

Memo

Aan
Quirijn Lodder, RWS Waterdienst

Datum 25 juli 2012	Kenmerk 1206171-004-ZKS-0003	Aantal pagina's 35	Review Zheng Bing Wang
Van Jebbe van der Werf	Doorkiesnummer +31 (0)88 33 57 959	E-mail jebbe.vanderwerf@deltares.nl	

Onderwerp
Advies geulwandsuppletie Onrustpolder

1 Inleiding

1.1 Project Kennis voor Beheer & Onderhoud Kust

Rijkswaterstaat (RWS) Waterdienst heeft Deltares gevraagd om het kustonderzoek, dat nodig is voor het optimaliseren en toekomst vast maken van de suppletie strategie, te programmeren. Dat heeft geresulteerd in het project Beheer & Onderhoud Kust (B&O Kust) dat in het kader van de raamovereenkomst tussen Deltares en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu wordt uitgevoerd aangeduid met Kennis voor Primaire Processen (KPP). Het project KPP B&O Kust is opgedeeld in een aantal deelprojecten. In het deelproject Ondersteuning Rijkswaterstaat worden ad-hoc regionale vraagstukken beantwoord die betrekking hebben op het beheer en onderhoud van de kust.

In januari 2012 heeft RWS Waterdienst een vraag gesteld met betrekking tot een geplande geulwandsuppletie in Noord-Beveland. In dit memo worden de vraagstelling en de resultaten van een beknopte studie toegelicht.

1.2 Aanleiding, beheersvragen en onderzoeksvragen

Bij de Onrustpolder (Noord-Beveland) treedt plaatselijk structurele erosie op. Ten einde de negatieve effecten van deze erosie te stoppen, heeft RWS Waterdienst een geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust, de getijdegeul die vlak voor de kust ligt, opgenomen in het meerjarige suppletieprogramma 2012-2015.

Momenteel is RWS in de fase waarin het ontwerp van deze suppletie definitief gemaakt moet worden. Om dit te kunnen doen, vraagt RWS advies ten aanzien van de volgende vragen:

- Zijn er risico's bij het uitvoeren van een geulwandsuppletie?
- Hoe kunnen we deze eventuele risico's beheersen?

Voor het beantwoorden van bovenstaande beheersvragen, dienen de volgende aanvullende onderzoeksvragen beantwoord te worden:

- Welke processen zijn verantwoordelijk voor de kusterosie bij de Onrustpolder?
- Wat is het effect van een geulwandsuppletie op deze kusterosie op korte en middellange termijn?

Hierbij richten we ons op de bestaande RWS ontwerpen van de geulwandsuppletie. We beschouwen geen alternatieve suppletie strategieën zoals morfologische baggeren en



grootschalige ingrepen (e.g. zandmotoren). Dergelijke alternatieven zijn overigens wel onderzocht door Van der Werf et al. (2010) en McCall (2010).

1.3 Aanpak en opbouw memo

Om de beheers- en onderzoeksvragen te beantwoorden zijn de volgende stappen doorlopen:

- Beschrijving van het morfologische systeem (Hoofdstuk 2). Dit leidt tot een hypothese over het optreden van de structurele kusterosie bij de Onrustpolder (eerste onderzoeksvraag).
- Analytische beschouwing over het initiële effect van geulwandsuppleties op stroomsnelheden (Paragraaf 3.1), aangevuld met numerieke snelheidsberekeningen. Deze analyse leidt tot een eerste indicatie voor de korte termijn effecten (~0-1 jaar) van geulwandsuppleties (onderzoeksvraag 2).
- Beknopte data-analyse van eerder uitgevoerde geulwandsuppleties (Paragraaf 3.2). Deze analyse leidt tot een eerste indicatie voor de middellange termijn effecten (~2-5 jaar) van geulwandsuppleties (onderzoeksvraag 2).

Met behulp van deze bevindingen en kennis van het morfologische systeem wordt een eerste beschouwing gegeven van het mogelijke effect van de aanleg van de geplande geulwandsuppletie bij de Onrustpolder (Paragraaf 3.3)

De conclusies en aanbevelingen komen aan bod in Hoofdstuk 4. Hierbij komen we terug op de beheers- en onderzoeksvragen.

De vraagstelling en de tussentijdse resultaten van deze studie zijn besproken in twee workshops met deskundigen van RWS¹ en Deltares².

¹ Marian Lazar, Quirijn Lodder, Gemma Ramaekers

² Ankie Bruens, John de Ronde, Zheng Bing Wang, Jebbe van der Werf

2 Korte beschrijving morfologische systeem Onrustpolder

Hieronder volgt een korte beschrijving van het morfologische systeem. Deze beschrijving is gebaseerd op bestaande literatuur, aangevuld met een analyse over de verplaatsing van de getijdegeul richting de kustzone en een eerste beschouwing van het mogelijke effect van bochtstroming hierop. Een uitgebreidere beschrijving is terug te vinden in Van der Werf et al. (2010) en McCall (2010).

2.1 Algemeen

De Onrustpolder is een naam die wordt gebruikt voor het kustvak Noord-Beveland. In de literatuur wordt dit stuk kust, tezamen met een deel van de buitendelta van de Oosterschelde, ook wel Banjaard genoemd. Het kustvak (no. 15 volgens de RWS systematiek) ligt in de provincie Zeeland en loopt van de Veerse Gatdam in het zuiden tot de Oosterscheldekering in het noorden. De kust is ongeveer 3 km lang en bevat de JARKUS raaien 120 tot en met 360 (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Ligging JARKUS raaien Noord-Beveland.

Door de bouw van de Zandkreekdam (1960) en Veerse Gatdam (1961) werd de zeearm tussen Walcheren en Noord-Beveland gesloten en ontstond het (zoete) Veerse meer. De Oosterscheldekering, aangelegd tussen 1969 en 1986, verbindt Schouwen met Noord-Beveland. Deze halfopen kering sluit alleen bij grote stormvloed, waardoor de Oosterschelde onder normale omstandigheden in verbinding met open zee staat.

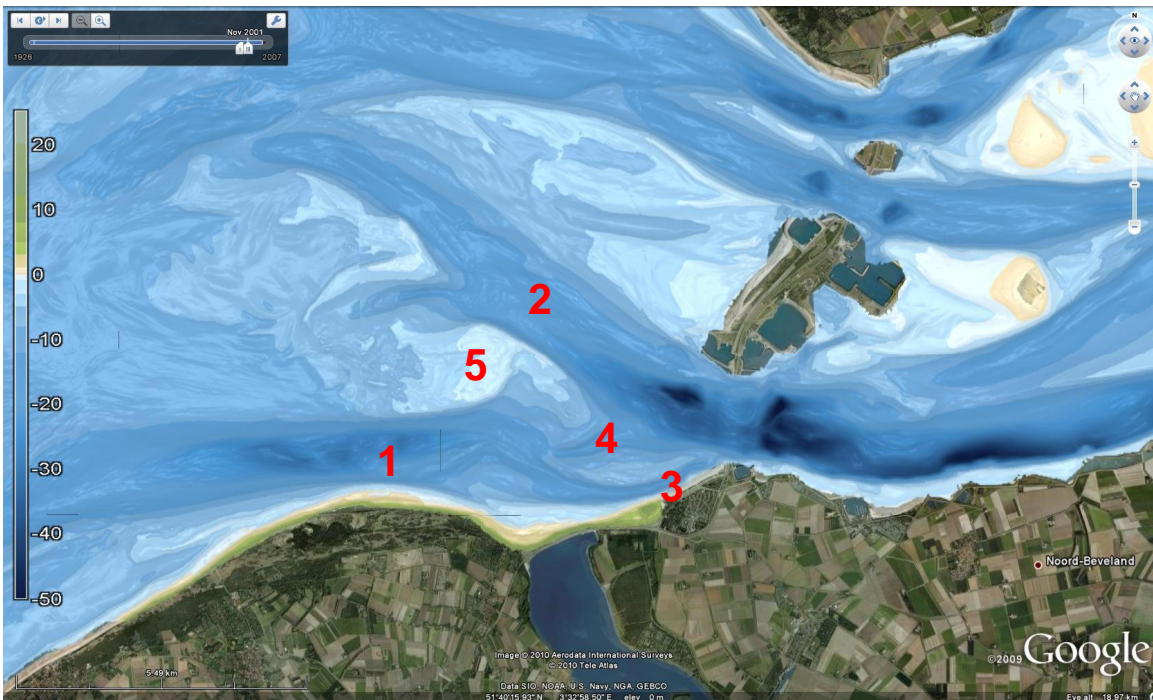
Overige Deltawerken die mogelijk relevant zijn voor de ontwikkeling in dit gebied zijn:



- scheiding Oosterschelde en Grevelingen: Grevelingendam (1965)
- afsluiting Volkerak van het Hollands Diep: Volkerakdam (1957-1969)
- afsluiting zeearm tussen Goeree en Schouwen: Brouwersdam (1962-1971)
- inkorting Oosterschelde: Markiezaatskade (1983) en Oesterdam (1987)
- scheiding Oosterschelde en Volkerak: Philipsdam (1987)

2.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling

De buitendelta van de Oosterschelde heeft duidelijk herkenbare morfologische elementen. De belangrijkste zijn geulen, ondiep gelegen delen (platen) en eb- en vloedscharen. Vanuit de buitendelta stromen drie getijdegeulen de Oosterschelde in en uit: de Hammen, de Schaar van Roggenplaat en de Oude Roompot (van noord naar zuid). Nabij de kust van Noord-Beveland liggen de geulen Roompot (1), de Oude Roompot (2) en Schaar van Onrust (3), de ebschaar Roompot-Hompels (4) en de ondiepte Hompels (5), zie Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Morfologische elementen van de ebdelta van de Oosterschelde nabij Noord-Beveland: 1) de Roompot, 2) de Oude Roompot, 3) de Schaar van Onrust, 4) de Roompot-Hompels en 5) de Hompels.

De Roompot en Schaar van Onrust zijn vloedgedomineerd, de Oude Roompot is ebgedomineerd (Van der Werf et al., 2010). Deze geulen worden aan weerszijden door ondiepe gelegen delen (platen) omsloten welke bekend staan als de Hompels. De bodemligging van deze ondiepe delen wordt zowel door de golven als het getij beïnvloed. De ondiepe delen worden doorsneden door vloed- en ebscharen. De vloedscharen ontstaan vanuit de Roompot en de ebscharen ontstaan vanuit de Oude Roompot. De Schaar van Onrust vormt de belangrijkste verbinding tussen de Oude Roompot en de Roompot.

De morfologische ontwikkeling van de buitendelta van de Oosterschelde wordt de laatste 50 jaren gedomineerd door aanpassingen aan veranderingen in het getij. Deze veranderingen zijn het gevolg van de aanleg van de Deltawerken. Hierdoor werd de Oosterschelde korter en het getijdeprisma kleiner. Ook verhindert de Oosterscheldekering de uitwisseling van sediment

tussen de buitendelta en het bekken. Als gevolg hiervan sedimenteren de getijdegeulen in de buitendelta en zijn er grote erosiekuilen aan weerszijde van de Oosterscheldekering ontstaan. De sedimentatie van de geulen zal zich waarschijnlijk doorzetten tot een nieuw morfologisch evenwicht bereikt is.

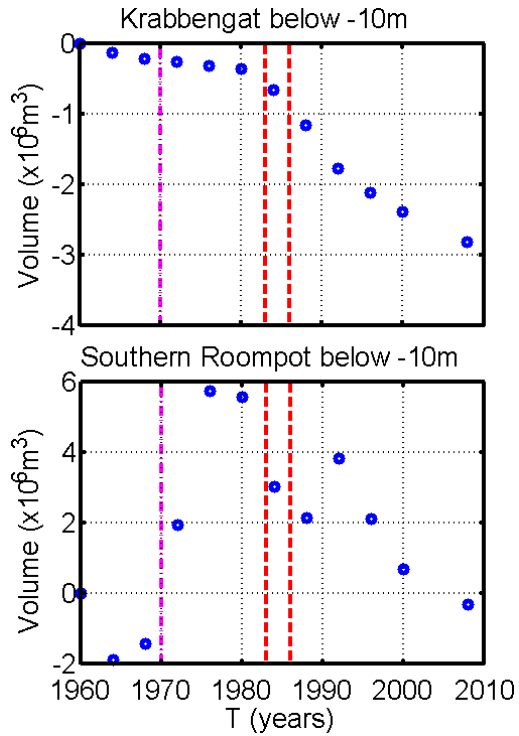
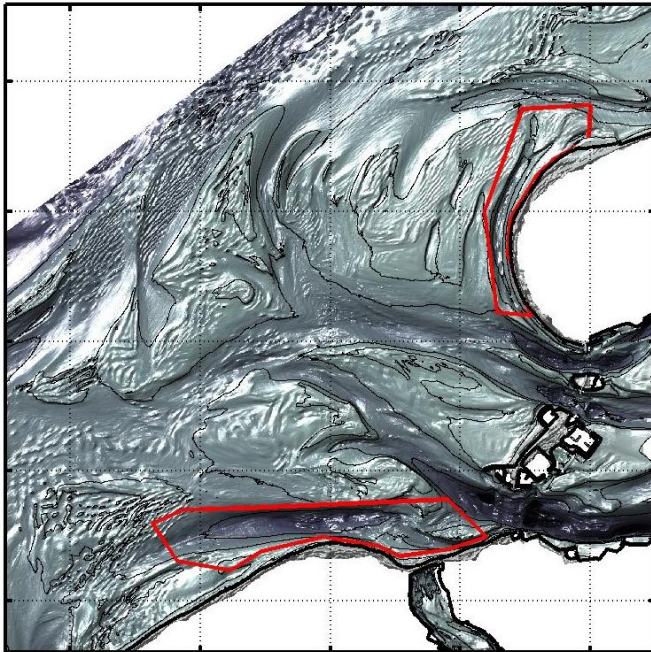
Cleveringa (2008) stelt dat de buitendelta in zijn geheel met de klok mee naar het noorden is geroteerd, waarschijnlijk als gevolg van de gedeeltelijke afsluiting door de Oosterscheldekering. Cleveringa schat dat de verandering van het totale sedimentvolume in de buitendelta van de Oosterschelde voor de periode van 1984 tot 2004 ligt tussen de -1.2 (erosie) en +0.4 (sedimentatie) miljoen m³/jaar.

Hiernaast vinden de “natuurlijke”, cyclische morfologische ontwikkelingen plaats: het ontstaan, de groei, de migratie en het verdwijnen van getijdegeulen, eb- en vloedscharen en zandbanken. Volgens Cleveringa is het lastig om de natuurlijke veranderingen en de veranderingen als gevolg van menselijk ingrijpen van elkaar te scheiden voor de buitendelta van de Oosterschelde, omdat ze dezelfde orde van grootte hebben.

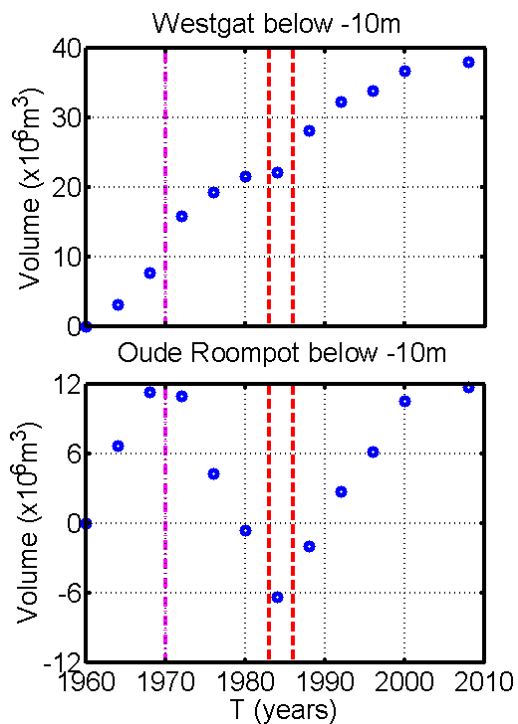
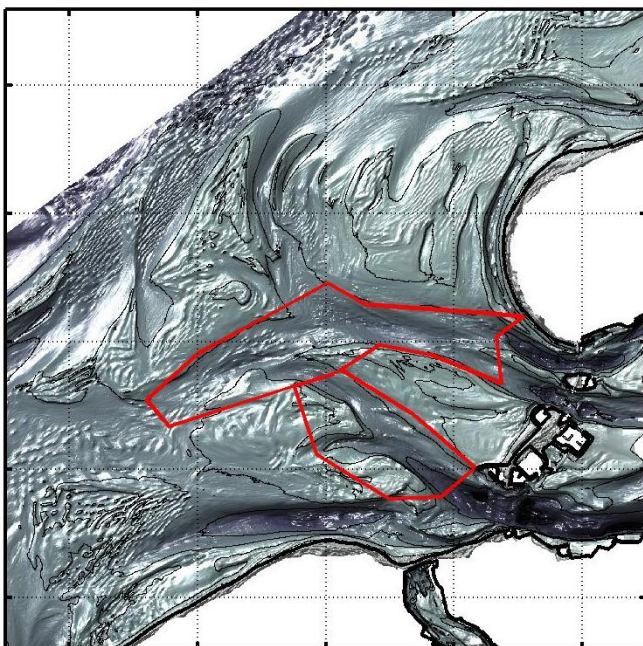
Als gevolg van de afname in sedimenttransport zijn de ebscharen “bevroren” en is de beweging van de geulen vertraagd (De Groot, 2002). Cleveringa (2008) concludeert dat de positie van de Roompot vrij stabiel is; de overige geulen roteren naar het noorden tot noordoosten als gevolg van een heroriëntatie van de getijdestroming door de Oosterscheldekering.

Volgens Van der Werf et al. (2010) blijkt uit de bodempeilingen duidelijk het dichtdrukken van de Schaar van Onrust en het opschuiven van de bocht richting de kust. De kustwaartse beweging van de geul was tussen 1964 en 1968 en 1976 en 1989 het sterkste (~10-20 m/jaar).

Figuur 2.3 en Figuur 2.4 tonen de ontwikkeling van het sedimentvolume van de belangrijkste geulen in de buitendelta van de Oosterschelde: de (Zuidelijke) Roompot, de Oude Roompot, het Westgat en het Krabbengat. Hierin is duidelijk het effect van de aanleg van de Volkerakdam (1969) en de Oosterscheldewerken (1983-1987) zichtbaar. De Oude Roompot sedimenteerde tot 1969, na aanleg van de Volkerakdam volgde erosie, en sinds 1987 vindt er weer sedimentatie plaats. Het morfologische gedrag van de Zuidelijke Roompot is gespiegeld: erosie tot 1969, sedimentatie tussen 1969-1987, en sinds 1987 weer erosie. De sedimentatie in de Oude Roompot sinds midden jaren '80 is het gevolg van het afgenomen getijdeprisma: de geul is te ruim voor het debiet. Ook de watervolumes door de Zuidelijk Roompot zijn afgenomen. Echter, de residuele stroming en de vloeddominantie zijn toegenomen, waardoor – ondanks de kleinere watervolumes door de gehele geul – het diepere deel van deze geul erodeert. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door een verandering in het (residuele) waterstandsverhang langs de geul als gevolg van de Deltawerken. De uitwisseling van water en sediment tussen de buitendelta en getijdebekkens voor en na de Deltawerken wordt verder uitgezocht door Menno Eelkema in het kader van zijn promotieonderzoek aan de TU Delft.



Figuur 2.3 Ontwikkeling sedimentvolume van het Krabbengat en de Zuidelijk Roompot. De paarse lijnen duiden de aanleg van de Volkerakdam aan en de rode lijnen de Oosterscheldewerken. (afkomstig van Menno Eelkema, TUDelft)



Figuur 2.4 Ontwikkeling sedimentvolume van het Westgat en de Oude Roompot. De paarse lijnen duiden de aanleg van de Volkerakdam aan en de rode lijnen de Oosterscheldewerken. (afkomstig van Menno Eelkema, TUDelft)

2.3 Lokale morfologische ontwikkeling

Bij de lokale morfologische ontwikkeling van de Onrustpolder kunnen drie verschillende gebieden worden onderscheiden:

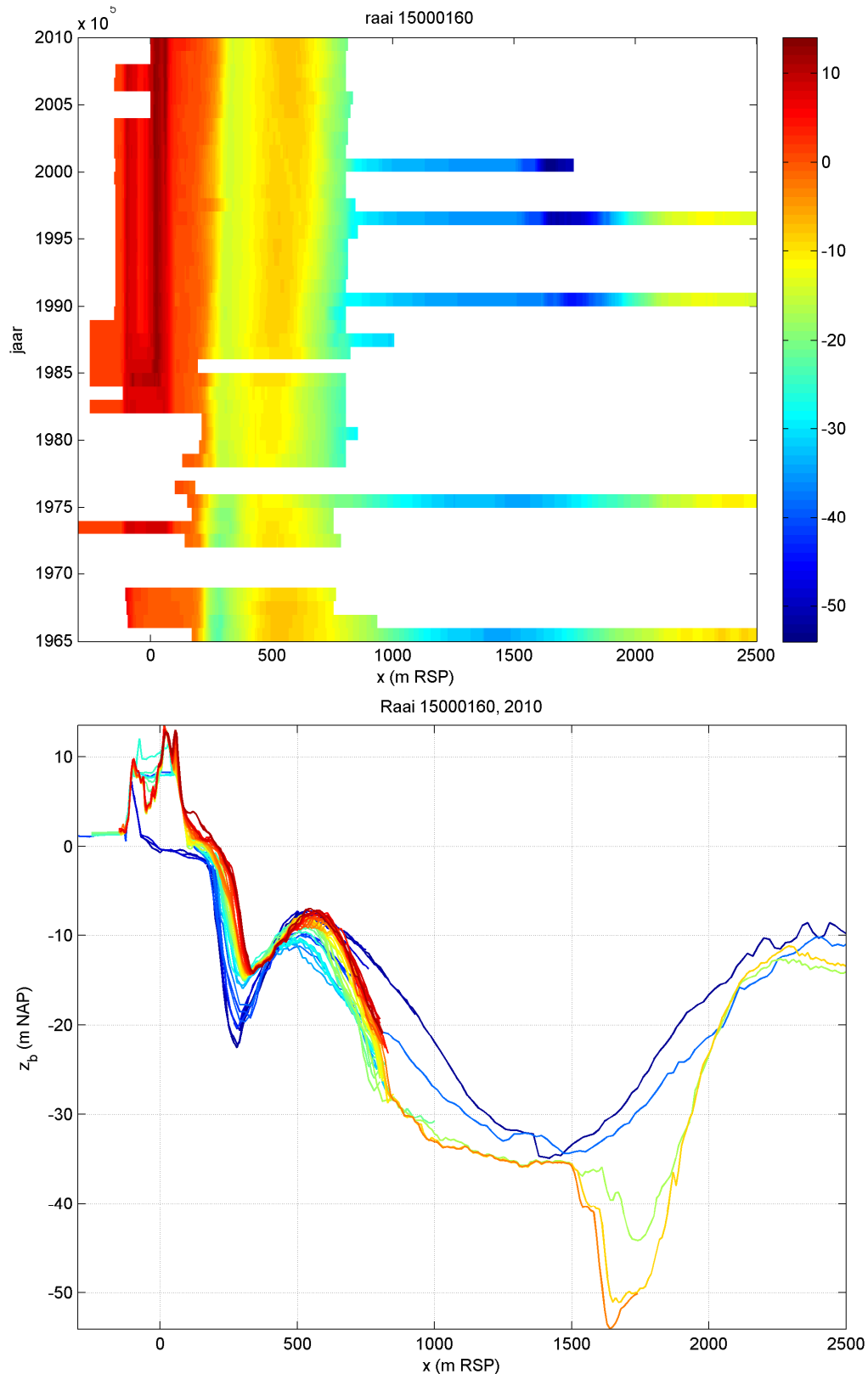
1. oostelijk gedeelte (raaien 120-180)
2. middengedeelte (raaien 200-280)
3. westelijk gedeelte (raaien 300-360)

Onderstaande figuren tonen voor een representatieve JARKUS raai per deelgebied een *timestack* plot, alsmede de ontwikkeling van het kustprofiel, de MKL en MOLK positie. De MOLK (momentane oeverlijn kust) is indicator van de ligging van de landwaartse geulwand (zie ook Van der Werf et al., 2010). Voor het berekenen van de MOLK positie wordt een vergelijkbare methode gehanteerd als voor de MKL positie. Als bovengrens wordt NAP -5 m gehanteerd en als ondergrens NAP -15 m of hoger als de geul ondieper is.

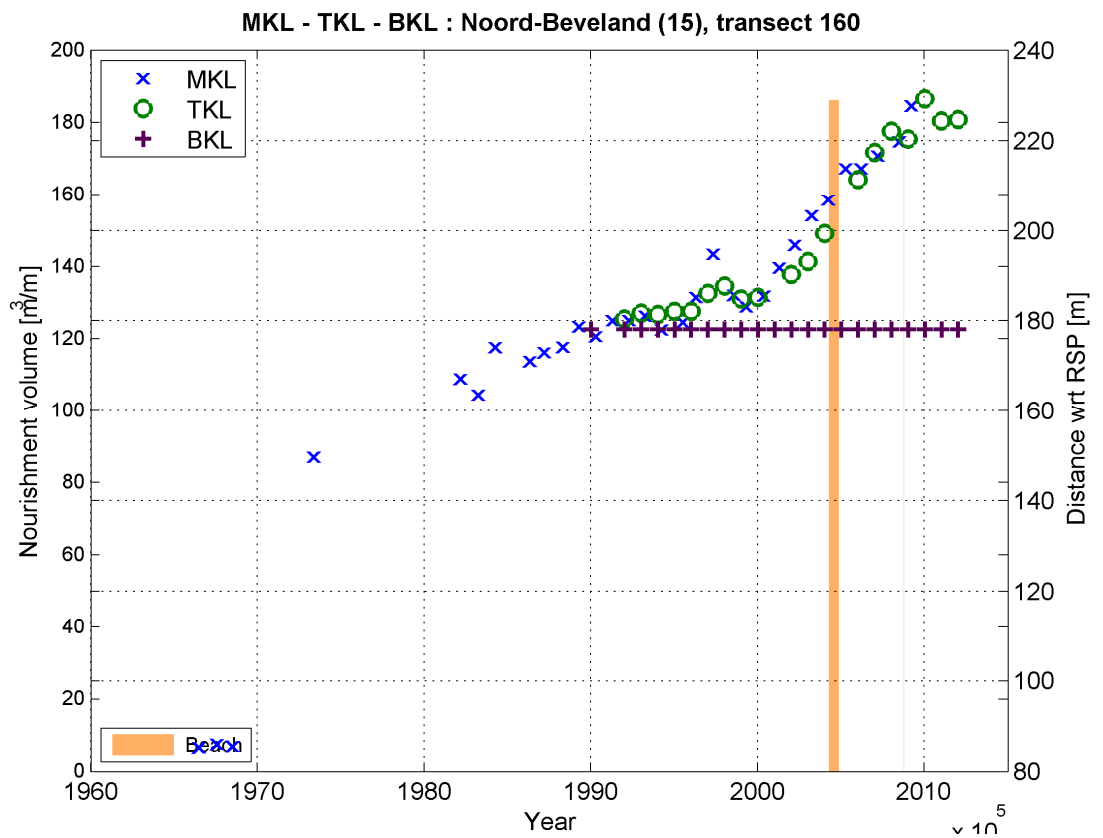
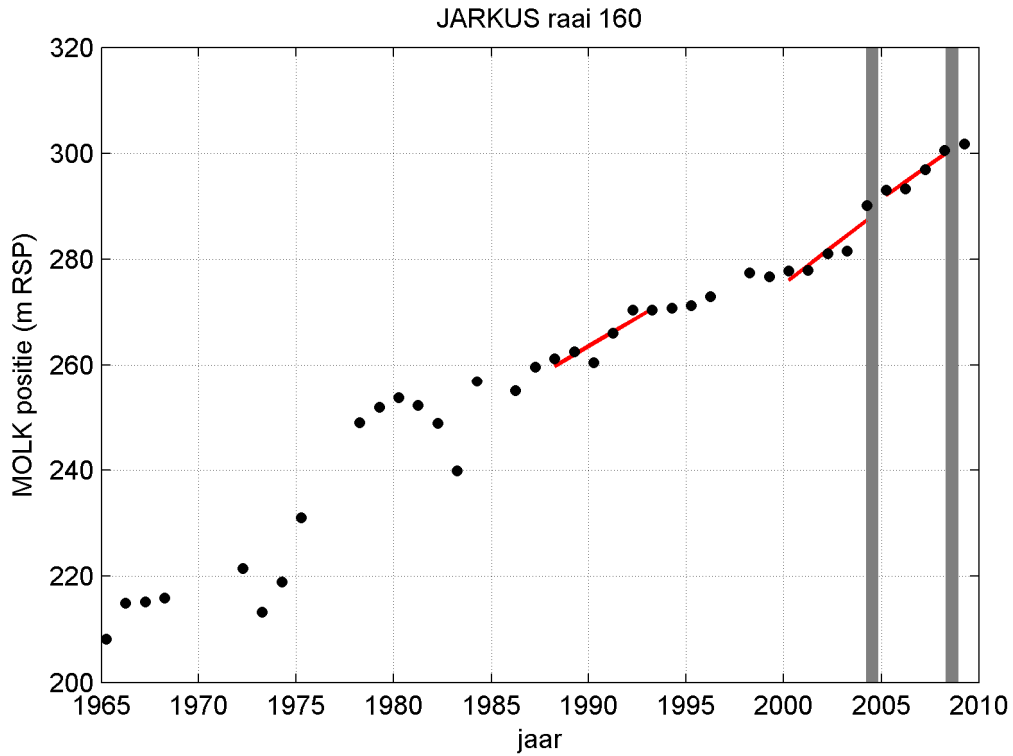
De figuren tonen dat de oostelijke raaien (120-180) geleidelijk uitbouwen in zeewaartse richting. Dit betreft zowel de ondiepere (< 5 m) als de diepere zone (> 5 m). Opvallend is de sterke zeewaartse migratie van de geulwand tussen 1988 en 1998 voor JARKUS raaien 140 en 160. De geul ligt aan de landzijde volledig stabiel voor raai 180 (zie Van der Werf et al., 2010). Dit is het gevolg van een oeverwerk dat onder water de geulwand op zijn plaats houdt (zie ook De Groot, 2002). In de middenraaien (200-280) is het oprukken van de Schaar van Onrust richting kust duidelijk zichtbaar, met name voor raaien 240 en 260. Het strand lijkt wel hoger te worden in de tijd. De geul ligt vrij stabiel voor de westelijke raaien (300-360), terwijl hier de kustnabije zone sedimenteert. Deze ontwikkelingen zijn mede het gevolg van suppleties. In Noord-Beveland zijn tot en met 2009 zes strandsuppleties uitgevoerd: in 1973, 1993, 1996, 2000, 2004 en 2008 (zie Van der Werf et al, 2010 voor meer details).

De MOLK is meer zeewaarts komen te liggen voor de raaien 120-160, en is tamelijk stabiel voor raai 180 en 200. Voor raaien 220-260 is te zien hoe de geul richting kust oprukt. Ook is er een sterke trendbreuk zichtbaar voor en na aanleg van de Oosterscheldekering. Na aanleg is het oprukken duidelijk vertraagd. Voor de overige raaien is de MOLK positie redelijk stabiel in de tijd, terwijl die voor 1988 vrij snel richting kust oprukte.

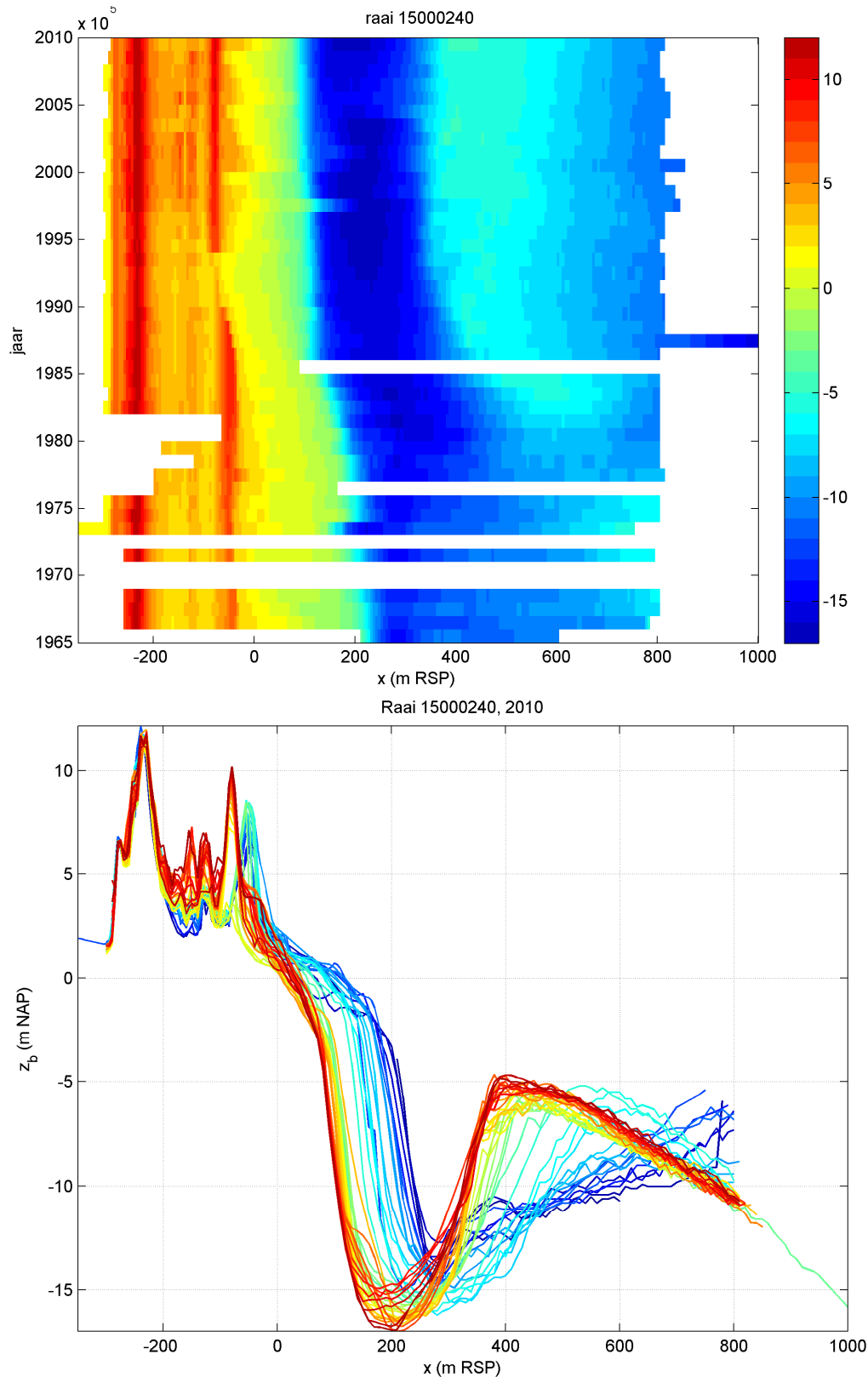
De MKL figuren bevestigen de bovengeschetste morfologische ontwikkeling. Als we ons richten op de periode na 1990, zien we dat in de oostelijke raaien (120-180) de MKL zeewaarts van de BKL ligt en de trend positief is (kustlijn beweegt zeewaarts). De overvloed aan zand is het resultaat van suppleties en oostwaarts langstransport van zand dat hier kan (deels) kan blijven liggen. Met name raaien 220, 240 en 260 hebben last van structurele erosie. Ondanks de vele suppleties wordt de BKL veelvuldig overschreden (toegestaan in het kader van morfologisch baggeren volgens afspraken tussen RWS Zeeland en Adviesorgaan Zeeuwse Waterkeringen, zie Van der Werf et al, 2010). Op korte termijn is een duidelijk zaagtandpatroon zichtbaar (plotselinge zeewaartse MKL verplaatsing ten tijde van de suppletie, langzame landwaartse verplaatsing als gevolg van erosie in de daaropvolgende jaren). De langjarige trend vertoont echter geen positief effect zoals in de oostelijke en westelijke raaien, de trend lijkt zelfs licht negatief te blijven. Door het landwaartse verplaatsen van de MOLK bestaat de vrees dat het effect van strandsuppleties minder efficiënt zal worden en de langjarige landwaartse trend in MKL toeneemt (zie verderop). De morfologische situatie in de westelijke raaien is gunstiger; mede door de suppleties is de langere termijn trend in MKL hier zeewaarts. Het zaagtandpatroon (kortere termijn) in de MKL is het gevolg van de uitgevoerde suppleties.



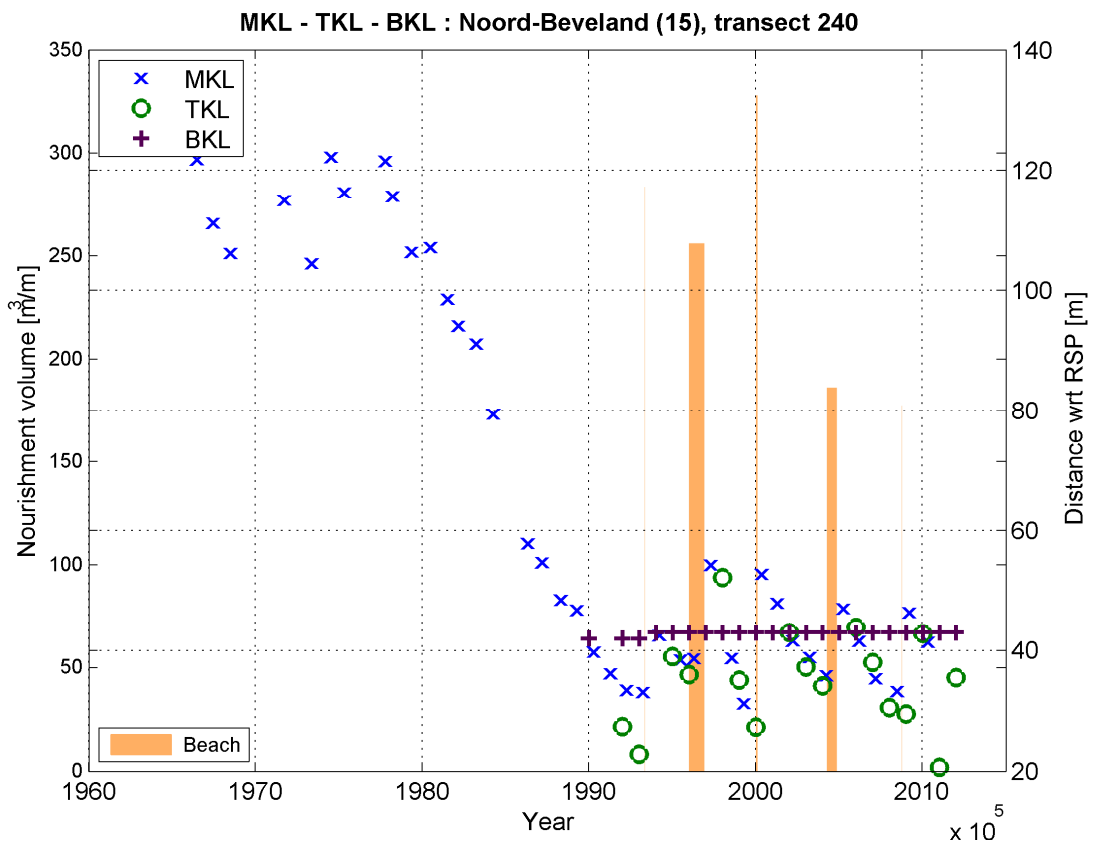
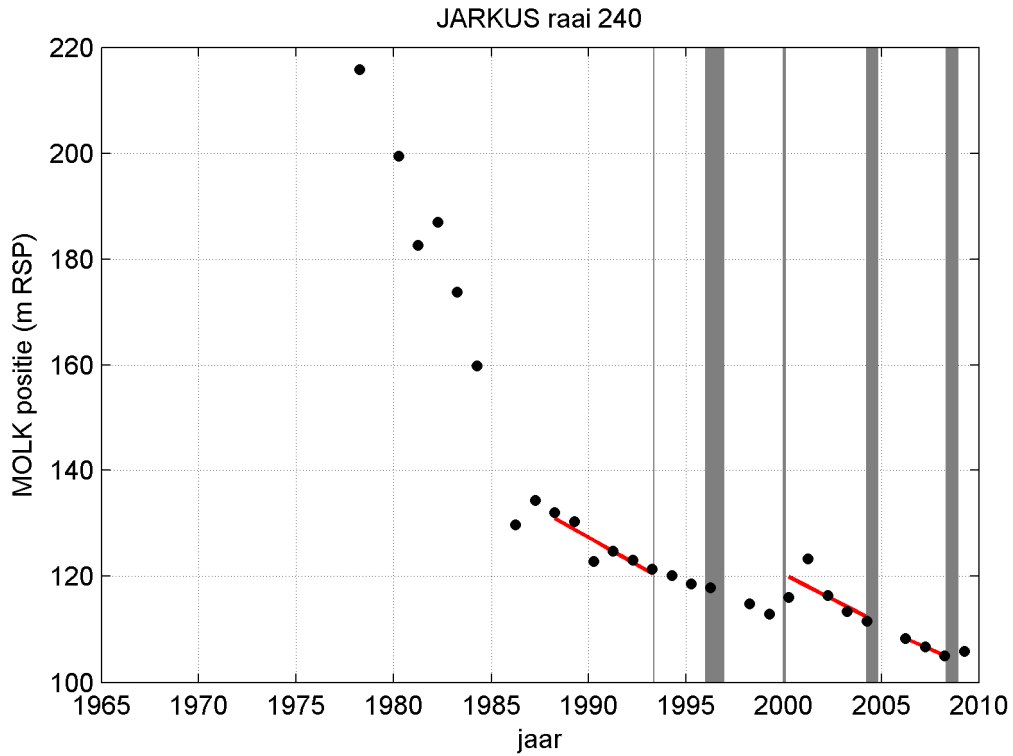
Figuur 2.5 Bodemontwikkeling JARKUS raai 160: timestack plot bodem in [m NAP] (bovenste figuur), profielontwikkeling van 1965 (donkerblauw) tot 2010 (donkerrood) (onderste figuur).



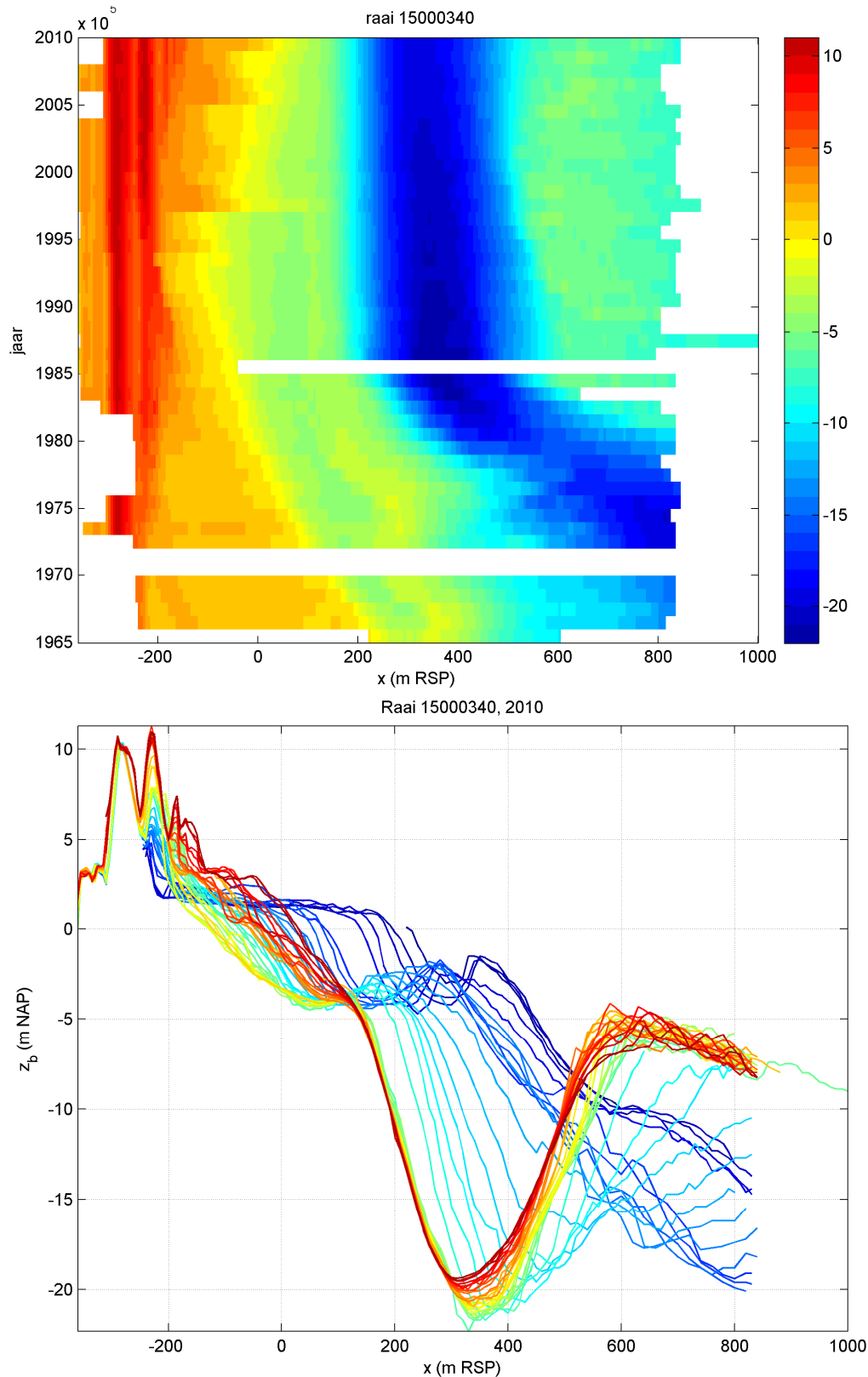
Figuur 2.6 Bodemontwikking JARKUS raai 160: MOLK positie (bovenste figuur), MKL, TKL en BKL positie en suppletievolumen (onderste figuur).



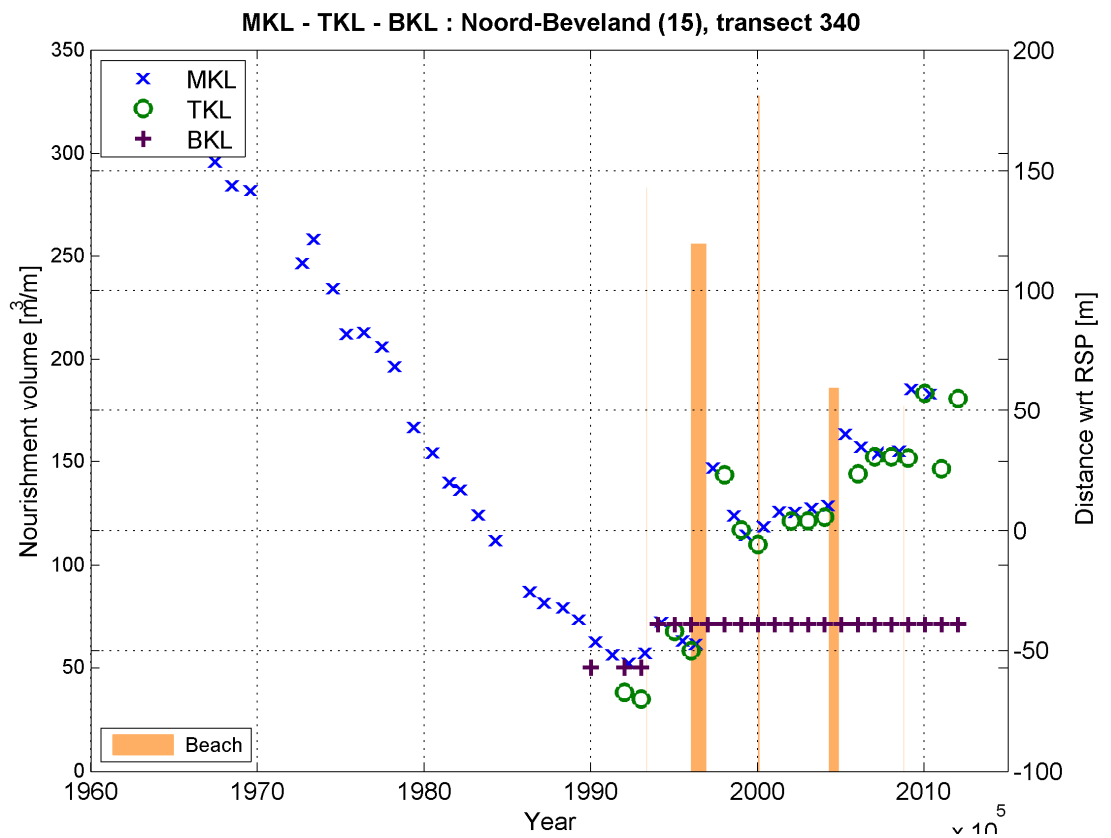
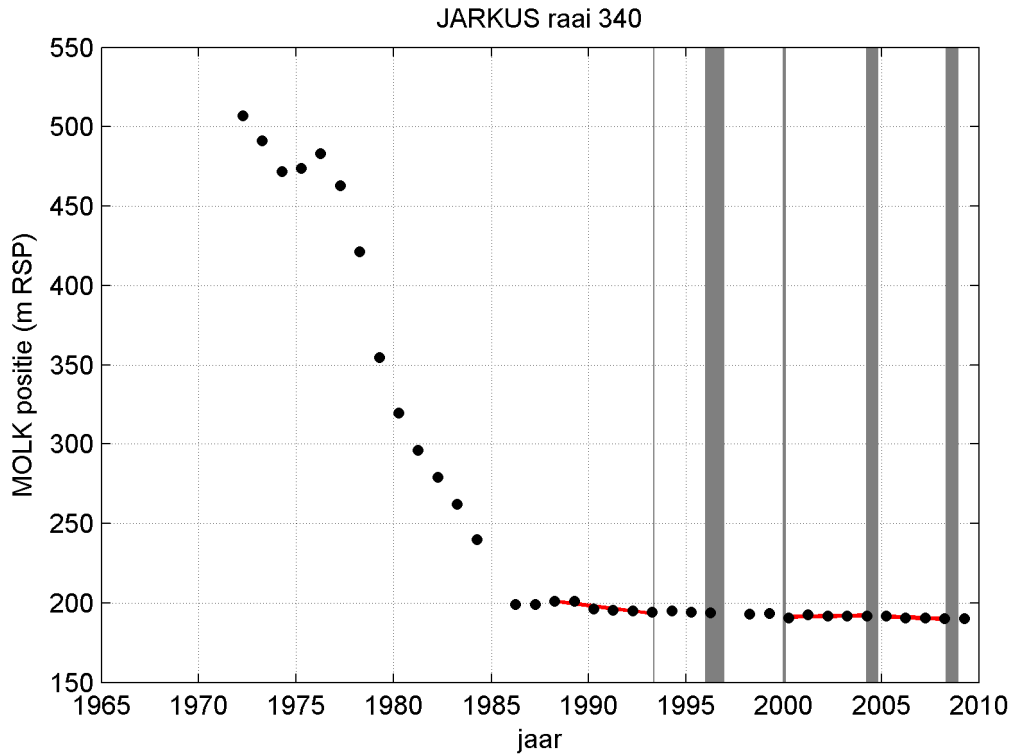
Figuur 2.7 Bodemontwikkeling JARKUS raai 240: timestack plot bodem in [m NAP] (bovenste figuur), profielontwikkeling van 1965 (donkerblauw) tot 2010 (donkerrood) (onderste figuur).



Figuur 2.8 Bodemontwikkeling JARKUS raai 240: MOLK positie (bovenste figuur), MKL, TKL en BKL positie en suppletievolumen (onderste figuur).



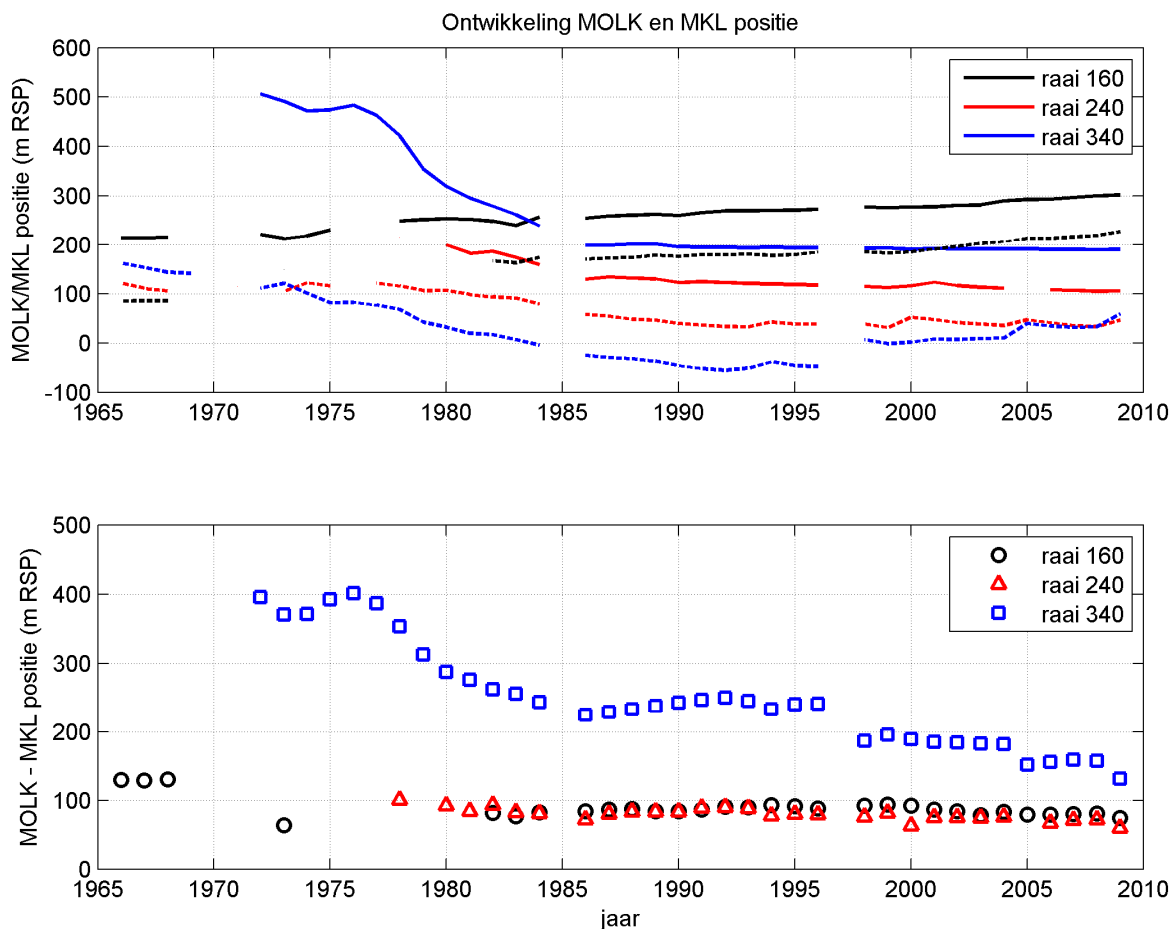
Figuur 2.9 Bodemontwikkeling JARKUS raai 340: timestack plot bodem in [m NAP] (bovenste figuur), profielontwikkeling van 1965 (donkerblauw) tot 2010 (donkerrood) (onderste figuur).



Figuur 2.10 Bodemontwikkeling JARKUS raai 340: MOLK positie (bovenste figuur), MKL, TKL en BKL positie en suppletievolumen (onderste figuur).



Een andere manier om de morfologische ontwikkeling te bestuderen, is via het verschil tussen MOLK en MKL positie, zie Figuur 2.11. Deze figuur laat zien dat de afstand tussen de MOLK en MKL positie het grootste is voor raai 340. Dit komt met name door de breedte van de MKL zone. Ook verkleint hier de afstand tussen de MKL en MOLK positie het snelste, wat voornamelijk veroorzaakt wordt door de zeewaartse uitbouw van de MKL zone en, in mindere mate, de landwaartse migratie van de geulwand (zie ook Figuur 2.10).



Figuur 2.11 De MOLK (getrokken lijnen) en MKL positie (gestippelde lijnen) voor de JARKUS raaien 160, 240 en 340 (bovenste figuur) en het verschil daartussen (onderste figuur).

De onderlinge afstand tussen de MKL en MOLK positie is tamelijk constant voor raai 160, doordat het kustprofiel in zijn geheel zeewaarts migreert. De afstand tussen de MOLK en MKL positie is het kleinste voor raai 240, ca. 60 m in 2009. Dit betekent dat de geul dicht bij het strand ligt. In de jaren '80 was de onderlinge afstand nog orde 80 m. Desondanks lijkt dat de MKL positie redelijk op peil is gehouden met strandsuppleties (zie ook Figuur 2.8), maar dit is dus voornamelijk door een ophoging van een steeds smaller worden strand. Op termijn is deze onderhoudsstrategie waarschijnlijk niet meer haalbaar is, omdat de trend is dat de MKL en MOLK posities convergeren. Na verloop van tijd ligt de Schaar van Onrust hier zo vlak voor de kust, dat het gesuppleerde mogelijk snel verdwijnt in de geul door ondermeer afschuiving en golferosie.

2.4 Belang bochtstroming

De sterke lokale kusterosie bij raaien 200-280 zou mogelijkwijs mede verklaard kunnen worden door de ligging in een buitenbocht van de Schaar van Onrust (zie Figuur 2.1 en Figuur 2.2). Om een bocht te doorlopen moet het water namelijk een centripetale versnelling ondergaan. Als reactie oefent het water een naar buiten gerichte centrifugale kracht uit die afhangt van de hoofdstroomsnelheid u en de bochtstraal r , u^2/r . Doordat $u(z)$ vanaf de bodem naar de waterspiegel over het algemeen toeneemt terwijl de drukgradiënt uniform over de waterkolom verdeeld is, is de resultante een naar binnen gerichte kracht en dwarsstroming in het onderste deel van de verticaal en een naar buiten gerichte kracht en dwarsstroming in het bovenste deel van de verticaal. De hiermee gepaard gaande bodemschuifspanning τ_{br} kan worden beschreven door:

$$\tau_{br} = \alpha \tau_{b\phi} = \frac{h}{r} \frac{2}{\kappa^2} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \tau_{b\phi} \quad (2.1)$$

met h de waterdiepte, κ (≈ 0.38) de Von Karman constante, g de zwaartekrachtsversnelling, C de Chézy ruwheidscoëfficiënt en $\tau_{b\phi}$ de bodemschuifspanning in de richting van de hoofdsnelheid. Typische waarden voor de Onrustpolder zijn $h = 15$ m, $C = 60$ m^{0.5}/s en $r = 3$ km. Dit geeft $\alpha \approx 0.05$, oftewel een additionele bodemschuifspanning van orde 5%. Evaring met riviermorphologie leert dat dit een niet te verwaarlozen bijdrage is aan de erosie van de buitenbocht. De relatief steile landwaartse geulwand (Figuur 2.7) lijkt dit vermoeden te bevestigen.

2.5 Hypothese erosie Onrustpolder

Gegeven het voorafgaande stellen we volgende hypothese:

De erosie in het middengedeelte van het kustvak Noord-Beveland wordt veroorzaakt door de grootschalige morfologische ontwikkeling van de buitendelta van de Oosterschelde (enerzijds de uitdiepende trend van de Roompot, anderzijds de laterale zanddruk door de zuidelijke migratie van de ondiepte Hompels) versterkt door lokale processen zoals bochtstroming en wellicht de opbouw van ondergrond.

Het oprukken van Schaar van Onrust, de belangrijkste oorzaak voor de kusterosie, is duidelijk afgenomen na de Oosterscheldewerken, maar zet zich nog wel steeds langzaam door. De MKL zone is inmiddels zo smal geworden dat doorgaan met strandsuppleties wellicht geen duurzame onderhoudsstrategie is. Het strand wordt feitelijk alleen maar opgehoogd, en bij verder oprukken van de geul zal het gesuppleerde zand waarschijnlijk steeds sneller eroderen. Door het uitvoeren van een geulwandsuppletie wordt de geulwand zeewaarts gelegd waarmee deze situatie (tijdelijk) voorkomen wordt. In paragraaf 3.3 wordt nader ingegaan op de verwachte morfologische ontwikkeling met en zonder geulwandsuppletie.



3 Beschouwing morfologisch effect geulwandsuppletie

3.1 Initiële effecten

3.1.1 Inleiding

Het is vanuit kustbeheer relevant te weten wat de initiële morfologische respons van het systeem op de aanleg van de geulwandsuppletie is. Dit bestuderen we in deze paragraaf aan de hand van de initiële impact van de suppletie op de stroomsnelheden. Een vereenvoudigde analytische beschouwing geeft ons inzicht in de dominante processen en leert ons wat de belangrijkste parameters zijn. Hiermee kunnen we de resultaten van Delft3D simulaties, die een meer gedetailleerd beeld van de invloed van de geulwandsuppletie geeft, beter interpreteren. Een lokale, significante toename van de snelheid in de MKL zone na suppleren vormt mogelijk een risico, aangezien dit duidt op een (initiële) toename van het sedimenttransport en additionele erosie. Een ander mogelijk risico is de verandering van het stroombeeld bij de Oosterscheldekering, verder afgelegen van de suppletie, in relatie tot onder meer erosiebescherming. Dit zal ook kort geadresseerd worden.

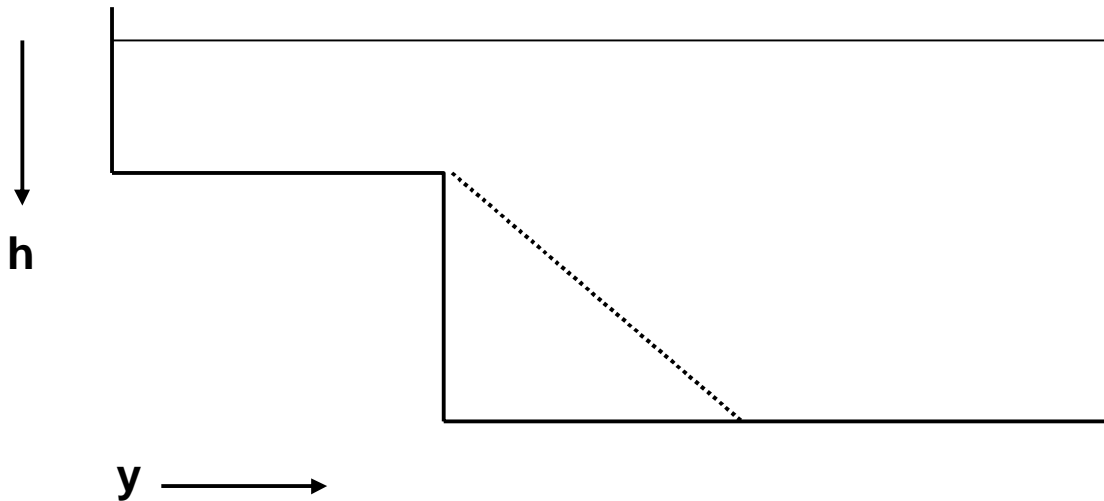
3.1.2 Analytische beschouwing

Het effect van een geulwandsuppletie op de stroomsnelheden wordt bepaald door massabehoud en bodemwrijving:

$$Q = Au = \int_0^B hu \, dy \quad (3.1)$$

$$u = C\sqrt{hi} \quad (3.2)$$

met Q het geuldebiet, A het doorstroomoppervlakte van de geul, B de geulbreedte, h de waterdiepte, u de stroomsnelheid, C de Chézy ruwheidscoëfficiënt en i het waterstandsverhang. Gegeven een vaste waterstand en geuldebiet, zorgt massabehoud voor een toename van de snelheden ter plekke van de suppletie aangezien A verkleind is en bodemwrijving voor een afname van de snelheden door de kleinere waterdiepte h . Voor de onderstaande schematische situatie kan de verandering van de stroomsnelheid door aanleg van een geulwandsuppletie analytisch worden bepaald.



Figuur 3.1 Schematisch dwarsdoorsnede met een MKL zone (links) en een geul (rechts) waarin een suppletie wordt gelegd (gestippelde lijn).

Met

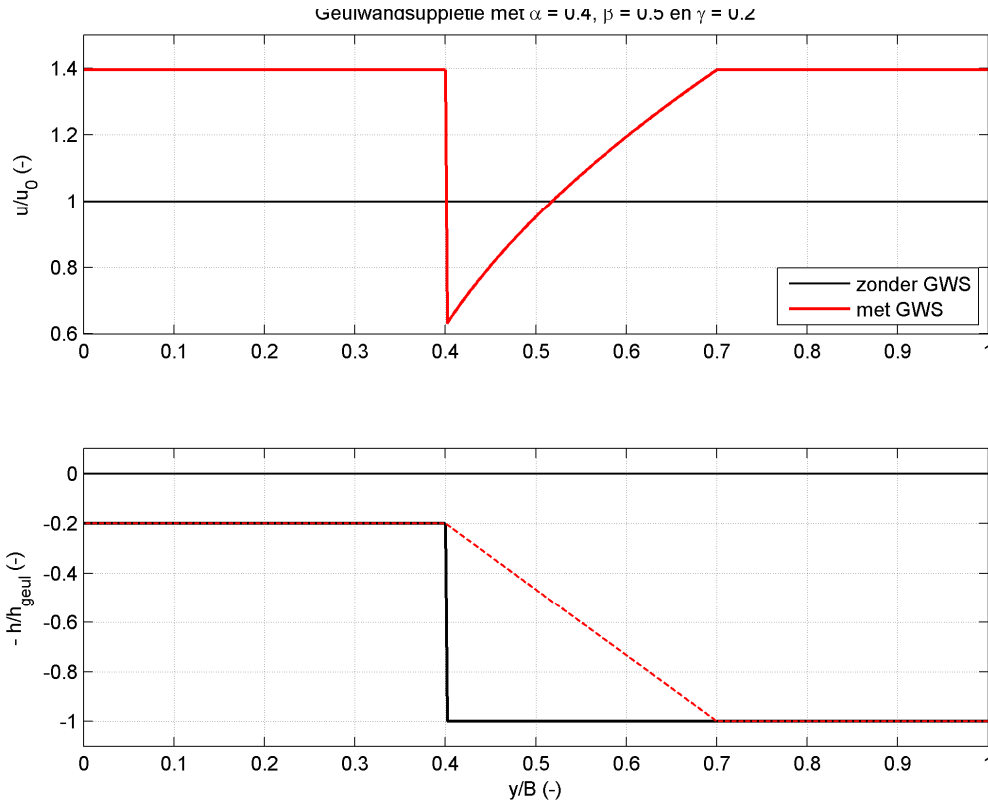
$$\begin{aligned}
 B_{\text{MKL}} &= \alpha B \\
 B_{\text{geul}} &= (1 - \alpha) B \\
 B_{\text{GWS}} &= \beta B_{\text{geul}} = (1 - \alpha) \beta B \\
 h_{\text{MKL}} &= \gamma h
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

geeft dit

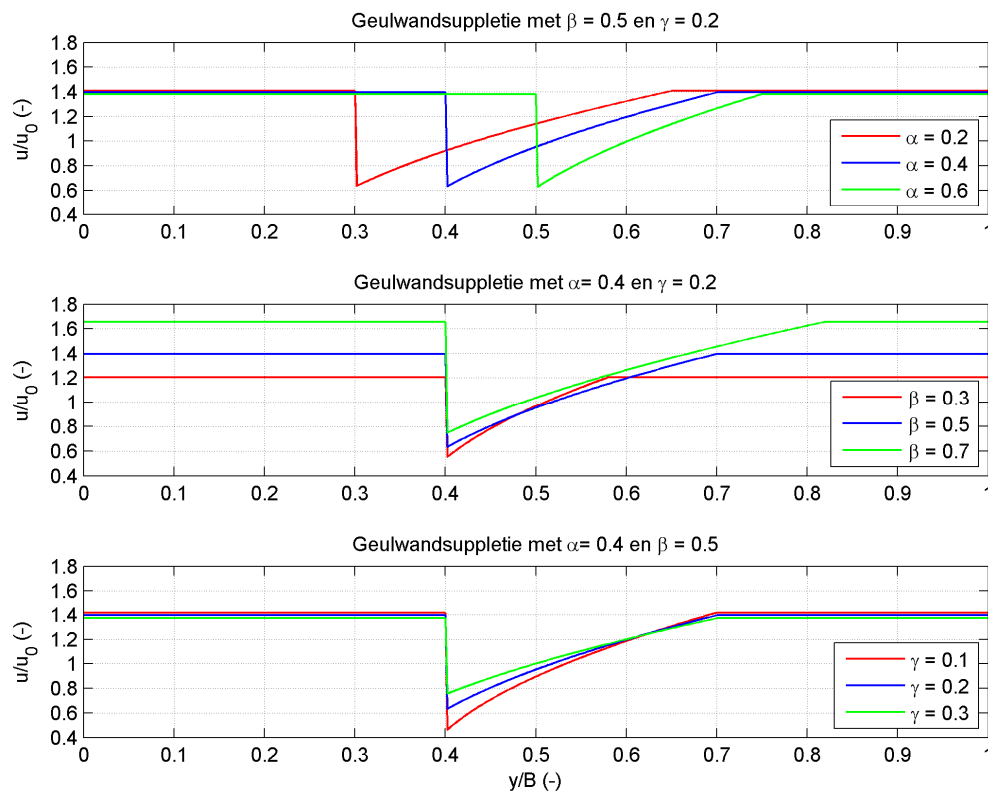
$$\frac{u(y)}{u_0} = \left(\frac{h(y)}{h_0(y)} \right)^{0.5} \frac{1 + \alpha (\gamma^{1.5} - 1)}{(1 - 0.6\beta) + \alpha (\gamma^{1.5} - 1 + 0.6\beta)}
 \tag{3.4}$$

Figuur 3.2 geeft een voorbeeld van een snelheidsverdeling volgens deze vergelijking met $B = 500$ m, $B_{\text{mkl}} = 200$ m, $B_{\text{geul}} = 300$ m, $B_{\text{GWS}} = 150$ m, $h_{\text{geul}} = 20$ m, $h_{\text{MKL}} = 4$ m. In dit geval neemt de snelheid in de MKL zone met 40% toe. Ter plekke van de geulwandsuppletie neemt de snelheid af met maximaal ~40%. De snelheidsafname vindt plaats tot $y/B \approx 0.5$, waarna de snelheid weer oploopt tot de maximale toename net naast de geulwandsuppletie op $y/B = 0.7$. Dit betekent dat in een goot gedeelte van de suppletie, in dit geval ca. 2/3, de snelheid toeneemt ten opzichte van het geval zonder suppletie. In werkelijkheid kan door de geulwandsuppletie het debiet door de geul afnemen. In deze analytische beschouwing wordt het geuldebiet constant verondersteld en dit effect dus niet meegenomen.

Figuur 3.3 toont het effect van α (relatieve breedte MKL zone en hiermee de breedte van de geul en de geulwandsuppletie), β (relatieve breedte geulwandsuppletie) en γ (relatieve hoogte MKL zone) op de snelheidsverdeling. Deze figuur laat zien dat α met name de verdeling van de snelheid bepaalt. Parameter β heeft een grote invloed op de grootte van de impact van de geulwandsuppletie. Parameter γ heeft een beperkte invloed op de snelheid. Wel is zichtbaar dat hoe dieper de suppletie wordt aangelegd, hoe kleiner de impact van de geulwandsuppletie, aangezien deze dan kleiner is in vergelijking met het totale doorstroomoppervlak van de geul.



Figuur 3.2 Effect geulwandsuppletie op snelheid volgens Vgl. (3.4).



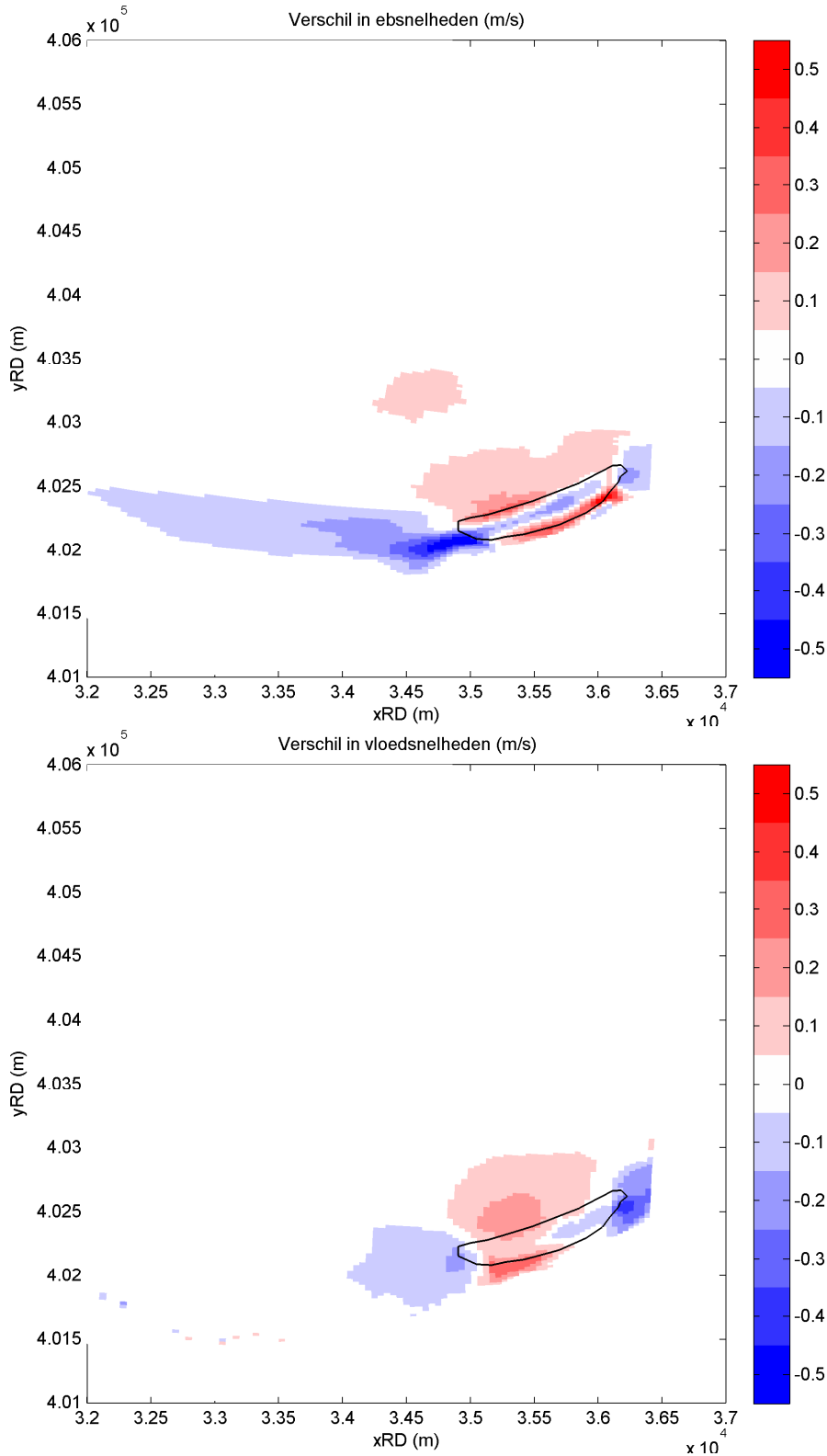
Figuur 3.3 Invloed parameters op effect geulwandsuppletie op snelheid volgens Vgl. (3.4).

3.1.3 Delft3D berekeningen

Door Van der Werf et al. (2010) zijn verschillende kustonderhoudsstrategieën doorgerekend met een niet-gekalibreerd 2DH (dieptegemiddeld) Delft3D model (alleen getijforcering). Hierbij is de impact van de ingreep op de snelheden en (initiële) zandtransporten bestudeerd. Eén ingreep betrof een geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust, aangelegd vanaf NAP -5 m met een 1:13 helling en een totaalvolume van ca. 2 Mm³. Dit is vergelijkbaar met de RWS ontwerpen die nu in het suppletieprogramma staan. Figuur 3.4 toont de verschillen tussen de simulaties met en zonder suppletie. De pieksnelheden zijn ~1.0-1.2 m/s in de Schaar van Onrust.

Deze figuur laat zien dat de snelheid ter plekke van de geulwandsuppletie afneemt, en landwaarts en zeewaarts hiervan toeneemt, in lijn met bovenstaande analytische beschouwing (met name goed zichtbaar voor de piek ebsnelheden). Het effect is ook van dezelfde orde van grootte (zie Figuur 3.2). Verder zijn er 2D effecten zichtbaar. Zo neemt de snelheid voor de suppletie af, door de divergentie van stroomlijnen; "de stroming wil om de blokkade heen". Na de geulwandsuppletie convergeren de stroomlijnen weer, maar het heeft een aanpassinglengte nodig om weer de snelheid te bereiken die correspondeert met de referentiesituatie. Uit de simulaties blijkt dat het vloeddebiet door de Schaar van Onrust met 12% afneemt, en het ebdebiet met 18%. Dit effect is niet meegenomen in de analytische beschouwing en daarom geeft deze een overschatting van de impact van de geulwandsuppletie op de stroomsnelheid.

Van der Werf et al. (2010) concludeerden, mede op basis van deze simulaties, dat het stroombeeld nabij de stormvloedkering maar beperkt wordt beïnvloed door deze ingreep, aangezien dit stroombeeld voornamelijk wordt bepaald door de grote getijdegeul Oude Roompot en de ingreep relatief klein is en wordt uitgevoerd in de Schaar van Onrust.



Figuur 3.4 Verschil in de grootte van de maximale ebsnelheden (boven) en vloednelheden (beneden) tussen een Delft3D simulatie met een zonder geulwandsuppletie. De polygoon geeft de locatie van de suppletie weer. Rood betekent een toename van de snelheid als gevolg van de suppletie, en blauw een afname.

3.2 Effecten middellange termijn

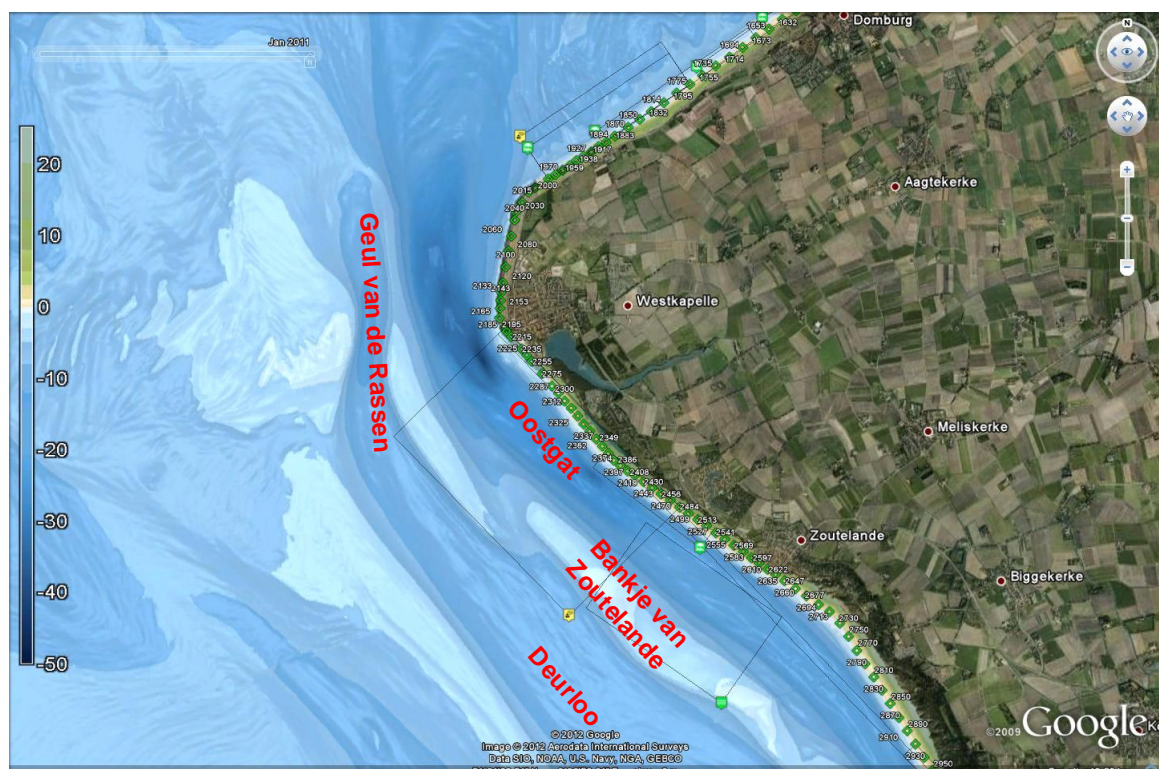
3.2.1 Inleiding

Om een eerste beschouwing te geven over het mogelijke middellange termijn (~2 tot 5 jaar) effect van een geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust, bestuderen we in deze paragraaf de waargenomen effectiviteit van in het verleden uitgevoerde geulwandsuppleties. In het gebied van de Onrustpolder is nog nooit een geulwandsuppletie uitgevoerd, daarom richten we ons op twee andere locaties langs de Nederlandse kust: het Oostgat (Walcheren) en Vlieland. We zijn ons er van bewust dat op deze locaties de werking van het morfologische systeem enigszins afwijkt van de huidige locatie, desalniettemin geeft een dergelijke (beknopte) analyse ons inziens een eerste indicatie over het te verwachte effect op de huidige locatie.

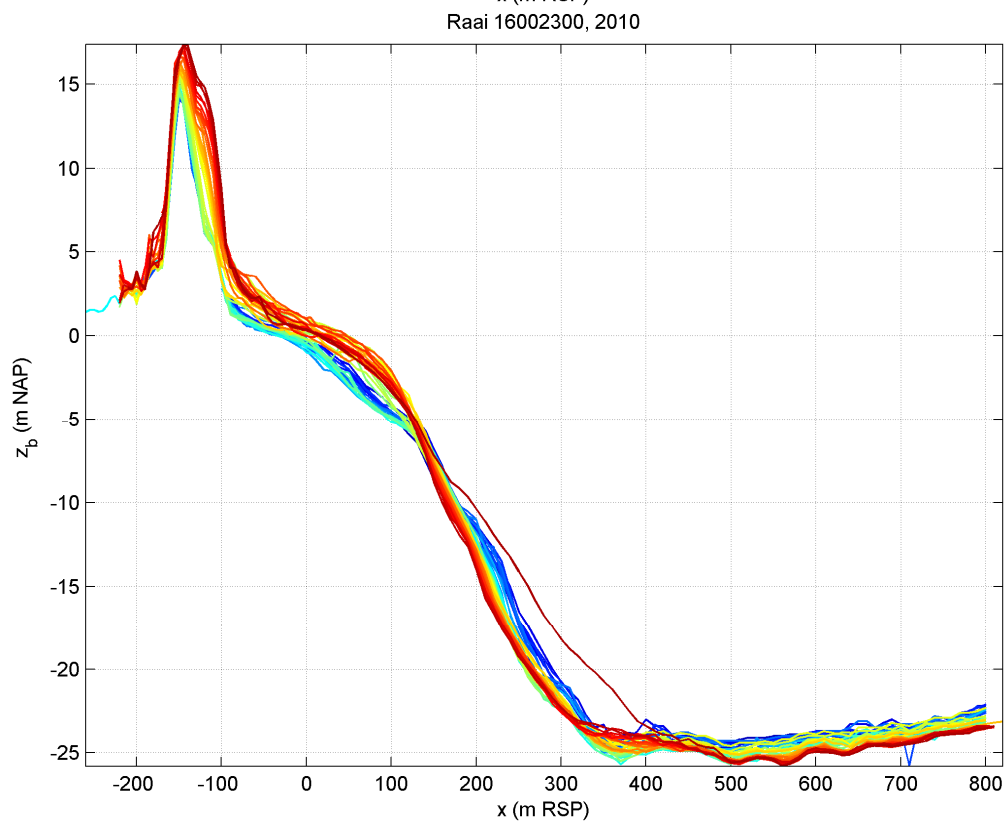
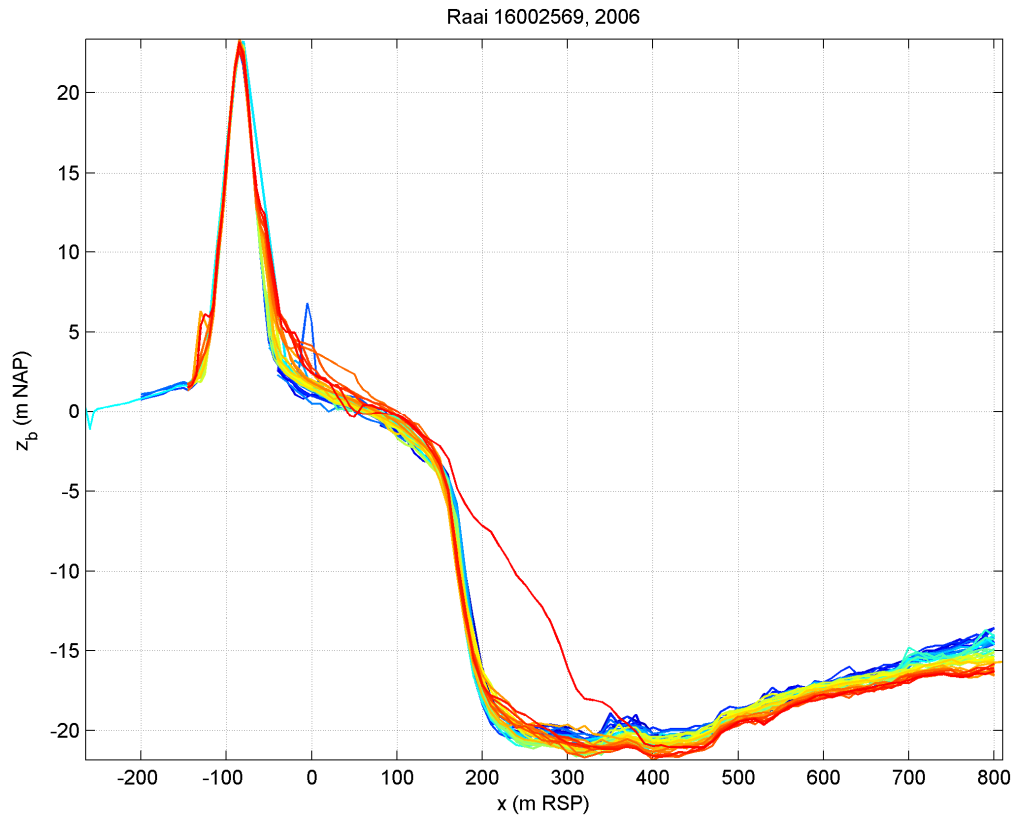
Naar verwachting bestaat er een relatie tussen de grootte van de ingreep en de respons van de kust (trendwijziging in MKL). De verhouding tussen het suppletievolume per strekkende meter en het doorstroomoppervlakte van de geul wordt hierbij gezien als indicator voor de grootte van de ingreep. De relatie kan op basis van een analyse van de JARKUS data bestudeerd worden, en dit geeft informatie over de respons op een tijdschaal van ~2-5 jaar.

3.2.2 Analyse Oostgat

In het Oostgat is tweemaal een geulwandsuppletie uitgevoerd. Tussen september en november 2005 is er 2.8 Mm^3 gesuppleerd in raaien 2475-2685, oftewel gemiddeld $1320 \text{ m}^3/\text{m}$. In april 2009 vond er ten noorden hiervan een geulwandsuppletie plaats (raaien 2180-2513); 6.3 Mm^3 in totaal wat correspondeert met $\sim 1950 \text{ m}^3/\text{m}$ (zie Figuur 3.5). In 2006 is er langs dit hele gebied een strandsuppletie aangelegd. Figuur 3.6 toont het dwarsprofiel voor JARKUS raaien 2469 en 2300 in het jaar na aanleg van de 2005 en 2009 suppletie. Uit deze figuur blijkt al dat het een relatief kleine ingreep betreft ten opzichte van het totale geuloppervlak.

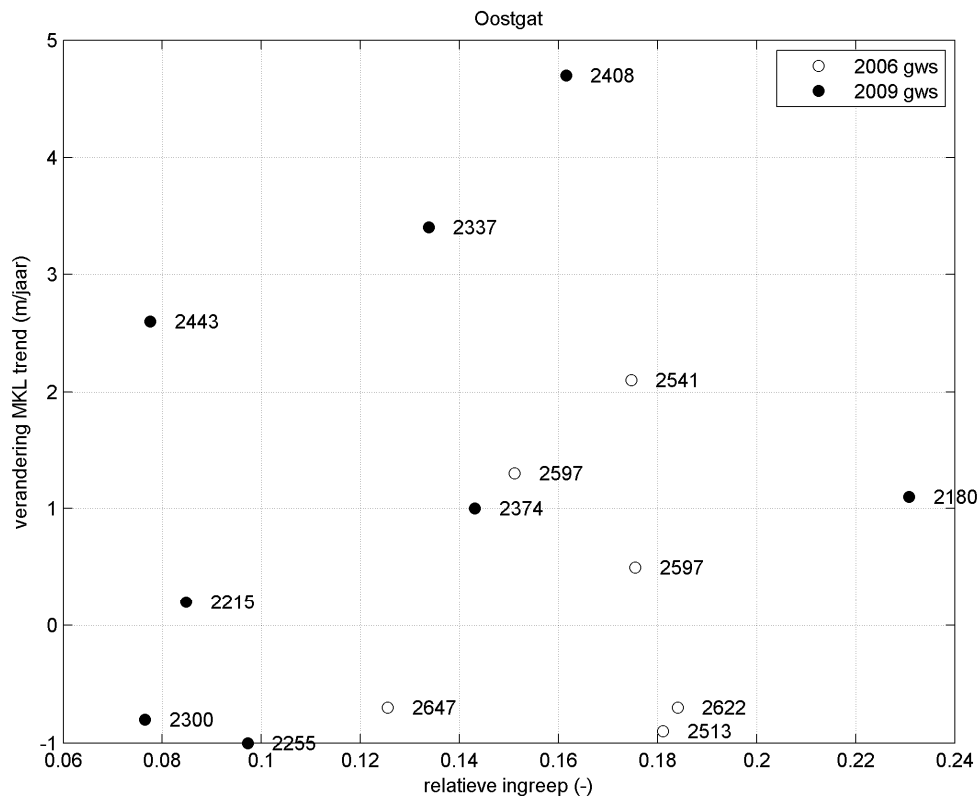


Figuur 3.5 Overzicht ligging geulen en geulwandsuppleties in het Oostgat.



Figuur 3.6 Dwarsprofiel in het jaar na aanleg van de 2005 (boven) en 2009 (onder) geulwandsuppletie in het Oostgat.

Voor een aantal raaien is het doorstroomoppervlakte van de geul het jaar voor en na aanleg van deze suppleties uitgerekend op basis van de gemeten bodemligging. Het Oostgat is een brede getijgeul, zodat de JARKUS data vaak niet de gehele geul bevatten. De berekening geeft dan ook een onderschatting van het werkelijke oppervlakte. Om de effectiviteit van de ingrepen te onderzoeken, vergelijken we de MKL trend voor de suppletie met die erna. Voor de 2005 suppletie betreft het de jaren 2002-2005 en 2007-2011, waarmee we de sprong in MKL positie door de 2006 strandsuppletie niet meenemen. Voor de 2009 suppletie vormen de jaren 2007-2009 de situatie voor en de jaren 2009-2011 de situatie na de ingreep. De 2009 geulwandsuppletie is uitgevoerd tot hooguit een waterdiepte van ca. 5 m. Het overgrote gedeelte van de suppletie valt dus buiten de MKL zone en eventuele veranderingen in de MKL positie komen dan ook niet doordat de geulwandsuppletie deels in de MKL zone is gelegd. Figuur 3.7 toont het resultaat van de analyse.



Figuur 3.7 Relatie tussen de relatieve ingreep (oppervlakte geulwandsuppletie/geuloppervlakte) en de verandering van de MKL trend voor een aantal JARKUS raaien in het Oostgat. Een positieve verandering van de MKL trend betekent een vermindering van een negatieve, landwaartse MKL trend, dan wel een toename van een positieve, zeewaartse MKL trend.

Deze figuur laat zien dat de 2005 en 2009 geulwandsuppleties een ingreep van ~8-24% van de geul betrof (n.b. dit betreft per definitie een overschatting, zie de eerdere opmerking). Over het algemeen reageert de MKL positief op de geulwandsuppletie. De trend verandert tussen -1 en +5 m/jaar. Er is geen relatie zichtbaar tussen de grootte van de ingreep en de MKL trend³.

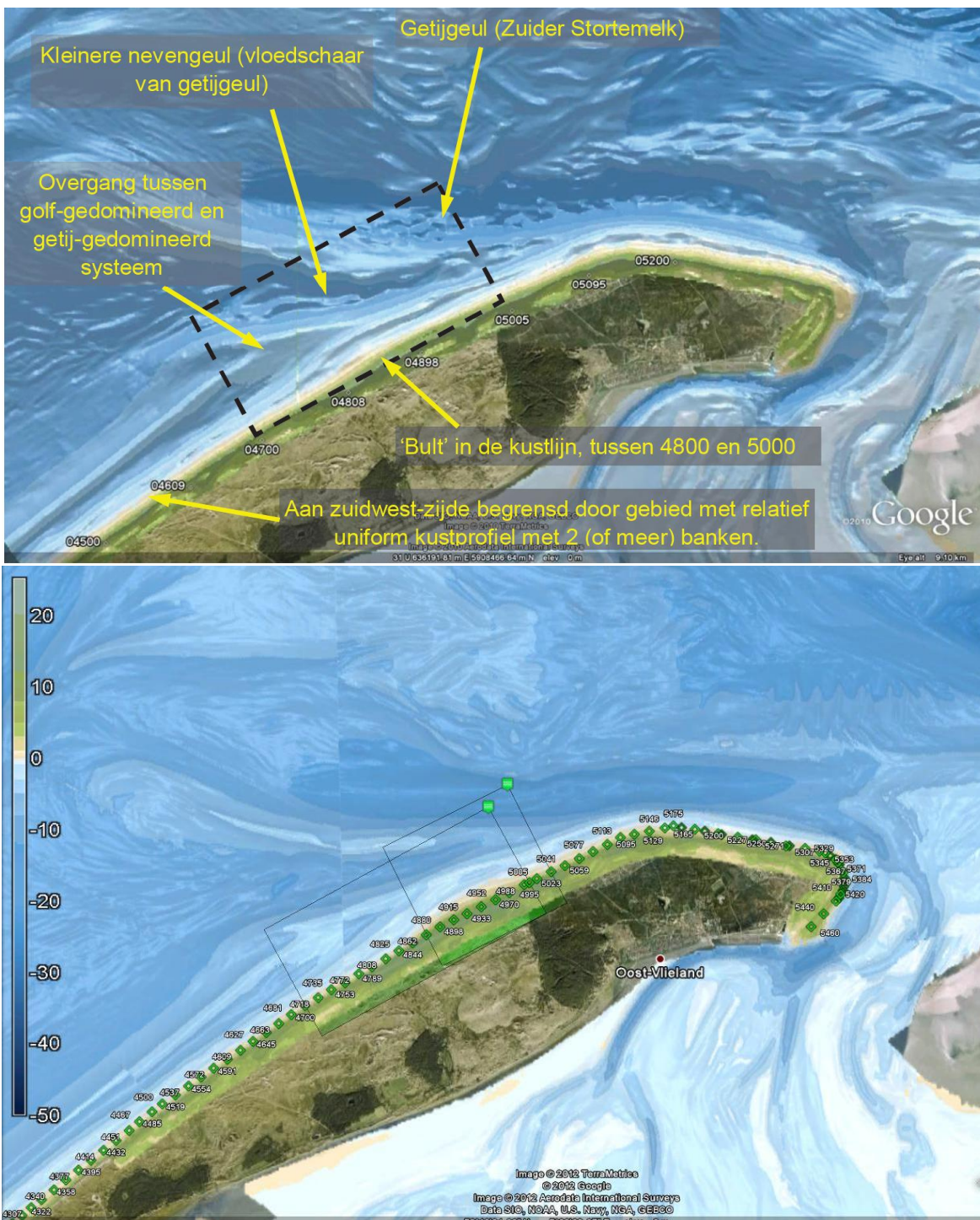
³ Evenals bij een vooroeversuppletie is het effect van een geulwandsuppletie pas na enige tijd (jaren) zichtbaar in de MKL ontwikkeling. Het effect van de suppletie wordt in de huidige methode daardoor mogelijk maar deels meegenomen. Ook wordt de relatie vertroebeld door uitgevoerde strandsuppleties.



3.2.3 Analyse Vlieland

Bovenstaande analyse hebben we ook uitgevoerd voor twee geulwandsuppleties in Oost-Vlieland (zie Figuur 3.8):

1. juni – september 2005, raaien 4860-5020, 1.2 Mm^3 over 1.6 km, gemiddeld $725 \text{ m}^3/\text{m}$.
2. januari – april 2009, raaien 4700-5000, 1.8 Mm^3 over 3.0 km, gemiddeld $595 \text{ m}^3/\text{m}$

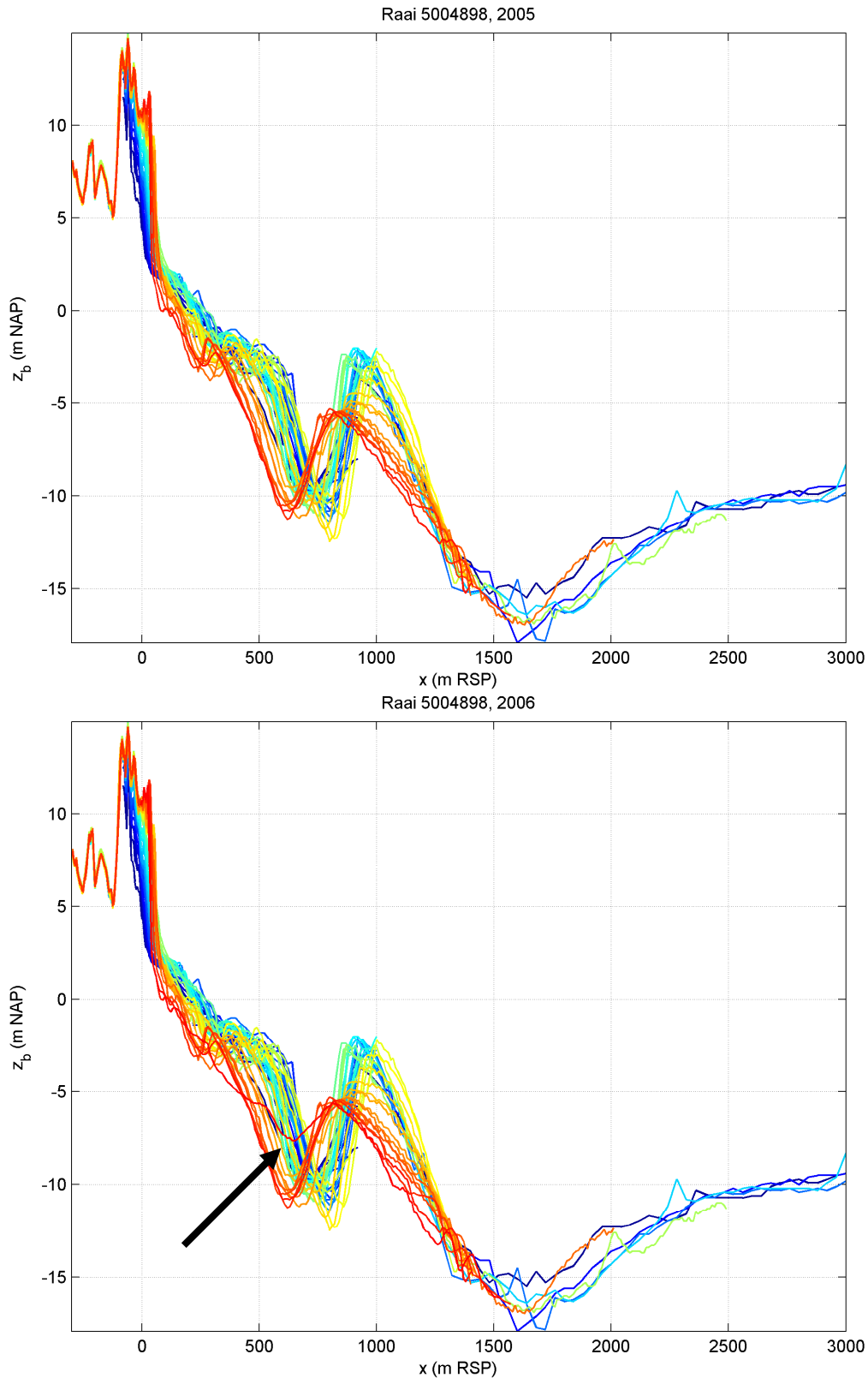


Figuur 3.8 Ligging geulen en geulwandsuppleties op Vlieland. Bovenste figuur afkomstig uit Van Oeveren (2011).



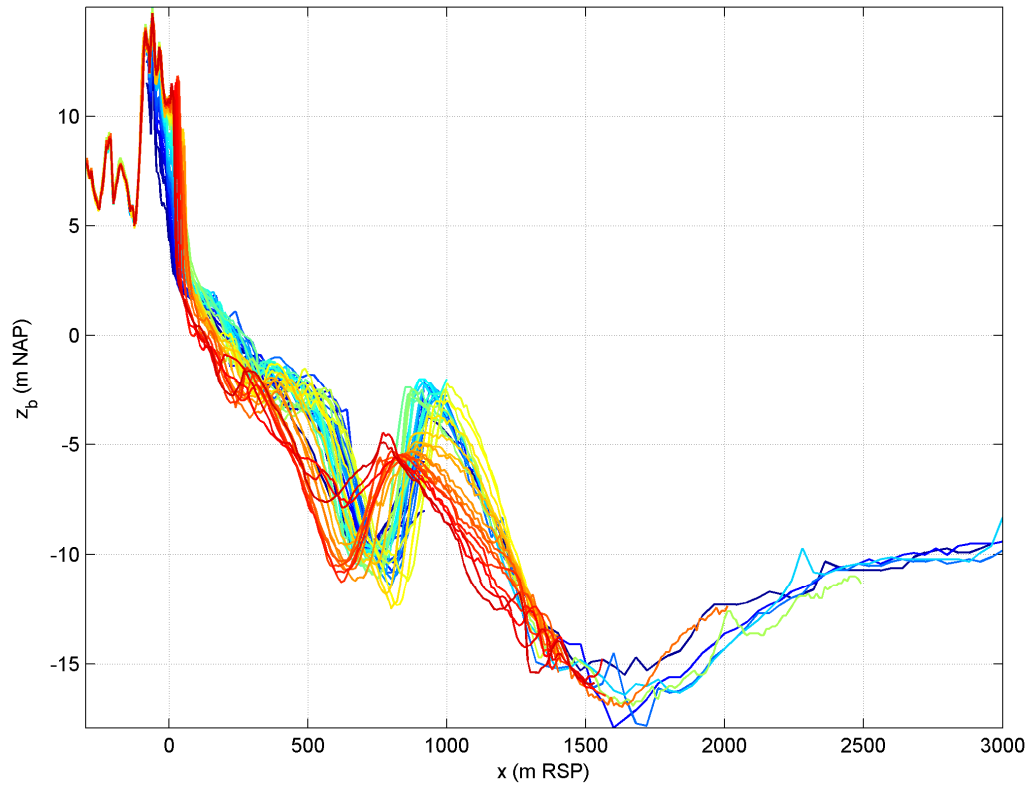
Figuur 3.9 en Figuur 3.10 tonen de bodemontwikkeling bij raai 4898 t/m 2005, 2006, 2008 en 2009, waarbij de 2005 en 2009 suppleties zichtbaar worden door het verschil tussen de 2006 en 2005 bodem en de 2009 en 2008 bodem, respectievelijk.

De twee suppleties overlappen gedeeltelijk. Verder is er in 2001 op het strand gesuppleerd tussen JARKUS raaien 4890 en 5010, en onderwater tussen raaien 4620 en 4850. Uit deze figuren blijkt al dat de geulwandsuppleties relatief groot waren ten opzichte van de geul. Het betreft hier suppleties in de vloed-schaar, die relatief klein is ten opzichte van de noordelijk gelegen getijdegeul Zuider Stortemelk die in verbinding staat met de Waddenzee. Anders dan het getijgedomineerde Oostgat, ligt dit gebied op de overgang van een golfgedomineerd systeem in het Westen met een relatief langsuniform kustprofiel met twee of meer banken en een getijgedomineerd systeem bij de kop van Vlieland.

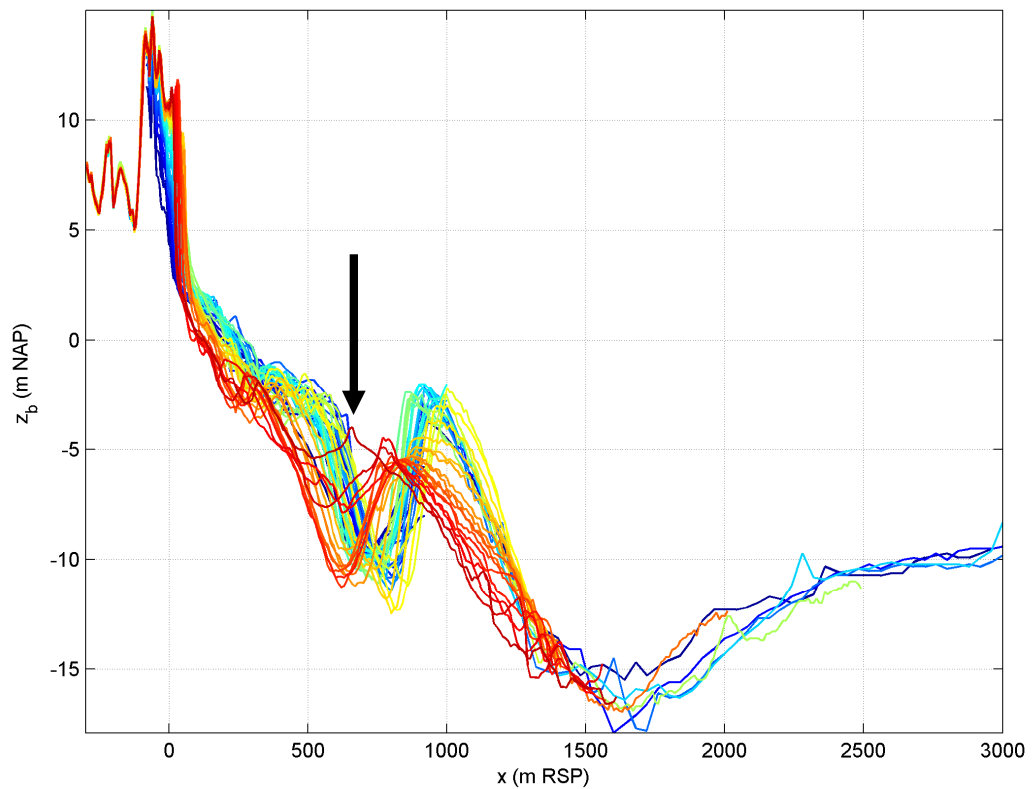


Figuur 3.9 Bodemontwikkeling bij JARKUS raai 4898, Vlieland t/m 2005 (bovenste figuur) en 2006 (onderste figuur). De pijl duidt de 2005 suppletie aan die zichtbaar is in de 2006 JARKUS meting.

Raai 5004898, 2008



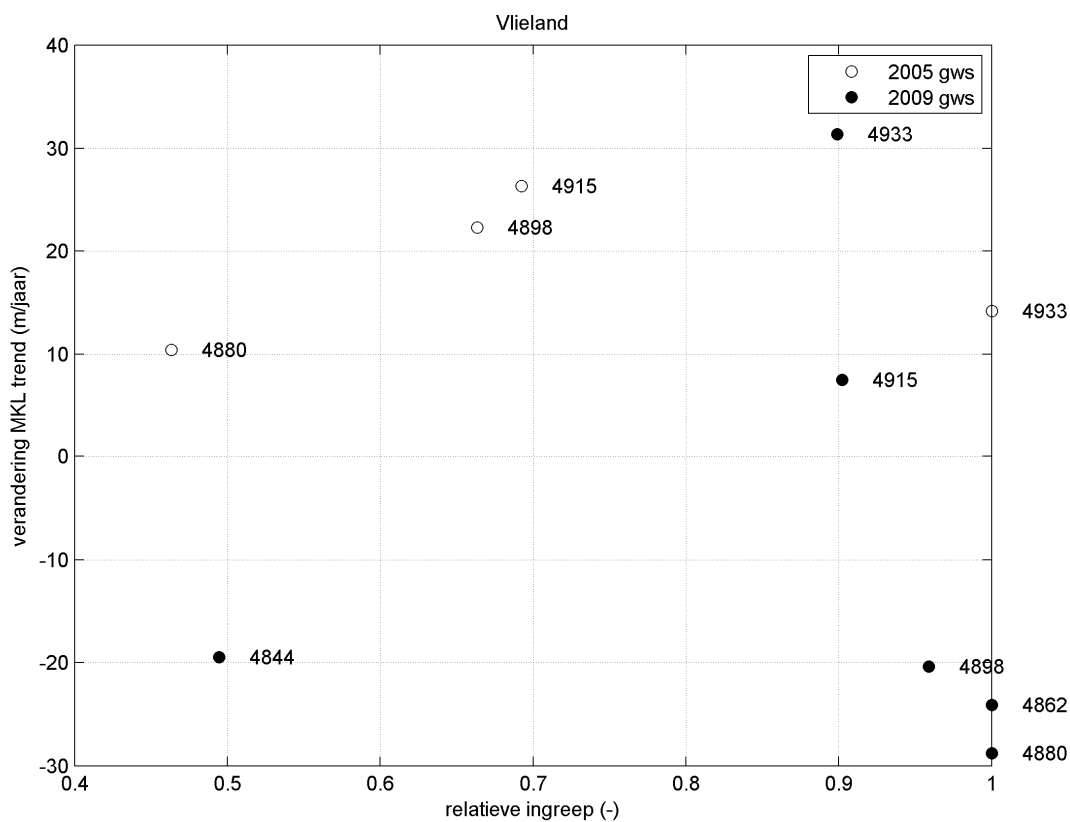
Raai 5004898, 2009



Figuur 3.10 Bodemontwikkeling bij JARKUS raai 4898, Vlieland t/m 2008 (bovenste figuur) en 2009 (onderste figuur). De pijl duidt de 2009 suppletie aan die zichtbaar is in de 2009 JARKUS meting.



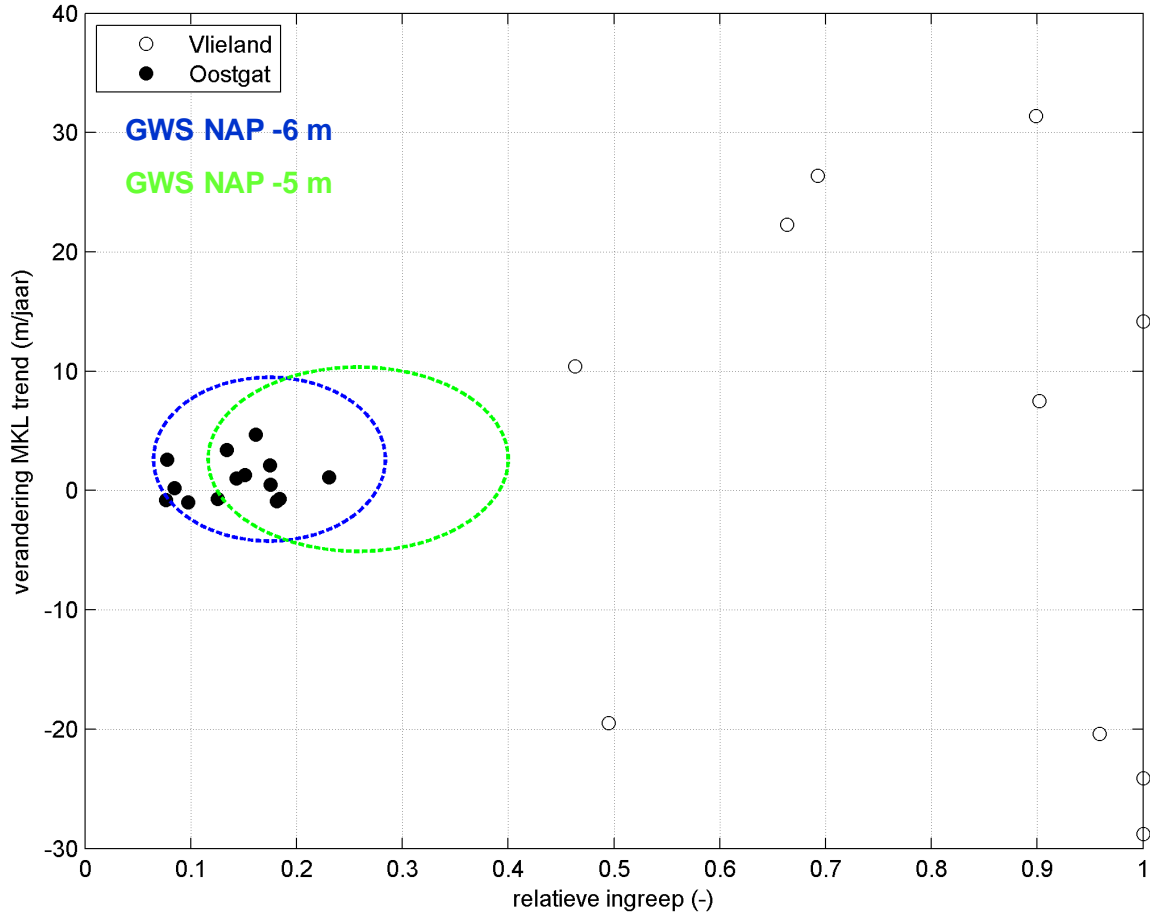
De relatie tussen de ingreep en de MKL trend wordt getoond in Figuur 3.11. De beschouwde periodes voor de MKL trend zijn: 2002-2005 (voor de 2005 geulwandsuppletie), 2006-2008 (na de 2005 en voor de 2009 geulwandsuppletie) en 2009-2011 (na de 2009 geulwandsuppletie). De suppleties waren relatief groot: tussen de 40 en 100% van de vloodschaar is dichtgestort. Ook de respons van de MKL trend is veel sterker en de spreiding groter dan bij het Oostgat; deze veranderde tussen de -30 en +40 m/jaar. Op raainiveau lijkt er een relatie te bestaan tussen de grootte van de ingrepen en de verandering van MKL trend: een grotere ingreep resulteert in een minder positieve/meer negatieve MKL trend.



Figuur 3.11 Relatie tussen de relatieve ingreep (oppervlakte geulwandsuppletie/geuloppervlakte) en de verandering van de MKL trend voor een aantal JARKUS raaien op Vlieland. Een positieve verandering van de MKL trend betekent een vermindering van een negatieve, landwaartse MKL trend, dan wel een toename van een positieve, zeewaartse MKL trend.

3.2.4 Hypothese impact geulwandsuppletie op middellange termijn

Door de data van het Oostgat en Vlieland te combineren krijgen we Figuur 3.12. Hierin zijn de RWS ontwerpen van de geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust indicatief aangegeven. Hieruit volgt dat een grotere ingreep meer risico (lees meer spreiding) met zich meebrengt in termen van de MKL trend op de termijn van ~2-5 jaar. Verder lijkt het erop dat er een optimum is in het effect van de geulwandsuppletie op de MKL trend. Ook is het duidelijk dat er veel spreiding is tussen de verschillende raaien.



Figuur 3.12 Relatie tussen de relatieve grootte van de geulwandsuppletie en de verandering van de MKL trend. De ovals geven indicatief de parameter ruimte aan van de RWS ontwerpen van de suppletie in de Schaar van Onrust.

Deze overwegingen leiden tot de volgende hypothese over het effect van een geulwandsuppletie op de MKL trend op de termijn van ~2-5 jaar:

Een relatief kleine geulwandsuppletie (ten opzichte van het doorstroomoppervlakte van de geul) heeft een positief effect op de MKL positie. De suppletie fungeert als erosiebuffer, waardoor de eroderende processen vertraagd worden.

Een relatief grote geulwandsuppletie heeft een negatief effect op de MKL positie. De geul heeft een waterafvoerende functie, en als de geul dusdanig wordt geblokkeerd, “wil de stroming een nieuwe geul graven in het kustprofiel”.

De grote spreiding duidt op het belang van lokale processen zoals golfwerking, bochtstroming en de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare harde lagen. Ook wordt de relatie vertroebeld door de aanwezigheid van strandsuppleties.

Bovenstaande gaat mogelijk niet op als door de geulwandsuppletie de stroming door de getijdegeul wordt tegengehouden en een andere getijdegeul de waterafvoer kan overnemen.

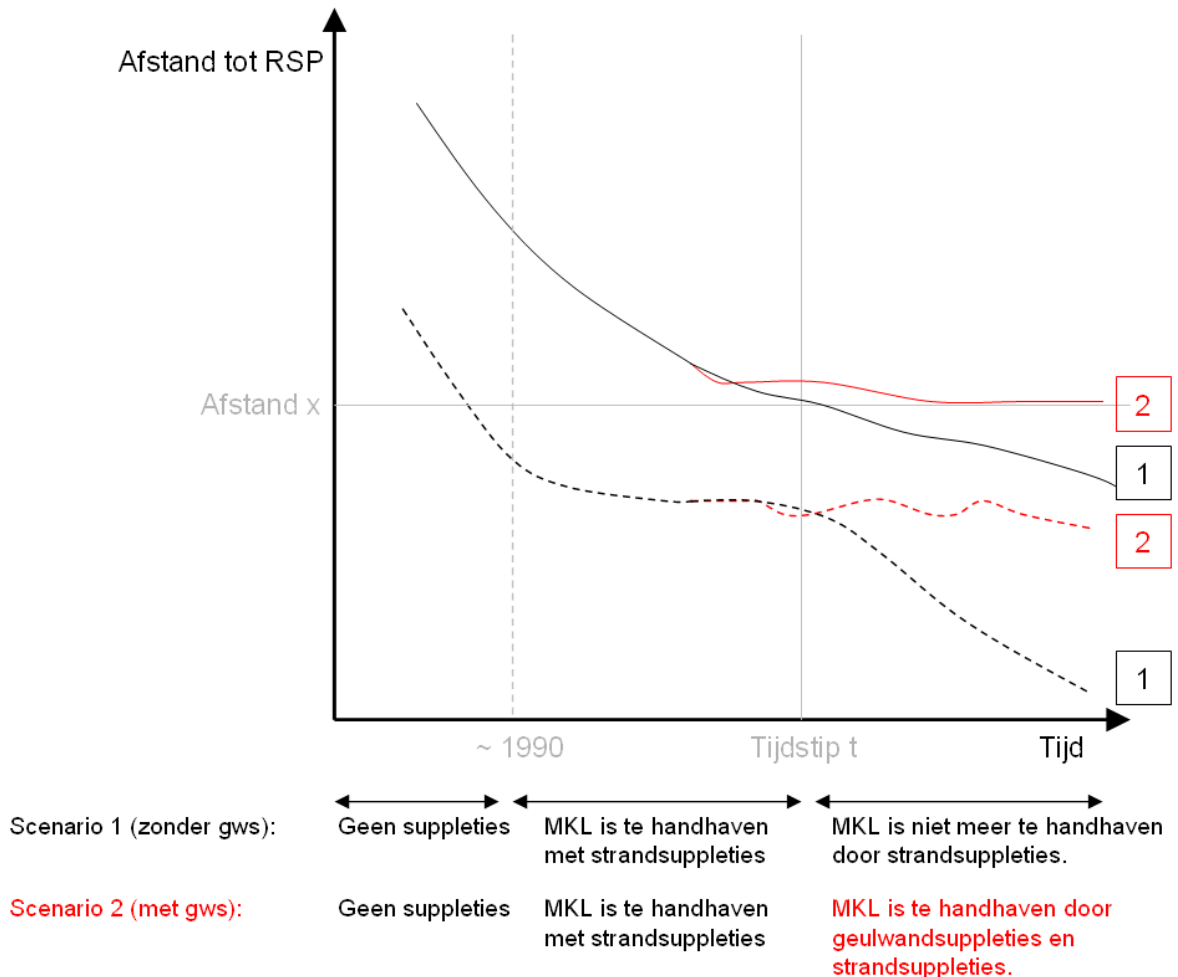


3.3 Verwachte impact geulwandsuppletie Schaar van Onrust

3.3.1 Hypothese morfologische ontwikkeling met en zonder geulwandsuppletie

Voordat we de globale RWS ontwerpen van de geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust nader beschouwen, bespreken we eerste onze hypothese ten aanzien van de morfologische ontwikkeling met en zonder geulwandsuppletie op basis van voorafgaande analyses (zie Figuur 3.13):

- Voor 1990 vonden er geen strandsuppleties plaats. De Schaar van Onrust rukte op (landwaartse trend MOLK positie) en de kust erodeerde sterk (landwaartse trend MKL positie).
- Sinds 1990 zijn er veel strandsuppleties uitgevoerd. Daardoor is de structurele landwaartse verplaatsing van de MKL sterk verminderd. Ook de landwaartse trend van MOLK positie lijkt afgenomen te zijn (waarschijnlijk mede door de aanleg van de Oosterscheldewerken), maar de geul verplaatst zich nog wel landwaarts.
- Als de landwaartse verplaatsing van de MOLK positie zich doorzet en de afstand tussen de MOLK en MKL positie blijft verkleinen, neemt naar verwachting de landwaartse trend van de MKL positie toe, omdat het kustprofiel versteilt. Dit wordt schematisch aangeduid met een de afstand x op tijdstip t . (In werkelijkheid is het waarschijnlijk een meer geleidelijk proces.) Het lijkt schier onmogelijk vooraf een inschatting te maken van afstand x en tijdstip t .
- Dan kan de landwaartse verplaatsing van de MKL niet langer tegengegaan worden door strandsuppleties, omdat het gesuppleerde zand zeer snel erodeert.
- Door het uitvoeren van geulwandsuppleties wordt de landwaartse verplaatsing van de MOLK (tijdelijk) gestopt.
- Hierdoor kan op (langere) termijn de landwaartse trend in de MKL positie met behulp van strandsuppleties worden tegengegaan.
- Hierbij moet de bovenstaande hypothesen over het initiële en middellange termijn (~2-5 jaar) effect van de geulwandsuppletie op de MKL positie in acht worden genomen.

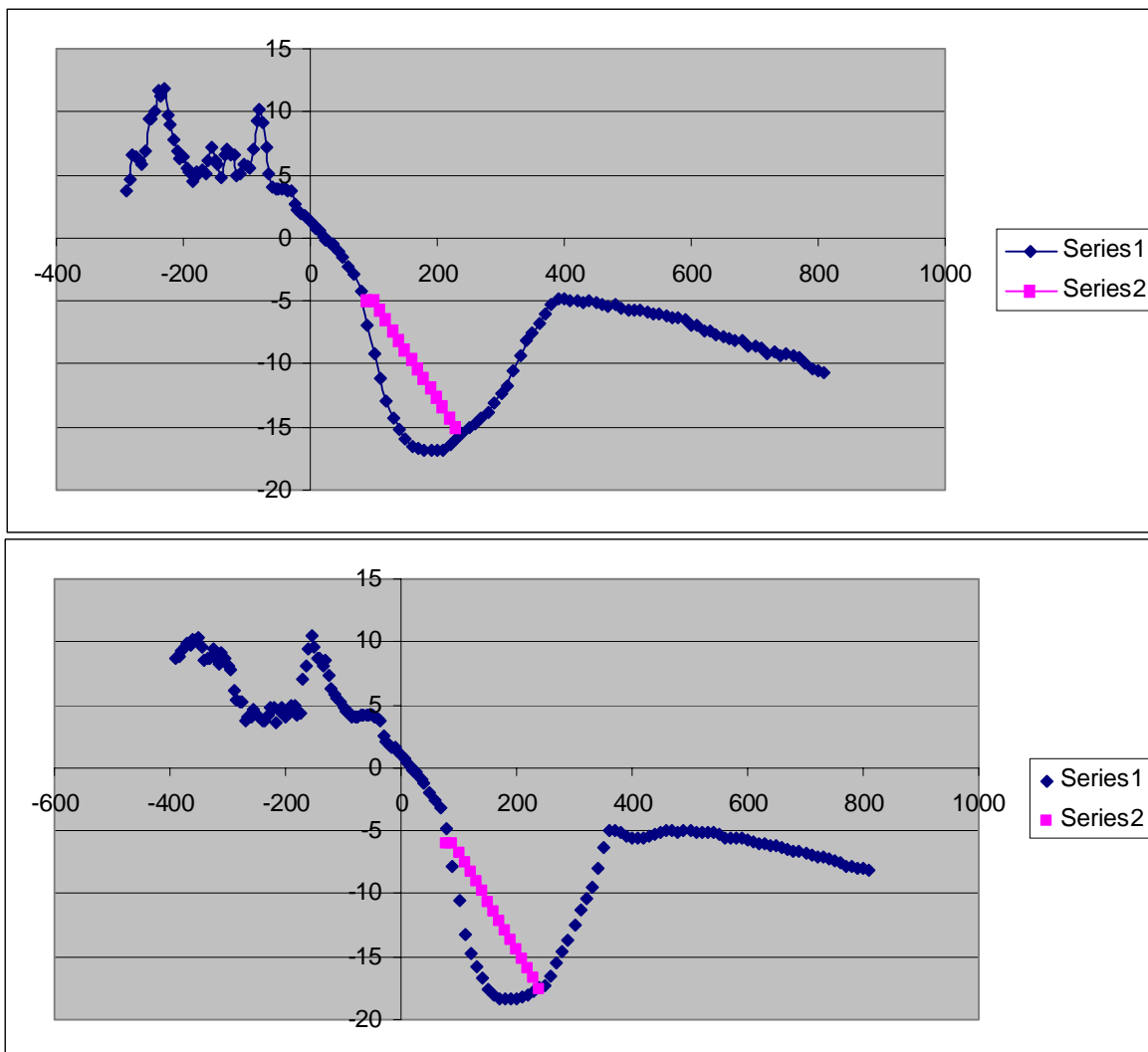


Figuur 3.13 Schematische ontwikkeling MOLK positie (getrokken lijnen) en MKL positie (gestippelde lijnen). De zwarte lijnen geven een indicatie van de morfologische ontwikkeling voor een scenario met strandsuppleties maar zonder geulwandsuppleties en de rode lijnen voor een scenario waarbij de kust onderhouden wordt middels een combinatie van strand- en geulwandsuppleties.



3.3.2 Nadere analyse globale ontwerpen geulwandsuppletie

RWS Waterdienst heeft twee globale ontwerpen gemaakt voor de geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust. Het beslaat raaien 160-360. De aanleghoogte is NAP -5 m, dan wel NAP -6 m, en de zeewaartse helling is 1:13. Figuur 3.14 toont de profielen bij JARKUS raai 240. Dit correspondeert met een volume van 1.5 en 1.2 Mm³, gemiddeld 740 en 580 m³/m, voor de suppletie op NAP -5 m en NAP -6 m, respectievelijk.



Figuur 3.14 Globaal ontwerp geulwandsuppletie in JARKUS raai 240 met een aanleghoogte van NAP -5 m (bovenste figuur) en NAP -6 m (onderste figuur)

De geplande geulwandsuppleties in de Schaar van Onrust liggen qua grootte tussen die in het Oostgat en Vlieland (zie Figuur 3.12). Op basis van de data-analyses voor deze twee gebieden, zal naar verwachting over het algemeen de MKL trend positief beïnvloed worden, maar dit kan per raai verschillen. Het effect zal sterker zijn voor de grotere suppletie, maar het risico wellicht ook. Verder is het de verwachting dat de snelheden in de MKL zone direct na aanleg zullen toenemen, met als risico een tijdelijke toename van de erosie.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Beantwoording vragen

4.1.1 Onderzoeksvragen

1. Welke processen zijn verantwoordelijk voor de kusterosie bij de Onrustpolder?

Onze hypothese is dat de erosie in het middengedeelte van het kustvak Noord-Beveland wordt veroorzaakt door de grootschalige morfologische ontwikkeling van de buitendelta van de Oosterschelde (enerzijds de uitdiepende trend van de Roompot, anderzijds de laterale zanddruk door de zuidelijke migratie van de ondiepte Hompels) versterkt door lokale processen zoals bochtstroming en wellicht de opbouw van ondergrond.

Het oprukken van Schaar van Onrust, de belangrijkste oorzaak voor de kusterosie, is duidelijk afgenomen na de Oosterscheldewerken, maar zet zich nog wel steeds langzaam door. De MKL zone is inmiddels zo smal geworden dat doorgaan met strandsuppleties wellicht geen duurzame onderhoudsstrategie is. Het strand wordt feitelijk alleen maar opgehoogd, en bij verder oprukken van de geul zal het gesuppleerde zand waarschijnlijk steeds sneller eroderen.

2. Wat is het effect van een geulwandsuppletie op deze kusterosie?

Onze hypothese, mede gebaseerd op een analyse van geulwandsuppleties in het Oostgat en Vlieland en de MKL respons op een termijn van 2-5 jaar, is dat een geulwandsuppletie twee belangrijke effecten heeft:

1. Het fungeert als erosiebuffer. Het voorkomt dat de geul vrijwel direct onder het strand komt te liggen. Hiermee worden de eroderende processen vertraagd en de MKL zal hier positief⁴ op reageren.
2. Het blokkeert de stroming door de geul. Gegeven de waterafvoerende functie van de geul, zal de stroming een nieuwe geul graven in het kustprofiel, wat een negatief effect heeft op de MKL.

Het belang van beide processen lijkt af te hangen van de verhouding tussen suppletie- en geulvolume per strekkende meter. Hiernaast spelen de volgende zaken een rol:

- Lokale processen zoals golfwerking, bochtstroming en de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare harde lagen
- De aanwezigheid van strandsuppleties.
- Bovenstaande gaat niet op als door de geulwandsuppletie de stroming door de getijdegeul wordt tegengehouden en een andere getijdegeul de waterafvoer kan overnemen.

Uit een analytische en numerieke beschouwing blijkt dat initieel de stroomsnelheden ter plekke van de geulwandsuppletie afnemen, maar aanzienlijk toenemen in de MKL zone en het zeewaartse deel van de suppletie en de geul. De belangrijkste sturende parameter lijkt de breedte van de suppletie. Deze toename van snelheden bij de kust kan leiden tot een initiële toename van kusterosie.

⁴ Hiermee wordt bedoeld: een toename van de zeewaartse MKL trend dan wel een afname van de landwaartse MKL trend.



4.1.2 Beheersvragen

1. Zijn er risico's bij het uitvoeren van een geulwandsuppletie?

Hierbij zijn we uitgegaan van de RWS ontwerpen: een geulwandsuppletie in raaien 160-360 met een aanleghoogte van NAP -5 (-6) m, een zeewaartse helling van 1:13, een totaalvolume van 1.5 (1.2) Mm³, en gemiddeld 740 (580) m³/m. Gezien de grootte van de suppleties in verhouding met het geuloppervlakte en de bevindingen voor het Oostgat en Vlieland, verwachten we gemiddeld gezien een positief effect op de MKL trend, met mogelijksterke verschillen van raai tot taai. Het effect zal sterker zijn voor de hogere suppletie, maar ook het risico, dat wil zeggen de spreiding in het verwachte effect op de MKL positie.

Naar verwachting zullen de snelheden bij de kust initieel toenemen, wat kan leiden tot extra kusterosie. Dit effect zal verminderen in de tijd.

Het stroombeeld nabij de stormvloedkering wordt naar verwachting maar beperkt beïnvloed door een geulwandsuppletie van deze omvang in de Schaar van Onrust, aangezien dit stroombeeld voornamelijk wordt bepaald door de grote getijdegeul Oude Roompot.

2. Hoe kunnen we deze eventuele risico's beheersen?

De mogelijke additionele initiële kusterosie kan worden bestreden met een strandsuppletie. Het is hierbij van belang dat de strandsuppletie tegelijkertijd met of kort voor de geulwandsuppletie wordt aangelegd. Gezien de relatief sterke erosie van de uitgevoerde strandsuppleties lijkt het verstandig de strandsuppletie maximaal 1 jaar voor geulwandsuppletie uit te voeren.

4.2 Aanbevelingen

Erg belangrijk is het om na aanleg van de geulwandsuppletie en de eventuele strandsuppletie de morfologische ontwikkeling te monitoren. Dus naast de jaarlijkse JARKUS metingen extra bodempeilingen in de Schaar van Onrust en het aanpalende kustgebied. Deze data kunnen dan gebruikt worden om bovenstaande verwachte morfologische ontwikkeling te toetsen.

Verder verdient het aanbeveling om de in deze studie geformuleerde hypothesen over de processen verantwoordelijk voor erosie door migrerende geulen en het effect van geulwandsuppletie hierop nader te onderzoeken. Naast een uitgebreidere data-analyse kan dit middels modelberekeningen waarmee systematisch de invloed van geulwandsuppletie op de stroming, zandtransporten en morfologische ontwikkeling kan worden bestudeerd. Een aandachtspunt hierbij is het eventuele belang van bochtstroming.

Meer algemeen gesteld is het gedrag van getijdegeulen en geulwandsuppleties een interessant en relevant onderzoeksonderwerp. De eerste geulwandsuppleties zijn nu 5-7 jaar geleden uitgevoerd zodat de datareeks lang genoeg is om de morfologische respons te bestuderen. Tot op heden is er nog geen structureel onderzoek uitgevoerd naar de werking van geulwandsuppleties die in de loop der jaren langs de Nederlandse kust zijn uitgevoerd. Om geulwandsuppleties verder te optimaliseren (en risico te beperken) wordt aanbevolen om dit onderzoek, in overleg met de Waterdienst, de aankomende jaren te programmeren in KPP B&O Kust.

5 Referenties

Cleveringa, J. (2008). Morphodynamics of the Delta coast (south-west Netherlands), Quantitative analysis and phenomenology of the morphological evolution 1964-2004. Report A1881, Alkyon, The Netherlands.

De Groot, A.V. (2002). Kustlijnhandhaving Onrustpolder, Evaluatie van de effecten van morfologisch baggeren en strandsuppleties. Stageverslag, Universiteit Utrecht, Nederland.

McCall, R. (2010). Investigation of the morphological response of a Sand Engine in the Banjaard. Memo *Building with Nature* project, Deltares/Ecoshape, Nederland.

Van der Werf, J.J., Doornenbal, P.J., McCall, R.T. (2010). Verkenning van strategieën voor het kustonderhoud bij de Onrustpolder, Zeeland. Rapport 1202349-000, Deltares, Nederland.

Van Oeveren, C. (2011). KLZ- Suppletie strategie: Regionale advisering Vlieland Noord-Oost. Memo 1202345-000-ZKS-0001, Deltares, Nederland.