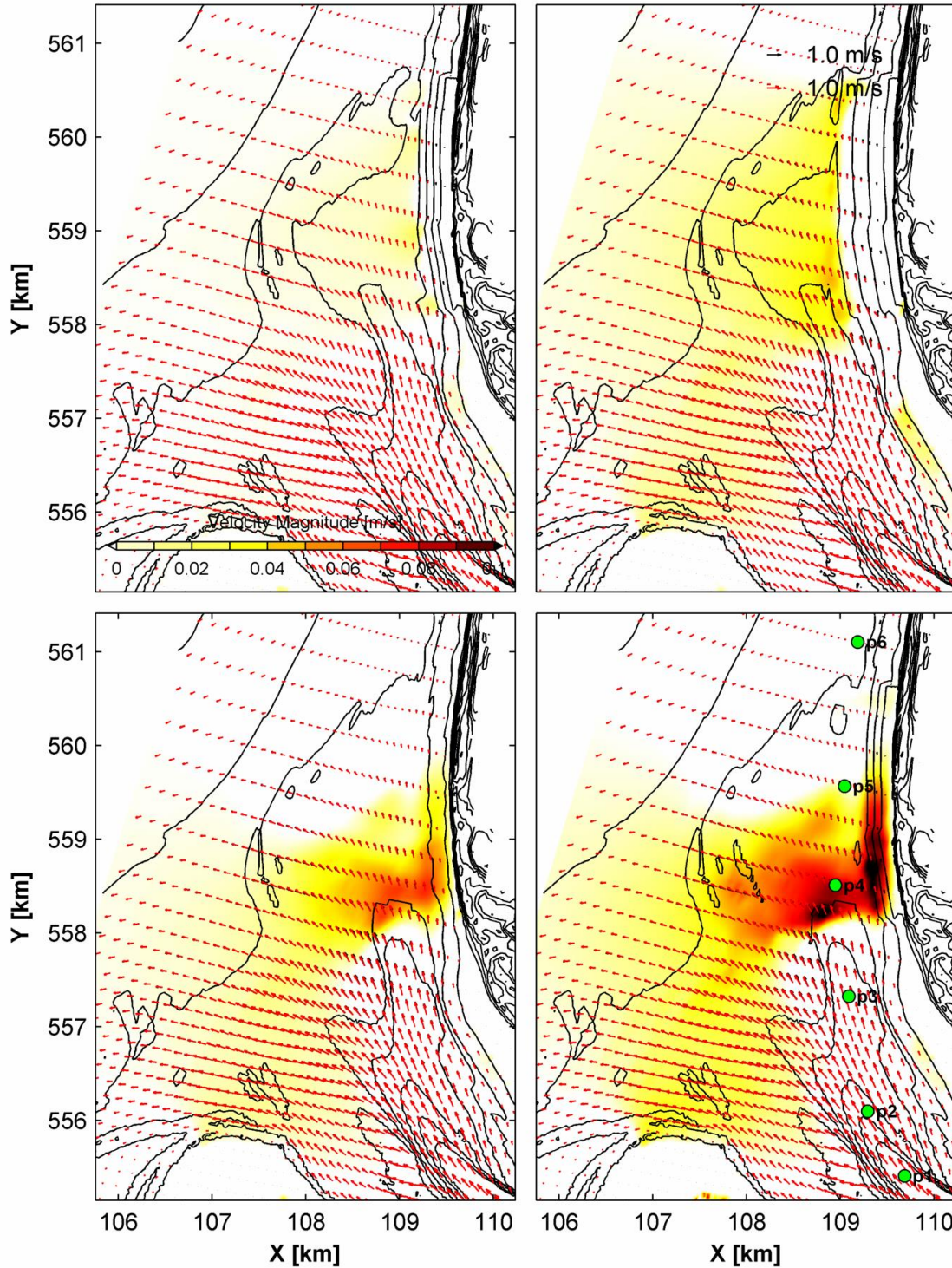
tweede gebied ter plaatse van de Hors waar stromingen afwijken ten opzichte van de referentiesimulatie. Op basis van de debieten (Figuur 3.9; dwarsdoorsnede CS1), die vrijwel onveranderd zijn richting het Marsdiep kan toch worden geconcludeerd dat de grootschalige stroming niet wordt beïnvloed door de suppletie. Deze verschillen zijn waarschijnlijk het effect van de gevoeligheid van de stroming in dit gebied, wat vlak bij de koppelrand van het domein-decompositie model ligt.

Voor sedimenttransport zijn het niet alleen de instantané stromingen die van belang zijn, maar ook de residuele stroming speelt een grote rol. De residuele stromingen geven een beeld van de netto waterverplaatsing over een langere tijd (in dit geval over 2 weken). Residuele stroming en residueel sedimenttransport zijn niet exact gelijk, maar een eerste indicatie kan wel worden verkregen door het stromingsbeeld te analyseren (Figuren 3.13-3.15).

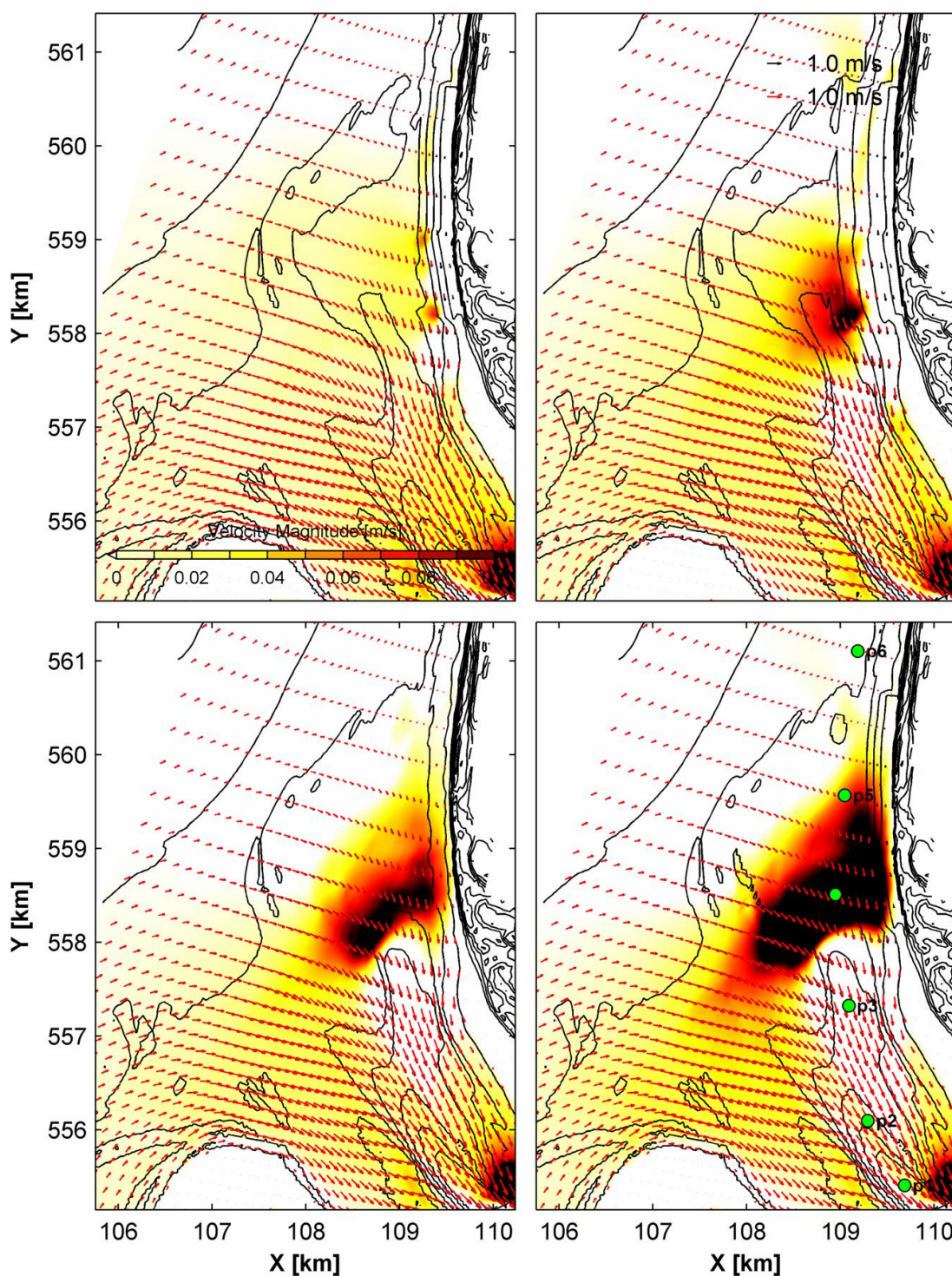
De residuele stroming in de referentiesimulatie vertoont een vloedgedomineerd beeld over de NUN en Molengat. Dit beeld komt goed overeen met de literatuur (zie bijvoorbeeld Elias 2006, pagina 185 Figuur 6-11). Zoals op basis van Figuur 3.8 al was geconcludeerd, zien we een sterke vloeddominante stroming langs de Noorderhaaks en langs de kust van Texel. Langs de kust van Texel is met name de vergroting van de residuele vectoren tussen km 12 en km 9 van belang. Deze geven al een indicatie dat hier zandverliezen van de kust te verwachten zijn. Figuur 3.14 en 3.15 laten zien dat eigenlijk voor alle suppletievarianten vergelijkbare residuele stromingsvelden optreden. Vergelijken we dit residueel patroon met die van suppletievariant 4 in wat meer detail (Figuur 3.16), dan zien we een vrijwel identiek vectorbeeld met uitzondering van het suppletiegebied. Met name de strandsuppletie is aangelegd in het gebied waar de grote vectoren voorkomen. Deze zijn nu niet meer aanwezig. Zeewaarts van de strandsuppletie zijn deze ook niet terug ontstaan. Het residuele stroombeeld suggereert hier dat de vergroting van de residueel in het gebied tussen km 9 en 12 niet optreedt. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat dit ook een tijdelijk effect kan zijn. De helling van de suppletie is steiler dan van het natuurlijk profiel. Dit steile profiel zal zich wel terug aanpassen aan een natuurlijke helling waardoor deze doorgaande transportvectoren misschien terugkeren.



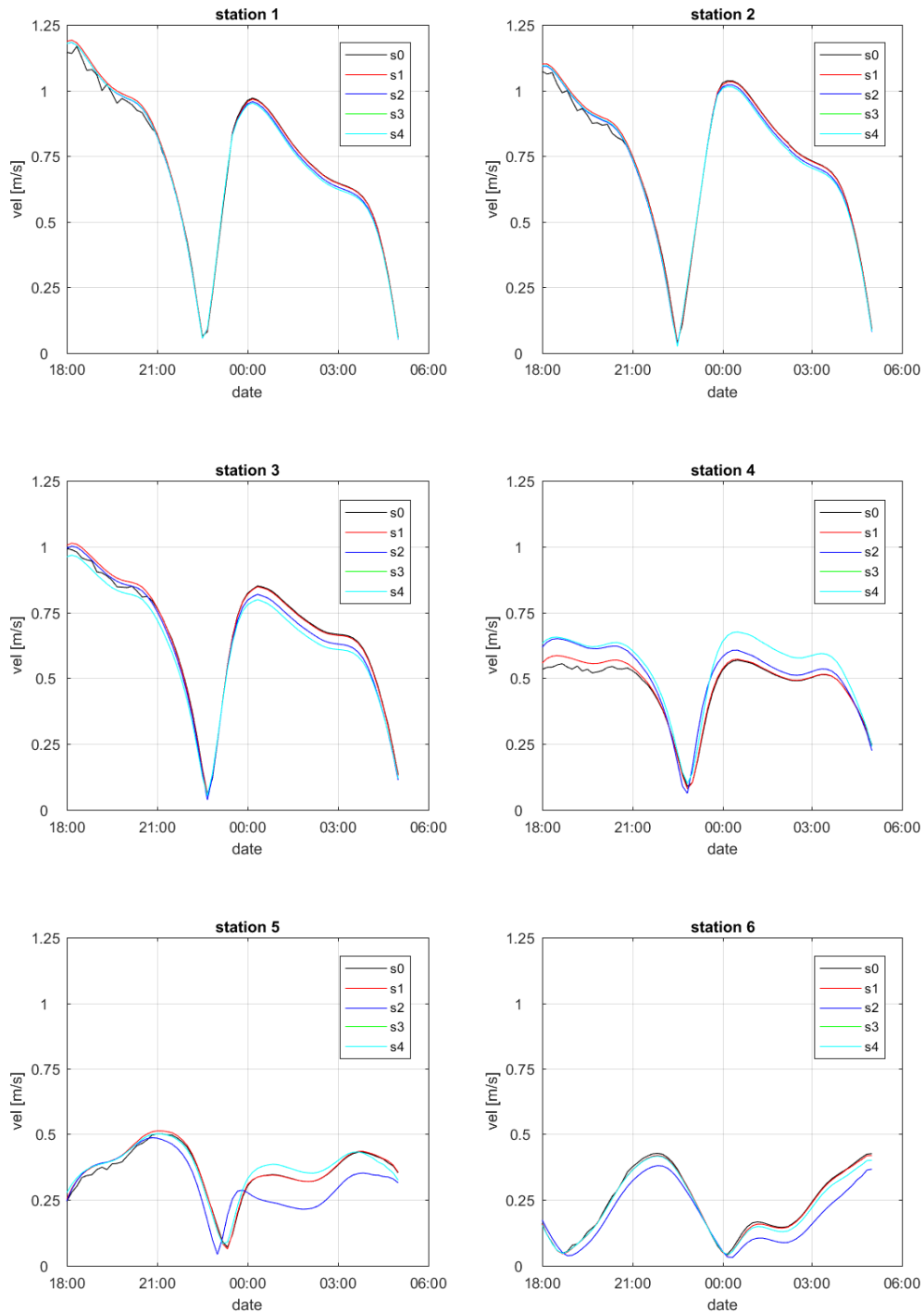
Figuur 3.9: Overzicht van de invloed van de suppletievarianten op debieten door het Molengat (dwarsprofiel 1 tot 5). Zie Figuur 3.2 voor ligging dwarsprofielen.



Figuur 3.10: Overzicht van het verschil in maximale ebstrooming voor de 4 suppletiealternatieven ten opzichte van de referentiebodembodem. Vectors geven de modelresultaten voor de referentiesimulatie (zwart) en suppletiescenario (rood). De achtergrond kleur geeft de magnitude van de verschilvector (in m/s).

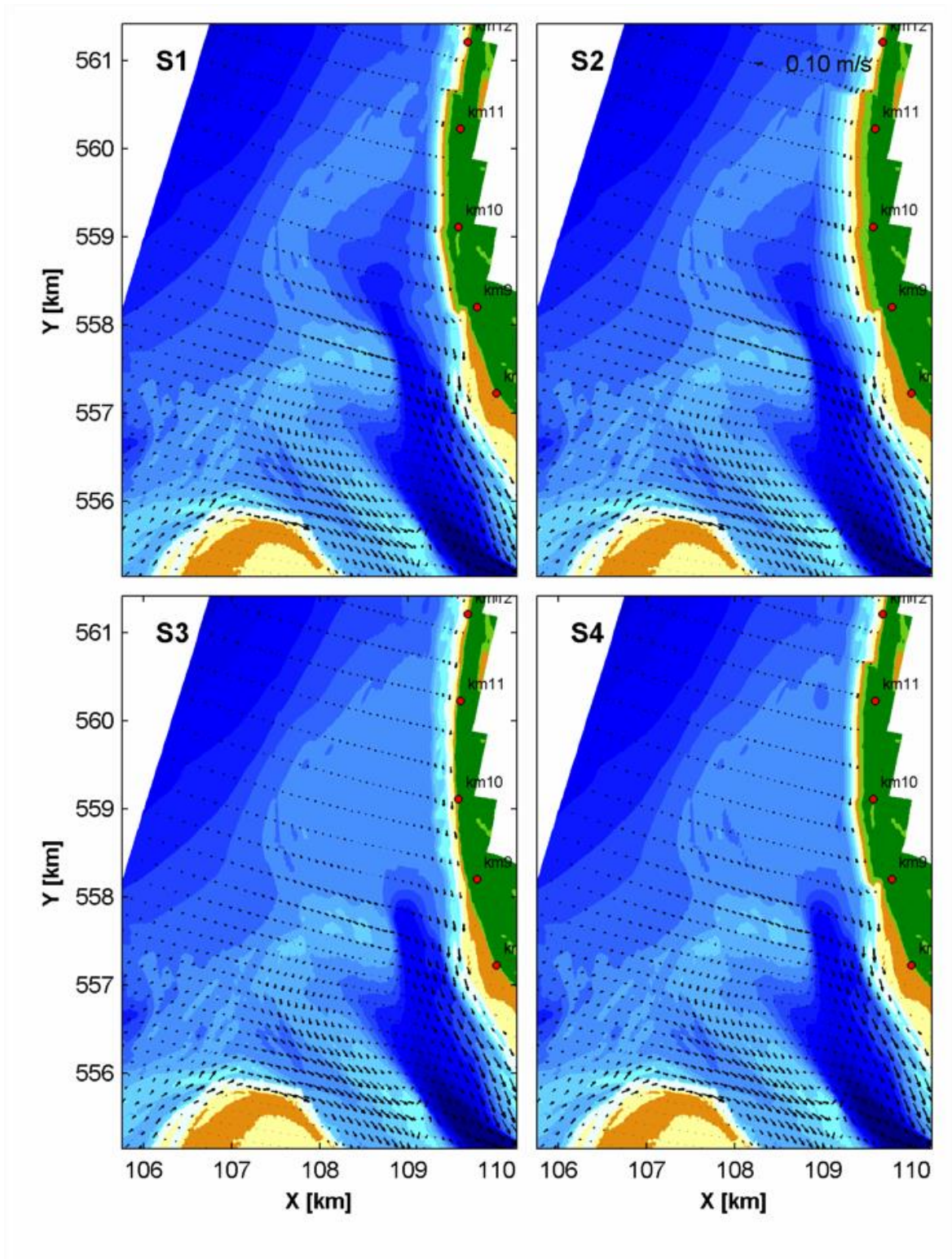


Figuur 3.11: Overzicht van het verschil in maximale vloedstroming voor de 4 suppletiealternatieven ten opzichte van de referentiebedem. Vectors geven de modelresultaten voor de referentiesimulatie (zwart) en suppletiescenario (rood). De achtergrond kleur geeft de magnitude van de verschilvector (in m/s). Vectors zijn met een factor 5 uitgedund.

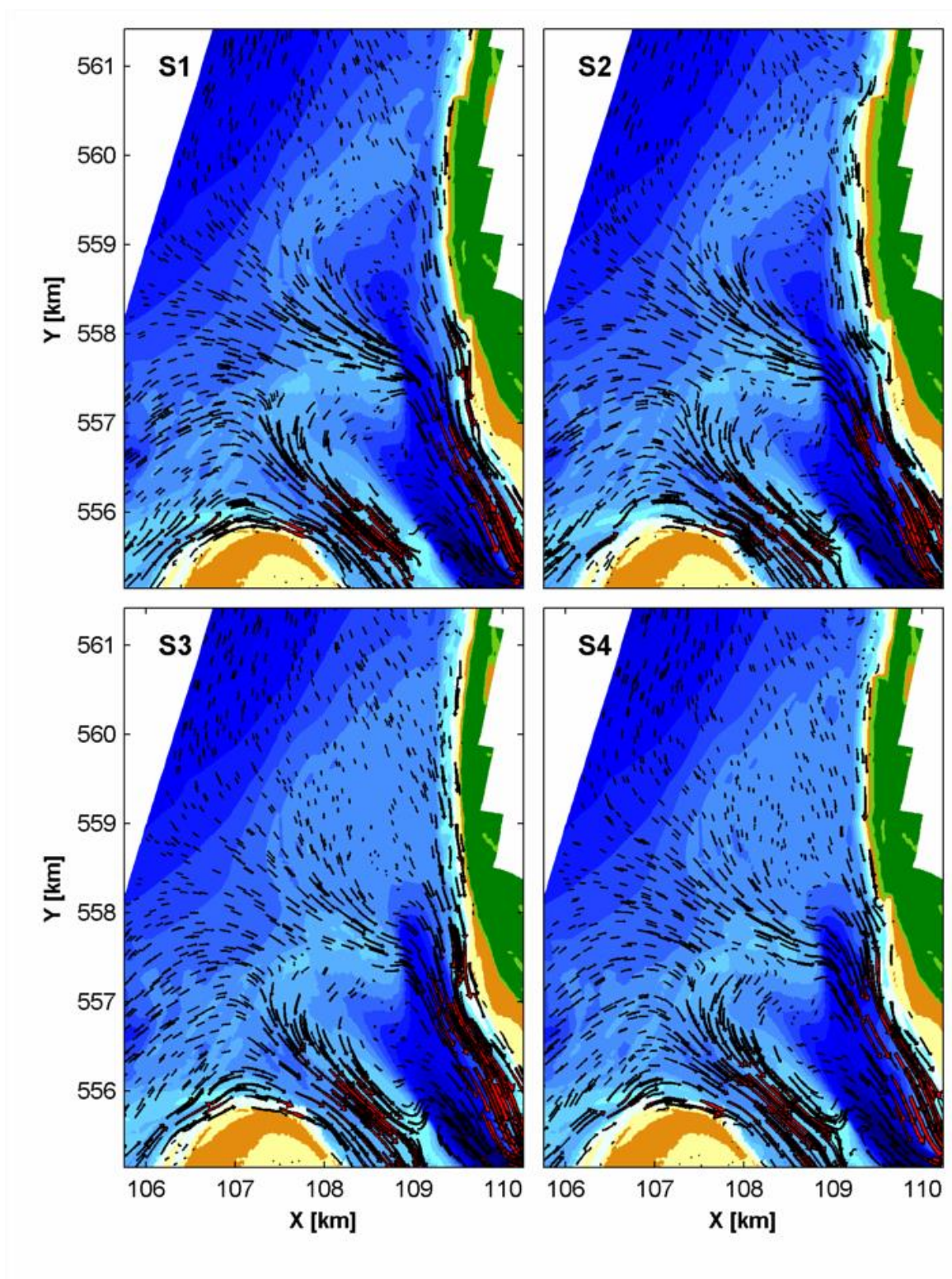


Deltares (07:08:57 on Tue 6th Sep 2016)

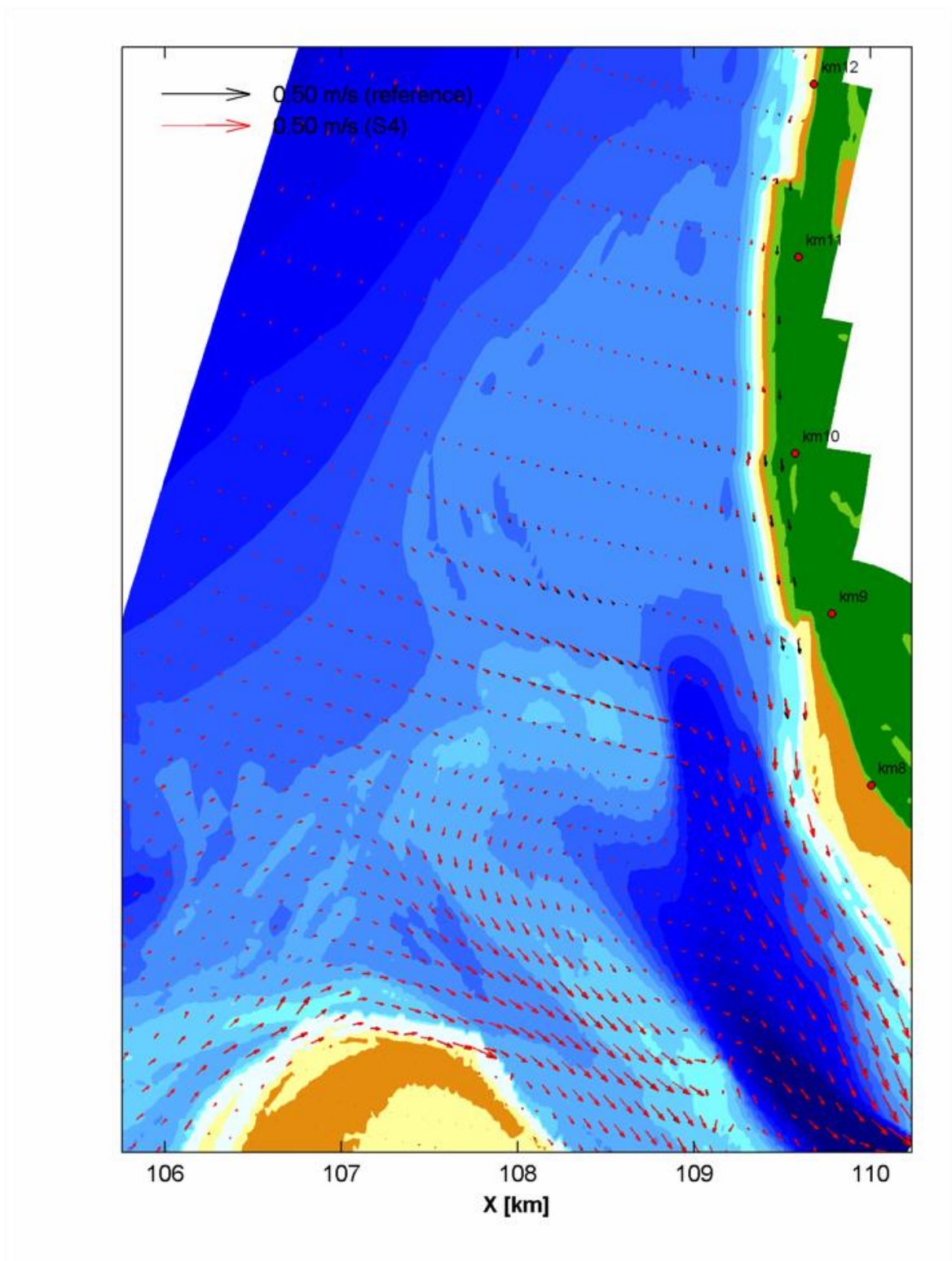
Figuur 3.12: Overzicht van het verschil in stroomsnelheden voor de suppletievarianten voor een gemiddeld getij. De locatie van de observatiepunten is weergegeven in Figuur 3.10 en 3.11 (groene punten).



Figuur 3.13: Overzicht van de residuele stroomsnelheden voor de 4 alternatieven. Vectoren zijn met een factor 5 uitgedund.



Figuur 3.14: Overzicht van de residuele stromingspatronen voor de 4 alternatieven door middel van 'curved vectors' (gelijk aan Figuur 3.13, maar andere manier van weergeven zodat patronen beter herkenbaar zijn).



Figuur 3.15: Overzicht van de residuele stroomsnelheden voor de referentiesimulatie (zwart) en suppletievariant S4 (rode vectoren). Vectoren zijn met een factor 5 uitgedund.

3.4 Model resultaten; Begrijpen van maatgevende processen.

3.4.1 Getijsimulaties

Voor het begrijpen van de processen richten we ons in eerste instantie op het getij. In deze simulaties zijn de getijgedreven sedimenttransporten berekend over de aanwezige bodems tussen 1991 en 2015¹. Figuur 3.16 geeft een beeld van de transporten voor het gehele noordelijke deel van de buitendelta. Figuur 3.17 geeft een wat beter beeld van het suppletiegebied.

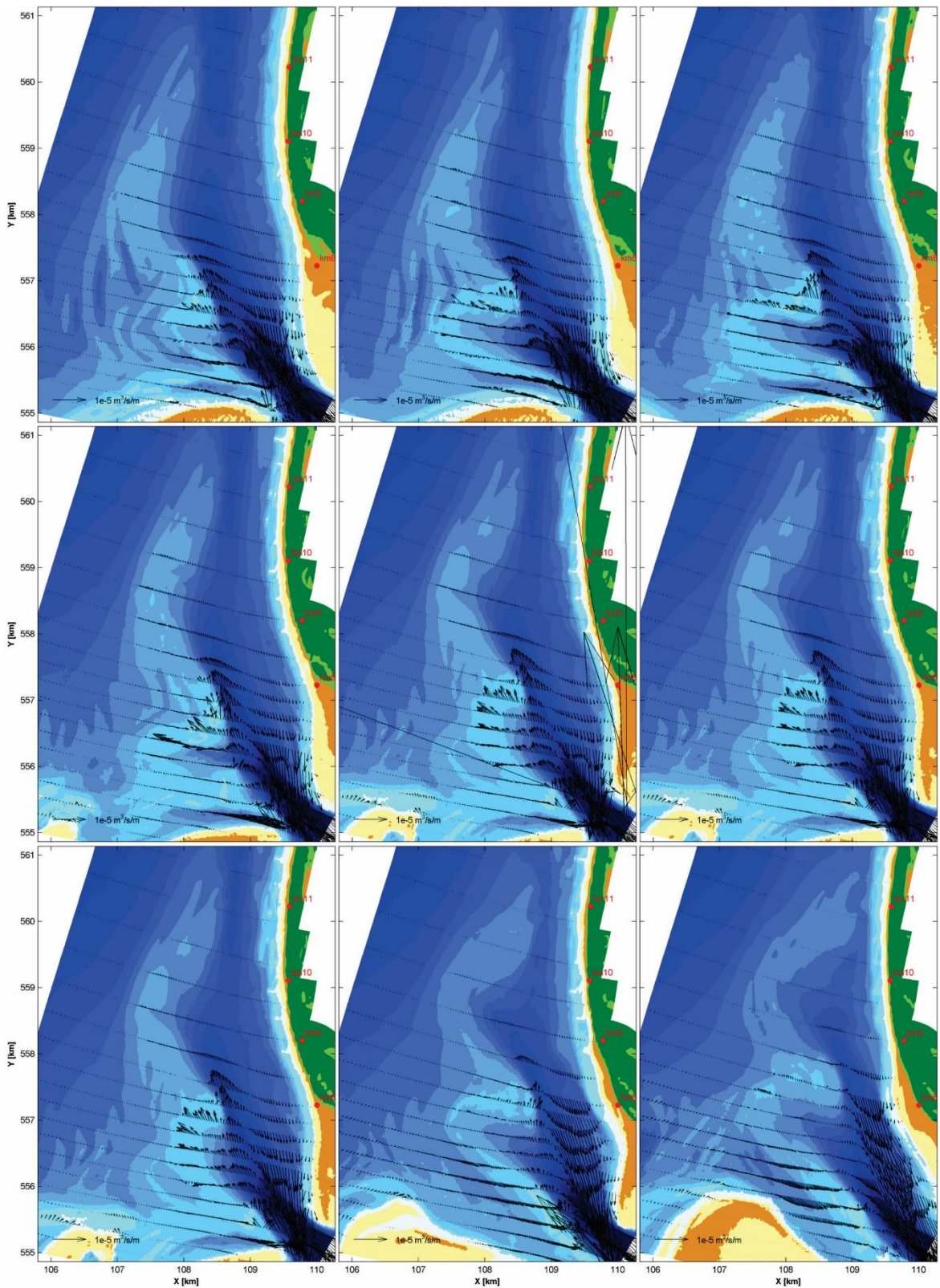
Duidelijk zichtbaar in de resultaten is het verschil in transportgrootte over het gebied. De transporten zijn maximaal nabij het zeegat en dan met name in het diepe deel van het Molengat. Deze transporten zijn een orde groter dan elders op de buitendelta. Dit is een belangrijke conclusie, want ook het kustvak rond Paal 10 bevindt zich duidelijk buiten het dominante transportgebied. Deze transportverdeling is wel verklaarbaar. Sediment transport schaal niet lineair met de stroomsnelheid maar met een factor 3 tot 5. De getij-gedreven stroming in het diepe deel van het Molengat is het grootst. Dit werkt dan ook gelijk door in de sedimenttransporten.

Kijken we naar het grootschalige transportbeeld dan zien we dat over de gehele periode (bij alle bodems) het beeld van grote transporten richting het zeegat en kleinere transporten verder weg gelijk blijft. Daarnaast zijn de transporten vloeddominant langs de kust en eb-dominant over de NUN (met uitzondering van het vloedgeultje direct grenzend aan de Noorderhaaks). Deze transport richtingen corresponderen met de geobserveerde structuren in de bodem. Dit geeft vertrouwen in de modelresultaten. De vloeddominantie langs de kust en Noorderhaaks correspondeert met de geobserveerde residuele stroomrichting. De geul zelf en de NUN vertoonden geen duidelijke dominantie in de stroming, maar vertonen wel een eb-dominantie in de transporten.

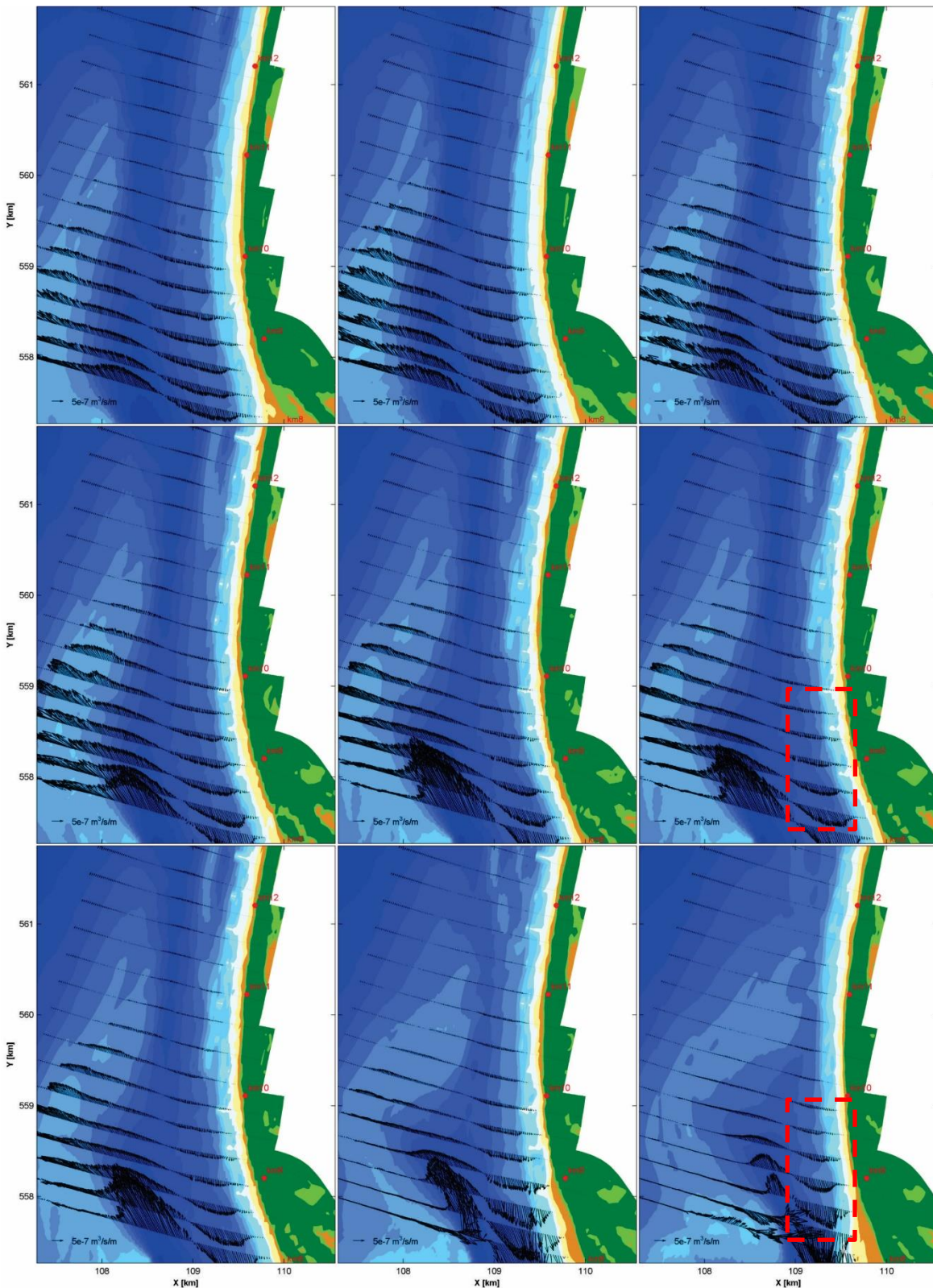
Een belangrijke conclusie is, dat we in 2009 en 2012 een duidelijke verandering in de transportvectoren zien. Bij deze twee bodems zijn de transporten op de NUN duidelijk afgenomen ten opzichte van de voorgaande jaren, terwijl de grootte van de transportvectoren in het Molengat juist toeneemt. Deze grotere transporten strekken zich ook verder noordwaarts uit. Vergelijk bijvoorbeeld de transportvectoren rond km 8 (rode vierkant in Fig. 3.17). Tot 2006 waren de transporten zeer klein, maar sindsdien zien we duidelijke transportvectoren.

Kijken we in detail naar het kustvak rond km 10 dan zien we dit beeld nog wat duidelijker terug. In de recente bodems (2009 en 2012) zijn de transporten langs de kust hoger dan in de eerdere metingen. Waarbij er vooral tussen km 9 en km 10 een grote gradiënt optreedt. Deze gradiënt is een indicatie dat er juist hier erosie zal optreden. Ten noorden van km 11 lijken de transporten echter juist iets af te nemen. Dit kan een indicatie zijn dat het dominante erosiegebied zich door de grote vervorming van de NUN wat naar het zuiden heeft verlegd.

¹ De 2015 bodem was voor deze modelering nog niet beschikbaar, gezien de geringe verschillen tussen de 2012 en 2015 bodem is het echter niet de verwachting dat de transporten in 2015 significant verschillen van de 2012 resultaten.



Figuur 3.16: Overzicht van de getijdgedreven residuale sedimenttransporten voor de bodems tussen 1991 en 2012. De vectoren zijn met een factor 3 kustdwars en een factor 4 kustlangs uitgedund.



Figuur 3.17: Overzicht van de getijgedreven residuele sedimenttransporten voor de bodems tussen 1991 en 2012. De vectoren zijn met een factor 4 kustlangs uitgedund.

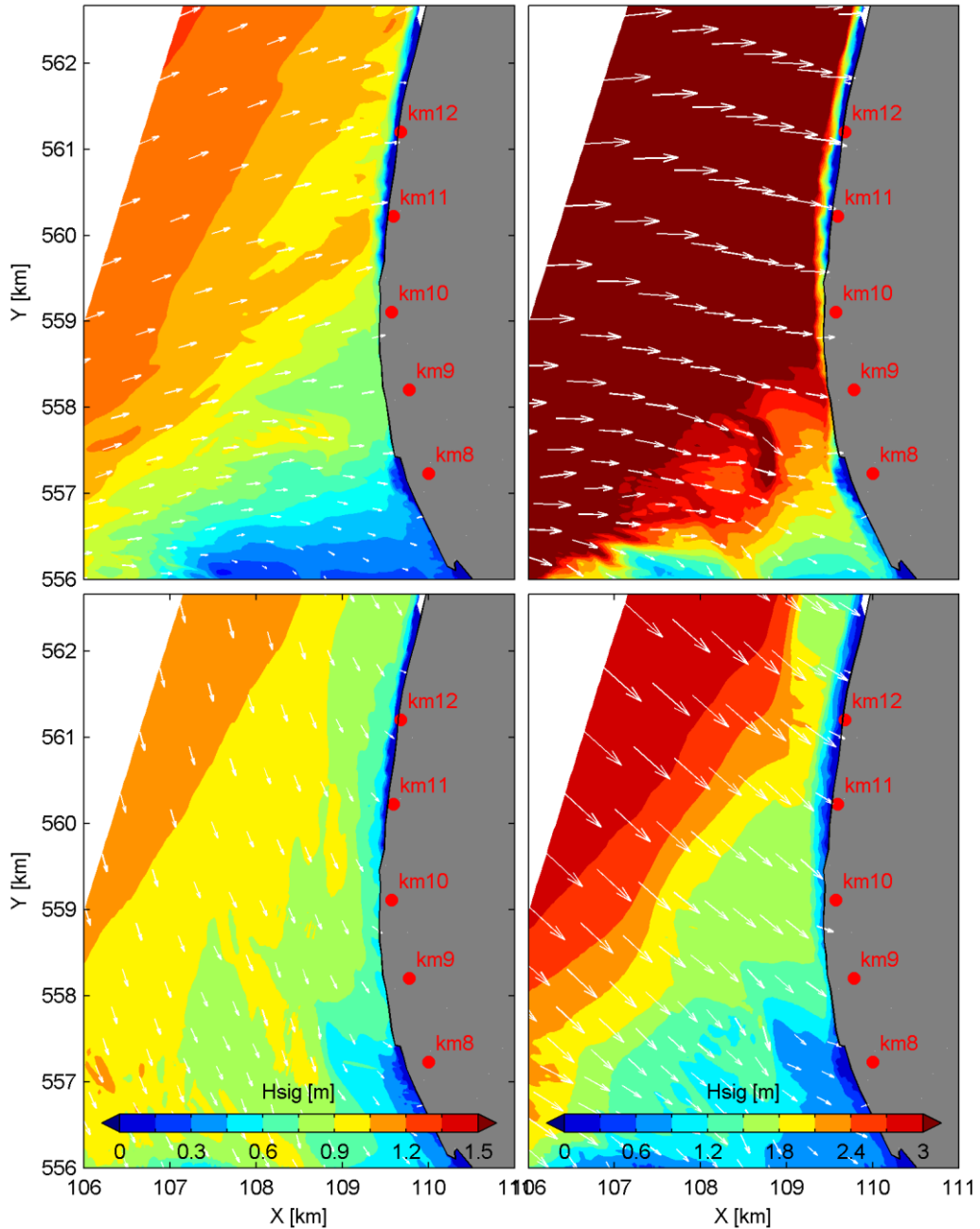
3.4.2 Getij en Golven

In figuren 3.18 t/m 3.21 wordt de invloed van de veranderingen in bodemligging op de golfhoogte gegeven. In deze simulaties is de morfologische golfhoogte gebruikt zoals bepaald in de studie van Stein (2004) en weergegeven in Tabel 3.1. Door deze 4 golfcondities gewogen bij elkaar op te tellen wordt een representatieve voorspelling van het jaarlijks gemiddelde transport verkregen. In de huidige modelstudie berekenen we niet de transporten, maar berekenen we de verschillen in gemiddelde golfhoogte over een aantal bodems tussen 1986 en 2015. De verschillen in golfhoogte geven een indicatie van de mogelijke effecten van de veranderingen in de bodemligging op de transporten langs de kust.

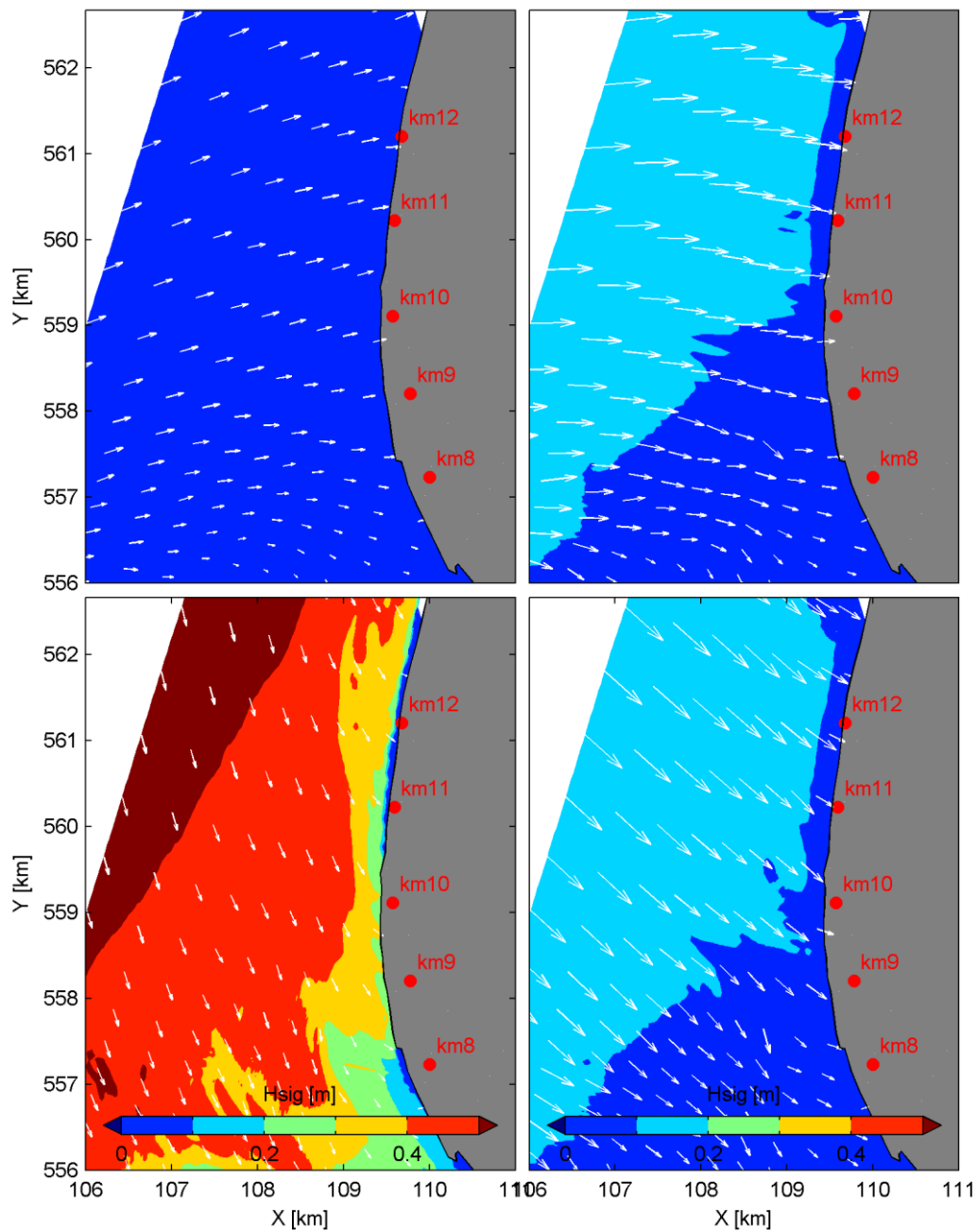
Tabel 3.1 Golf schematisatie gebaseerd op Stein (2004)

	H_{sig} [m]	H_{dir} [deg]	T_{m02} [s]	Kans voorkomen [%]
Zuid laag	1.48	235	4.63	26.44
Zuid hoog	3.30	255	6.09	6.12
Noord Laag	1.35	355	4.83	47.90
Noord hoog	3.30	315	5.99	6.13

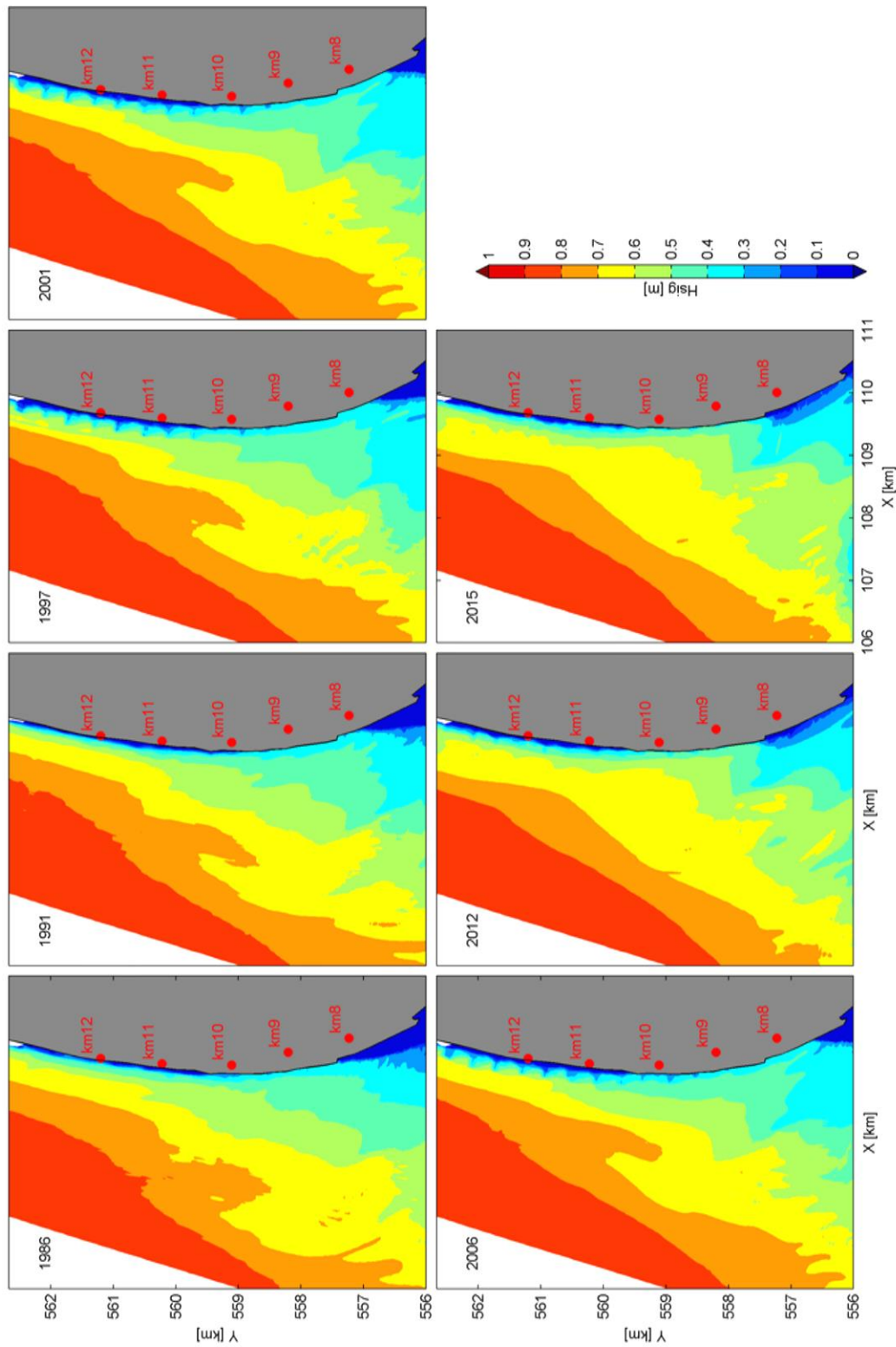
Figuur 3.18 geeft de berekende golfhoogte voor de 2015 bodem, voor ieder van de 4 golfhoogten. In deze figuur is duidelijk het verschil in golfhoogte te zien tussen hoge en lage golven, en de grote gradiënt in golfhoogte over de buitendelta heen. Ook langs de kust is er een duidelijke gradiënt zichtbaar met een in noordelijke richting toenemende golfhoogte. Als we de golfhoogte schalen met de kans van voorkomen, krijgen we een indicatie van het belang van de individuele golfklassen op het jaarlijkse gemiddelde. Uit Figuur 3.19 kan afgeleid worden dat met name de golfconditie Noord laag een dominante rol speelt voor dit gedeelte van de kust. De golfcondities Zuid hoog en Noord hoog geven een ongeveer vergelijkbare bijdrage. Door de 4 gewogen golfcondities bij elkaar op te tellen krijgen we een beeld van de jaarlijks gemiddelde golfhoogte (zie Figuur 3.20, 2015 bodem). De golfhoogte neemt af op de buitendelta. Er treedt zowel kustlangs als kustdwars een grote gradiënt in golfhoogte op. Over het algemeen vertonen de bodems tussen 1986 en 2001 identieke kenmerken in de afname van de golfhoogte. De bodems van 2012 en 2015 wijken hier in detail van af. Deze verschillen worden duidelijker weergegeven in Figuur 3.21 door de berekende golfhoogteverandering ten opzichte van de 2015 bodem. De kustlangse verandering in golfhoogte tussen de 2012 en 2015 bodem is beperkt. De grootste veranderingen vinden hier plaats aan de zeezijde van de Noorderhaaks. Dit beeld is duidelijk anders voor de 2006 bodem. Hier zien we dat in 2006 de golfhoogte aan de kust tussen km 9 en km 11 lager was dan in 2015. In de 2006 bodem was er meer golfafscherming door de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks. Een overeenkomstig beeld zien we voor alle bodems tussen 1986 en 2006.



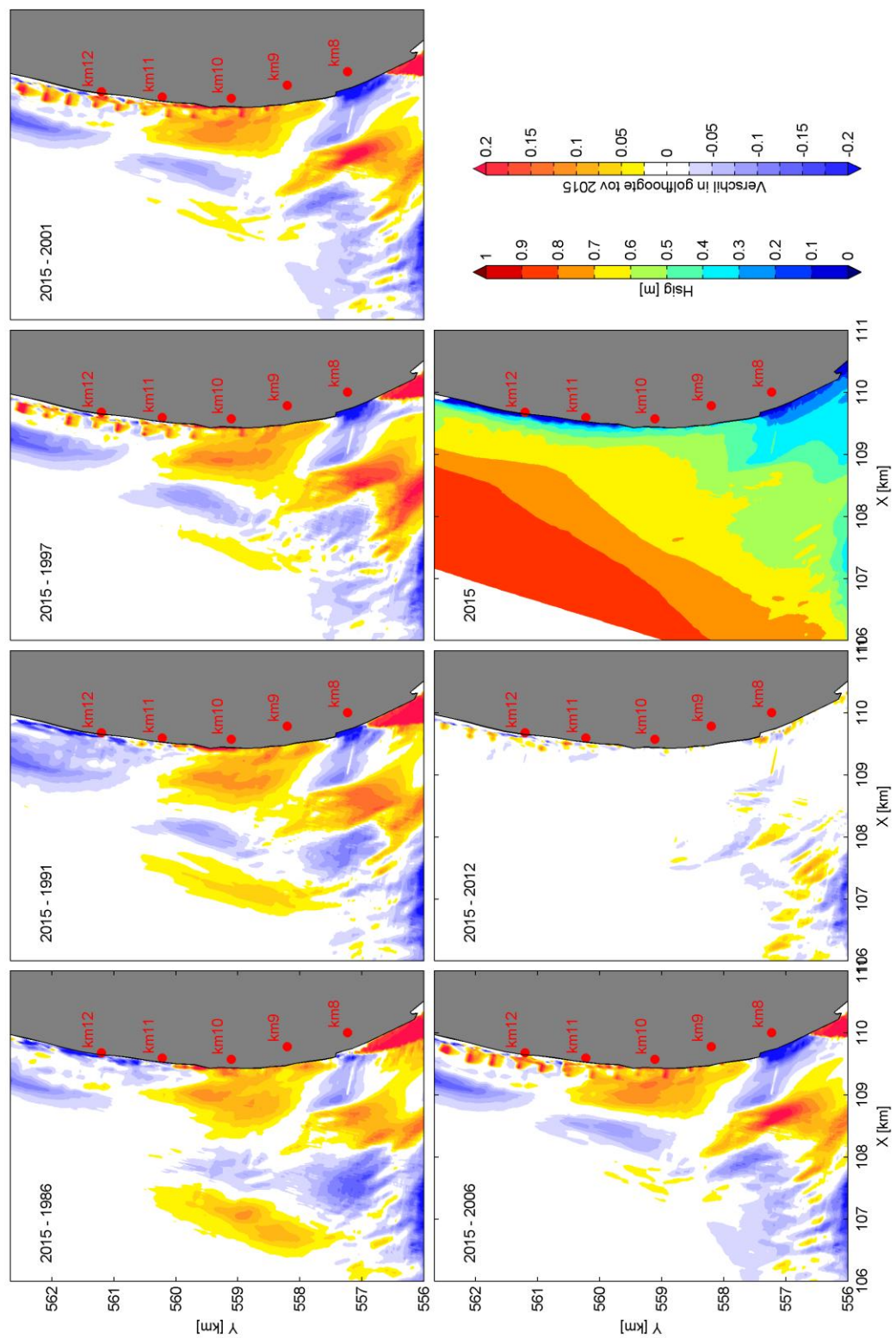
Figuur 3.18: Overzicht van de berekende golfhoogte en richting voor de 2015 bodem en de 4 golfklassen (1) Zuid laag en (2) Zuid hoog (boven) en (3) Noord laag en (4) Noord hoog (bodem).



Figuur 3.19: Overzicht van de berekende golfhoogte en richting voor de 2015 bodem en de 4 golfklassen (1) Zuid laag en (2) Zuid hoog (boven) en (3) Noord laag en (4) Noord hoog (bodem) geschaald met de kans van voorkomen.



Figuur 3.20: Overzicht van de berekende gemiddelde golfhoogte voor bodems tussen 1986 en 2015.



nh

Figuur 3.21: Overzicht van de berekende gemiddelde golfhoogte voor bodems tussen 1986 en 2015 ten opzichte van de 2015 bodem.

4 Discussie en conclusies

4.1 Discussie

Eerdere studies hebben al duidelijk laten zien dat het noordelijke deel van de buitendelta zich landwaarts verplaatst, waardoor ook het Molengat opschuift richting de kust. Dit proces heeft zich na afsluiting van de Zuiderzee in gang gezet en heeft sindsdien de kustlijn van zuidwest Texel beïnvloed. De vorming van een langgerekte bank (spit) aan de noordzijde van de Noorderhaaks (de Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks) en het opdringen van de geul hebben lange tijd de erosie van het achterliggende kustvak gedomineerd. Dit proces was zeer geleidelijk en continue (en daarmee dus ook voorspelbaar). De processen verantwoordelijk voor de kustlijn erosie van zuidwest Texel worden in het conceptuele model van Cleveringa (2001) samengevat (zie Figuur 2.5). Cleveringa geeft aan dat erosie van de achterliggende kust samenhangt met (1) het opschuiven van het Molengat, (2) golfgedreven transporten met een divergentiepunt ongeveer rond strandpaal 13 en (3) getijstromingen (stuwpunt in de vloedstroom ter hoogte van strandpaal 11).

De laatste jaren is er een duidelijke verandering in deze ontwikkeling opgetreden. De noordelijke punt van de NUN heeft zich vrijwel verheeld met de kust van Texel. Ook treden er ter plaatse van de Hors grote veranderingen op. De Hors en de Noorderhaaks zijn duidelijk van vorm veranderd. In plaats van landwaartse verplaatsing wordt de geuldoorsnede van het Molengat juist wat breder en ondieper, een situatie die ook vroeger in de oude bodems zichtbaar was. Een kleinere, ondiepere geul langs de kust is op zich een gunstige ontwikkeling, omdat deze ook minder invloed (gevaar) op de kust uitoefent en structurele erosie waarschijnlijk reduceert. Dit wil niet zeggen dat het op een kleinere schaal ook overal een gunstig effect heeft. Lokaal kunnen de veranderingen in de voorliggende vooroever juist voor meer erosie zorgen als gradiënten in de transporten ontstaan, of sedimenttransportpatronen juist veranderen. De veranderingen in het Molengat beïnvloeden ook de getijstrooming en de veranderingen in de vooroever (de verheling van de noordpunt van de NUN beïnvloedt het lokale golfklimaat). Het is zeer waarschijnlijk dat beide effecten zowel het stuwpunt in de vloedstrooming als het convergentiepunt in de golf gedreven transporten hebben veranderd. De erosie rond strandpaal 10 suggereert dat het zwaartepunt dus iets zuidelijk is verplaatst, waardoor de maximale verliezen nu optreden rond Paal 10. Door de aanlanding van de voorliggende bank ligt er meer zand op de vooroever, maar direct aan de kust resulteert dit (nog) niet in een positieve impuls.

De modelsimulaties laten zien dat de golfhoogte en de gradiënten in golfhoogte juist in de laatste jaren toenemen. Ook het getij lijkt een rol te spelen. De modelresultaten voor de getijgedreven transporten over de verschillende jaren laten zien dat in de recente bodems de getijgedreven transport(gradiënt)en juist in dit strandvlak toenemen. Op basis van deze modelsimulaties kan ook worden geconcludeerd dat:

(1) Het strandvak rond Paal 10 niet direct in de hoofdcirculatie van het zeegat ligt. Rond paal 10 zijn de stroomsnelheden relatief klein ten opzichte van de stroomsnelheden in het Molengat nabij het Marsdiep. In termen van processen zal het gedrag van deze suppletie meer overeenkomsten vertonen met een reguliere suppletie dan bijvoorbeeld met een geulwandsuppletie zoals uitgevoerd aan de zuidkant van het zeegat ter plaatse van het Nieuwe Schulpengat.

(2) Alle suppletievarianten vertonen slechts een beperkte (lokale) invloed op de stromingen. Er doen zich geen grootschalige veranderingen, op de schaal van het zeegat, voor. Zelfs bij gedeeltelijke opvulling van de uitstroom van het Molengat is het niet de verwachting dat de stroming naar het zeegat significant wordt verstoord. Een grootschalige respons op de schaal van het zeegat wordt dan ook niet verwacht.

Een derde, voor de hand liggende, conclusie is dat de grotere ingrepen ook wat grotere effecten vertonen. Gedeeltelijke afsluiting van het Molengat in combinatie met de strandsuppletie geeft de grootste beïnvloeding. De reguliere strandsuppletie heeft eigenlijk geen invloed op de processen. Bij afsluiting van het Molengat nemen in eerste instantie de snelheden wat toe. Dit is misschien niet geheel in lijn met de verwachting. Echter het Molengat gedraagt zich op deze locatie niet als een geul. Het is een plaatselijke verdieping ontstaan door het opdringen van de NUN. Verkleining van het doorstroomoppervlak zorgt ervoor dat er meer water door een kleiner oppervlak moet stromen waardoor de snelheden juist iets toenemen (deze toename is wel zeer beperkt).

Met behulp van deze kennis kan, op basis van expert judgement, een schatting gemaakt worden van de wenselijkheid van de suppletievariant ten aanzien van de neveneffecten op de naastgelegen kusttraaien. Als belangrijkste conclusies kunnen hier worden getrokken;

- Gezien de zeer kleine veranderingen in stromingspatronen is het niet de verwachting dat de suppletievarianten zich in eerste instantie heel anders gaan gedragen.
- Er is geen indicatie dat de grootste suppletie (S4 variant) meer risico oproept dan de kleinste (S1) variant. In beide zijn de voorspelde effecten klein. Onwenselijke overgangssituaties zoals zanddruk door een tijdelijk diepe geul worden hier niet verwacht. Daarnaast zal het aanbrengen van meer zand in de vooroever er op langere termijn wel voor zorgen dat er een grotere aanlanding van de NUN kan plaatsvinden. Hoe dit zich precies ontwikkelt, is op basis van de simulaties niet te voorspellen.
- De suppletievarianten zullen zich waarschijnlijk als reguliere suppleties gedragen.
- Het effect van de suppletievarianten op golven is hier niet onderzocht. Wel kunnen de S3 en S4 varianten, waarbij de diepte van de vooroever verkleint, ervoor zorgen dat de golfhoogtes ter plaatse van het strand wat afnemen door extra dissipatie van de golfenergie.

Met behulp van het tot nu toe uitgevoerde onderzoek kunnen niet alle vragen met betrekking tot de primaire oorzaken van het insnoeringseffect van het strand bij Paal 10 op Texel worden beantwoord. Er kan aan de hand van de getijsimulaties wel worden geconcludeerd dat veranderingen in de bodemligging recentelijk (2009-2012) een grotere gradiënt in de transporten nabij strandpaal 10 veroorzaken. Deze zijn mede verantwoordelijk voor de geobserveerde erosie. Ook het golfklimaat lijkt ongunstig te zijn veranderd. De Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks geeft recent wat minder afscherming waardoor de lokale golfhoogte ter plaatse van Paal 10 is toegenomen. Beide effecten dragen ertoe bij dat de kustlijn hier erodeert.

Een voorspelling met betrekking tot de toekomstige ontwikkeling kan alleen door uitgebreide morfologische simulaties. Vanuit de bodemdata kunnen echter al waardevolle inzichten worden verkregen. De bodemdata laat zien dat de NUN eigenlijk al verbonden is met de kust van Texel. De bodemdata van 2012 en 2015 geven wel een indicatie dat er langs de Noorderhaaks een nieuwe zeewaartse verbinding met het Molengat wordt gevormd. Als er inderdaad een nieuw (zeewaarts gericht) Molengat ontstaat, zal het afgesplitste deel van de NUN relatief snel verder kunnen verhelen met de kust. Over langere termijn geeft dit een bron van zand misschien het best vergelijkbaar met het aanlanden van het Bornrif aan Ameland.

Wel kan er dan tijdelijk (lokaal) erosie ontstaan door geultjes die de kust worden ingedrukt door het opschuivende zandpakket.

4.2 Conclusies

Wat zijn de dominante processen in relatie tot de insnoering?

De insnoering wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de lokale bodemverandering van de vooroever. Ter plaatse van Paal 10 is een ondiep platform ontstaan. Daarnaast is de hoogte van de Noorderhaaks juist iets afgenomen. Beide effecten hebben geleid tot een (kleine) verandering in het golfklimaat aan de kust, waardoor er een veranderde gradiënt in de golfhoogte en dus ook in de sedimenttransporten is ontstaan. Dit leidt lokaal tot een divergentiepunt in de sedimenttransporten en tot erosie van de kustlijn. Deze erosie kan verder versterkt zijn door de gradiënten in de getijgedreven transporten die zich door de veranderingen in het Molengat nu wat verder noordwaarts uitstrekken en dus ook invloed hebben op het kustvak rond Paal 10.

Wat zijn de achterliggende hydrodynamische processen?

Zowel golven als getij hebben bijgedragen tot de veranderingen in transporten. Waarschijnlijk is de golf-gedreven component maatgevend.

Wat zijn de achterliggende morfologische processen?

Door gradiënten in de kustlangse golfhoogte ontstaat er een divergentiepunt ter plaatse van Paal 10. Dit veroorzaakt een netto sedimenttransport en erosie van de kustlijn.

Welke onzekerheden/risico's zijn er?

Structurele erosie van de zuidwestkust van Texel is een proces dat zich al vele decaden voordoet. Dit heeft in essentie te maken met de gebogen vorm van de kust en het relatief geringe zandvolume dat vanaf de buitendelta de kust bereikt. De lokale erosie ter plaatse van Paal 10 lijkt echter vooral een lokaal gedreven probleem. Afhankelijk van de exacte ligging en vorm van de vooroever (NUN) kan deze erosie zich wat langs de kust verplaatsen. Deze erosie is niet gerelateerd aan geulvorming of het verplaatsen van een diepe geul, maar lijkt vooral een wat ongunstige uitkomst van de vormveranderingen van de NUN waardoor de met name golfgedreven transporten hier erosie veroorzaken. Met doorgaande vormverandering van de voorliggende NUN kan het erosiegebied in de toekomst weer verdwijnen. Met een suppletie kan een tijdelijke buffer aan zand worden aangebracht om de effecten van de erosie te mitigeren. In principe ligt er een extra buffer aan zand direct voor het kustvlak maar aan de kustlijn geeft dit nog geen positieve impuls.

Hoe ontwikkelt de getijde geul het Molengat zich verder?

De laatste jaren is er een duidelijke verandering in het gedrag van Molengat opgetreden. De noordelijke punt van de NUN heeft zich vrijwel verheeld met de kust van Texel. De geuldoorsnede van het Molengat wordt, ter plaatse van de Hors, juist wat breder en ondieper en lijkt zich niet richting de kust te verplaatsen. Door het breder worden, verflauwen van de geulwand, treedt er langs de kust echter wel erosie op. Een kleinere, ondiepere geul langs de kust is op zich een gunstige ontwikkeling, omdat deze ook minder invloed (gevaar) op de kust uitoefent en structurele erosie waarschijnlijk reduceert. Dit wil niet zeggen dat het op een kleinere schaal ook overal een gunstig effect heeft. Met name aan de noordpunt van de NUN treden grote veranderingen in vorm en ligging op. Dit geeft, op den duur, een extra zandtoename aan de kust, maar het kan ook (tijdelijk) leiden tot kusterosie door ongunstige gradiënten in stromings- en brandingstransport.

Zal de het Molengat oostwaarts blijven verplaatsen?

Nee, het Molengat lijkt zich recentelijk in positie te stabiliseren. De geul verondiept sterk. Echter de geulwand verflauwt, dit leidt dan weer tot extra erosie van de kustlijn. In de huidige situatie is het achterliggende proces van deze erosie dus niet het verplaatsen, zoals dat vroeger het geval was, maar de vormverandering van de geul (het verflauwen van de geulwand).

Zal de Noorderhaaks aansluiten aan Texel, zo ja op welke termijn?

Op deze vraag is geen eenduidig antwoord te geven. Op hele lange termijn is het periodiek aanlanden van platen (en geulen) vanuit de buitendelta met de zuidwestkust van Texel veelvuldig voorgekomen. Dit is ook een proces dat we vrijwel bij alle zeegaten tegen komen. Op korte termijn is dit echter niet waarschijnlijk. Hiervoor is het Molengat op dit moment nog te groot en diep. Het lijkt ook niet aannemelijk dat op korte termijn deze geul verdwijnt. De geul lijkt wel te verondiepen maar ook te verbreden. Pas als de geul veel kleiner wordt, dan zou er tijdens een zware storm misschien een verlanding (van een gedeelte) van de Noorderhaaks kunnen plaatsvinden. Soortgelijke aanlandingen (zoals bijv. Borrif strandhaak, Bollen van de Ooster) laten echter zien dat zelfs kleine geultjes een aanlanding nog lang tegen kunnen houden.

Welke suppletievarianten zijn ongunstig voor de gebruikersfuncties van het strand?

Alle suppletievarianten vertonen slechts een zeer kleine invloed op de stromingen. Zelfs bij gedeeltelijk opvullen van het restant van het voorliggende Molengat vertonen de stromingen geen duidelijke verandering. Onwenselijke overgangssituaties zoals zanddruk door een tijdelijk diepe geul worden hier dan ook niet verwacht. Dit komt ook doordat de suppleties duidelijk buiten de hoofdcirculatie van het zeegat liggen en zullen zich dan ook veel meer als een reguliere suppletie gedragen. De negatieve effecten van de suppletie op de gebruikersfuncties van het strand zullen hier ook niet anders zijn dan bij andere reguliere suppleties.

5 Literatuur

- Cleveringa, J. (2001). Zand voor zuidwest Texel. Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel (in Dutch), Report RIKZ/OS/2001/ 031. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Elias, E.P.L., (2006). Morphodynamics of Texel Inlet. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (Delft): 261 pp.
- Elias, E.P.L., van Oeveren, C., Bruens, A. (2014). BeheerBibliotheek Texel. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Rapport 1209381-007, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J., Wang, Z.B. en de Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, 91-3.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M. and Stelling, G.S. (2004). "Development and validation of a three-dimensional model," *Coastal Engineering*, 51, 883-915.
- Ridderinkhof, H., Van Haren, H., Eijenraam, F., en Hillebrand, T. (2002). "Ferry observations on temperature, salinity and currents in the Marsdiep tidal inlet between the North Sea and Wadden Sea." *Proceedings of the second international conference on EUROGOOS. Operational oceanography: implementation at the European and regional scales.* FLEMMING, N.C. et al., eds., Elsevier Oceanography Series, 66, pp: 139-148.
- Rietveld, C. F. W. (1962). The natural development of the Wadden Sea after the enclosure of the Zuider Sea. *Proc. of the 8th International Conference on Coastal Engineering*, Mexico City, 765-781.
- Steijn, R.C. en C. Jeuken, (2000), Vier mogelijke beheersingrepen in het Zeegat van Texel - morfodynamische modelberekeningen, rapport samenwerkingsverband Alkyon/WL|Delft Hydraulics A514/Z2742, 68 pag., 15 tab., 146 fig.
- Thijsse, J. T. (1972). Een halve eeuw Zuider Zeewerken 1920-1970 (in Dutch), Tjeenk Willink, Groningen.

A Detailbeschrijving van representatieve profielen rond strandpaal 10

Raaien 605 en 700; zuidkant de Hors (Figuur A-1)²

Raai 605 geeft een representatief beeld van de ontwikkelingen aan de zuidzijde van de Hors. Aan de zuidzijde wordt de Hors begrensd door het Marsdiep. Het diepe gedeelte van deze geul blijft stabiel gedurende de gehele periode. De dominante veranderingen treden op boven de -25m contour. Tussen 1965 en 1990 is de -12m contour 250m landwaarts verplaatst. Dit sediment heeft bijgedragen aan de vorming van de Hors. De laagwaterlijn is hier 250m zeewaarts gemigreerd. Sinds 1990 zien we eigenlijk een tegenovergestelde trend. Het profiel tussen 2 en -8m erodeert (verplaatst landwaarts), tussen de -8m en de -13m neemt de hoogte toe. Deze toename is vooral in de periode 2009-2013 significant. De geulwand tussen de -13 en -38m verplaatst zich tot 2011 landwaarts.

De zuidwestpunt van de Hors (raai 700) vertoont initieel een sterke uitbouw van de landwaartse geulwand. De geul ontwikkelt een zeer steil talud en is daarbij in diepte toegenomen van -8 tot -20m. In de periode 1992-2010 zien we dat vrijwel de gehele geul landwaarts beweegt met uitzondering van de landwaartse geulwand boven de -7m. Dit gedeelte blijft opmerkelijk stabiel. Recent, 2010-2013, zien we een duidelijke verandering in het gedrag van het profiel. Aan de bovenkant van de geul, tot de -2m contour, is er tot 2011 nog opbouw. Recent (2012-2013) vindt hier veel erosie plaats. In deze periode neemt ook de maximale diepte van het Molengat sterk af.

Profielen 704 en 707: westzijde van de Hors (Figuur A-2)

Profiel 704 geeft een goed beeld van de ontwikkeling van het knikpunt in de Hors. In deze profielen is ook de landwaartse verplaatsing en verdieping van het Molengat goed te volgen. In de periode 1965-2000 neemt de diepte toe van -15 naar -24m NAP. De gehele geul verplaatst daarbij een 500m landwaarts. Sinds 2000 zien we dat de geul verondiept. In 2013 is de diepte met 8m afgenomen. De landwaartse geulwand vertoont tot 2000 een versteiling met een knippunt rond de -10m; tussen de -10 en -20m verdiept de geulwand, terwijl boven de -10m de kust juist zeewaarts uitbouwt. Sinds 1990 is deze trend juist omgedraaid. Het profiel vertoont een sterke erosie. De -2m contour is daarbij 750m landwaarts opgeschoven. Deze grote erosie heeft tot gevolg dat de Hors lokaal vervormde van een bolle naar een holle kustlijn.

Profiel 707 geeft een beeld van de ontwikkelingen van de noordkant van de Hors, waar de brede kustvlakte overgaat in het normale strand-duin profiel. Ook hier zien we een landwaartse verplaatsing van de NUN en het Molengat in de periode 1965-1990. De breedte van het Molengat neemt daarbij sterk af. Bij de Hors zijn de veranderingen eigenlijk klein. Alleen op de geulwand zien we een verdieping van de zone -4 tot -9m. Sinds 1990 vindt er significante sedimentatie van het diepe geulgedeelte plaats. In deze periode zien we ook een verandering in de vorm van de NUN. Tot 1990-1994 was er een steile geulwand te zien bij de NUN. Deze geulwand verflauwt tussen 1990-1994. Tijdelijk gaf dit een zeewaartse ligging van deze geulwand. Met de doorgaande migratie van het Molengat verplaatst de flauwe geulwand zich echter ook landwaarts. De maximale geuldiepte verkleint van -14 naar -10m NAP. Deze

² Zie figuur 1-1 voor locatie van de raaien.

verondieping gaat echter gepaard met grote erosie op de landwaartse geulwand. De -4m contour verplaatst hier 600m landwaarts.

Profielen 800 en 860: overgang de Hors naar duinkust Texel (Figuur A-3).

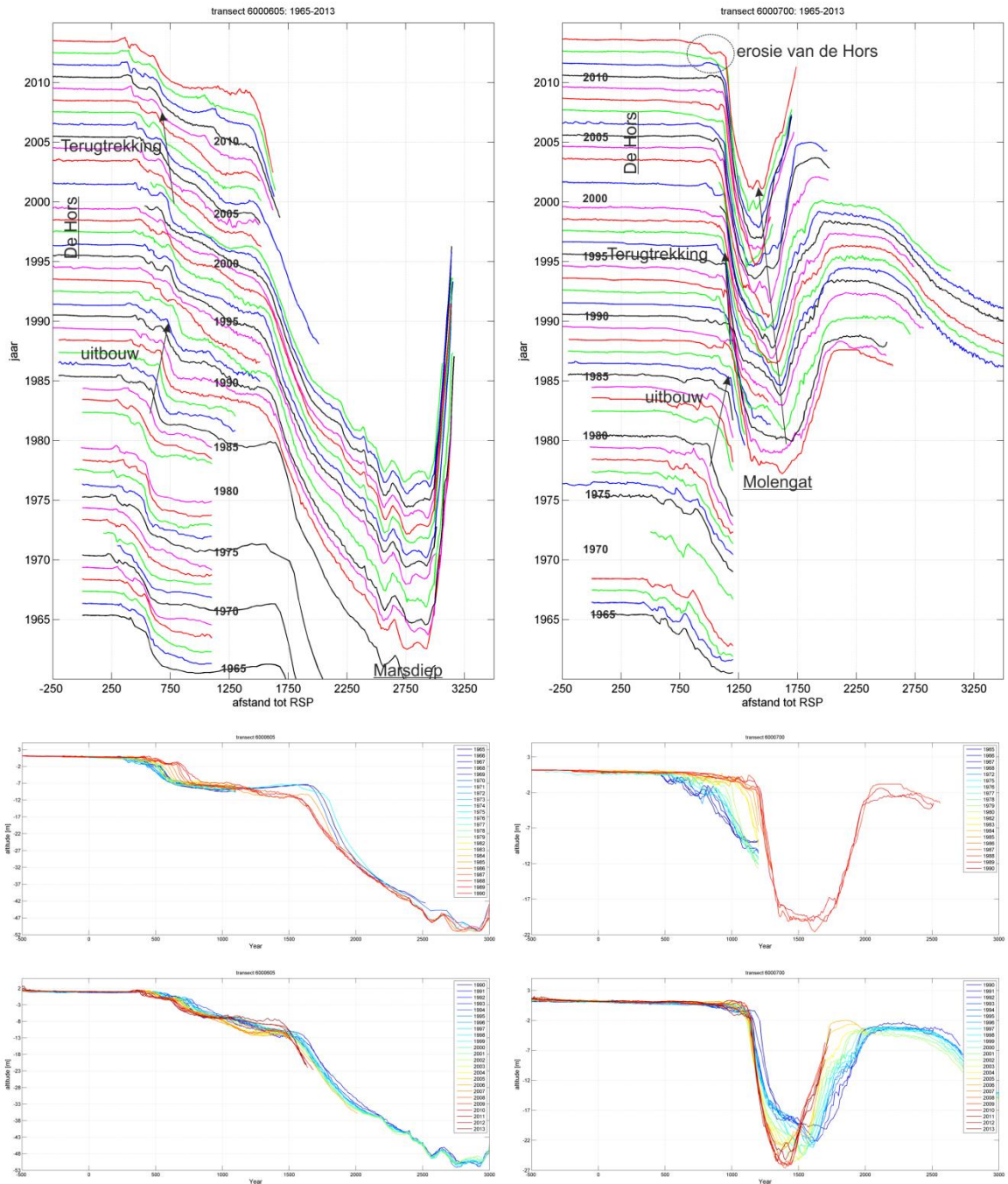
In deze profielen zien we de vorming, het verdiepen, van Molengat door de landwaartse verplaatsing van de NUN. Dit veroorzaakt een erosie aan de kustzijde. De geul zelf blijft tot 1995 vrijwel stabiel in diepte. Tegelijkertijd met de landwaartse verplaatsing vervormt de zeewaartse geulwand van een flauw naar zeer steil profiel. Dit steile profiel migreert vervolgens landwaarts (1990-2010). Tijdens deze migratie blijft de NUN vrij stabiel op hoogte. Sinds 2008 zien we dat de hoogte van NUN sterk afneemt (van -2.5 naar -5m). Langs de kust zien we in deze periode juist een uitbouw. De -3m contour migreert een 250m zeewaarts. Sinds 1995 zien we dat het diepe gedeelte van de geul opvult.

In profiel 860 is er van een breed strand geen sprake. De geulwand gaat sinds 1990 vrijwel direct over in het duinprofiel. Ook in dit profiel zien we een sterke erosie van de kust tot 2005. In de periode 2005-2013 neemt de ondiepe kustzone (tot de -5m) juist in volume toe. In het diepere gedeelte vindt juist nog veel erosie plaats doordat de geul hier richting de kust blijft verplaatsen. De geul verliest hierbij veel doorstroomoppervlakte. Sinds 2000 lijkt de landwaartse verplaatsing te versnellen.

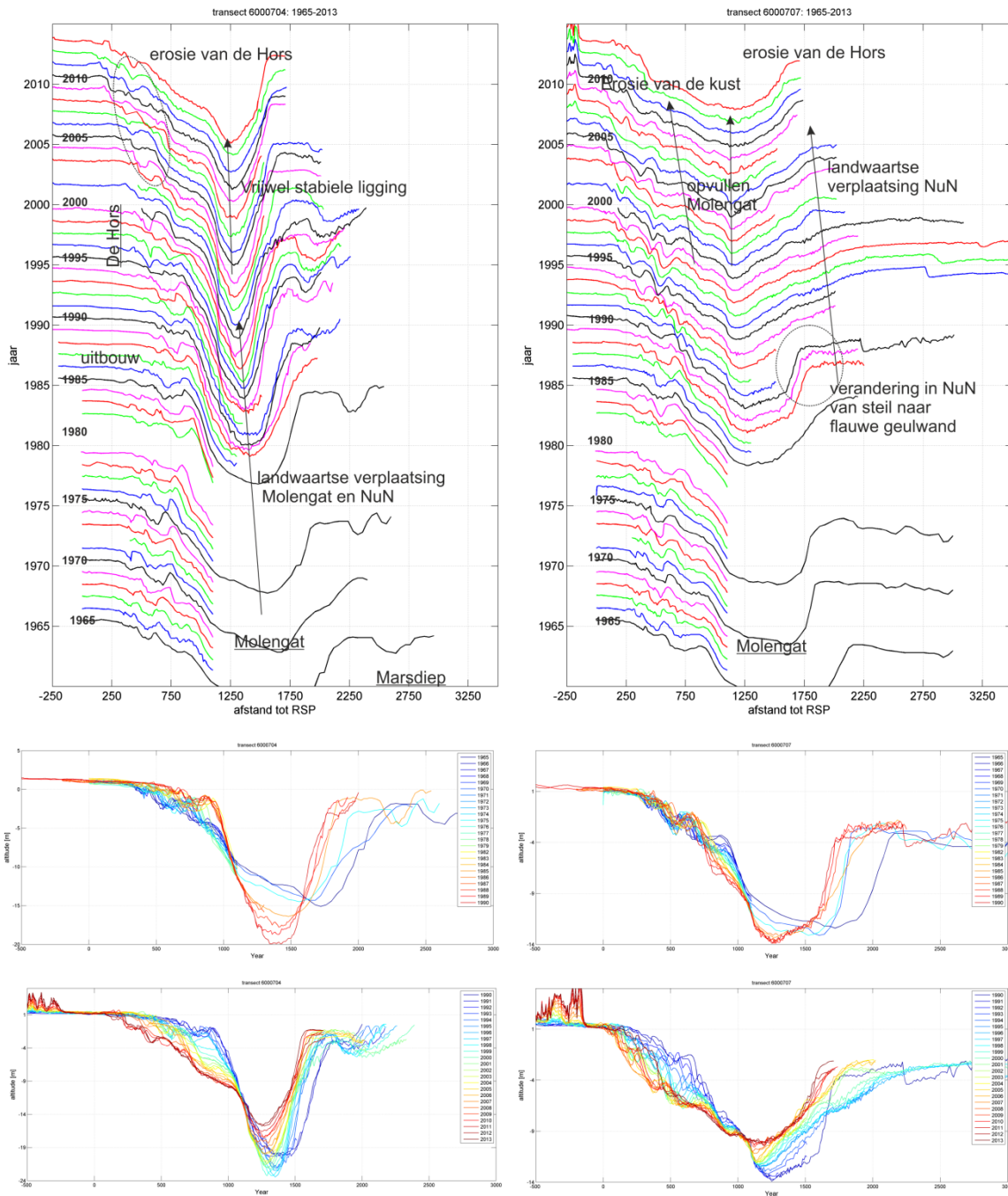
Profielen 1000 -1210: noordpunt van de NUN (Figuur A-4 en A-5).

Profielen 1000 tot 1210 geven het gebied weer waar de NUN sterk richting de kust migreren. Hier is het Molengat over het algemeen ondiep. Raai 1000 geeft duidelijk de trend van kusterosie weer. Hier migreert de laagwater lijn, in de periode 1965-1990, zo'n 250m landwaarts. De brekerbanken die initieel nog aanwezig zijn, zijn na 1980 niet meer te onderscheiden. Er is slechts een beperkt aantal raaien over de NUN gemeten, maar deze raaien laten een vrij stabiele NUN zien tussen 1995 en 1999. Daarna verandert het profiel iets van vorm, waarschijnlijk door de ontwikkeling van een ebschaar.

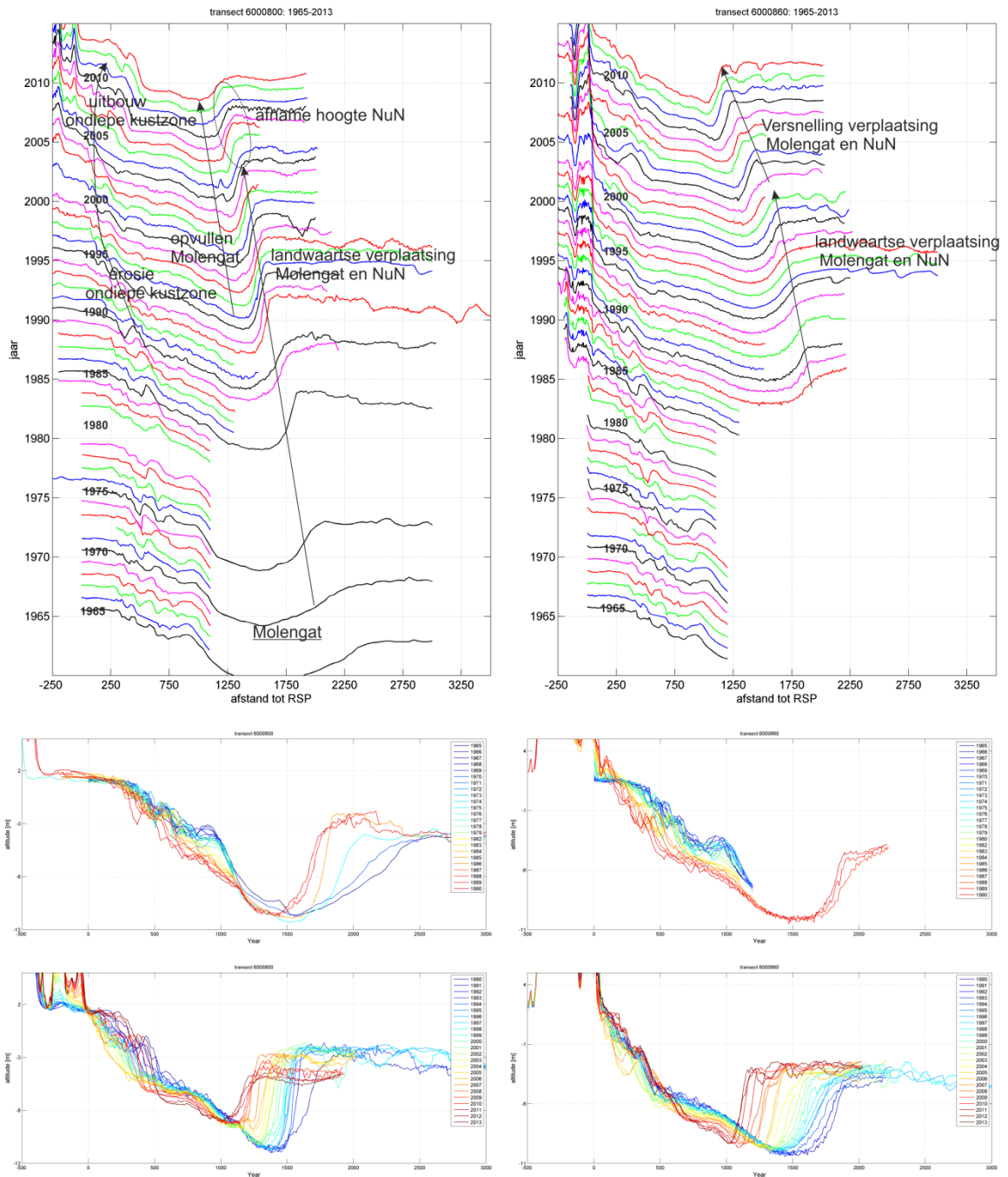
Profiel 1053, 1108 en 1210 liggen in het aanlandingsgebied van de punt van de NUN. In dit profiel is duidelijk de landwaartse migratie van de punt van de NUN zichtbaar. Deze migratie is vrijwel continue aanwezig tot 2005. Sinds 2005 vindt deze verlanding versneld plaats. In 2013 is er eigenlijk geen duidelijke scheiding tussen kust en NUN te definiëren.



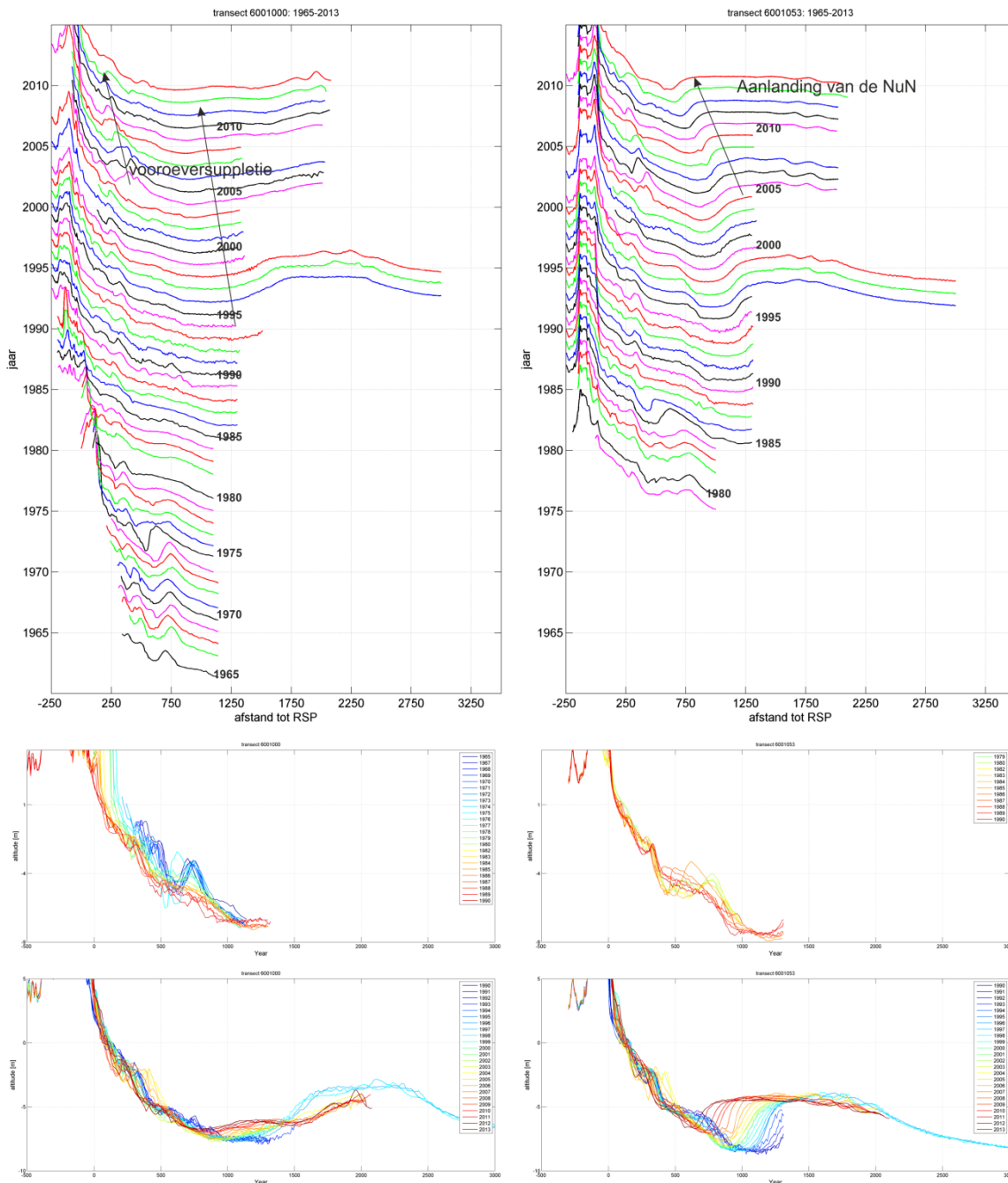
Figuur A-1 Ontwikkeling van raai 605 (links) en 700 (rechts) d.m.v. timestacks over de periode 1965-2013 (boven), dwarsprofielen over de periode 1965-1990 (midden) en dwarsprofielen over de periode 1990-2013 (onder).



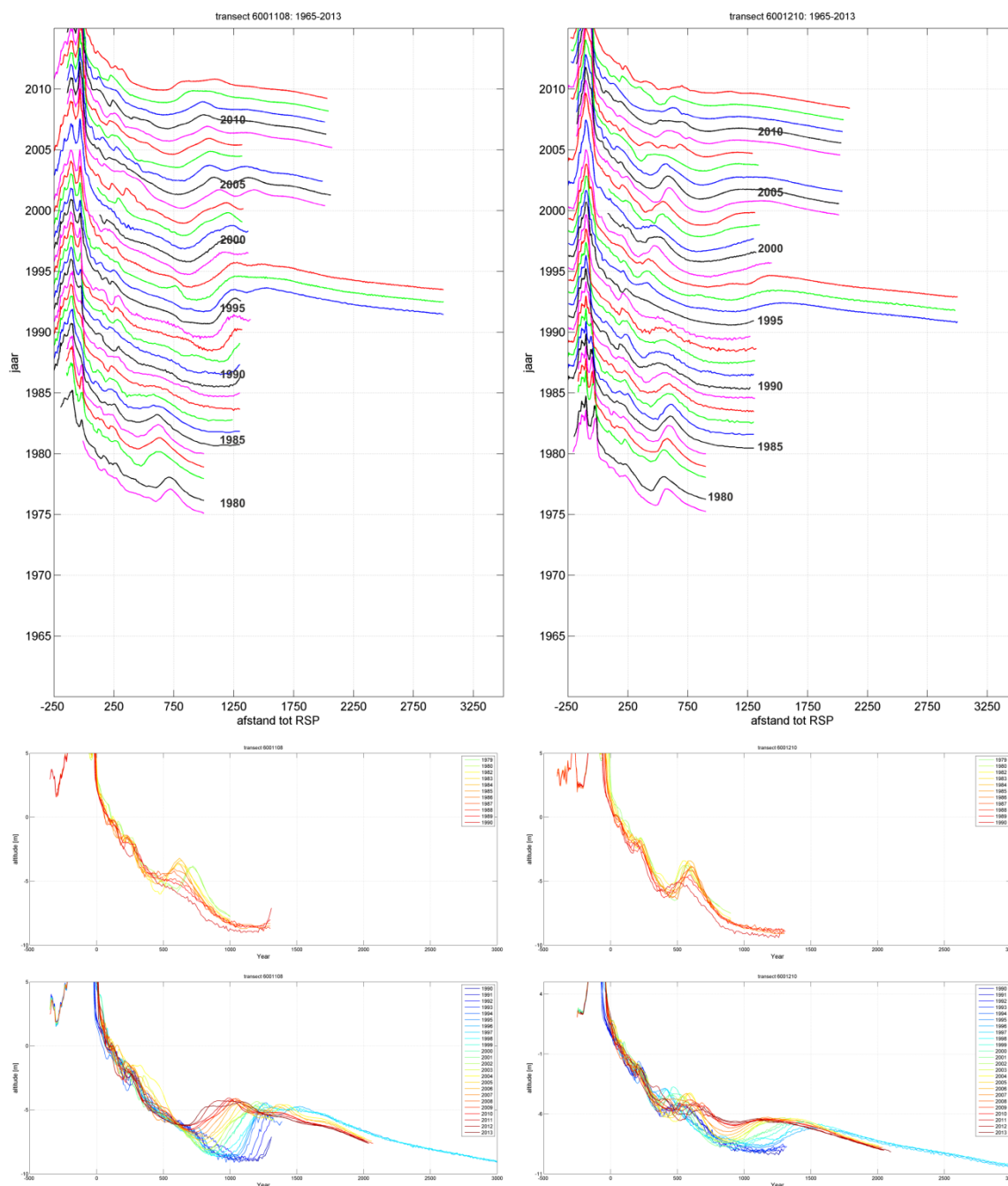
Figuur A-2 Ontwikkeling van raai 704 (links) en 707 (rechts) d.m.v. timestacks over de periode 1965-2013 (boven), dwarsprofielen over de periode 1965-1990 (midden) en dwarsprofielen over de periode 1990-2013 (onder).



Figuur A-3 Ontwikkeling van raai 800 (links) en 860 (rechts) d.m.v. timestacks over de periode 1965-2013 (boven), dwarsprofielen over de periode 1965-1990 (midden) en dwarsprofielen over de periode 1990-2013 (onder).



Figur A-4 Ontwikkeling van raai 1000 (links) en 1053 (rechts) d.m.v. timestacks over de periode 1965-2013 (boven), dwarsprofielen over de periode 1965-1990 (midden) en dwarsprofielen over de periode 1990-2013 (onder).



Figuur A-5 Ontwikkeling van raai 1108 (links) en 1210 (rechts) d.m.v. timestacks over de periode 1965-2013 (boven), dwarsprofielen over de periode 1965-1990 (midden) en dwarsprofielen over de periode 1990-2013 (onder).