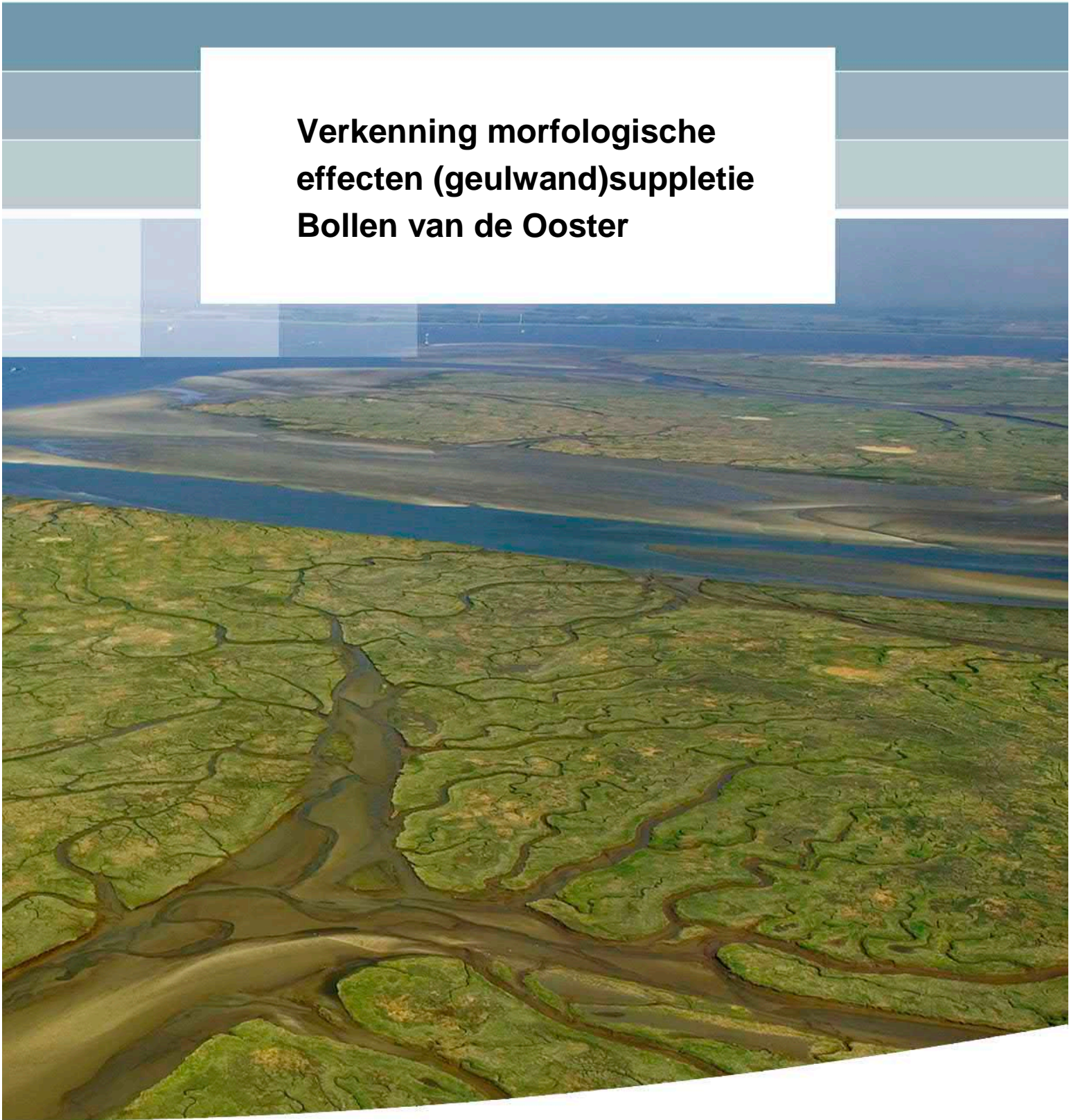


**Verkenning morfologische
effecten (geulwand)suppletie
Bollen van de Ooster**



Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster

Edwin Elias

1220040-006

Titel

Verkenning morfologische effecten (geulwand)suppletie Bollen van de Ooster

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
KPP-B&O Kust. Regionaal Advies	1220040-000	1220040-000-ZKS-0005	53

Trefwoorden

verkenning, geulwand-suppletie, Bollen van de Ooster, Grevelingenmond




Samenvatting

Langs de zuidwest kust van Goeree (raaien 1250-1500) vindt er structurele erosie plaats. Uit de toetsing van de kustlijn (1-1-2015) volgt dat de BKL overschreden gaat worden. Om de BKL te handhaven is een suppletie gewenst. Door middel van analyse van de beschikbare bodemmetingen, aangevuld met eenvoudige modelsimulaties geven we in deze rapportage antwoord op de vraag: *Wat zijn de gevolgen van een geulwandsuppletie in de geul tussen de Bollen van Ooster en Goeree en is het verstandig om deze uit te voeren?*

Een analyse van de beschikbare meetdata geeft een goed beeld van de opgetreden veranderingen rond de kop van de Bollen van de Ooster en de aanliggende kust van Goeree. Op grote schaal kan worden geconcludeerd dat de Bollen van de Ooster zich noord-oostwaarts (en landwaarts) verplaatst. De modelresultaten laten zien dat juist tijdens afgaand getij op zee, hoge zuidwaarts gerichte stroomsnelheden langs de kust van Goeree staan. Deze stromingen worden samengeknepen en versnellen tussen de Bollen van de Ooster en de kust. Dit veroorzaakt hier hoge (in)stroomsnelheden. Deze stromingen verklaren de aanwezigheid van de diepe geul die zich aan de kop van de Bollen van de Ooster heeft gevormd. De Bollen van de Ooster verplaatsen zich noordoostwaarts door de overheersende golfgedreven transporten. Het erosiegebied dat samenhangt met de geul en stromingen verplaatst zich dus ook langzaam noordwaarts.

Een belangrijke conclusie is dat een reguliere geulwandsuppletie, waarbij de geul slechts gedeeltelijk wordt volgestort, leidt tot grotere instroomsnelheden ter plaatse van de suppletie. Hierdoor zullen zal de suppletie eroderen met verliezen die waarschijnlijk hoger zijn dan op basis van de huidige trend zou worden afgeschat. Er treden geen significante (negatieve) veranderingen in stromingen op langs de kust buiten het suppletiegebied. Een geulwandsuppletie waarbij de gehele geul wordt afgesloten zorgt ervoor dat de instroming niet meer kan plaatsvinden, waardoor ook het gebied van erosie zal verdwijnen. Deze ingreep zal echter wel een significante morfologische verandering in het gebied veroorzaken.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Okt. 2015	dr. E.P.L. Elias		ir. P.K. Tonnon		drs. F.M.J. Hoozemans	

Status

definitief

Inhoudsopgave

1 Inleiding	1
1.1 Doelstelling	1
1.2 Studiegebied	2
1.3 Beheer en onderhoud van de kust	5
2 Werking van het Morfologische Systeem	9
2.1 Achtergronden van het Morfologische Systeem Voordelta (Elias en Van de Spek, 2014)	9
2.2 Grevelingenmonding	12
2.3 Morfologische ontwikkelingen Bollen van de Ooster en de kust van Goeree	18
3 Modelsimulaties; Effect van suppleren op stroomsnelheden	35
3.1 Model schematisatie	35
3.2 Model resultaten	41
4 Discussie en Conclusies	49
4.1 Morfologie van de Bollen van de Ooster	49
4.2 Effecten van Geulwandsuppleties	50
5 Literatuur	53
 Bijlage(n)	
A Aanvullende simulaties.	A-1

1 Inleiding

1.1 Doelstelling

Langs de zuidwest kust van Goeree (raaien 1250-1500) vindt er structurele erosie plaats. Uit de toetsing van de kustlijn (1-1-2015) volgt dat de BKL hier overschreden gaat worden. Om de BKL te handhaven is een suppletie gewenst. Een reguliere strandsuppletie geeft hier waarschijnlijk geen duurzame oplossing voor kustlijnhandhaving. De erosie wordt namelijk veroorzaakt door een relatief klein oprukkend geultje gelegen tussen de Bollen van Ooster en de kust van Goeree. Rijkswaterstaat overweegt nu om een geulwandsuppletie uit te voeren met als doel de levensduur van een eventuele strandsuppletie te verlengen. Als gevolg van een dergelijke geulwandsuppletie kan er een verandering in gedrag van de geul ontstaan, waardoor deze dicht kan gaan. De effecten van het dicht gaan van de geul op de omgeving zijn op dit moment onbekend. In het kader van het Regionaal Advies, onderdeel van het project KPP-B&Okust is aan Deltares gevraagd, middels een beknopte studie, inzichtelijk te krijgen wat de mogelijke effecten van een geulwandsuppletie tussen de Bollen van Ooster en Goeree zijn. In deze rapportage geven we daarom antwoord op de volgende hoofdvraag: *Wat zijn de gevolgen van een geulwandsuppletie in de geul tussen de Bollen van Ooster en Goeree en is het verstandig om deze uit te voeren?*

Ter beantwoording van deze vraag maken we gebruik van zowel modellen en meetdata (Vaklodingen en JarKus). Met behulp van modelsimulaties wordt inzichtelijk gemaakt hoe de stroming na een eventuele (gedeeltelijke) afsluiting van de geul als gevolg van de geulwandsuppletie veranderd. Door analyse van de beschikbare JarKus en Vaklodingen proberen we antwoord te geven op de vraag: Hoe ontwikkelt de bollen van de Ooster zich? We richten ons met name op de deelvragen:

- Gaat een deel van de Bollen van de Ooster op termijn aanlanden?
- Gaat de geul tussen de Bollen van de Ooster en Goeree uit zichzelf dicht en op welke termijn?
- Is er een cyclisch gedrag te ontdekken in de ontwikkeling van de Bollen van Ooster en zo ja, wat is het effect op dit gedrag wanneer de geul dicht gezet wordt?
- Zijn er situaties die onwenselijk zijn (zoals het ontstaan van een tijdelijke diepe geul door zanddruk die voor extra erosie zorgt?) en wordt dit versterkt als de geul wordt (gedeeltelijk) wordt afgesloten.

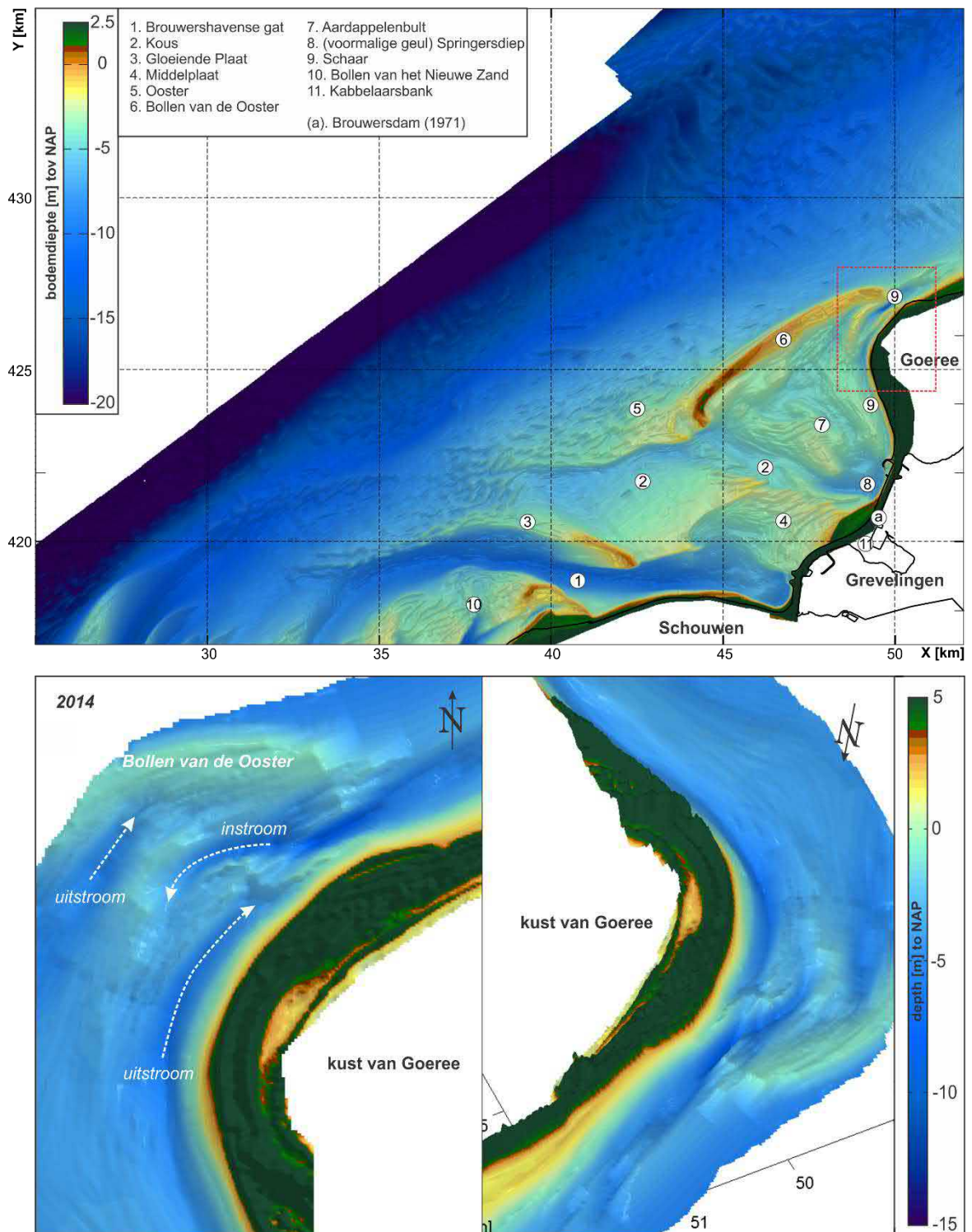
Na een introductie in het studiegebied (paragraaf 1.2) en een beknopt overzicht van het uitgevoerde kustbeheer (paragraaf 1.3) volgt in het tweede hoofdstuk van dit rapport een beschrijving van het morfologische systeem. Hierin wordt ingegaan op de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Voordelta en Grevelingenmonding (paragraaf 2.1 en 2.2). Deze twee paragrafen zijn gebaseerd op in 2014 en 2015 uitgevoerd onderzoek naar de morfologische ontwikkelingen van de Voordelta. In paragraaf 2.3 wordt ingegaan op de ontwikkeling van de noordelijke punt van de Bollen van de Ooster en de naastgelegen kust van Goeree. In hoofdstuk 3 volgen de resultaten van modelsimulaties waarin de veranderingen in stroombeeld worden weergegeven voor verschillende varianten van de geulwandsuppletie. Het laatste hoofdstuk bestaat uit de samenvatting en discussie waarbij ingegaan wordt op de verwachte morfologische ontwikkelingen rond de Bollen van de Ooster en de mogelijke effecten van de geulwandsuppletie hierop.

1.2 Studiegebied

De Bollen van de Ooster is een zandbank in de Grevelingenmonding. De Grevelingenmonding ligt ingeklemd tussen de eilandkoppen van Goeree en Schouwen (Figuur 1.1). De ontwikkelingen van de Grevelingenmonding en de naastliggende Haringvlietmonding vertonen grote overeenkomsten. Beide gebieden zijn veranderd van een actieve naar een passieve buitendelta; een ondiep platen-geulen gebied waar sediment (landwaarts) wordt herverdeeld. Het Haringvliet loopt wat voor in de ontwikkeling en kan daardoor een goede indicatie geven van de toekomstige ontwikkeling van de Grevelingenmonding.

Het noordelijke gedeelte van de Grevelingenmonding wordt gedomineerd door ondiepe plaatgebieden (Middelplaat [4], Kabellaarsbank [11] en Aardappelenbult [7]) die ingeklemd liggen tussen de Brouwersdam, Goeree en De Bollen van de Ooster (zie Figuur 1.1). De Bollen van de Ooster [6] heeft zich na afsluiting van het Grevelingen estuarium (in 1971) ontwikkeld tot een hoge, langgerekte plaat (of spit) met een zuidwest-noordoost oriëntatie. Ingeklemd tussen deze plaat en de kust van Goeree ligt een kleine geul Schaar [9]. De voormalige hoofdgeul Kous/Springersdiep [2,8] is vrijwel geheel opgevuld met sediment. Alleen in het zuiden, langs de kust van Schouwen, is er nog een diepere getijgeul: het Brouwershavense Gat [1]. Het Brouwershavense Gat is vooral langs de kust van Schouwen en nabij de Brouwersdam opgevuld met sediment. Het zeewaartse gedeelte van de geul vertoont een kromming door het opdringen, noordwaarts uitbouwen, van het platengebied Bollen van het Nieuwe Zand [10]. Aan de noordzijde wordt de geul begrensd door de Gloeiende Plaat [3]. Het Brouwershavense Gat heeft een zuidelijke uitstroom gekregen de Banjaard op en op de Banjaard heeft zich voor de geul een duidelijk eb-schild gevormd.

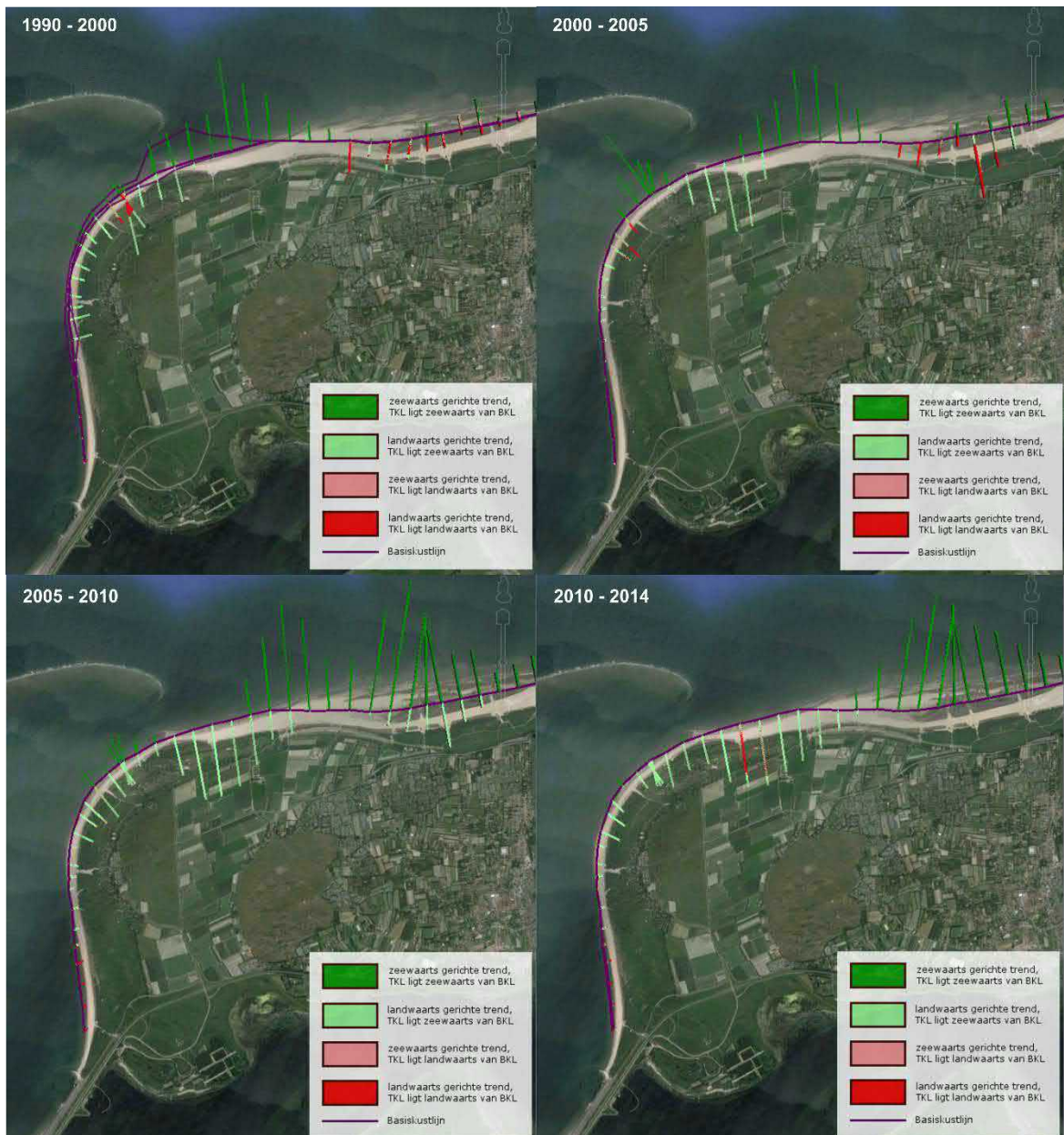
Eigenlijk is Schaar [9] geen doorgaande geul. Rond de kop van de Bollen van de Ooster (zie Fig. 1.1, onderste 2 panelen voor details) is er een overgangsgebied tussen de zeewaartse en landwaartse Schaar. Hier bevinden zich meerdere kleinere geulen gescheiden door ondiepe ruggen. Deze kleine geultjes zijn mede verantwoordelijk voor de geobserveerde erosie van de achterliggende kust van Goeree. De vorming van dergelijke geultjes gescheiden door ondiepe zandruggen wordt al door Van Veen (1950) verklaard door elkaar ontwijkende eb- en vloedgeulen. In dit rapport gebruiken we termen instroom- en uitstroomgeulen in plaats van eb- en vloedgeulen. Eb- en vloed is hier verwarrend omdat deze omgedraaid zijn voor het Noordzee getij en voor de interne circulatie binnen de Grevelingenmonding. Uitstroom in de Scheur (stroming vanaf de Brouwersdam) gebeurt tijdens opkomend getij, en instroom juist tijdens afgaand getij. We gebruiken instroom voor geulen die gedomineerd worden door stroming vanaf de zee naar de Brouwersdam en uitstroom voor geulen gedomineerd door stroming naar de zee toe.



Figuur 1.1: Ligging van de belangrijkste geulen en platen in de Grevelingenmondning (boven) en (onder) detail weergave (bovenaanzicht en 3D perspectief) van de kop van de Bollen van de Ooster (zie rode polygoon in bovenste paneel voor ligging).

1.3 Beheer en onderhoud van de kust

Een overzicht van de huidige problematiek langs de Noordwest kust van Goeree kan worden verkregen door analyse van de Basiskustlijn (BKL) en de te toetsen kustlijnen (TKL) (zie Figuur 1.2). De huidige structurele erosie aan de westkant van Goeree (km. 15 tot km. 17.5) is duidelijk weergegeven door de continue landwaarts gerichte trend van de TKL (lichtgroen). Vanaf km. 15 tot km. 10 verandert de trend van zeewaarts gerichte TKL tot 2000 (donkergroen) naar een landwaarts gerichte trend. In de recente metingen (2010-2014) vindt hier dan een overschrijding van de BKL plaats (rood).



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).

Onderstaande samenvatting uit de recente kustlijnkaartenboeken geeft een goede indicatie van de problematiek:

2005

De Goereese kust kent afwisselend aanzanding en erosie. Op de meeste plaatsen wordt de BKL niet overschreden. Ter hoogte van de Kwade Hoek (raai 300-1000) aan de noordzijde van het eiland is al jaren sprake van een zeewaartse trend in de ligging van de kustlijn. Alleen in de raaien 350 en 555-650 is de trend licht negatief. Bij de oostelijke aansluiting op het Flauwe Werk (raai 1025-1175) en ter plaatse van het Flauwe Werk (raai 1200-1750) is in 2004 een strandsuppletie uitgevoerd. Deze laatste suppletie is een no-regret-maatregel om de zwakke schakel het Flauwe Werk op sterkte te houden. Er is voor dit gedeelte geen toetsing van de BKL uitgevoerd. De kustligging op Goeree, beginnend bij het Westhoofd tot de aansluiting van de Brouwersdam (raai 1375-1900), fluctueert sterk. Dit is het gevolg van veranderingen in de ligging van de kortsluitgeulen en banken. Over dit kustgedeelte is de trend landwaarts, met uitzondering van de raaien 1475-1525. De BKL wordt alleen overschreden in 3 raaien op het Westhoofd (raai 1550 t/m 1600) en bij de aansluiting met de Brouwersdam (raai 1825-1900) in 4 raaien. Voor 2005 staat er voor het gedeelte van raai 1500 t/m raai 1900 een strandsuppletie gepland.

2015

In het oostelijk deel van kustvak Goeree is voorlopig geen sprake van overschrijdingen van de BKL. De gunstige, huidige kustlijnligging ten opzichte van de BKL valt hier samen met een zeewaartse trend. Westelijk van het Flauwe Werk (raai 1225 t/m 1700) is al enige jaren een landwaarts gerichte trend in de kustlijnligging. De hier optredende erosie is het gevolg van een kustlangs, in noord-oostwaartse richting, migrerende zandhaak. Uit deze toetsing (1-1-2015) zijn op dit traject drie raaien (1325, 1350 en 1375) overschreden. De verwachting is dat de komende jaren, als gevolg van de landwaartse trend, de helft van deze raaien overschreden gaat worden. Wanneer de zandhaak voorbij getrokken is, zal de kustlijn zich naar verwachting weer stabiliseren. De raaien ten zuiden van raai 1575 (Westhoofd) kennen een licht tot matige landwaartse trend van gemiddeld 2 m per jaar. In 2012 is de BKL van de raaien 1802 t/m 1900 herzien. De BKL is op dit traject landwaarts verlegd. De BKL is op dit traject van de raaien 1575 t/m 1900 op drie raaien overschreden: op 1575, 1825 en 1850. In het suppletieprogramma 2012 – 2015 is voor het Westhoofd van Goeree een suppletie opgenomen. Deze suppletie zal worden uitgevoerd in 2015 of 2016.

Ook in het verleden zijn hier al meerdere suppleties uitgevoerd (Figuur 1.3). Sinds 1966 is hier meer dan 10 miljoen m³ aan zand aan de kust toegevoegd (Tabel 1.1). Hiervan is 2 miljoen m³ als duinverzwaring aangelegd. Het is opmerkelijk dat het merendeel van de suppleties is uitgevoerd tot 1984. Tussen 1984 en 2005 waren er juist geen suppleties nodig om de kust te handhaven. Sinds 2005 is er dan weer sprake van een significante erosie, waardoor er terugkerende suppleties nodig zijn.



Figuur 1.3 Overzicht van de uitgevoerde suppleties (zie Tabel 1.1 voor locatie, jaar van uitvoering en hoeveelheden).

Tabel 1.1 Overzicht uitgevoerde suppleties aan de Noordwest kop van Goeree.

	Jaar end maand start uitvoering	Raai (km)		Type	Volume (m ³)
		begin	eind		
1	01/1966	15	17	Duinverzwaring	150,000
2	1/1968	13	15	Duinverzwaring	800,000
3	11/1969	15.01	16.01	Strandsuppletie	401,000
4	05/1971	15.01	16.01	Strandsuppletie	610,000
5	01/1972	16.5	17.25	Duinverzwaring	100,000
6	01/1972	18.75	19	Duinverzwaring	100,000
7	10/1973	14.5	17.5	Strandsuppletie	2,300,000
8	10/1973	14.5	17.5	Duinverzwaring	1,000,000
9	01/1976	18.5	19	Duinverzwaring	50,000
10	04/1977	14.5	17.5	Strandsuppletie	1,267,000
11	08/1984	14.5	17.5	Strandsuppletie	330,000
12	05/1985	14.5	17.5	Strandsuppletie	530,000
13	01/1994	10.25	12.0	Strandsuppletie	505678
14	10/2004	10.25	12.75	Strandsuppletie	920424
15	03/2005	15.5	18.75	Strandsuppletie	1000552
Totaal Volume					10,064,654

2 Werking van het Morfologische Systeem

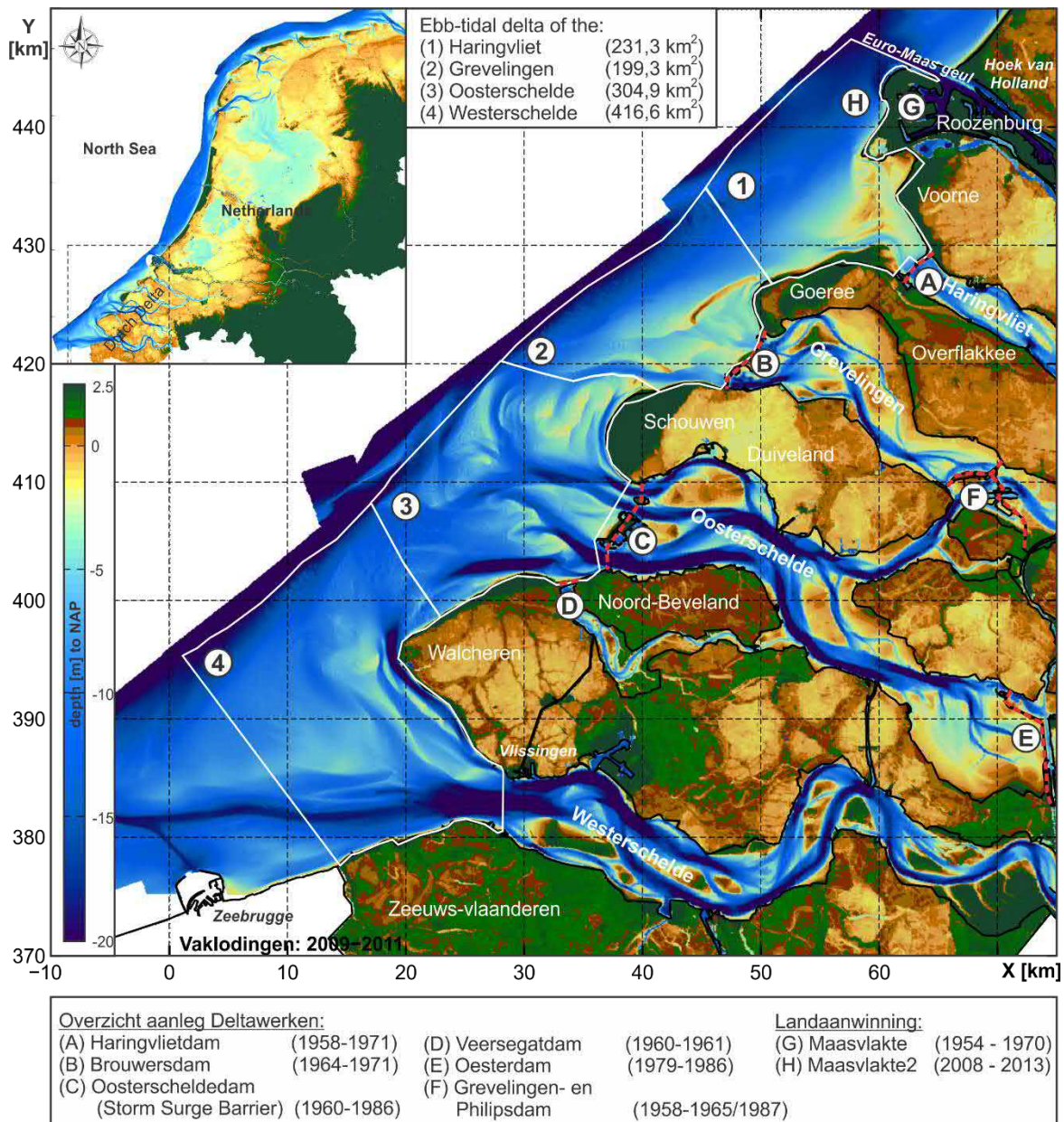
2.1 Achtergronden van het Morfologische Systeem Voordelta (Elias en Van de Spek, 2014)

De Voordelta bestaat uit een aaneengesloten ondiepte gevormd door de vier aan elkaar grenzende mondingsgebieden van de Westerschelde, Oosterschelde, Grevelingen en het Haringvliet (Figuur 2.1). Alleen bij de Westerschelde en Oosterschelde is er nog een verbinding van de monding met het achterliggende estuarium door grote getijgeulen. In noordwaartse richting neemt de diepte van de voordelta af, zijn de geulen kleiner (ondieper) en neemt het ondiepe plaatareaal toe. De estuaria (Grevelingen en Haringvliet) zijn hier door dammen afgesloten van de voorliggende monding. De monding van het Haringvliet is het meest ondiepe gebied. Aan de noordzijde wordt het Haringvliet begrensd door de eerste en de tweede Maasvlakte. De grote golfbrekers langs de vaargeul naar de haven van Rotterdam vormen een duidelijke scheiding tussen de Voordelta en de Hollandse kust. Aan de zuidzijde kan zo'n duidelijke grens van de Voordelta niet getrokken worden. Hier gaat de buitendelta van de Westerschelde (de Vlake van Raan) over in de Belgische Vlaamse banken. De landwaartse begrenzing in de Westerscheldemonding wordt vaak gekozen langs de denkbeeldige lijn tussen Vlissingen en Breskens.

Eigenlijk is er bij de Grevelingen- en Haringvlietmonding geen sprake van een buitendelta omdat de achterliggende estuaria zijn afgesloten. De Voordelta is al sinds de jaren zestig sterk beïnvloedt door de Deltawerken. De aanleg van de Haringvlietdam (voltooid in 1971) en de Brouwersdam dam (voltooid in 1971) sluit deze estuaria vrijwel volledig af van de voorliggende buitendelta. In de Haringvliet zijn wel spuisluizen aanwezig met een maximale capaciteit van 25.000 m³/s. De monding van de Oosterschelde en Westerschelde maken nog wel verbinding met het achterliggende estuarium. Toch is de invloed van menselijk ingrijpen in beide estuaria zeer groot. De voltooiing van de Oosterschelde stormvloedkering in 1986 heeft het doorstroomoppervlak ter plaatse significant verkleind en daarmee de hydrodynamica en morfodynamica van de Oosterschelde beïnvloedt. Het Westerschelde estuarium wordt sterk beïnvloedt door bagger- en stortwerkzaamheden die de hoofdgeul op plaats en diepte houdt.

Getij- en golfgedreven transporten vormen de basis voor de morfologische ontwikkelingen van alle mondingsgebieden. Toch is er een duidelijk verschil tussen de twee zuidelijke, open, zeegaten en de twee noordelijke, afgesloten, zeegaten. In de Oosterschelde- en Westerscheldemonding bestaat het getij uit de wisselwerking van het kustlangs getij op de Noordzee en het kustdwarse getij door instroom en uitstroom van het estuarium. Op de buitendeltas van het Haringvliet en Grevelingen is eigenlijk alleen nog het kustlangse getij aanwezig. Dit kustlangs getij kan lokaal wel rondstroming veroorzaken, maar deze rondstroming is significant kleiner dan het voormalige estuarium-gedreven getij dat voor afsluiting van de zeearmen aanwezig was. Door de gereduceerde getij-involed overheersen op de voormalige buitendelta's de golfgedreven transporten. De invloed van dichtheids-gedreven sediment transporten is beperkt. Alleen in de monding van het Haringvliet zijn er (periodiek) duidelijke dichtheidsgradiënten in zoutgehalte te onderscheiden. Door de spuisluizen in de Haringvlietdam wordt zoet water vanuit de Nieuwe Waterweg en door het Haringvliet gespuid. Vooral bij hoge rivierafvoer kan dit tijdelijk (lokaal) een groot dichtheidsverschil veroorzaken.

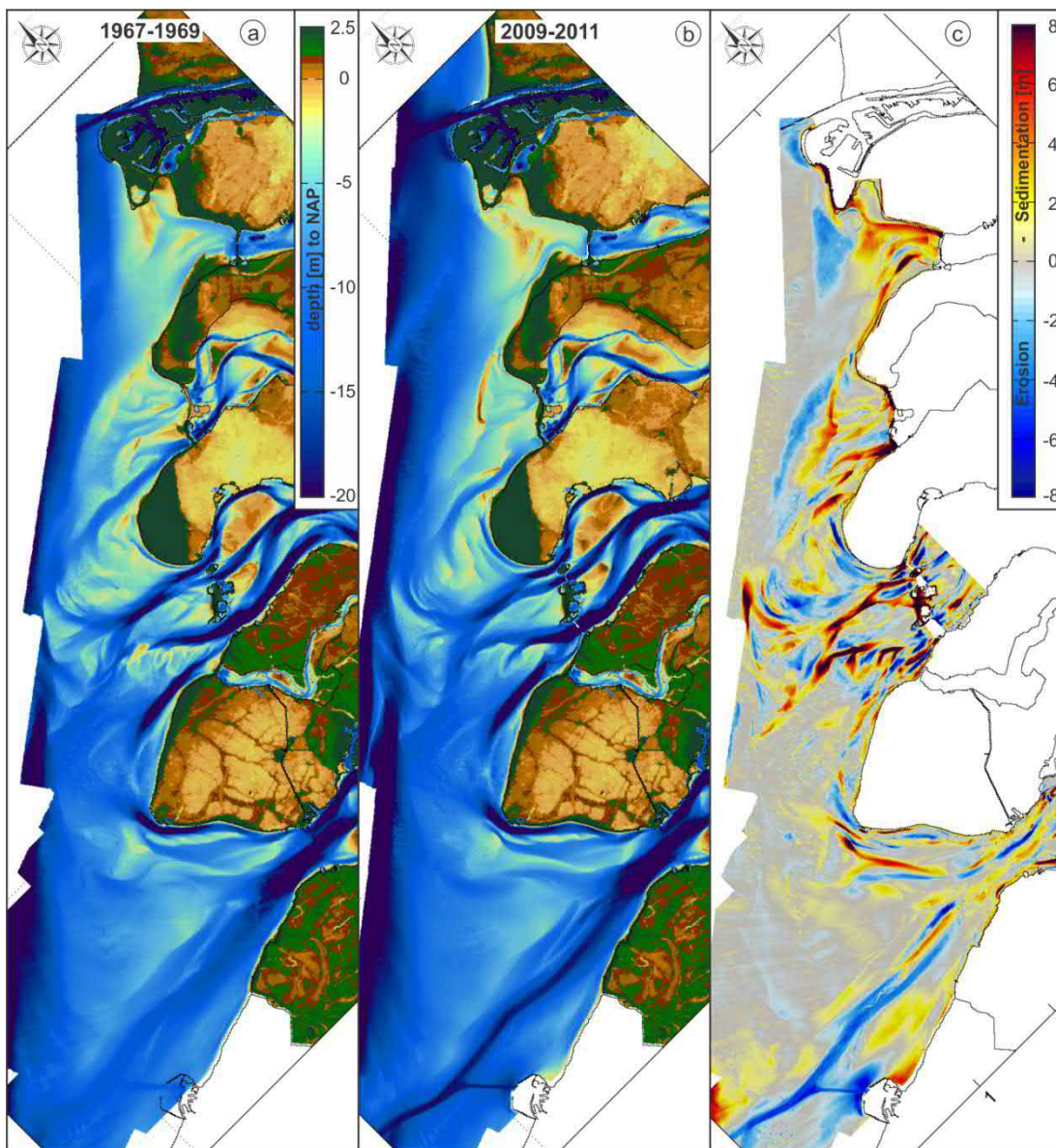
De bodem van de Voordelta en de Westerscheldemonding bestaat voornamelijk uit zand. Lokaal zijn er wel slibafzettingen aanwezig waar de stroomsnelheden en golven laag zijn. Ook zijn er afwijkende bodemsamenstellingen in de Westerscheldemonding, waar geulen oude geologische formaties aansnijden.



Figuur 2.1 Overzicht van de estuaria die de Voordelta vormen. De onderliggende bodem is gebaseerd op metingen over de periode 2009-2011.

Figuur 2.2 geeft een beeld van de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Voordelta over de periode 1967-2011. Gedurende deze periode vinden er grote morfologische veranderingen plaats. Dit komt vooral door de uitvoering van de Deltawerken, waardoor de hydrodynamica en de daaraan gerelateerde sedimenttransporten ingrijpend veranderd zijn. Hierdoor vinden grootschalige morfologische veranderingen plaats op de buitendelta's van de Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet. In de Oosterscheldemonding zien we een heroriëntatie van de geulen en banken door de veranderde getijstrooming na voltooiing van de

Oosterscheldekering. Hier domineren afwisselende patronen van sedimentatie en erosie. Zowel bij de Grevelingen en Haringvliet zien we dat de buitendelta in zijn geheel landwaarts migreert. Er vindt een grote erosie plaats aan de zeezijde en het sediment wordt landwaarts afgezet. De grootste afzettingen vinden plaats in de voormalige geulen die (gedeeltelijk) zijn opgevuld. Deze veranderingen zijn eigenlijk wel te verwachten: Buitendelta's worden gevormd door de balans van zeewaarts transport door de getijstrooming en landwaarts transport door golven. Het is aannemelijk dat voor uitvoering van de Deltawerken er een dynamisch evenwicht aanwezig was. Met het totaal wegvallen van de getijstrooming vanuit het Haringvliet en de Grevelingen kunnen de buitendelta's niet op een gelijke positie gehandhaafd worden. De nu dominante golfgedreven stroming zorgt ervoor dat het sediment netto landwaarts verplaatst: Uit de buitendelta komt veel sediment vrij dat de geulen langzaam opvult, maar ook afgezet wordt langs de aanliggende kuststroken.



Figuur 2.2 Overzicht van de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Voordelta over de periode 1967-2011.

2.2 Grevelingenmondning

Voor afsluiting van het Grevelingen estuarium, zijn de platen en geulen in de Grevelingen gevormd als een dynamisch evenwicht tussen de uitbouwende kracht van de getijstroming in en uit het estuarium, en de landwaartse, golfgedreven stroming en sedimenttransporten. Na afsluiting van het estuarium in 1971 is de kustdwarse (estuarium-gedreven) getijstroming bekken gestopt. Het afsluiten van het estuarium betekent eigenlijk dat het gebied zijn status als buitendelta verliest. Op de buitendelta overheersen nu de golfgedreven transporten. Er is nog wel getijstroming aanwezig maar deze wordt bepaald door het noordzeegetij en niet door de komberging van het estuarium. Het noordzeegetij veroorzaakt wel een rondstroming door de oude getijdgeulen heen (van der Spek, 1987). Het water stroomt de monding in via het Brouwershavense gat en stroomt uit via de Schaar, en vice versa na kentering. Deze rondstroming is echter veel minder efficiënt (sterk) dan de oorspronkelijke estuarium-gedreven stromingen. De balans tussen getij- versus golfgedreven transporten is hierdoor verstoord. De golfgedreven transporten overheersen. Grootschalige (landwaartse) verplaatsing van de platen en het opvullen van de oorspronkelijke geulen is daarom te verwachten en ook opgetreden (Figuur 2.3 en Figuur 2.4)

Een beschrijving van de ontwikkelingen van de buitendelta vóór afsluiting van de Grevelingen (over de periode 1933-1959) wordt gegeven door Van der Spek (1987); *“Gedurende deze periode neemt het getijvolume van de Grevelingen af, ten gunste van het getijvolume van de Oosterschelde, waardoor het profieloppervlak van de beide geulen Brouwershavense Gat en Springersdiep geleidelijk vermindert. De geulen worden smaller en dieper, het bankengebied tussen de geulen wordt steeds breder. De Middelpaalt en de Kabbelaarsbank verschuiven in de richting van de Hompelveot. De geul Brouwershavense Gat verplaatst zich in de richting van de oever van Schouwen, waardoor een zeer steil talud ontstaat. Door de reductie van het getijvolume zal ook de omvang van de buitendelta minder geworden zijn. Zeewaarts van de toekomstige Brouwerdam schuiven de geulen in de periode 1961-1965 ongeveer 100m naar het noordoosten en neemt de hoogte van de platen af.”*

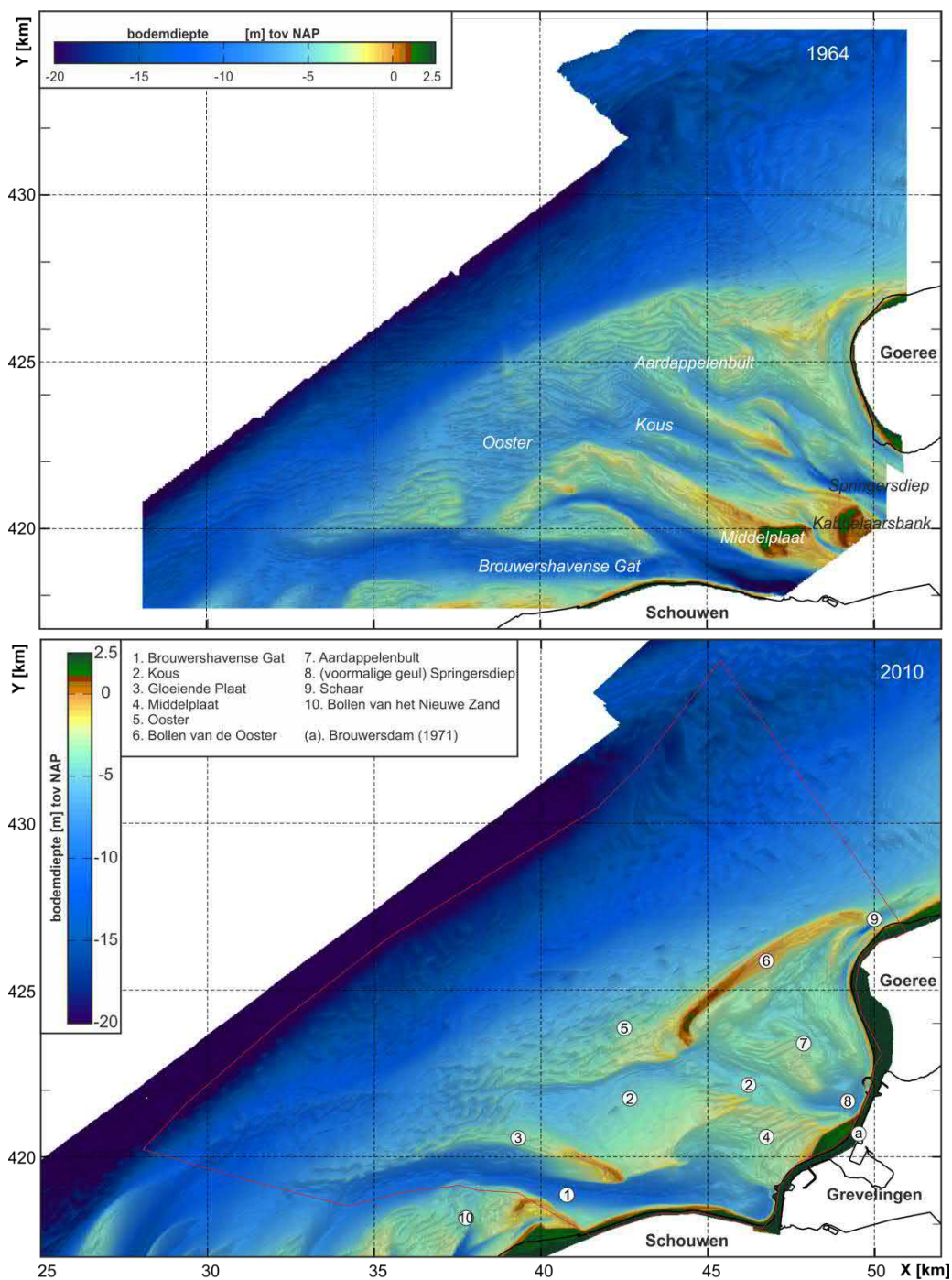
De ontwikkelingen van de Bollen van de Ooster worden in detail weergegeven in Figuur 2.5 en Figuur 2.6. De 1964 bodem is de eerste digitaal beschikbare bodem, maar deze is niet geheel representatief voor een natuurlijke situatie. In 1964 is het landwaartse deel van de Grevelingen estuarium al afgesloten door de Grevelingen- en Philipsdam (zie Figuur 2.1 voor ligging). De voltooiing van de Brouwersdam in 1971 sloot daarna het estuarium volledig af van de buitendelta en grootschalige veranderingen hebben plaatsgevonden. Vooral de voormalige plaat Ooster erodeert sterk aan de noordwestzijde. Het sediment wordt landwaarts verplaatst waardoor een langgerekte, ondiepe bank (Bollen van de Ooster) met zuid-noord oriëntatie vormt (Figuur 2.3, [6]). De vorming van deze bank is duidelijk te volgen in Figuur 2.6 (Profiel 1 en 2). In raai 1 verplaatst, in de periode 1964-2010, de -5 m contour bijna 1.5 km landwaarts. De bollen van de Ooster nemen daarbij in hoogte toe tot ongeveer 0m NAP. In doorsnede 2 zijn de verschillen nog groter. De -5m contour verschuift 2.5 km landwaarts en de Bollen van de Ooster hebben hier een hoogte van 0.8m. Het heeft tot 1999 geduurd voor een rechte, vrijwel continue ondoorbroken bank werd gevormd (zie Figuur 2.5). Deze bank was in 1999 nog breed (zo'n 500 m). Sindsdien is de hoogte verder toegenomen, maar is de breedte afgenomen. In totaal is het zandvolume aan de zeezijde van de Ooster met -63 miljoen m³ in sediment afgenomen (Figuur 2.4, [polygoon 15]). Een deel van het geërodeerde sediment heeft waarschijnlijk bijgedragen aan de vorming van de Bollen van de Ooster (13 miljoen m³ [19]) en het invullen van het landwaartse deel van Ooster (25 miljoen m³ [16]). Het geul-plaat gebied (Aardappelenbult) ingeklemd tussen de Bollen van de Ooster

en de Brouwersdam vult op en vlakt uit. Dit gaat gepaard met een netto sedimentatie van 8 miljoen m^3 . In de geulen, zoals Kous en het afgesloten Springersdiep, is de sedimentatie echter aanzienlijk groter (+18 miljoen m^3), dit komt omdat een gedeelte van het sediment geleverd wordt door de naast- en tussengelegen platen (-10 miljoen m^3).

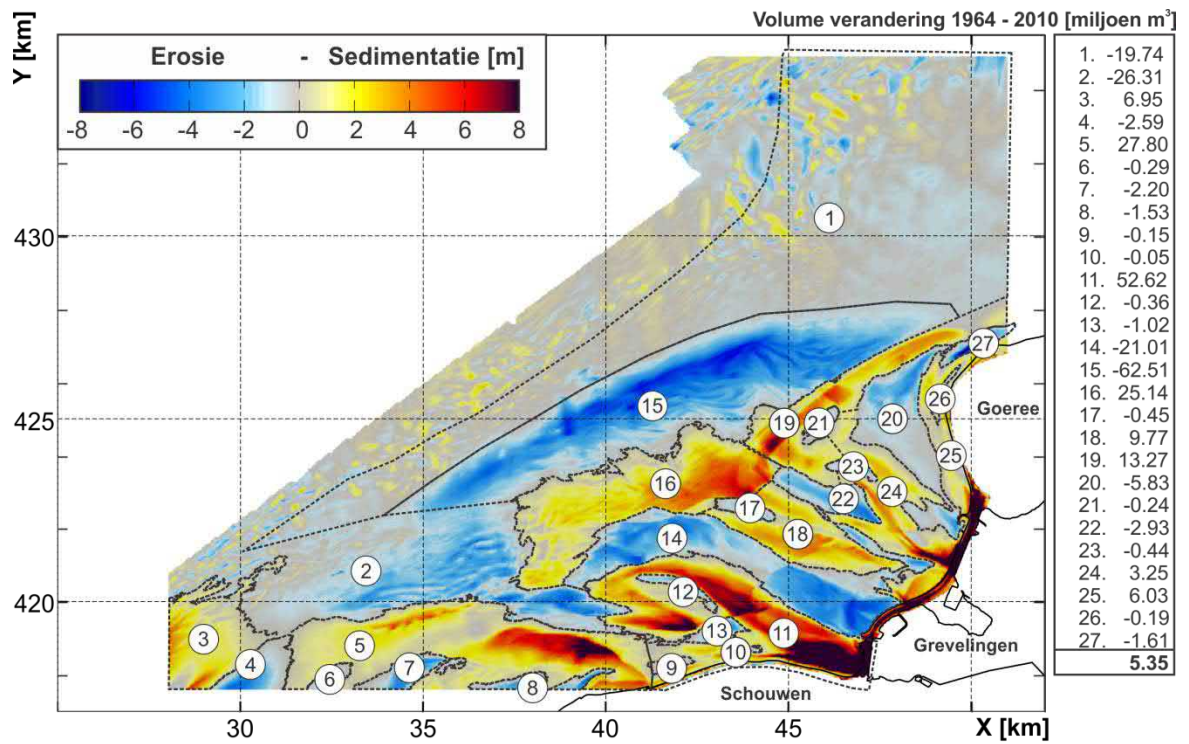
Tussen de Bollen van de Ooster en de noordwestkust van Goeree ontwikkelt zich een kleine maar diepe geul (Figuur 2.5). Deze geul blijft sinds 1999 onafgebroken aanwezig en veroorzaakt de hier opgetreden erosie van de kust. Met behulp van de JarKus datasets wordt in paragraaf 2.3 de geul in detail beschouwd.

Ook in het zuidelijke gedeelte van de monding treden grote veranderingen op. Het Brouwershavense Gat blijft hier, ook in de 2010 bodem, echter wel duidelijk als geul zichtbaar. Het voorliggende deel van de buitendelta vertoont ook hier een landwaartse verplaatsing. Een grote verandering treedt op rond een voormalige ebschaar van het Brouwershavense Gat (zie Figuur 2.3, 1964 voor ligging) en de aangrenzende Middelplaat. Het voormalige ebschild dat rond en voor deze ebschaar aanwezig is wordt landwaarts verplaatst en de ebschaar vult volledig op met sediment. Deze verplaatsing van dit ebschild en het landwaarts opschuiven van de Ooster, is in dwarsprofiel 4 (Figuur 2.6) goed te volgen. Profiel 4 geeft ook een interessant beeld van de opgetreden verandering in het Brouwershavense Gat. De opvulling van het diepe gedeelte van de geul vindt vooral plaats in de periode 1964-1998. Sinds 1998 blijft de bodem hier rond de -10m liggen, wel bouwt de zeewaarts gelegen bank (Gloeïende Plaat) sterk landwaarts uit waardoor het geul volume verkleint (zie Figuur 2.3). Het Brouwershavense Gat staat verder onder druk bij de Kop van Schouwen, waar de groei en noordwaartse verplaatsing van de Bollen van het Nieuwe Zand het Brouwershavense Gat vanuit het zuiden wegdrukt. Het Brouwershavense Gat krijgt hierdoor een kromming om de bollen van het Nieuwe Zand heen. Deze kromming draagt dan waarschijnlijk weer bij aan het zuidelijker worden van de uitstroom de Banjaard op. Zoals al eerder geobserveerd wordt op de Banjaard een duidelijk ebschild gevormd. Langs de noordzijde wordt het Brouwershavense Gat verder begrenst door een langgerekte bank (Gloeïende Plaat).

Hoewel er in de monding grote morfologische veranderingen optreden is de totale netto volumeverandering beperkt. Nemen we de voor de Grevelingen representatieve polygonen (zie tabel in Figuur 2.4) dan neemt het volume met 51 miljoen m^3 in sediment toe. Dit is inclusief de sedimentatie van 28 miljoen m^3 aan de zuidkant van het Brouwershavense Gat. Als we dit in meer detail beschouwen zien we dat het buitendelta front 89 miljoen m^3 aan sediment verliest (Figuur 2.4 [2, 15]). De Bollen van de Ooster nemen met 38 miljoen m^3 toe. De afgesloten geul Springersdiep en de Kous zijn opgevuld met sediment. Opvullen van het Springersdiep en de vorming van de Aardappelenbult heeft tot een volume toename van 8 miljoen m^3 geleid. Het opvullen van Kous (pol. 17,18) heeft geresulteerd in een volumetoename van 9 miljoen m^3 . In het landwaartse deel van het Brouwershavense Gat grenzend aan de kust van Schouwen (pol. 9-13) is veel sediment afgezet (50 miljoen m^3). Een significant gedeelte van dit sediment is afkomstig van het aangrenzende bankengebied. De Middelplaat verliest -21 miljoen m^3 sediment (pol. 14)

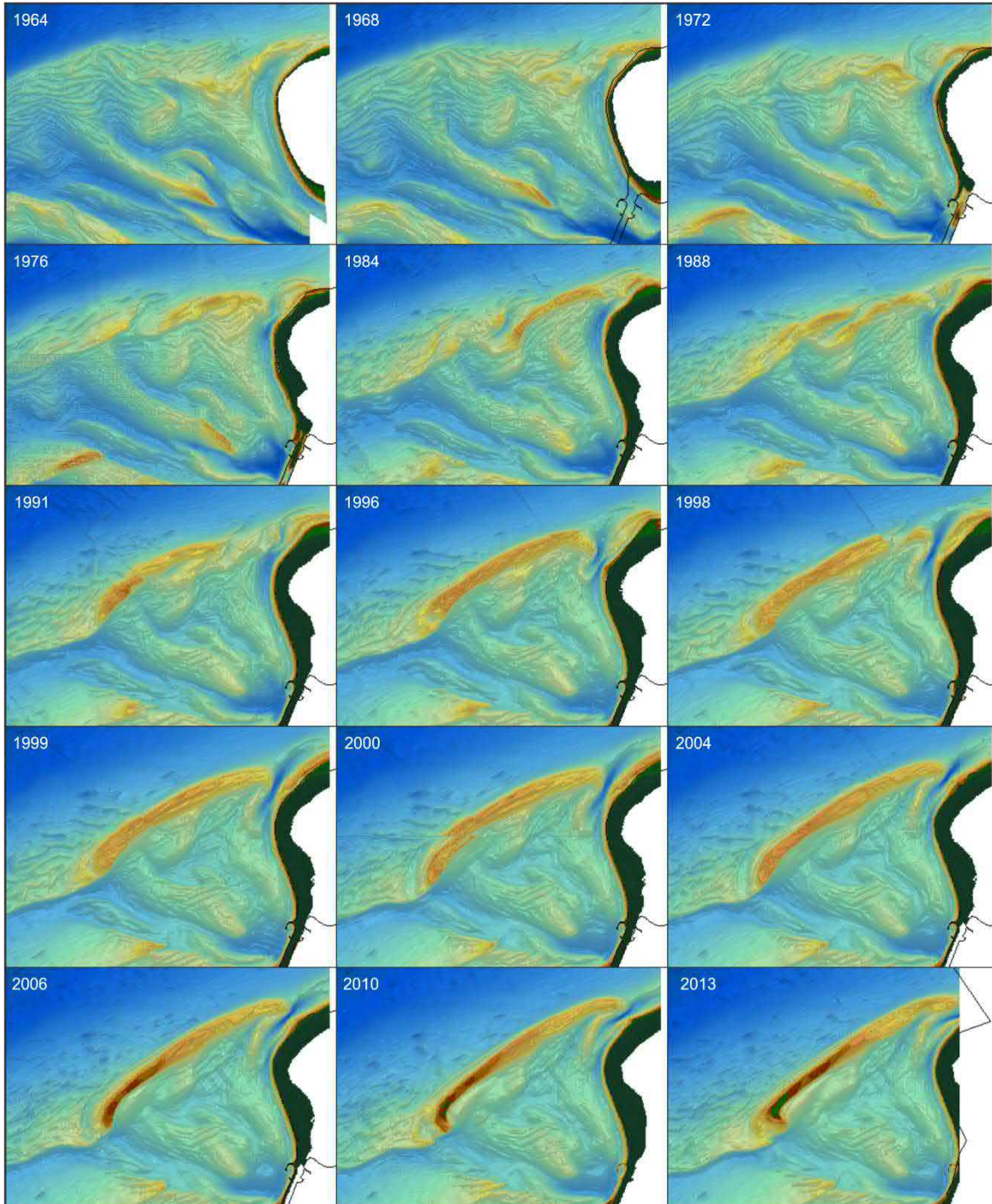


Figuur 2.3 Overzicht van de bodemligging van de Grevelingenmond in 1965-1967 (boven) en in 2010-2011 (onder).

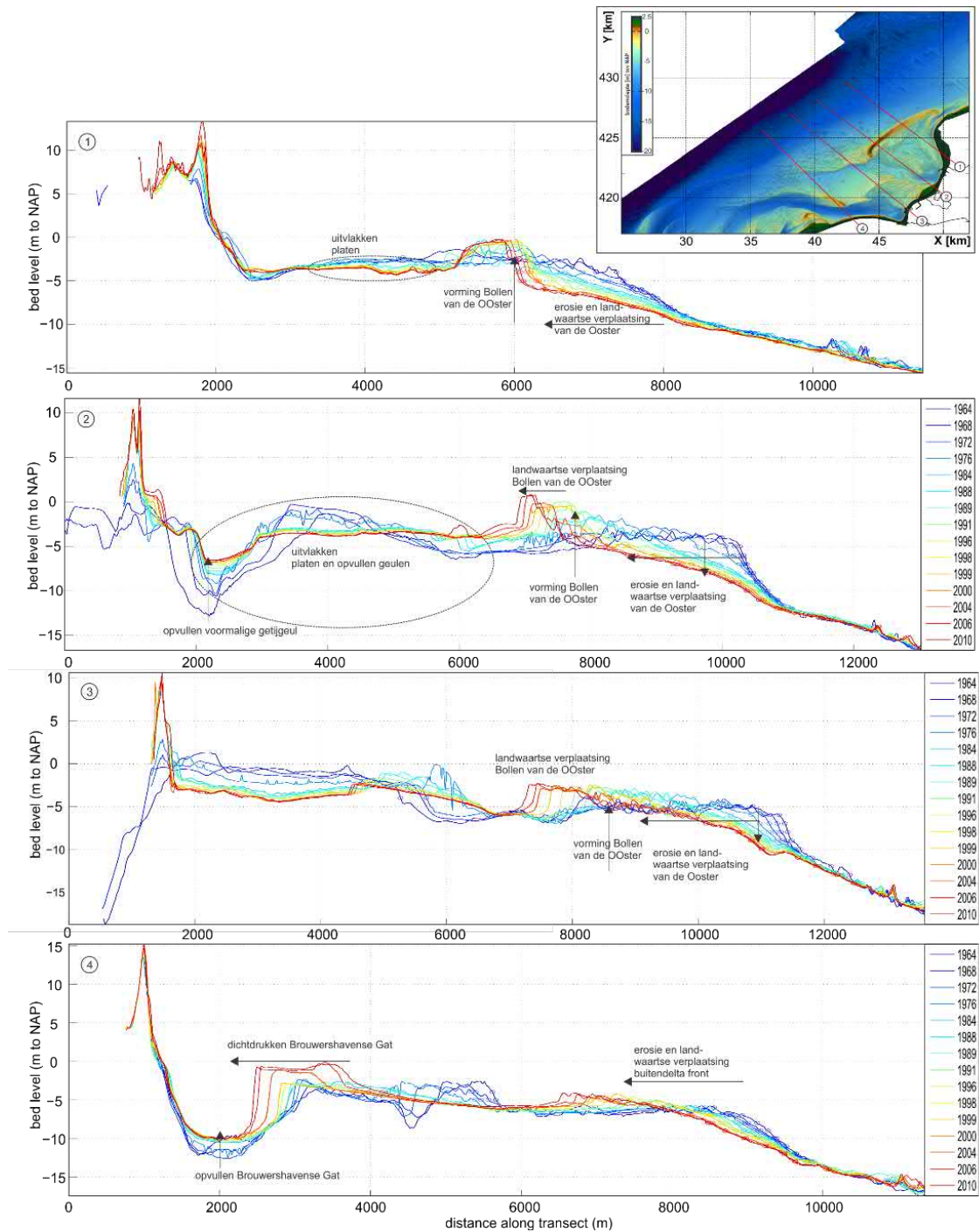


Gebied	Geselecteerde Polygonen	Volumeverandering (miljoen m ³)		
		sedimentatie	erosie	totaal
Bollen vd Ooster	16, 19, 21	+38.58	-0.41	38.16
Bollen vd Ooster (zee)	15	+0.02	-62.53	-62.51
Aardappelenbult	20, 21, 22, 23, 24, 25, 26	+18.31	-10.04	+8.27
Kouse - Middelpaalt	17, 18	+9.77	-0.45	+9.31
Brouwershavense Gat	5, 9, 10, 11, 12, 13, 14	+80.49	-22.67	+57.82
		+147.17	-96.35	+50.82

Figuur 2.4 Overzicht van de bodemverandering van de Grevelingenmond over de periode 1964 / 2010.



Figuur 2.5 Overzicht samengestelde (geselecteerde) bodems Grevelingenmond, ingezoomd op de Bollen van de Ooster, over de periode 1964-2010



Figuur 2.6 Overzicht van de veranderingen in bodemligging van de Grevelingenmondung over de periode 1964 2010 door middel van enkele representatieve profielen.

2.3 Morfologische ontwikkelingen Bollen van de Ooster en de kust van Goeree

Als we op de grote schaal kijken (vorige paragraaf), dan kan worden geconcludeerd dat de ontwikkeling aan de noordwestkust van Goeree sterk samen met de voorliggende geul "Schaar". Deze geul wordt onder invloed van de Bollen van de Ooster de kust ingedrukt. Met behulp van de JarKus meetingen kunnen we bovenstaande ontwikkeling in meer detail volgen (Figuur 2.7 tot en met Figuur 2.19). In de periode 1964-1972 was Schaar nog een geul die zich langs de kust van Goeree uitstreckte en rechtstreeks in verbinding stond met het achterliggende Grevelingen bekken (Figuur 2.7). Aan de zeewaartse uitstroom had zich een eb-schild gevormd. Tussen km. 13 en km. 15 sloot dit eb-schild aan op de kust. Rond 1972 beginnen kleinere geultjes en platen zichtbaar te worden op dit eb-schild. Deze platen en geulen landen periodiek aan op de kust. De vele suppleties die in de periode 1966-1985 zijn uitgevoerd, zijn waarschijnlijk gerelateerd aan de kusterosie ten gevolgen van de geulen die periodiek kusterosie veroorzaken.

Rond 1996 is er een duidelijke verandering van het morfologische gedrag (Figuur 2.8). Een grote en diepe (kortsluit)geul vormt en blijft dan onafgebroken aanwezig. Deze geul verhindert de verdere aanlanding van platen, waardoor de kust nu structurele erosie vertoont. De geul vormt zich als een vloedschaar zeewaarts van de oorspronkelijke geul schaar. Schaar wordt initieel, tijdens de vorming de kust in gedrukt. Tot 2000 blijft een grote geul zichtbaar. Initieel had de vorming van de geul voor het gebied tussen km. 12-15 geen negatieve gevolgen. Tussen de geul en de kust bevond zich nog een zandrug die zich verheelde met de kust. Dit levert rond 2003 een maximale zeewaartse verplaatsing (zandvolume). Sindsdien erodeert de kust sterk. Vanaf 2003 zien we ook dat er geen enkele hoofdgeul aanwezig is, maar meerdere kleine geultjes gescheiden door zandruggen ontwikkelen zich. Dit is eigenlijk het begin van de huidige configuratie van geulen gescheiden door kleine bankjes. Het is waarschijnlijk dat deze ontwikkelingen zijn gekoppeld aan de vorming van de Bollen van de Ooster. De Bollen van de Ooster strekt zich steeds verder noordwaarts (en landwaarts) uit (Figuur 2.9). In 1999 beginnen eigenlijk de eerste tekenen van de invloed op de instroom duidelijk te worden. De Bollen van de Ooster duwen tijdens zuidgaand noordzeegetij de stromingen tussen de bank en de kust (instroom). Dit resulteert uiteindelijk in de vorming van "gescheiden" instroom en uitstroom geulen. Deze instroom en uitstroomgeulen bepalen sinds 2003 de ontwikkelingen van de kustlijn. Tot 2010 zien we een vrijwel identiek beeld van twee uitstroomgeulen met daartussen een instroom geul (Figuur 2.8). In de periode 2010-2014 zien we de kop van de Bollen van de Ooster zich nog verder ontwikkelen en een sterkere kromming naar de kust toe maken. Dit resulteert eigenlijk in vrij abrupte veranderingen in de in- en uitstroomgeulen.

De erosie aan de kust wordt in sterke mate gestuurd door deze kleinschalige patronen. De grote variatie in de ruimte betekent dat ook een variatie in kustlijnontwikkeling en met name in het gebied tussen km.12 en km.17. De variatie in kustlijnontwikkelingen word voor een aantal representatieve raaien hieronder verder beschreven. Met name de timestacks van profielontwikkeling (Figuur 2.10 tot en met 2.18) geven de verandering in kustgedrag tussen 1995 en 2014 goed weer (zie figuur 1.3 voor de ligging van de raaien).

Raai 12.25 (Figuur 2.10)

Raai 12.25 ligt eigenlijk vrij stabiel in positie. In 1995 is het effect van de strandsuppletie beperkt terug te zien. De 2004 suppletie is echter wel terug te zien in de vorm van een sterke zeewaartse uitbouw van het kustprofiel. Het is opmerkelijk dat een beperkte uitbouw ook rond 2002/2003 optreedt. In de timestack is hierdoor eigenlijk sinds 2002 een trend van zeewaartse verplaatsing en vrij stabiele ligging sindsdien te onderscheiden. Recentelijk trekt de vooroever wel terug, maar deze ligt nog ver zeewaarts ten opzichte van de periode tot 2000.

Raai 12.75 (Figuur 2.11)

Een soortgelijk uitbouwend beeld is ook in profiel 12.75 te zien. De kust bouwt uit tot een maximale positie rond 2004. Sindsdien trekt het profiel zich sterk terug. Dit beeld is eerder (in kleinere mate) al terug te zien. Ook in de periode 1985-1990 vindt er een zeewaartse verplaatsing plaats, gevolg door terugtrekking (1990-1995). De erosie vindt vooral plaats aan het kustprofiel. Het duin ligt vooral na 2010 stabiel in positie. Rond raai 12.75 begint de recente periode (in dit profiel sinds 2004) van continue erosie van het kustprofiel duidelijk zichtbaar te worden.

Raai 13.25 (Figuur 2.12)

Raai 13.25 geeft een mooi beeld van de cyclische erosie die is opgetreden tot ongeveer 2000. In de periode 1995-2000 vinden de perioden van erosie en sedimentatie afwisselend plaats. Periodiek gaat de kust vooruit, gevolgd door een periode van terugtrekking. Over de gehele periode lijkt de trend wel een zeewaartse verplaatsing te geven. Sinds 2000 is dit niet meer terug te zien. Het profiel trekt zich nu met een vrijwel continue trend terug. Zeewaarts migreert een bank naar de kust toe. Deze migratie en verhoging van de bank vormt een kleine geul, met een steile landwaartse geulwand.

Raai 13.75 (Figuur 2.13)

Raai 13.75 geeft een goed beeld van het voormalige aanlandingsgebied van de banken van de monding aan de kust. Een grootschalige aanlanding is vooral in de periode 1977-1995 te zien. In 1995 bevindt zich in deze raai het maximale volume. Sindsdien vindt er sterke erosie van het kustprofiel plaats (er begint zich een geul te vormen). Deze erosie vindt continue plaats tot 2014. Ter plaatse van de duinvoet is er nog niet heel veel verandering.

Raai 14.25 (Figuur 2.14)

Raai 14.25 bevindt zich ter hoogte van de kop van de Bollen van de Ooster. In deze raai is de vorming van de instroomgeul duidelijk zichtbaar. De uitstroomgeulen zijn in dit profiel niet aanwezig. De instroom geul neemt sinds 2000 sterk in diepte toe. Dit gebeurt (mede) onder invloed van de voorliggende ondiepte, deze neemt in hoogte toe en verplaatst kustwaarts. Hierdoor word het stroomvoerende breedte van de geul verkleint en verplaatst de geul zich ook landwaarts. De diepte neemt hierbij toe tot -7.5m NAP. Deze trend continueert tot 2012. De 2012-2014 bodems blijven redelijk constant.

Raai 14.75 (Figuur 2.15)

Ook in deze raai is de instroomgeul dominant. Tussen 1995 en 2010 neemt deze geul sterk in diepte toe. Recentelijk, 2010-2014, neemt de diepte (en het doorstroomoppervlak) van de geul juist sterk af. De voorliggende Bollen van de ooster word hier juist zeewaarts uitgebouwd. Een duidelijke geulvorming vlak langs de kust, tussen de kust en de instroomgeul, is hier niet te zien. Wel neemt de diepte van dit gebied over het algemeen wat toe. Ten zuiden van deze raai wordt het meer-geulensysteem duidelijk zichtbaar.

Raai 15.25 (Figuur 2.16)

Raai 15.25 geeft een goed beeld van het meer-geulensysteem. Rond 2002 bereikt de instroomgeul zijn maximale diepte. Sindsdien neemt de diepte af; van -9m in 2001 tot -4m in 2014. De geul migreert daarbij naar buiten. Landwaarts en zeewaarts ontwikkelen zich 2 uitstroomgeulen. De ontwikkeling van een uitstroomgeul vlak langs de kust zorgt hier voor een steil kustprofiel en zal daarbij sterk bijdragen aan de geobserveerde erosie.

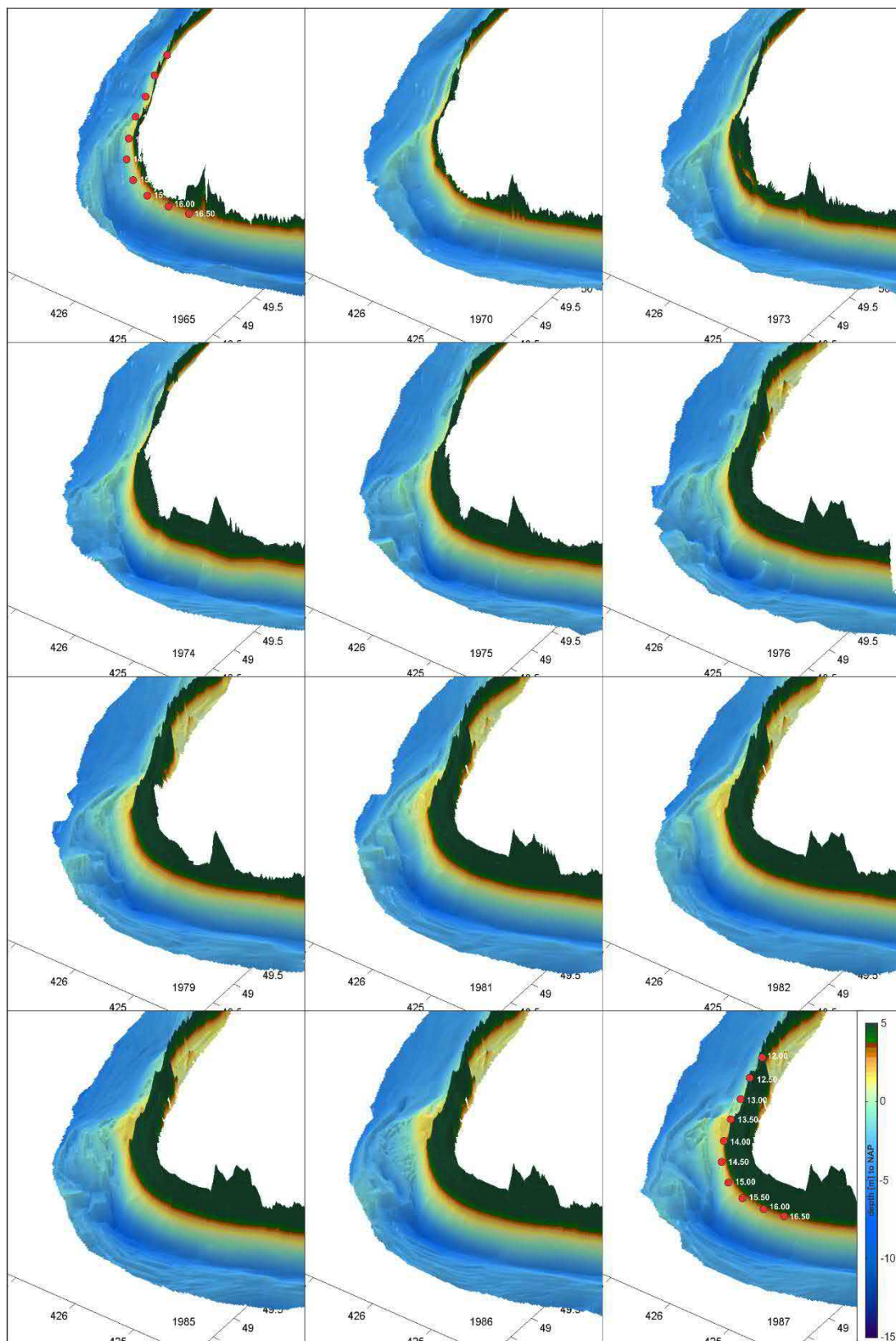
Raai 15.75 (Figuur 2.17)

Raai 15.75 vertoont een interessant gedrag. Tot 1995 bevindt er zich een grote, enkele geul in het profiel. Deze geul verliest rond 1995 zijn stabiliteit en migreert zeewaarts. Dit hangt mogelijk samen met de aanlanding van banken net ten noorden van dit profiel (Figuur 2.8). De geul blijft daarna zeewaarts, stabiel in positie, liggen maar vult wel langzaam op. Direct

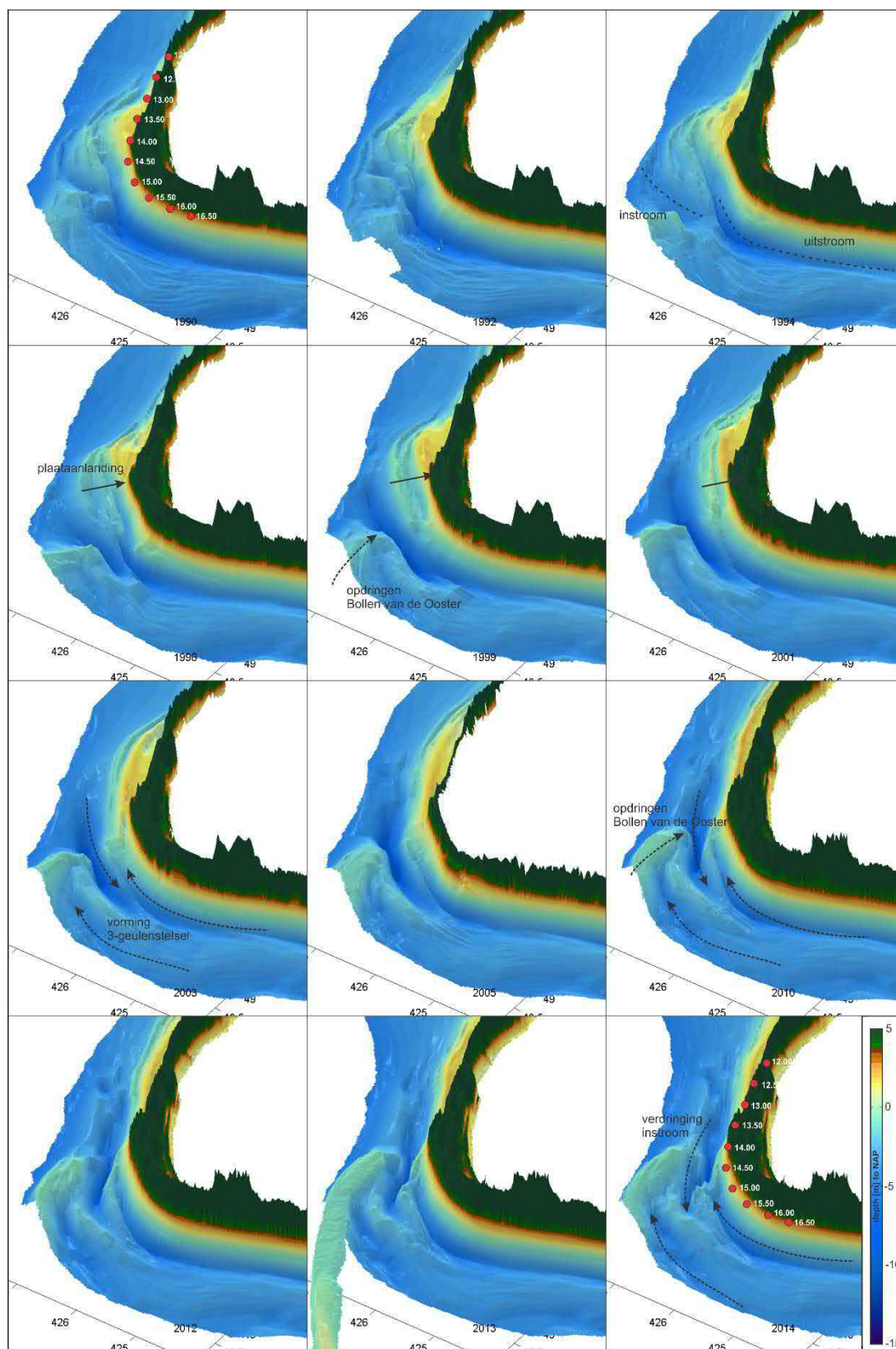
langs de kust ontwikkelt zich dan een kleinere geul. Ook zeewaarts zien we de vorming van een geul. Tot ongeveer 2005 zijn er dan 3 geulen aanwezig. Vanaf 2005 is de oorspronkelijke geul eigenlijk geheel opgevuld en blijft er een 2-geulensysteem, gescheiden door een brede, zandrug, over. Deze geulen blijven tot 2014 aanwezig.

Raai 16.25 en 16.75 (Figuur 2.18 en 2.19)

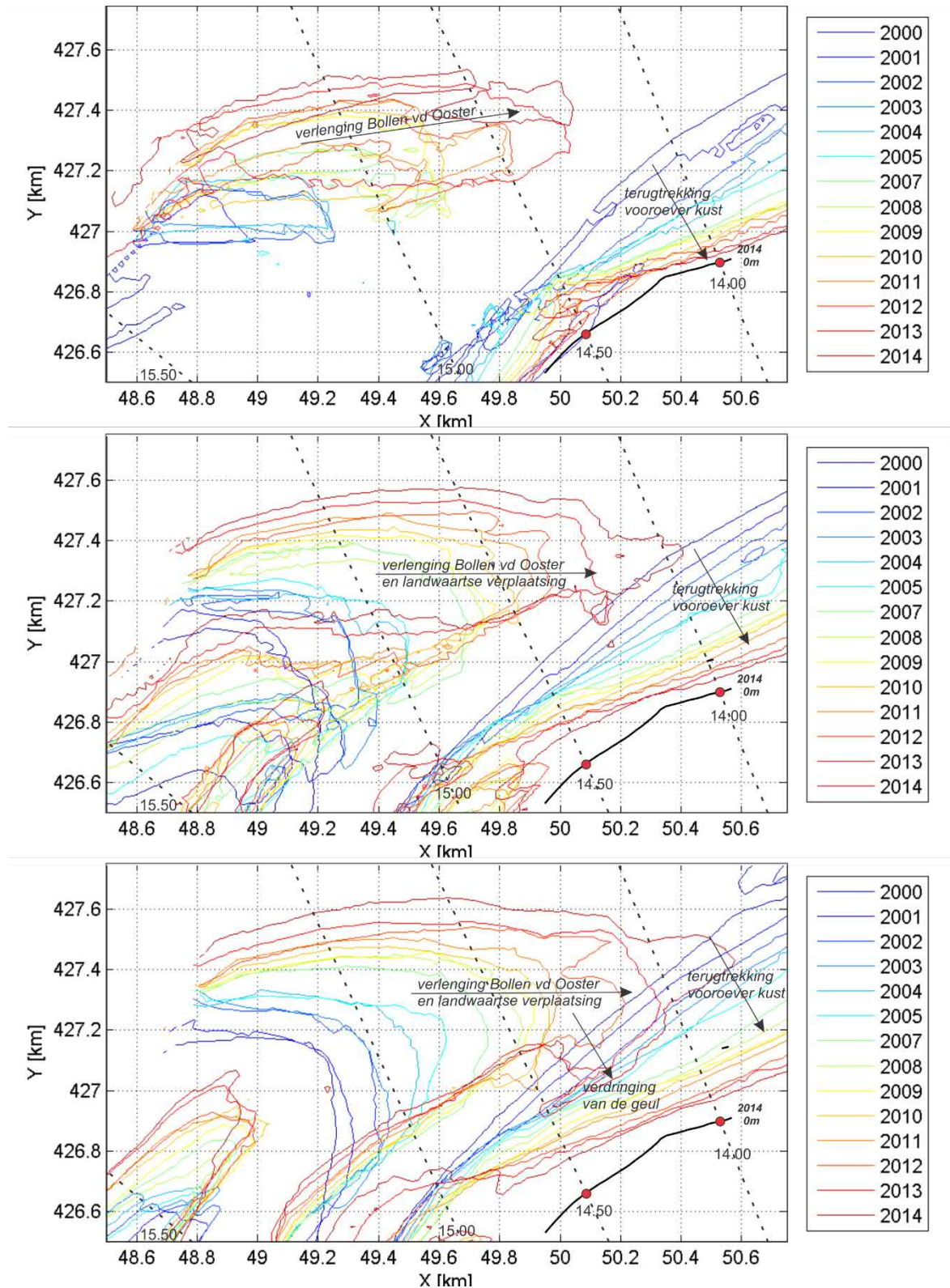
Deze raaien zijn opgenomen omdat het een goed beeld geeft van de eigenlijk zeer stabiele ligging van het kustprofiel tussen raai 16.50 en 19.00. In deze raaien vindt wel een lichte erosie van de strand en duinen plaats, maar de veranderingen zijn klein t.o.v. de meer noordelijk gelegen raaien.



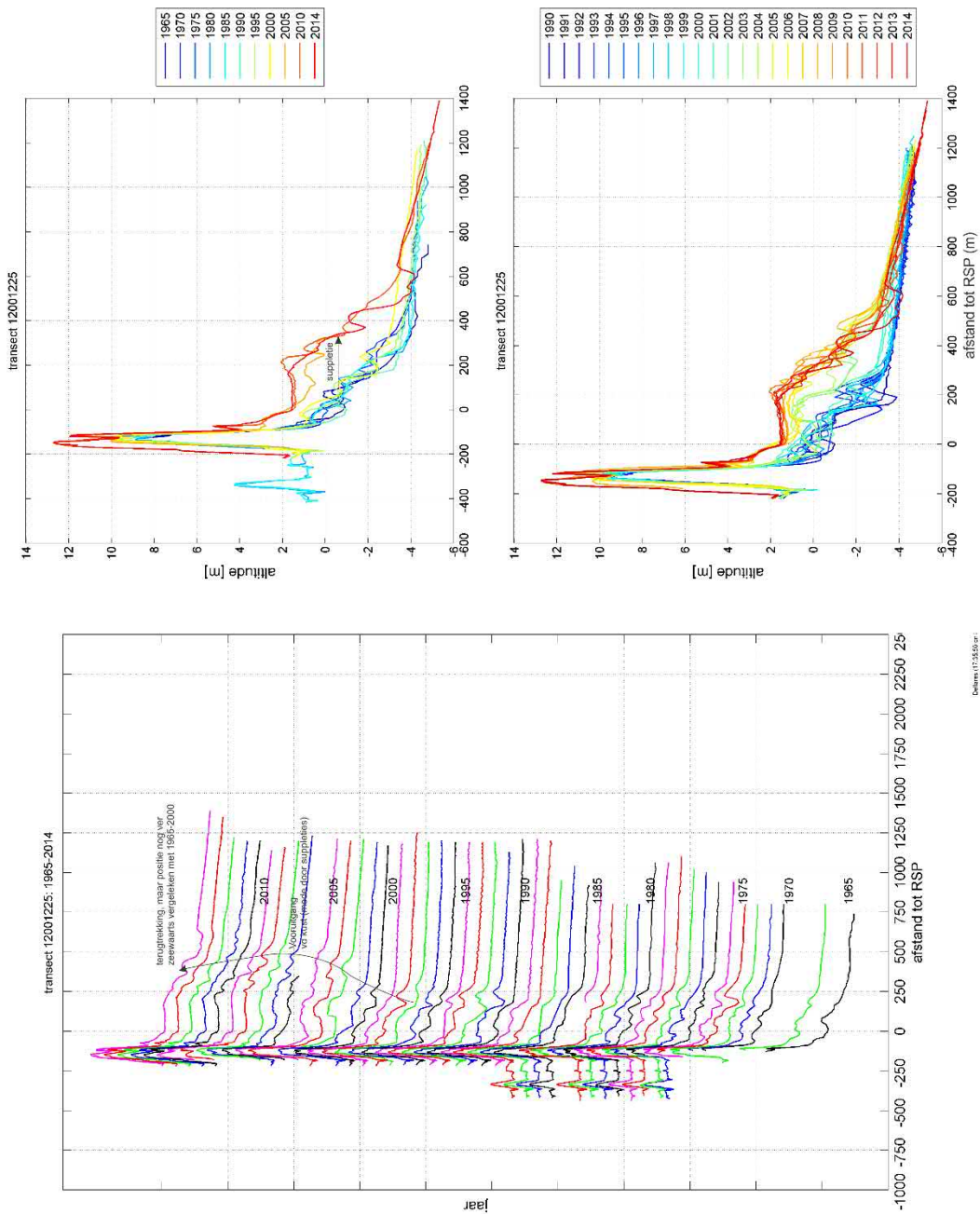
Figuur 2.7 Overzicht van de veranderingen aan de noordwestzijde van Goeree over de periode 1965-1987. (alleen de bodems met significante verandering worden hier getoond)



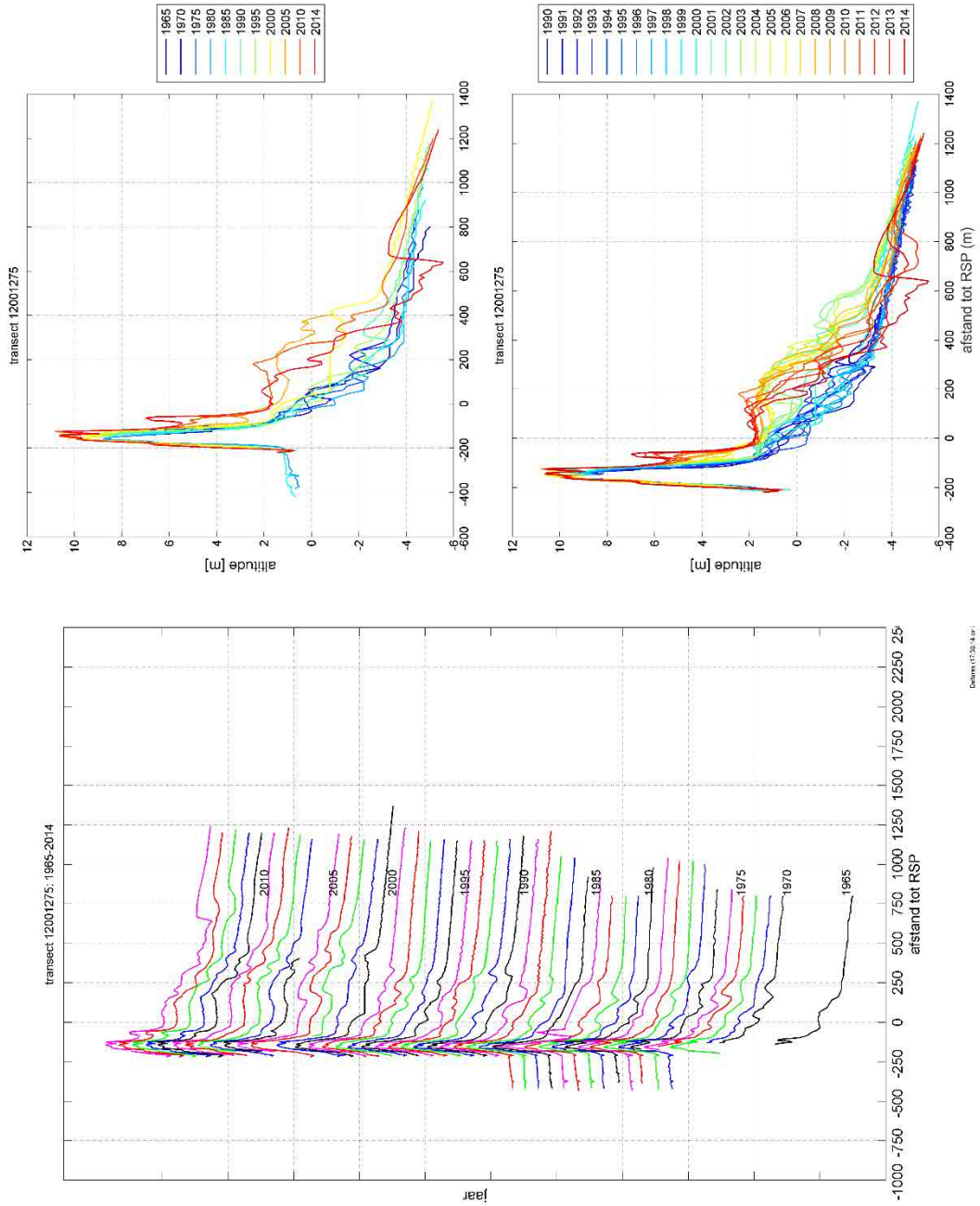
Figuur 2.8 Overzicht van de veranderingen aan de noordwestzijde van Goeree over de periode 1990-2014. (alleen de bodems met significante verandering worden hier getoond)



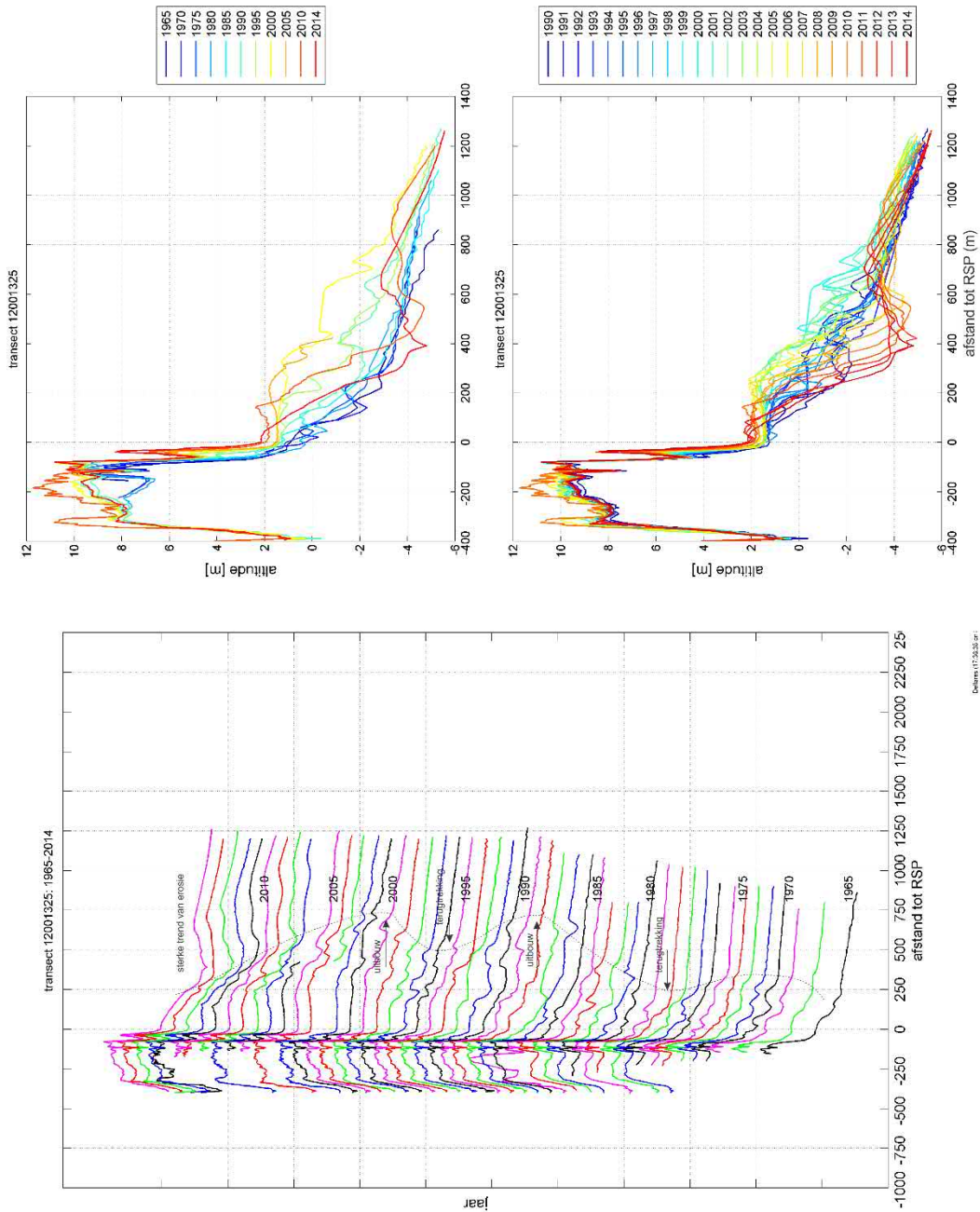
Figuur 2.9 Verplaatsing van de -1, -2 en -3m contour lijn (van boven naar beneden) nabij de kop van de Bollen van de Ooster, over de periode 2000-2014.



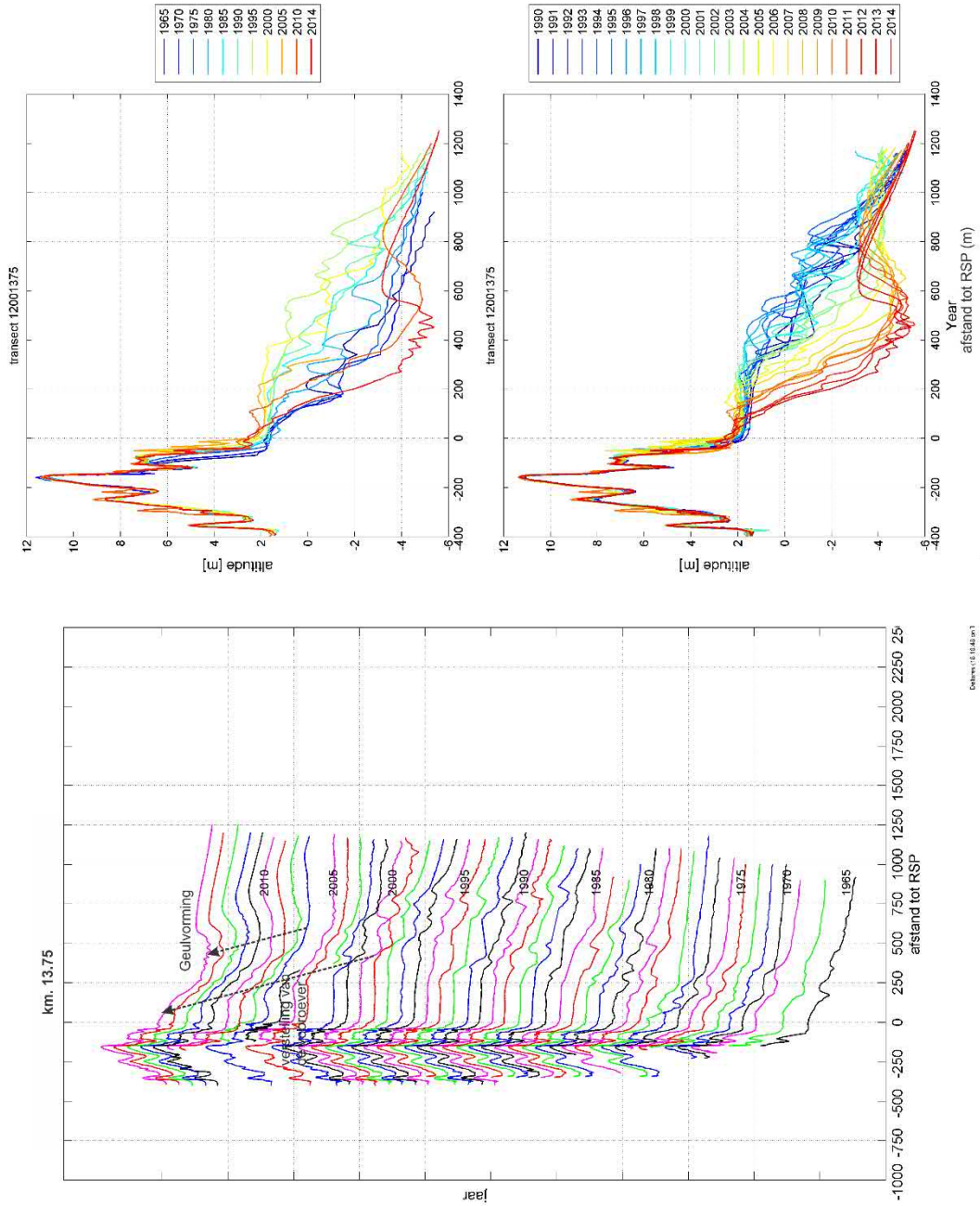
Figuur 2.10 : Ontwikking JarKus raai 1225 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



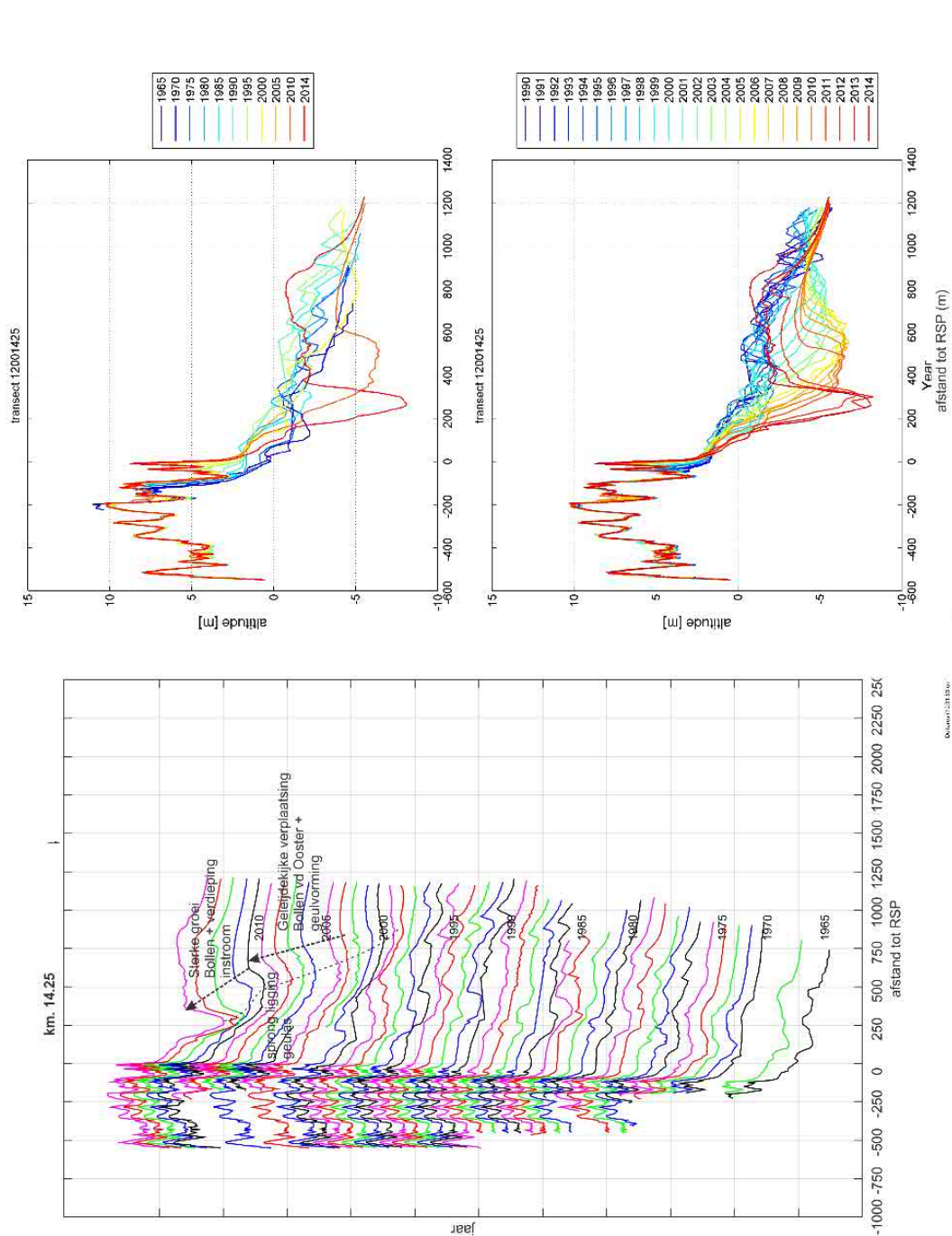
Figuur 2.11 : Ontwikkeling JarKus raai 1275 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



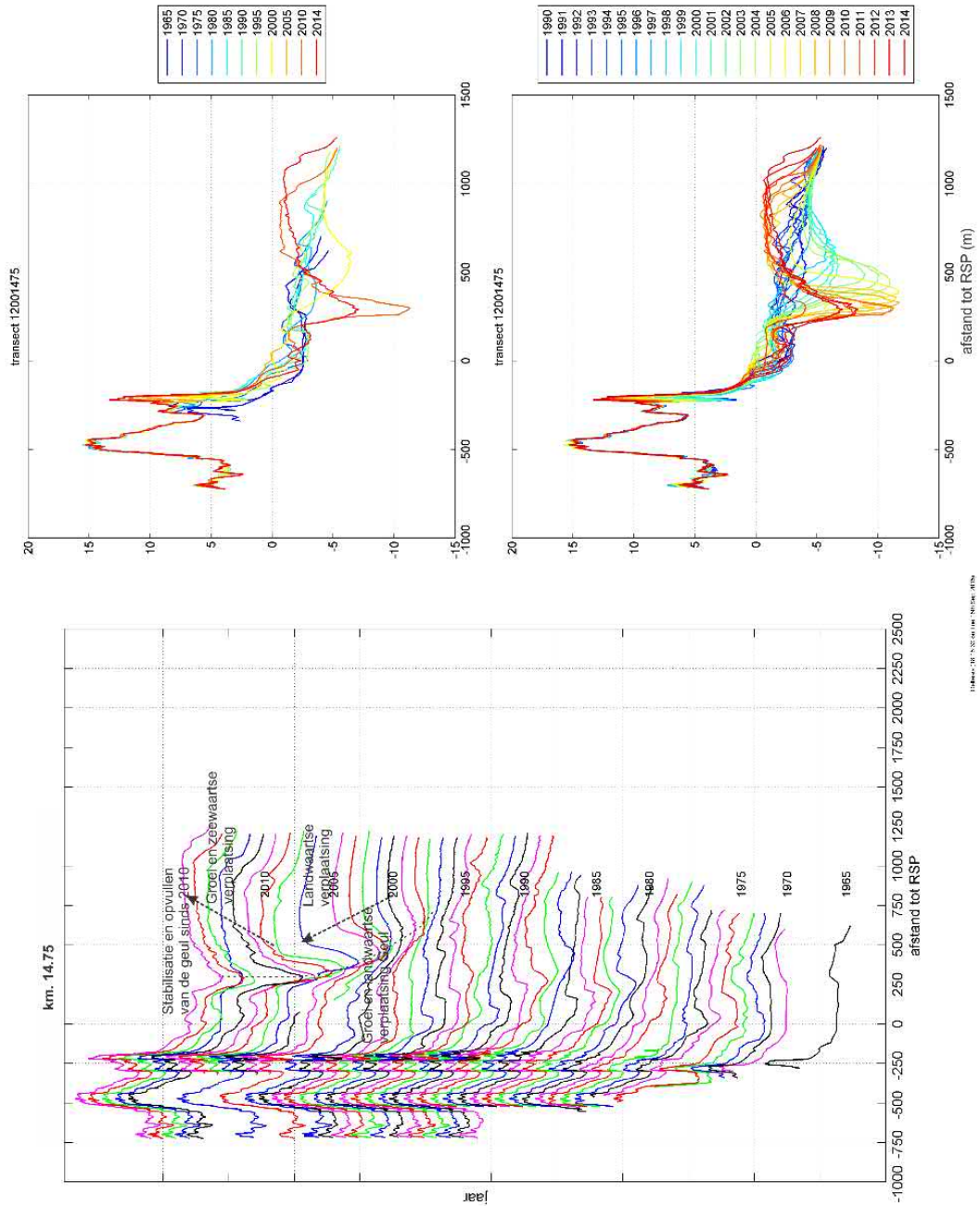
Figuur 2.12 : Ontwikking JarKus raai 1325 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



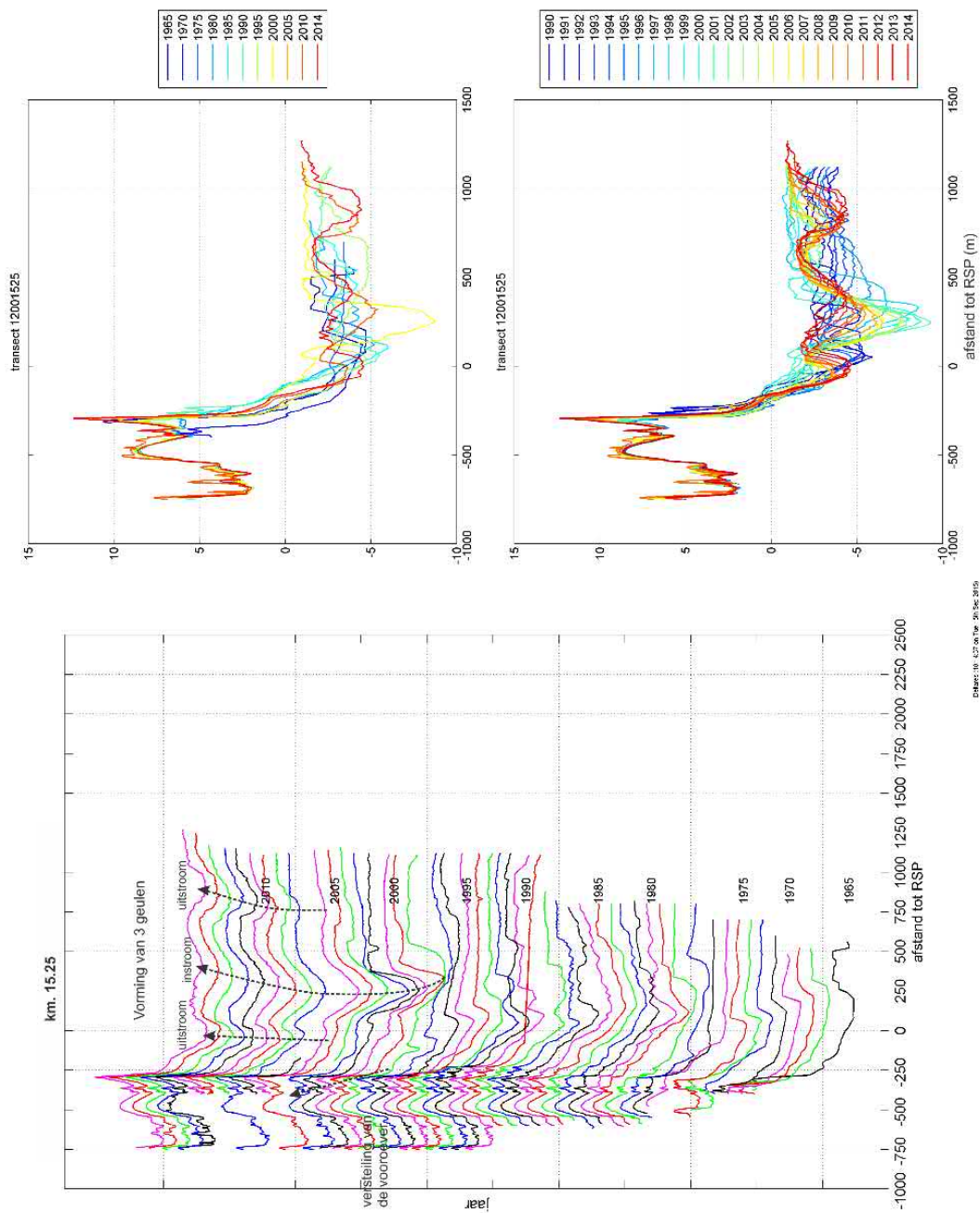
Figuur 2.13 : Ontwikkeling JarKus raai 1375 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



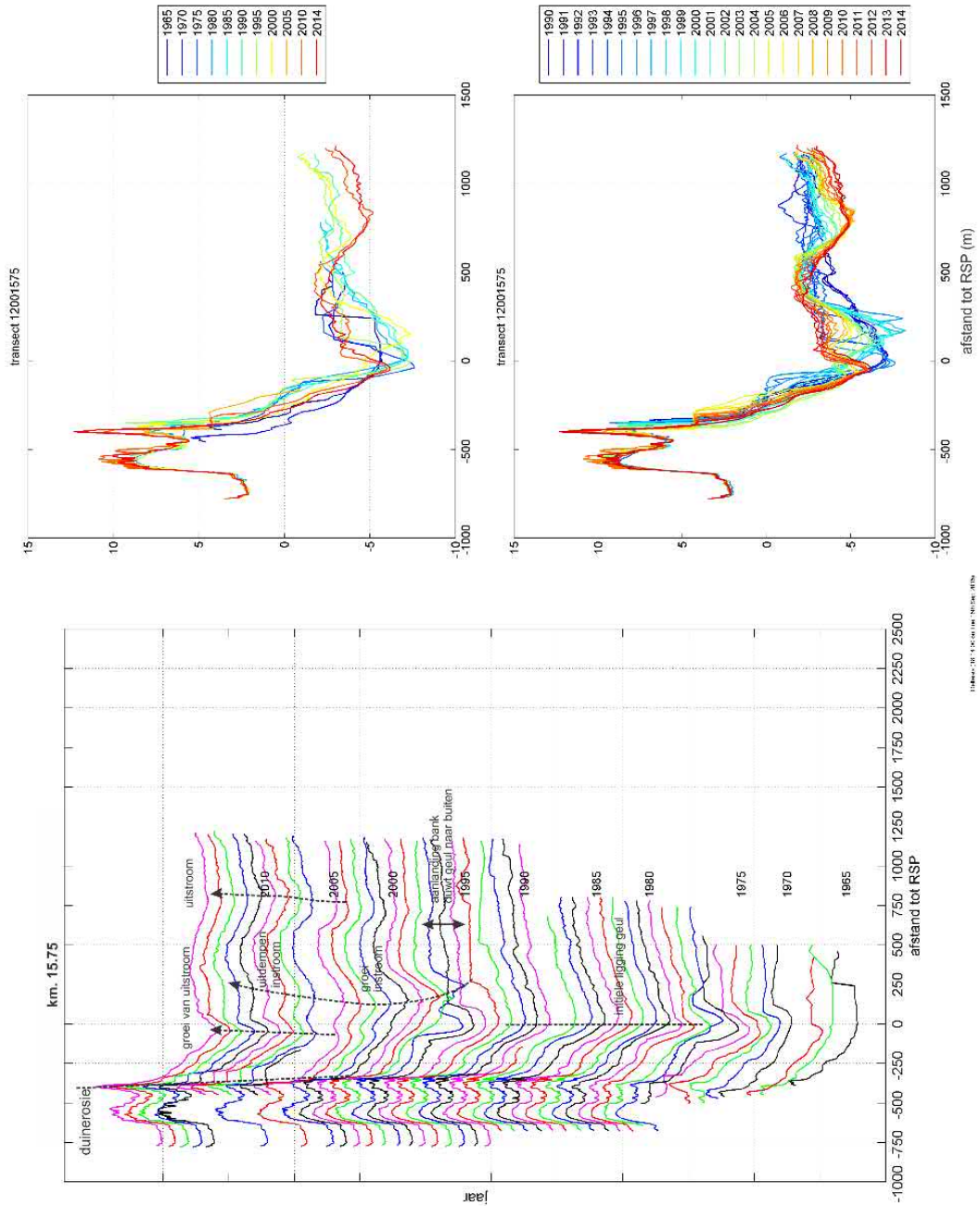
Figuur 2.14 : Ontwikking JarKus raai 1425 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



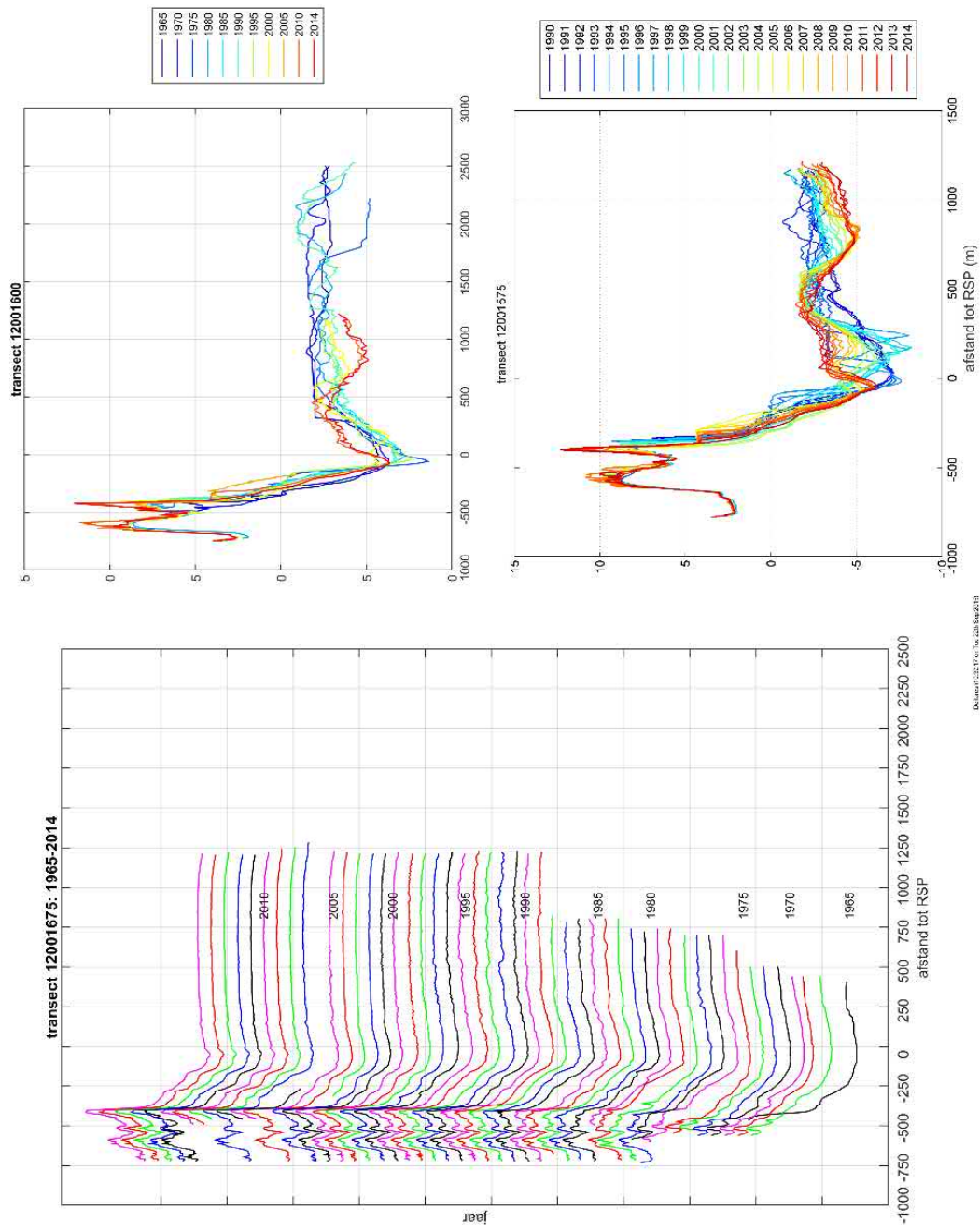
Figuur 2.15 : Ontwikkeling JarKus raai 1475 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



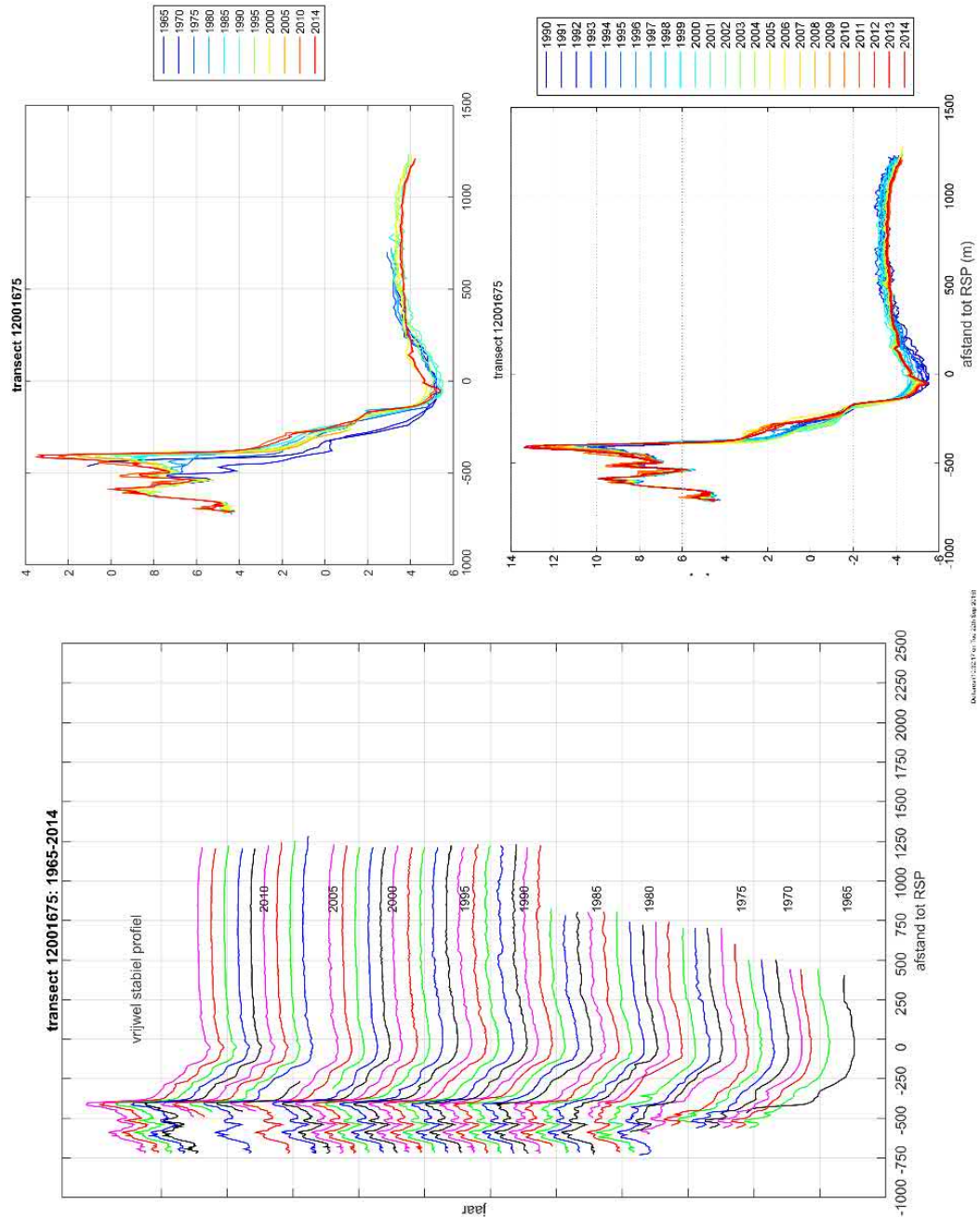
Figuur 2.16 : Ontwikkeling JarKus raai 1525 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



Figuur 2.17 : Ontwikkeling JarKus raai 1575 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



Figuur 2.18 : Ontwikking JarKus raai 1625 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.



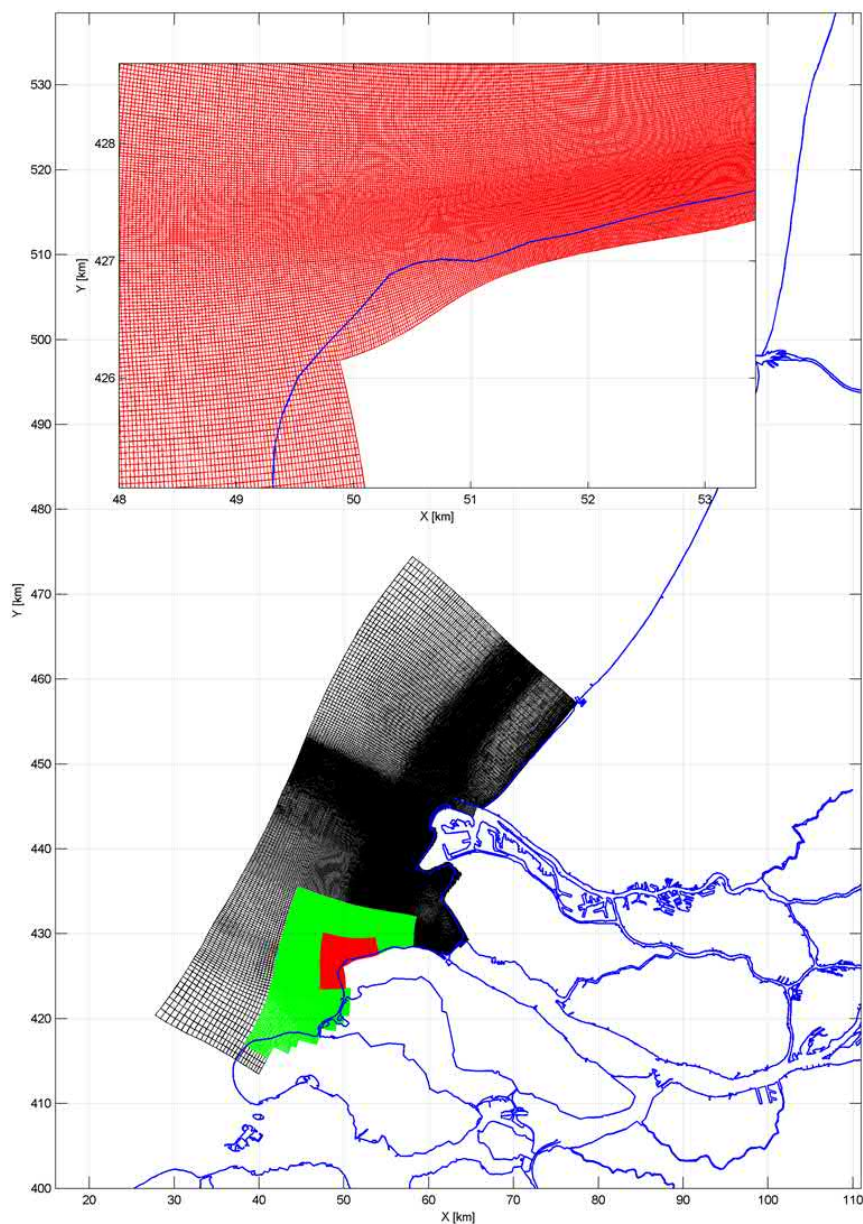
Figuur 2.19 : Ontwikkeling JarKus raai 1675 als timestack (links) en in 5-jaars interval (rechts boven) over de periode 1965-2014. Rechtsonder jaarlijkse profielontwikkeling 1990-2014.

3 Modelsimulaties; Effect van suppleren op stroomsnelheden

3.1 Model schematisatie

De hierin gepresenteerde modelsimulaties zijn niet bedoeld als uitvoerige modelstudie van de suppletievarianten. Met behulp van bestaande modellen wordt gekeken naar de initiële effecten van verschillende suppletie-varianten op de lokale stroombeelden tussen de Bollen van de Ooster en de kust van Goeree. Het Haringvliet model zoals oorspronkelijk ontworpen voor de Maasvlakte2 studies wordt hiervoor gebruikt (zie o.a. van Holland, 1997) als basis. De resolutie van dit model is ter plaatse van de kust van Goeree ontoereikend. Door middel van domein decompositie wordt een geschikte resolutie van ongeveer 20x20m nabij de Bollen van de Ooster verkregen. Figuur 3.1 geeft een overzicht van het model grid. Het zwarte grid is hierin het oorspronkelijke model. Door domein decompositie is het mogelijk lokaal het grid te verfijnen. Hiervoor zijn twee additionele grids toegevoegd, zodat op een geleidelijke manier, de vereiste resolutie ter plaatse van het studie gebied kan worden verkregen. Doordat de buitenkant van het model onveranderd is kunnen alle randvoorwaarden zoals afgeleid uit eerdere studies gebruikt blijven worden. Hierbij wordt impliciet de aanname gedaan dat de lokale veranderingen (grid verfijning) geen grote verandering op de grootschalige stroming veroorzaakt. Nadere analyse van de gemodelleerde stroomsnelheden in deze studie, geeft verder geen reden om aan te nemen dat deze aanname niet juist is. Verdere validatie en calibratie van het model valt buiten de scope van deze studie. De Maasvlakte 2 is in de studie niet meegenomen. De lokale resultaten van het Haringvliet worden hierdoor wel beïnvloedt. Een test simulatie laat zien dat de invloed van de Maasvlakte 2 verwaarloosbaar is rond de Bollen van de Ooster.

Het model wordt aangestuurd door middel van een morfologisch getij op de zeerand. Het morfologische getij geeft een representatief beeld van de sedimenttransporten over de springtij – doodtij getijcyclus en ligt over het algemeen rond de 10% boven het gemiddelde getij. Voor ieder suppletiealternatief worden 2 hele getijperioden aan data bewaard en geanalyseerd.



Figuur 3.1: Modelgrids van het stromingsmodel. De verschillende kleuren geven de 3 domeinen van het model weer. Het rode domein heeft een maximale resolutie van 20x20m ter plaatse van de Bollen van de Ooster. Het groene domein is nodig voor een nette overgang van lage naar hoge resolutie.

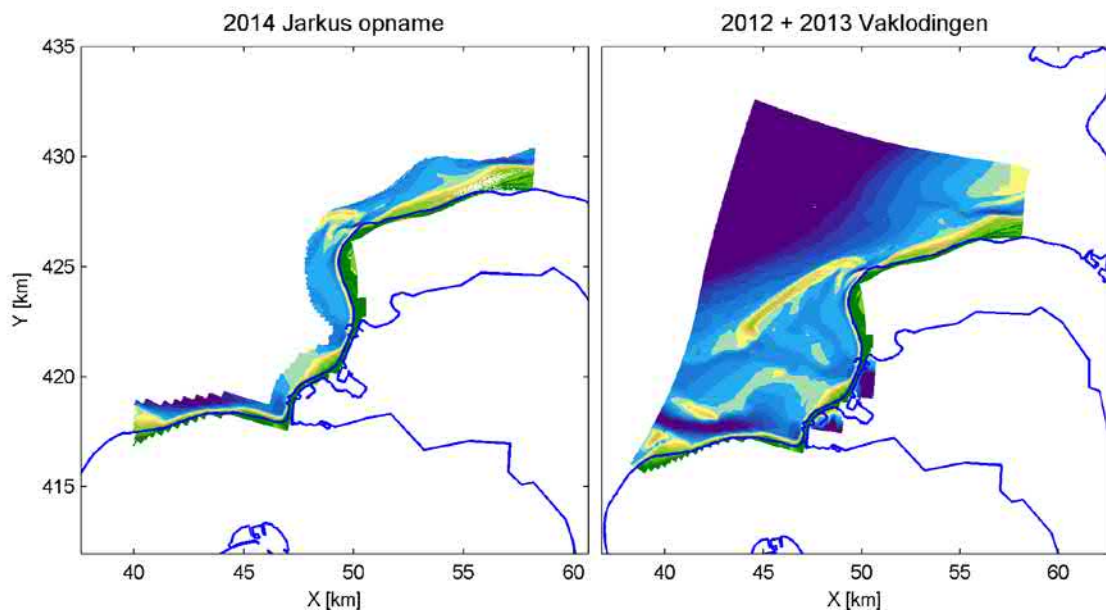
De bodem van het model is aangepast, zodat de huidige Bollen van de Ooster gemodelleerd kan worden. Als referentiebodem wordt hiervoor een 2014 bodem gecreëerd. Deze bodem bestaat uit de 2014 JarKus opname langs de kust, aangevuld met 2012 en 2013 Vakclodingen voor Haringvliet en Grevelingen. Figuur 3.2 geeft een overzicht van de gebruikte meetdata.

Naast de referentiesimulatie zijn in totaal 8 verschillende suppletievarianten doorgerekend. De resultaten van de 3 meest realistische varianten worden in dit hoofdstuk weergegeven. De resultaten van de overige 5 simulaties worden in Appendix A weergegeven. Deze resultaten worden hier verder niet geanalyseerd, maar geven wel een beeld van de gevoeligheid van de stromingen op de verschillende ingrepen.

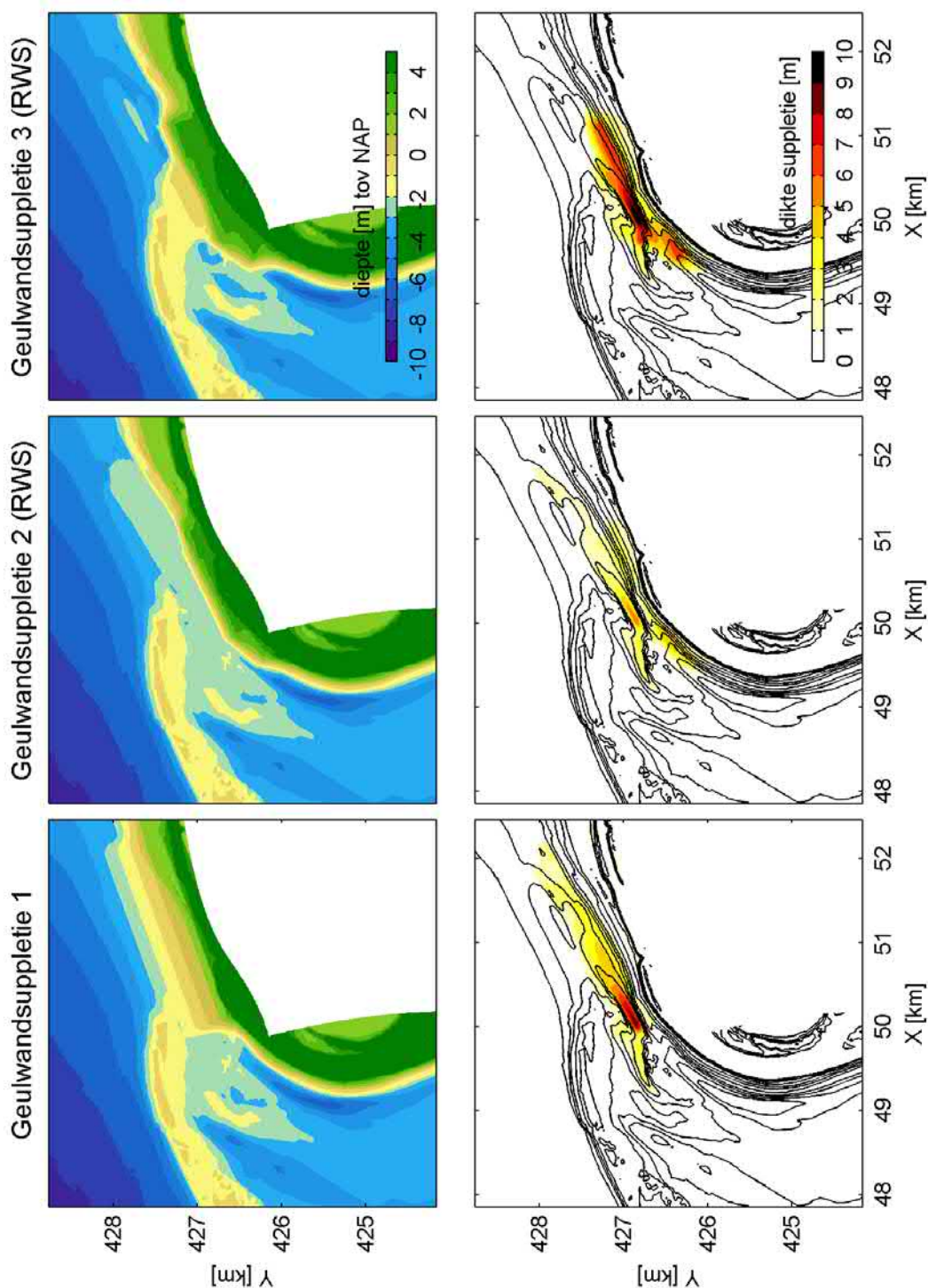
Figuur 3.3 geeft een overzicht van de drie verschillende suppletievarianten:

- Variant 1 is een voorbeeld van een zeer grote lang-gestreekte suppletie. De kruin van de suppletie ligt op 3m NAP. Het totale volume is 3.6 miljoen m³.
- Variant 2 is gebaseerd op het RWS ontwerp zoals gegeven in Figuur 3.4. Variant 2 geeft een geulwandsuppletie weer met vrij beperkte lengte en een kruinhoogte van +3m NAP. Het totale suppletievolume in de modelsimulatie is 2.5 miljoen m³.
- Variant 3, is gebaseerd op het Rijkswaterstaat ontwerp zoals gegeven in Figuur 3.5. In de derde variant is de geulwandsuppletie uitgebreid zodat de Bollen van de Ooster aansluit op de kust (de geul is dan effectief dicht gesuppleerd). Het totale volume van deze suppletie bedraagt 4.6 miljoen m³.

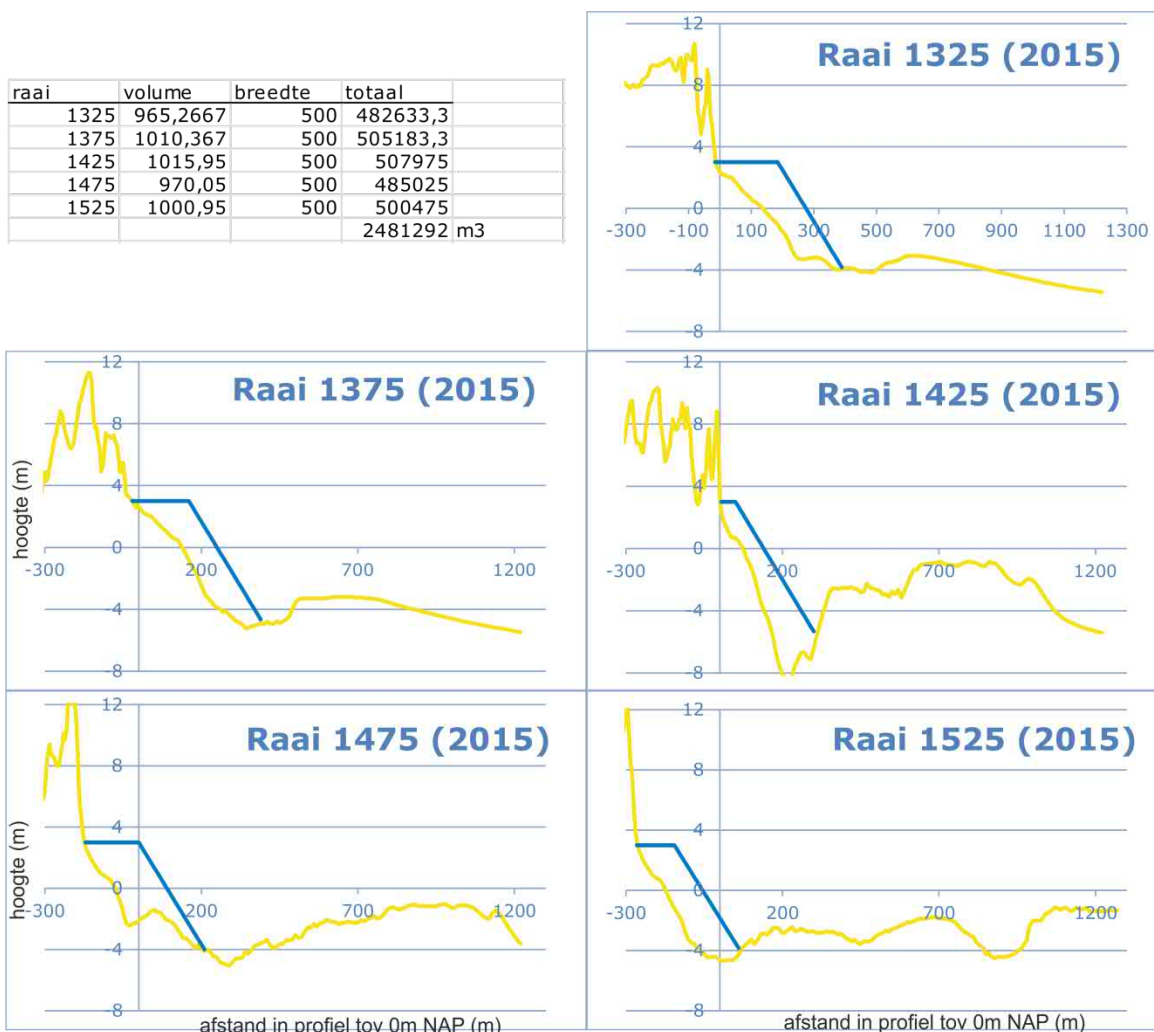
De volumes van de suppleties zoals gebruikt in het model wijken iets af van de door Rijkswaterstaat aangeleverde waarden. Dit komt doordat enerzijds doordat de initiële bodem gebaseerd is op de 2014 JarKus dataset (voor het aangeleverde ontwerp van RWS is de JarKus data van 2015 gebruikt). Daarnaast zijn in het model de kop en staart van de suppletie aangepast, zodat er een vloeiende overgang ontstaat tussen suppletie en omliggende kust. Met name in variant 3 is daarvoor ook een deel van de naast de suppletie liggende geul opgevuld.



Figuur 3.2: Overzicht van de gebruikte bodemdata in het model.

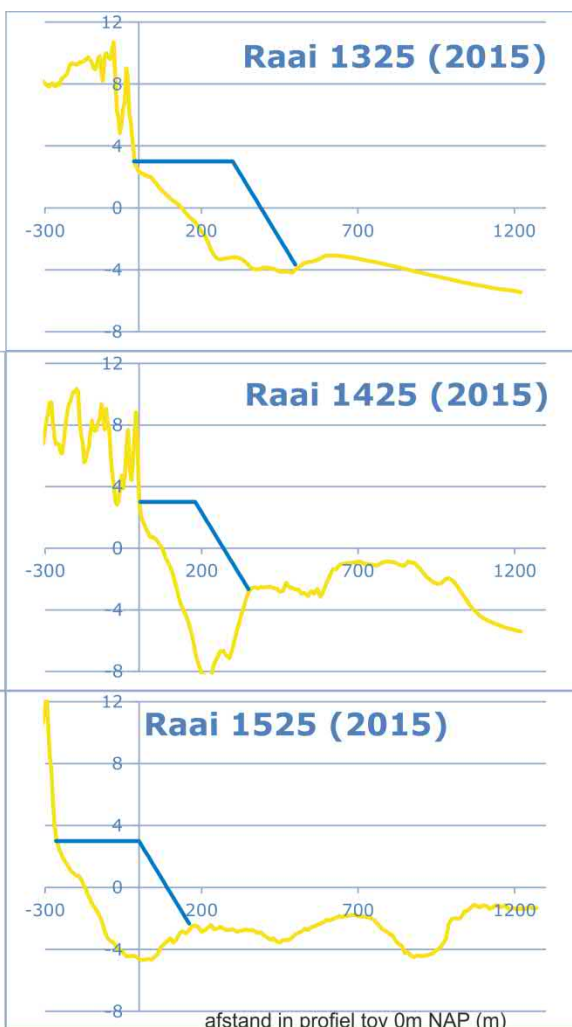


Figuur 3.3: Overzicht van de 3 alternatieven voor geulwandsuppletie. Boven: bodemschematisatie zoals gebruikt in het model. Onder: verschil in bodemligging tussen de verschillende suppletiealternatieven en de 2014 referentiebodem zonder suppletie.



Figuur 3.4 Ontwerpcriteria RWS Geulwandsuppletie 2

raai	volume	breedte	totaal
1325	1774,1	500	887050
1375	2137,067	500	1068533
1425	1952,35	500	976175
1475	2437,617	500	1218808
1525	1871,517	500	935758,3
			5086325 m3



Figuur 3.5 Ontwerpcriteria RWS Geulwandsuppletie 3

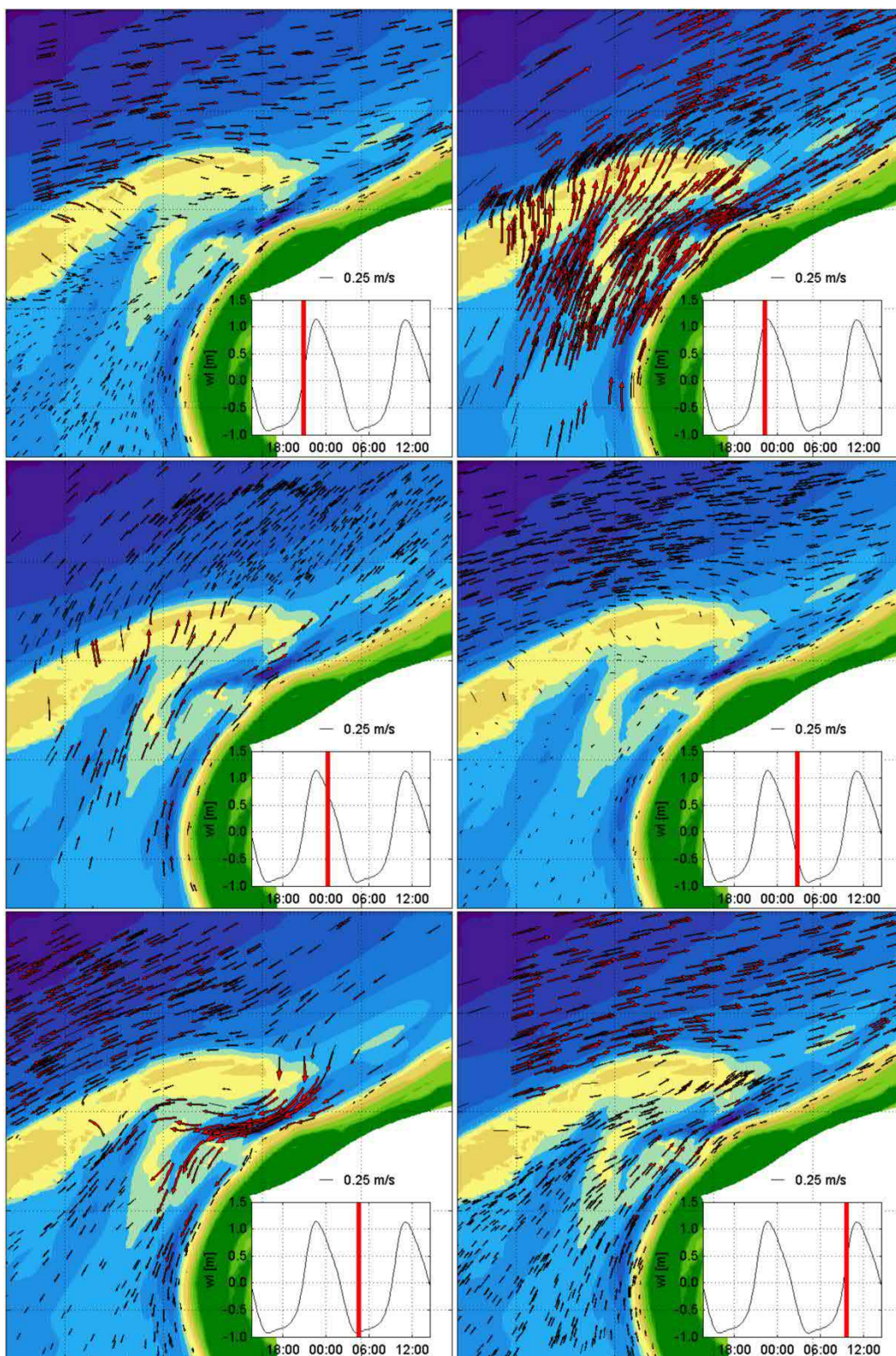
3.2 Model resultaten

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 kustradien.

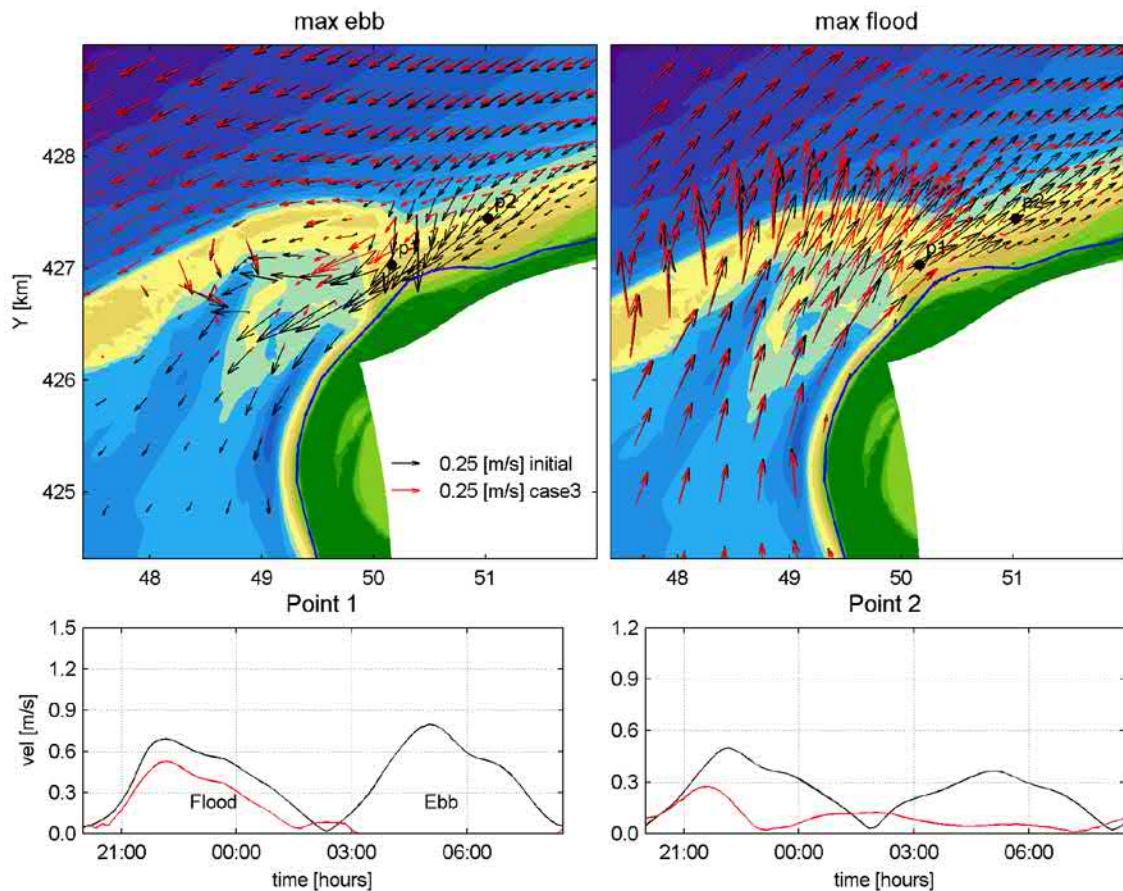
De modelresultaten worden hiervoor weergegeven door animaties van de stromingen door twee getijcycli (bijgevoegd aan dit rapport). Figuur 3.6 vat de animatie voor de referentie simulatie samen middels enkele representatieve stroombeelden. De grote invloed van de Bollen van de Ooster tijdens instroom (afgaand getij op de Noordzee) wordt hier goed inzichtelijk gemaakt. Grote zuidwaartse stromingen langs de kust zijn aanwezig als het getij zijn laagste waterstand bereikt. Hierdoor vormt de Bollen van de Ooster een obstakel voor de stroming. De stroming wordt zowel langs de zeewaartse als aan de landwaartse zijde geleid. Hierdoor ontstaan in het beperkte doorstroomoppervlak tussen de Bollen en de kust van Goeree grote stroomsnelheden. Deze stroomsnelheden verklaren de diepe geul (instroom) die zich hier dan ook heeft gevormd.

Tijdens het opkomende tij (noordwaartse stroming op zee) stroomt het water initieel vooral langs de zeewaartse zijde van de Bollen van de Ooster. Pas als de waterstand hoger staat, begint ook stroming vanaf de Brouwersdam (door Schaar) een rol te spelen. Tijdens maximale waterstand worden dan de hoogste stroomsnelheden bereikt. In tegenstelling tot de instroom, wordt deze stroming niet tussen de Bollen en de kust geduwd, maar vindt er een brede uitstroming over de Bollen van de Ooster plaats. Vanuit de morfologie was al een onderscheid gemaakt in verschil in dominantie (instroom versus uitstroom) voor de verschillende geulen. Het residuele stromingsbeeld weergegeven in Figuur 3.10 (linksboven) bevestigt dit beeld.

De effecten voor de verschillende varianten, worden samengevat in Figuur 3.7 tot en met 3.11. In Figuur 3.7, 3.8 en 3.9 worden de verschillen in maximale instroom en uitstroom weergegeven. Figuur 3.10 geeft een overzicht van de residuele stroombeelden. Figuur 3.11 geeft een overzicht van de gemiddelde en maximale stroomsterkte over de Bollen van de Ooster heen.



Figuur 3.6: Representatieve stroomvectoren over een getijcyclus voor de 2014 referentiesimulatie.

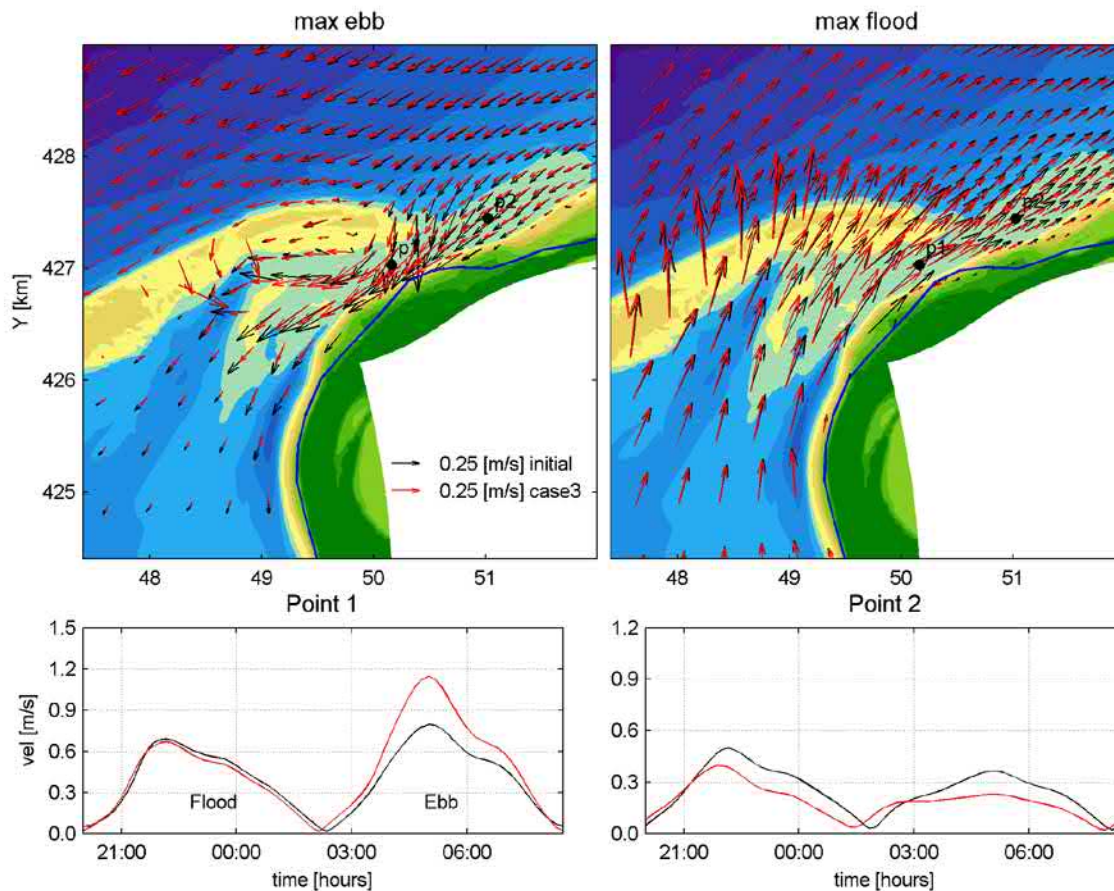


Figuur 3.7: Overzicht van de maximale eb- en vloedsnelheden voor Geulwandsuppletie 1 (rode pijlen) t.o.v. de referentiesimulatie (zwarte pijlen). Vectoren factor 8 uitgedund.

Figuur 3.7 geeft het effect van de grote geulwandsuppletie (alternatief 1) op de stroming weer. Deze suppletie is eigenlijk zo groot dat het de stroming tussen de Bollen van de Ooster en de kust vrijwel volledig geblokkeerd wordt. Hierdoor wordt voorkomen dat tijdens afgaand getij op zee instroming door de geul kan plaatsvinden. De grote instroomsnelheden door de geul worden dan ook niet waargenomen. De stroming wordt voornamelijk langs de bovenzijde van de Bollen van de Ooster geleid. De stromingen nemen daar echter niet toe. Het effect van de suppletie tijdens uitstroming is beperkt. Alleen lokaal, waar de suppletie is uitgevoerd, treden significante verschillen op.

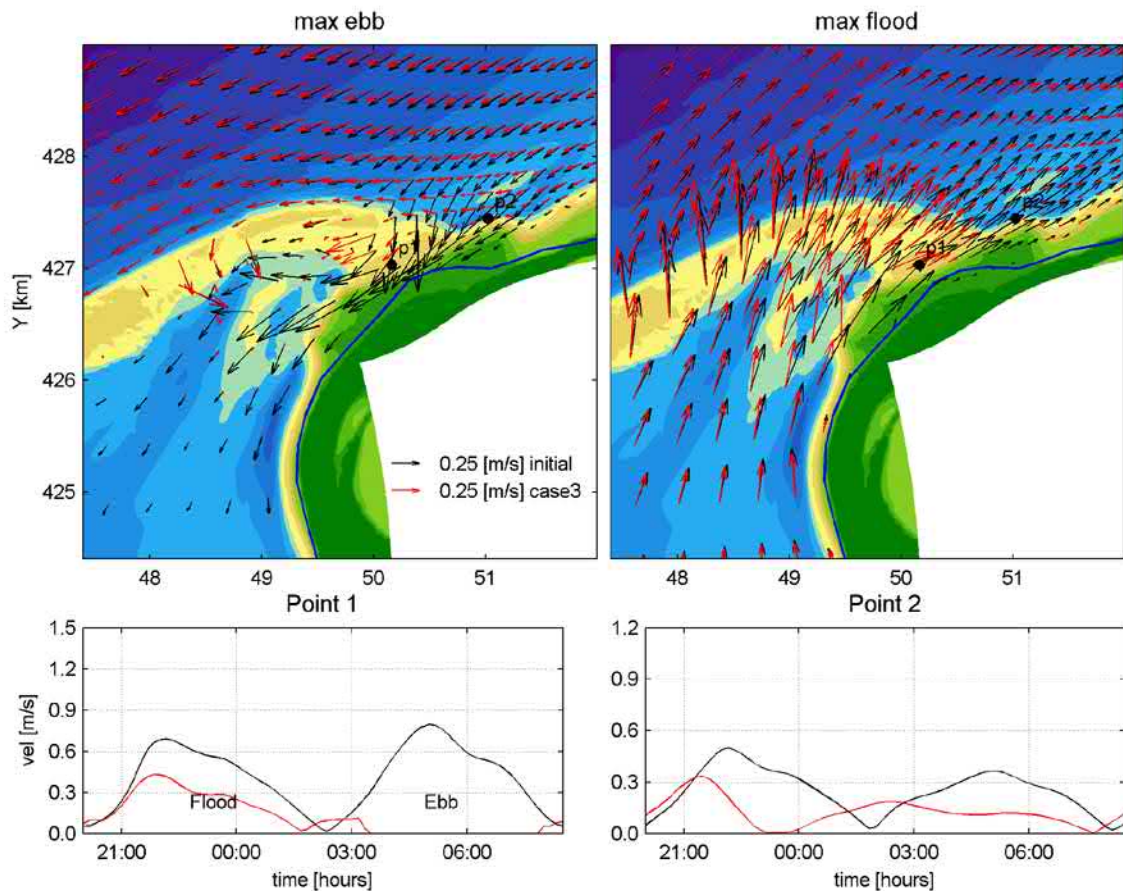
De suppletie sluit de geul echter niet volledig af. Bij het ontwerp van de suppletie was dit geen uitgangspunt. Een kleine opening tussen de suppletie en de Bollen van de Ooster blijft hier aanwezig. De stroomsnelheden door de geul worden door de suppletie sterk verlaagd, maar er zijn nog wel grotere snelheden direct langs de suppletie zichtbaar. Bij volledige afsluiting van de geul (variant 3, Figuur 3.5) treden deze snelheden niet op.

Richting het noorden nemen de snelheden direct langs de kust over het algemeen iets af. De stroming wordt meer zeewaarts geduwd en niet landwaarts.



Figuur 3.8: Overzicht van de maximale eb- en vloednelheden voor Geulwandsuppletie 2 (rode pijlen) t.o.v. de referentiesimulatie (zwarte pijlen). Vectoren factor 8 uitgedund.

Figuur 3.8 geeft het effect van een reguliere geulwandsuppletie (alternatief 2) weer. Deze suppletie verkleint (minder waterdiepte) de doorstroomopening tussen de Bollen van de Ooster en de kust. Hierdoor worden de stromingen tijdens instroom juist versterkt. Het is dan ook de verwachting dat (in ieder geval initieel) grotere verliezen van de suppletie zullen optreden. De effecten zijn vooral lokaal merkbaar tijdens de instroomfase. Tijdens uitstroom zijn de effecten beperkt. Uit deze stroombeelden volgt eigenlijk geen grote of negatieve invloed langs het strand buiten het suppletiegebied (noord en zuid). Ten noorden, richting het Flauwe werk lijken de stromingen juist iets af te nemen. De suppletie zorgt er wel voor dat er iets meer uitstroom over de Bollen plaatsvindt, mede hierdoor reduceren de snelheden ten noorden van de suppletie. De stroming aan de zeezijde van de Bollen van de Ooster lijkt zowel tijdens instroom als uitstroom niet significant te veranderen. Het is dan ook niet aannemelijk dat deze suppletievariant op grote schaal grote effecten zal hebben.



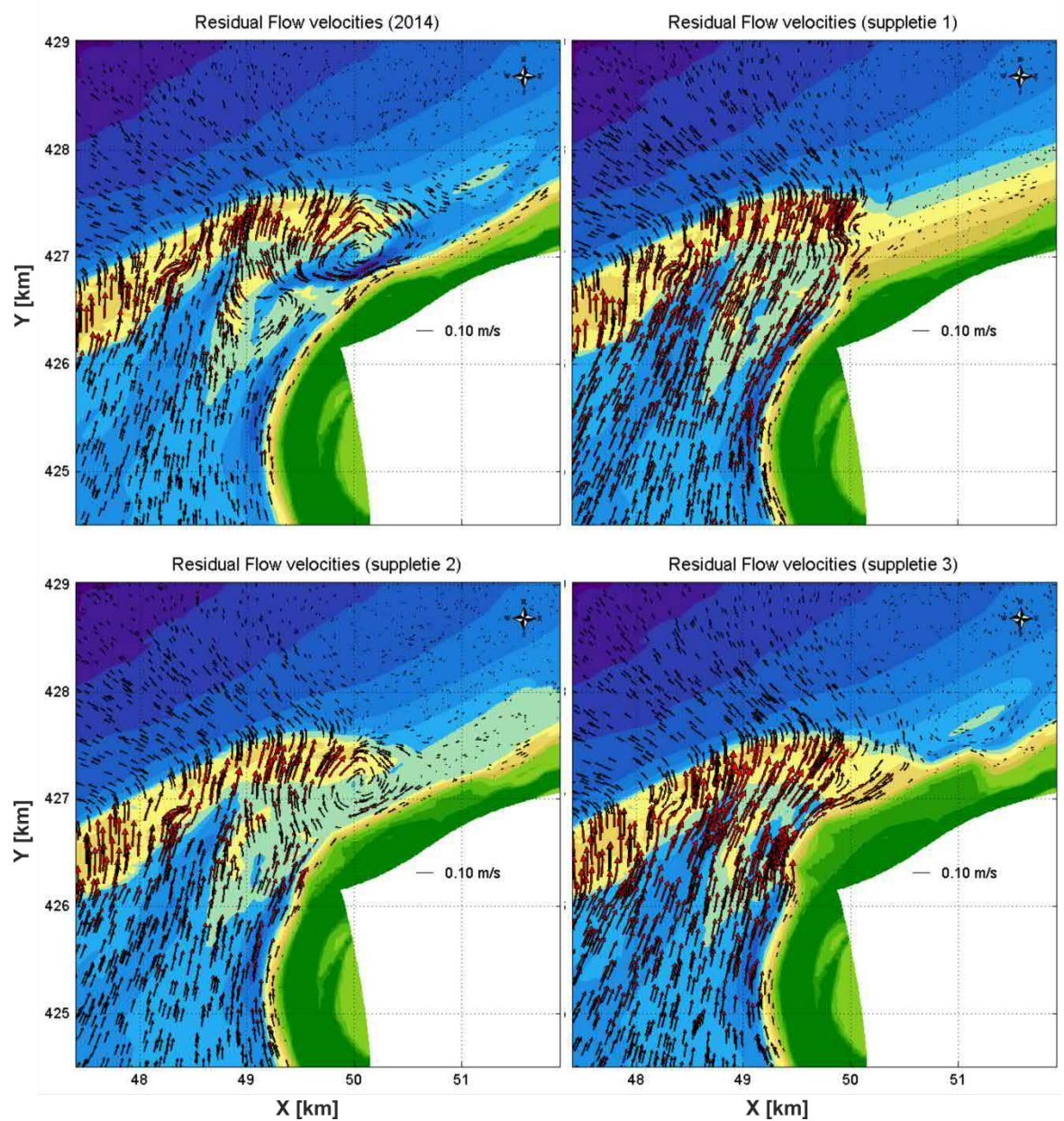
Figuur 3.9: Overzicht van de maximale eb- en vloedsnelheden voor Geulwandsuppletie 3 (rode pijlen) t.o.v. de referentiesimulatie (zwarte pijlen). Vectoren factor 8 uitgedund.

Figuur 3.9 geeft het effect van een geulwandsuppletie waarbij de Bollen van de Ooster aan de kust wordt vastgezet (alternatief 3). In deze variant reduceren de stroomsnelheden tijdens instroom significant. De stroming wordt nu vooral via de zeewaartse kant van de Bollen geleid. In de luwte van de Bollen reduceren de stroomsnelheden tot bijna nul. Deze variant geeft ook een duidelijke beïnvloeding van de stroming tijdens uitstroom fase van het getij. De uitstroom vindt nu meer zuidelijk, over de Bollen van de Ooster plaats. Ook nemen de stroomsnelheden over de Bollen toe. Langs de aanliggende kust van Goeree nemen deze juist af.

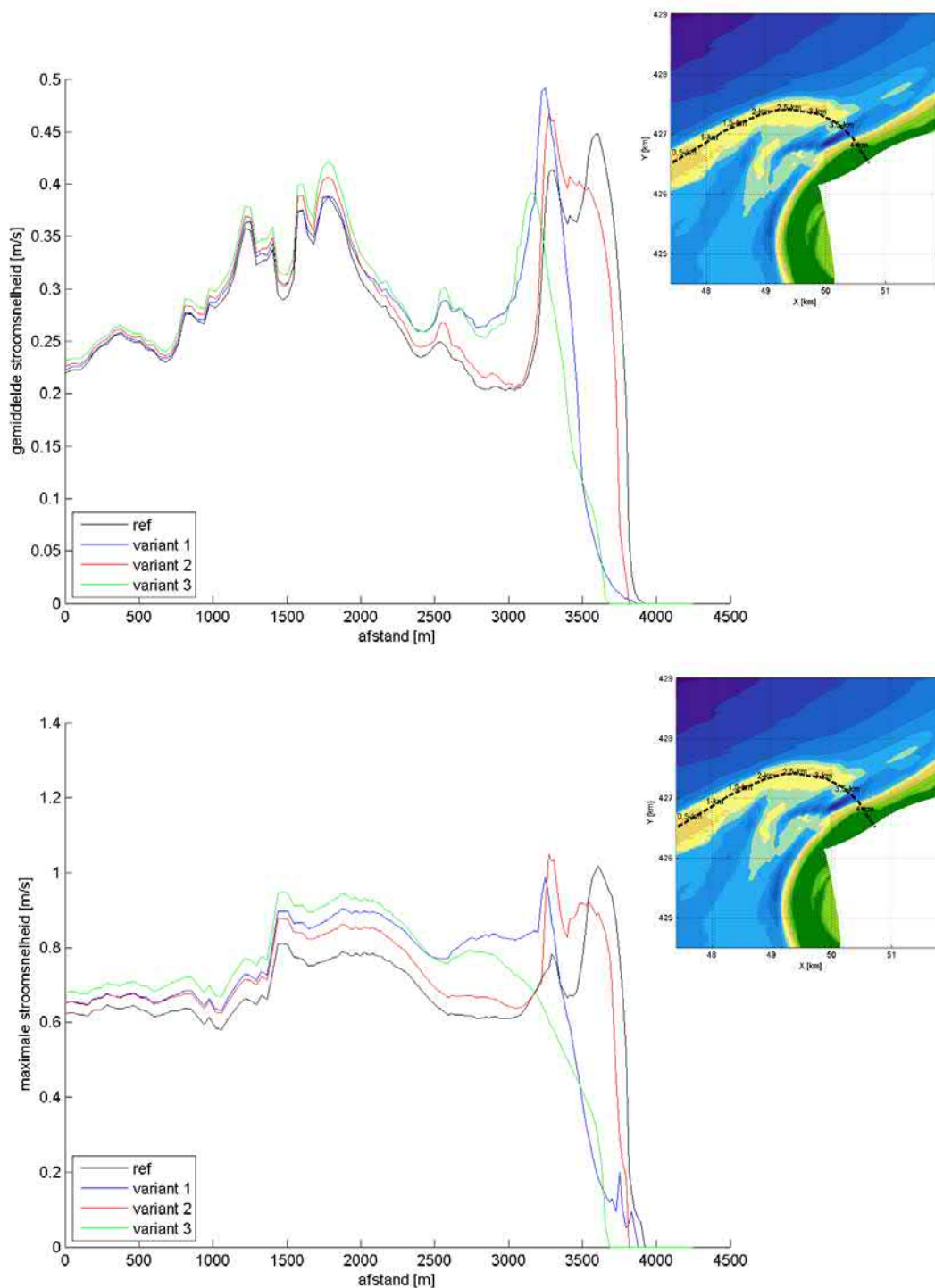
De mogelijke effecten van de verschillende de suppletievarianten op stroming over de Bollen van de Ooster worden ook weergegeven in Figuren 3.8 en 3.9. De residuele stroming geeft het stroombeeld gemiddeld over de getijperiode. Residuele stroming kan worden gezien als een indicator voor het sediment transport. Als er significante verschillen in de residuele stroombeelden zitten tussen de referentiesimulatie en de alternatieven kan dit duiden op een mogelijke verandering in de sediment transporten en daarmee ook de morfologie. Het residuele stroombeeld in de referentie simulatie (Figuur 3.8, linksboven) geeft een zeewaartse stroming over de Bollen van de Ooster en een voornamelijk noordwaartse stroming langs de kust van Goeree. In de geul tussen de Bollen van de Ooster en de kust zien we een zuidelijke stroming. De verschillen in zuidelijke en noordelijke stromingen komen goed overeen met de verschillende morfologische kenmerken in het gebied en verklaren de afwisseling tussen geulen en platen goed.

Figuur 3.10 (rechtsonder) laat zien dat het patroon van de residuele stroming ten gevolge van suppletievariant 2 niet aanzienlijk veranderd. Wel is de residuele instroming tussen de Bollen van de Ooster en de kust aanzienlijk kleiner. Dit laatste komt omdat de instroming kleiner is en de uitstroming vrijwel onveranderd. Dit heeft ook als gevolg dat de residuele stromingen door de geul en langs de kust aan de zuidwest zijde van Goeree juist wat toenemen.

Suppletiealternatieven 1 en 3 laten juist zien dat hier de residuele stroming over de Bollen van de Ooster heen toeneemt. Dit beeld wordt verder bevestigd in Figuur 3.11. In deze figuur is een raai getrokken over de Bollen van de Ooster heen (zie kleine figuren voor ligging) en zijn de gemiddelde en maximale stromingen gedurende de getijperiode weergegeven. Voor suppletiealternatief 1 is er een afname van de gemiddelde stroomsnelheden in de geul. Op de Bollen van de Ooster zijn de verschillen beperkt. De maximale stroomsnelheden nemen duidelijk af. De piek van 1 m/s in de geul wordt niet meer geobserveerd. Het beïnvloede gebied strekt zich iets verder uit op de Bollen van de Ooster. Tot 1 km vanaf de geulen zijn de snelheden lager. Alternatieven 2 en 3 vertonen een grotere invloed op de stroming over de Bollen. Ter plaatse van de suppletie zijn de stromingen over het algemeen lager. De residuele stroming in de geul voor alternatief 2 neemt echter niet significant af. Deze blijft vrijwel gelijk al is de piek zeewaarts verschoven. De gemiddelde en de maximale stroming over de Bollen van de Ooster (km.2 – 3.5) neemt in beide varianten significant toe.



Figuur 3.10: Overzicht van de residuele stroomsnelheden voor de referentie simulatie en 3 alternatieven.



Figuur 3.11: Overzicht van de verandering in getijgemiddelde stromingsmagnitude (bovenste plot) en de verandering in maximale stroom-snelheidsmagnitude gedurende het getij (onderste plot) over de Bollen van de Ooster voor de verschillende varianten t.o.v. de referentie simulatie. Afstand is in m t.o.v. een beginpunt op de Bollen (zie kleine figuren voor afstand over de Bollen van de Ooster).

4 Discussie en Conclusies

4.1 Morfologie van de Bollen van de Ooster

Beschrijving van het gebied

Analyse van de beschikbare meetdata geeft een goed beeld van de opgetreden veranderingen rond de kop van de Bollen van de Ooster en de aanliggende kust van Goeree. Detailanalyse van de morfologie tussen de Bollen van de Ooster en de kust van Goeree laat zien dat er een grote ruimtelijke variatie in morfologisch gedrag plaatsvindt. De geul Schaar is geen doorgaande geul vanaf de Brouwersdam naar zee toe, maar bestaat eigenlijk uit twee delen. Het landwaartse deel is gedomineerd door uitstroom (vanaf de Brouwersdam naar zee). Het zeewaartse deel door de instroom. Op de noordwestkop van Goeree, net achter de Bollen, komen deze geulen samen. In dit overgangsgebied is een 3-geulenstelsel aanwezig, met de uitstroomgeulen aan de buitenkant, langs de kust en zeewaarts richting de Bollen, en de instroomgeul in het midden.

Morfologische veranderingen

Op grote schaal kan worden geconcludeerd dat de Bollen van de Ooster zich noord-oostwaarts (en landwaarts) verplaatst. De geul die zich tussen de Bollen van de Ooster en de kust bevindt, volgt deze ontwikkeling en wordt vanuit deze reddenatie de kust ingedrukt. Op basis van de modelresultaten kan deze beschrijving worden aangescherpt. De modelresultaten laten zien dat juist tijdens afgaand getij op zee, hoge zuidwaarts gerichte stroomsnelheden langs de kust van Goeree ontstaan. Deze stromingen worden samengeknepen en versnellen tussen de Bollen van de Ooster en de kust. Dit veroorzaakt hier hoge (in)stroomsnelheden. Deze stromingen verklaren de aanwezigheid van de diepe geul die zich aan de kop van de Bollen van de Ooster heeft gevormd. Deze geul beweegt zich mee, met de verplaatsing van de Bollen van de Ooster. De Bollen van de Ooster verplaatsen zich noordwaarts door de overheersende golfgedreven transporten. De stromingen die tussen de Bollen en de kust worden geperst zullen wel bijdragen tot het zeewaarts houden van de Bollen. Zonder deze stroming zouden de Bollen van de Ooster wel al tegen de kust zijn gedrukt. Het erosiegebied dat samenhangt met de geul en stromingen verplaatst zich dus ook langzaam noordwaarts. In deze studie is niet gekeken naar de noordelijke grens van invloed. Toch is het aannemelijk dat erosie rond km. 12 al gerelateerd zal zijn aan de versnelling van de stroming naar de Bollen toe en de daaraan gerelateerde transportgradiënten.

Toekomstige ontwikkelingen

Vanuit de meetdata is niet direct af te leiden of de Bollen van de Ooster op korte termijn gaan aanlanden. De Bollen van de Ooster strekken zich vooral noordelijk uit. Het is wel waarschijnlijk dat dit zich niet oneindig zal voortzetten. Vooral in 2013 is er een duidelijke trend van kustwaartse verplaatsing opgetreden. Dit heeft een duidelijk knippunt in de instroomgeul veroorzaakt. Op basis hiervan is een aanlanding wel te verwachten. De 2014 bodem geeft echter geen duidelijkheid over de tijdsschaal. De 2014 bodem ligt kustdwars, vrijwel gelijk aan de 2013 bodem, maar heeft zich wel verder noordwaarts verplaatst.

Cyclisch gedrag

Cyclisch gedrag, het periodiek aanlanden van kleinere banken op de kust van Goeree, is waarneembaar in de periode tot 1994. Eigenlijk is dit de periode voordat de Bollen van de Ooster zich als lange, hoge en ondoorbroken bank heeft gevormd. Sindsdien accumuleert het zand zich in de Bollen van de Ooster en niet in kleinere banken die kunnen aanlanden. Daarnaast bevindt er zich sinds 1994 een barrière tussen de Bollen en de kust, in de vorm

van een relatief grote geul. Het ontstaan en gedrag van de Bollen van de Ooster is een eenmalige gebeurtenis en gerelateerd aan de afsluiting van de Grevelingen monding, waardoor er heel veel zand te ver zeewaarts ligt. Dit zand, het voormalige buitendeltafront, wordt door golven landwaarts verplaatst en heeft zodoende de Bollen van de Ooster gevormd. Uiteindelijk zal er zich een 'normale strandvlakte vormen'. De veranderingen van de Hinderplaat in de naastliggende Haringvlietmonding geven een goed toekomstbeeld van de toekomstige ontwikkelingen van de Bollen van de Ooster.

4.2 Effecten van Geulwandsuppleties

Met behulp van de modelsimulaties wordt een duidelijk inzicht verkregen in het effect van de suppletievarianten op de stroomsnelheden. Een belangrijke conclusie is dat een reguliere geulwandsuppletie, waarbij de geul slechts gedeeltelijk wordt volgestort, leidt tot grotere instroomsnelheden. De volumes van de geulwandsuppletie geven een significante reductie van het doorstroomoppervlakte waardoor de snelheden toenemen. Vergelijken we dit bijvoorbeeld met geulwandsuppletie bij het Oostgat, daar is de verkleining van het doorstroomoppervlak relatief beperkt en heeft de suppletie vrijwel geen effect op de stroomsnelheden. Op basis van de vergrote stroomsnelheden kan wel worden geconcludeerd dat er in deze variant grote verliezen van de suppletie zullen optreden (in ieder geval groter dan dat op basis van de huidige trend zou worden afgeschat). De stroomsnelheden langs de aanliggende kust, ten noorden en zuiden van de suppletie, lijken initieel niet significant te veranderen. Op basis van de initiële simulaties is een vergrote erosie van het strand niet aan te tonen. Dit wil niet zeggen dat er geen veranderingen gaan optreden. Vooral in alternatief 2 nemen de stroomsnelheden rond de Bollen van de Ooster toe. Dit zal morfologische veranderingen gaan veroorzaken. Zolang er een duidelijk opening zit tussen de Bollen van de Ooster en de kust zal de stroming hierdoor versnellen en lokaal erosie veroorzaken. Door een verdere noordwaartse verplaatsing, eventueel versneld door de gedeeltelijke suppletie, kan dus de erosie noordwaarts toenemen.

Op basis van deze simulaties kan worden geconcludeerd dat de stroming over het strand en intergetijdegebied. Naar alle waarschijnlijkheid zal afnemen. Ter plaatse van de Bollen worden stromingen de kust ingedrukt door de elkaar ontwijkende in- en uitstroomegeulen. De Bollen van de Ooster en de elkaar ontwijkende geulen zorgen ervoor dat geulen lokaal de kust worden ingedrukt waardoor er grote stroomsnelheden langs het strand en intergetijdegebied optreden. Door de suppletie wordt de instroomgeul gereduceerd of geheel dichtgezet waardoor dit proces afneemt. Hoe deze verliezen, die ergens anders in het systeem gaan accumuleren, zich op langere termijn gedragen is op basis van deze simulaties niet in te schatten. Het is wel aannemelijk dat verdere landwaartse verplaatsing van de Bollen van de Ooster een vergelijkbaar effect op de stromingen gaat hebben. De stroomsnelheden en erosie van de kust zullen bij natuurlijk verhehlen van de Bollen van de Ooster initieel waarschijnlijk gaan toenemen. Hoe lang dit verhehlen duurt, hangt waarschijnlijk sterk af van de stormintensiteit. Een serie van stormen, waardoor er grote landwaartse, transporten op de Bollen optreden, zou ervoor kunnen zorgen dat de Bollen snel verheelt met de kust, waardoor de erosie beperkt blijft. Blijven deze stormen uit, dan kan de verheeling lang duren en kan de getijstroming voor langere tijd kusterosie veroorzaken.

Een geulwandsuppletie waarbij de gehele geul wordt afgesloten heeft vooral een gunstig effect op de instroomsnelheden. Tijdens afgaand getij wordt de stroming nu alleen zeewaarts geleid, er vindt geen versnelling langs de kust meer plaats. Langs de zeezijde van de Bollen van de Ooster zijn ook geen hogere stroomsnelheden te observeren. Deze variant lijkt dus gunstig in het reduceren van de erosie ten gevolge van de instroom. In deze variant nemen de snelheden tijdens uitstroom, over de Bollen van de Ooster toe. Hoe zich dit op langere termijn uitwerkt is ook hier moeilijk te voorspellen. De initiële studie zoals hier uitgevoerd is voor deze variant eigenlijk niet toereikend. Aangezien een volledige afsluiting, de

morfologische karakteristieken van het gebied veranderd, zal dit verder uitgewerkt moeten worden.

Het is niet uit te sluiten dat er zich een nieuwe kortsluitgeul door de Bollen van de Ooster zal ontwikkelen. Op basis van de geobserveerde ontwikkelingen van de Haringvlietmonding is het duidelijk dat banken zoals de Hinderplaat en de Bollen van de Ooster geen oneindig lange stabiliteit hebben. De Hinderplaat is inmiddels op meerdere plaatsen doorbroken. Het is de verwachting dat dit ook bij de Bollen van de Ooster gaat optreden. Veranderingen in de getij-gedreven stromingen zouden dit proces kunnen bespoedigen.

5 Literatuur

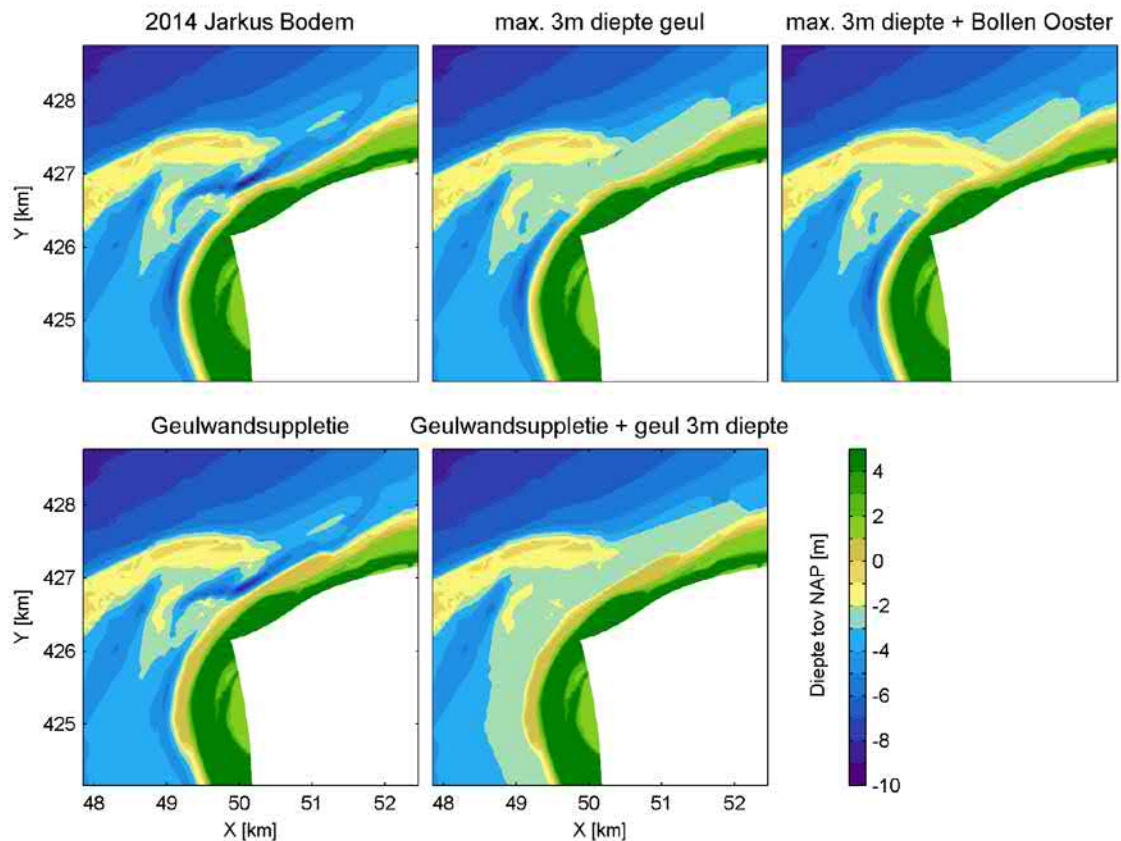
Van der Spek (1987); Beschrijving van de ontwikkeling van de buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen. Nota GWAO-87.105. Ministerie van Verkeer en Waterstaat Rijkswaterstaat, dienst Getijdewateren.

Van Veen (1950). Eb- en Vloedschaar systemen in de Nederlandse Getijwateren. Waddensymposium. Koninklijk Nederlandsch Aardkundig Genootschap, pag. 43-65.

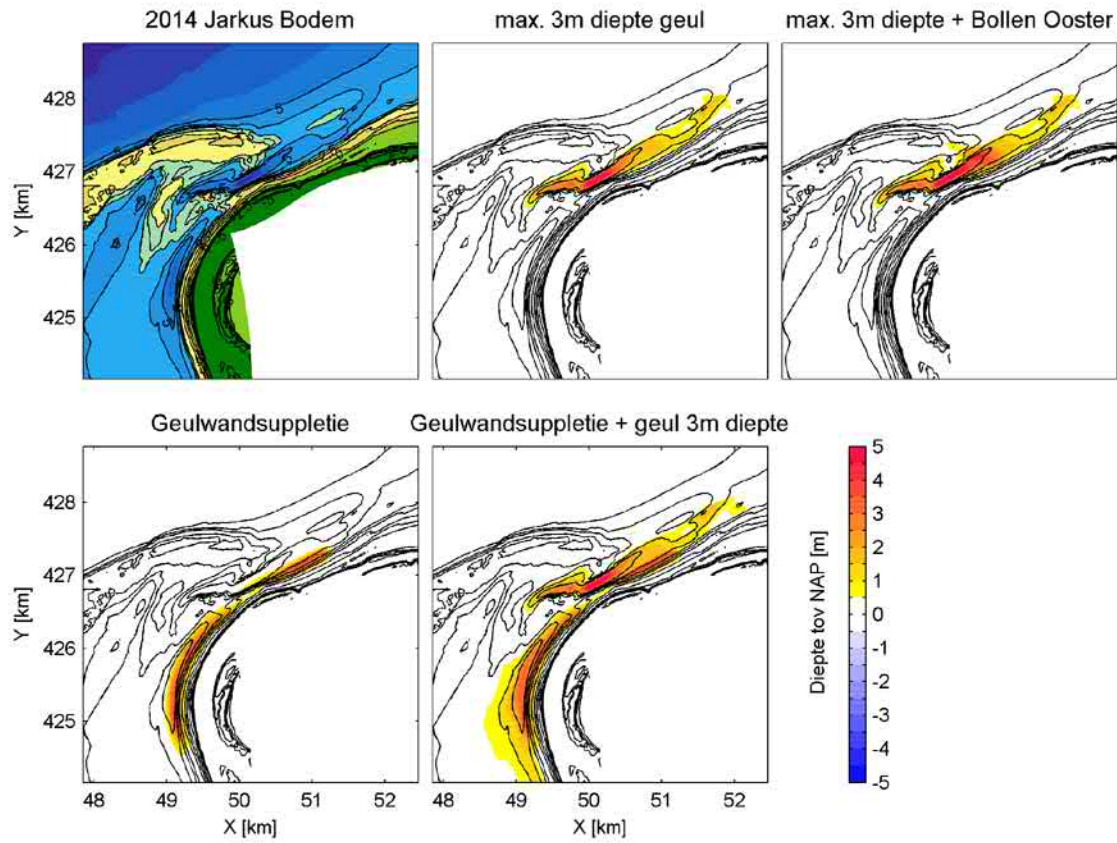
Elias, E., van der Spek, A.J.F. (2014). Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta. 1964-2013 (werkdocument), Deltares, Delft.

Van Holland, G. (1997). Hydrodynamica en morfodynamica van de monding van het Harinvliet. Z2301.61. Waterloopkundig Laboratorium, Delft.

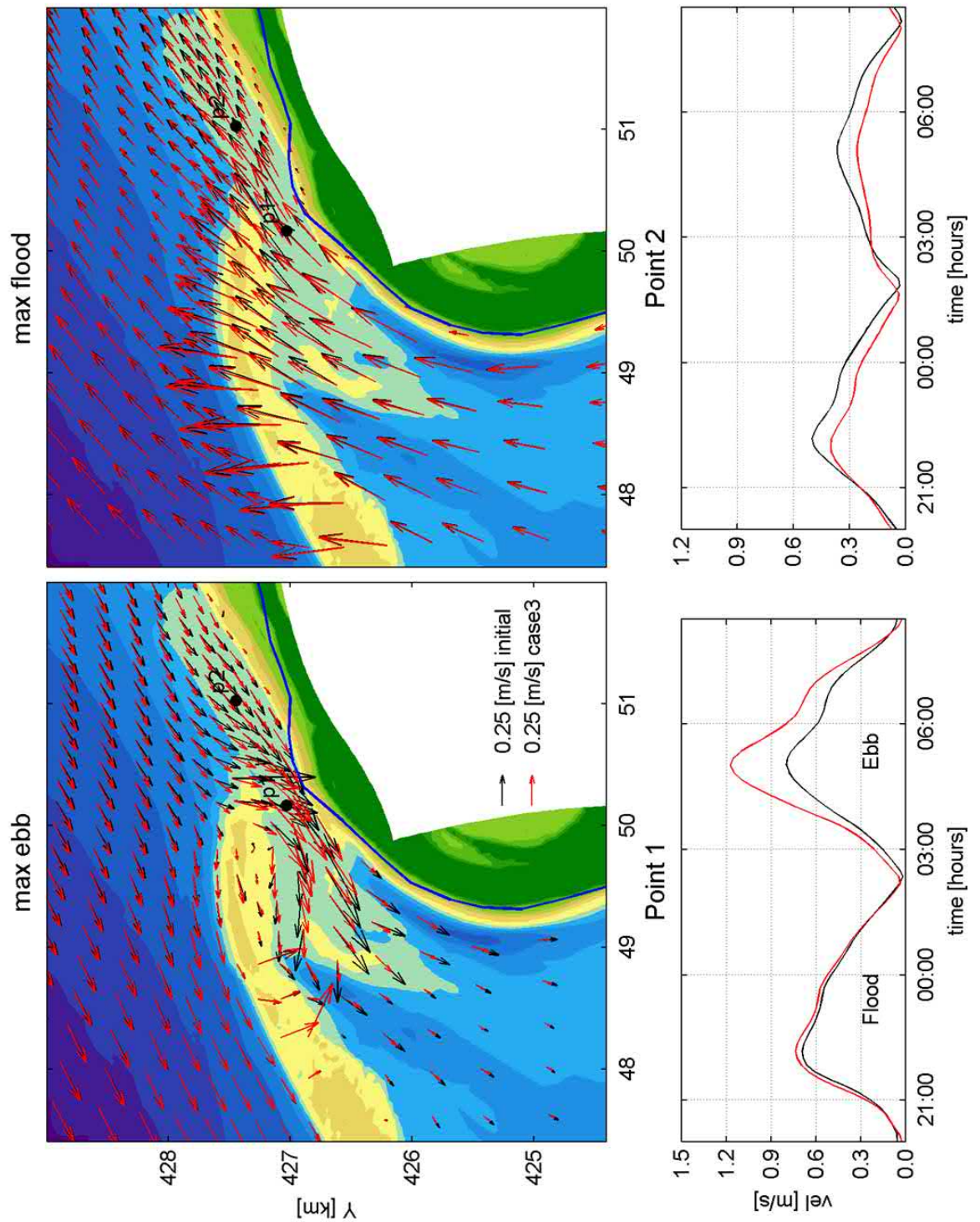
A Aanvullende simulaties.



Figuur A-1: Bodemschematisaties voor 5 verschillende alternatieven. Deze alternatieven zijn respectievelijk (1) referentie som (2014 bodem). (2) Opvullen van de geulen tussen de Bollen van de Ooster en de kust van Goeree tot een maximale diepte van 3m. (3) Opvullen van de geulen tussen de Bollen van de Ooster en de kust van Goeree tot een maximale diepte van 3m + het verbinden van de Bollen van de Ooster met de kust. (4) Aanleg van een geulwandsuppletie om de kop van Goeree. Dit gebeurt van de 0m contour en dan een 300m zeewaarts. In totaal geeft dit een suppletiehoeveelheid van 3,64 miljoen m^3 . (5) Aanleg van een geulwandsuppletie om de kop van Goeree + opvullen van de geulen tot een maximale diepte van 3m.

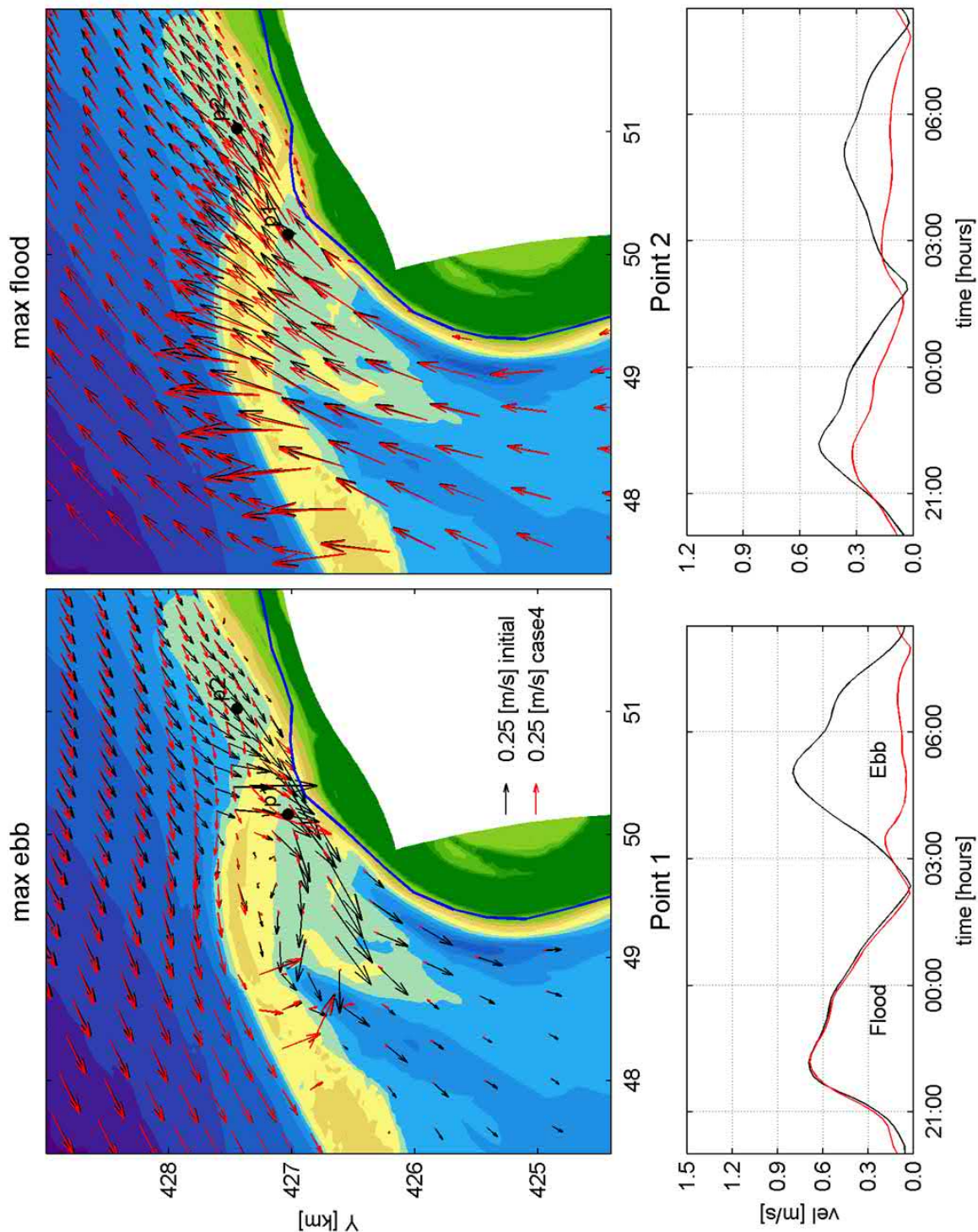


Figuur A-2: Bodemschematisaties voor 5 verschillende alternatieven. Verschil tussen alternatief en referentiebodem.

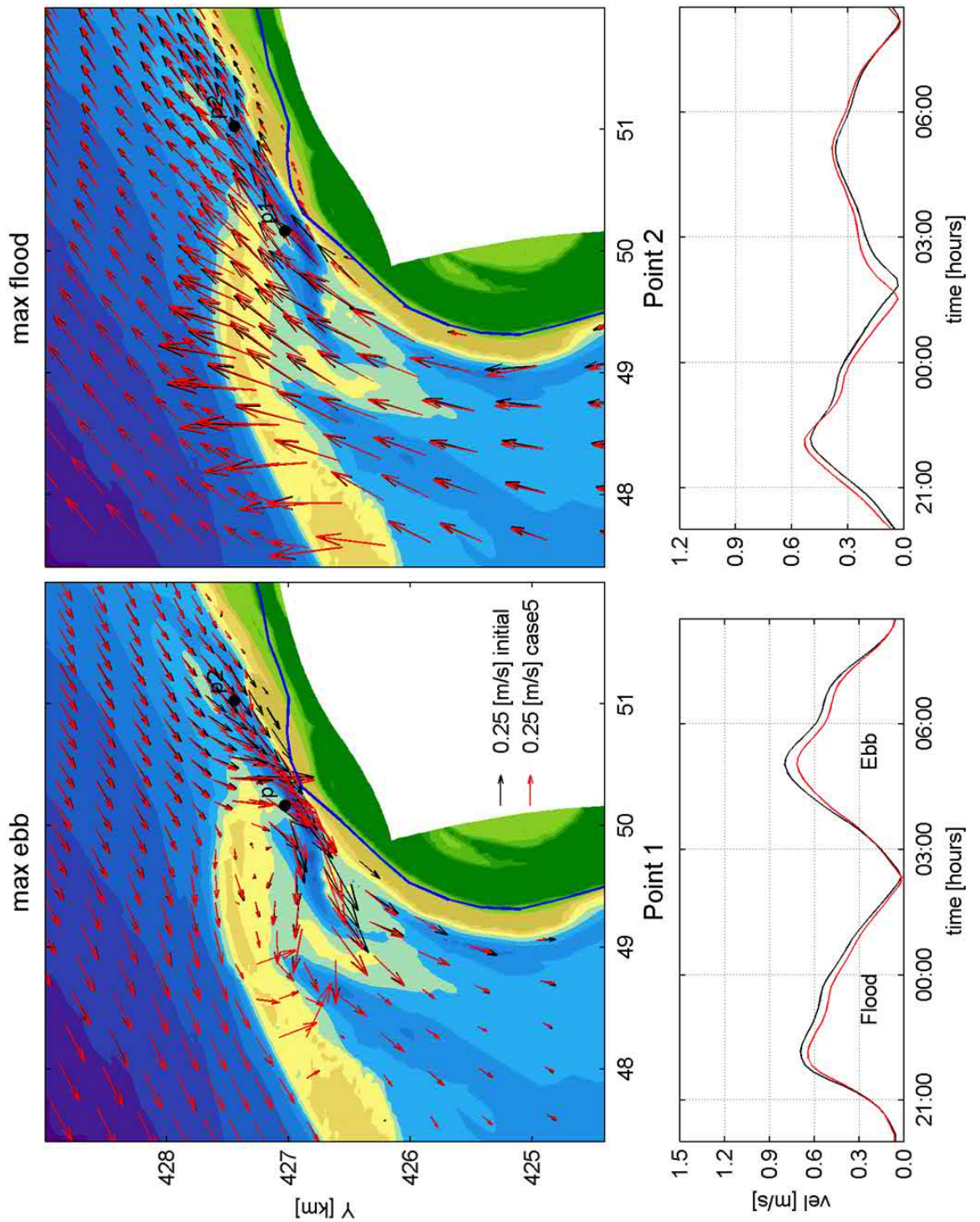


Figuur A-3: Berekende stroomsnelheden voor maximale eb- en vloodsnelheden voor referentiesimulatie en alternatief 3: opvullen van de geulen t.p.v Bollen van de Ooster tot maximaal 3m diepte.¹

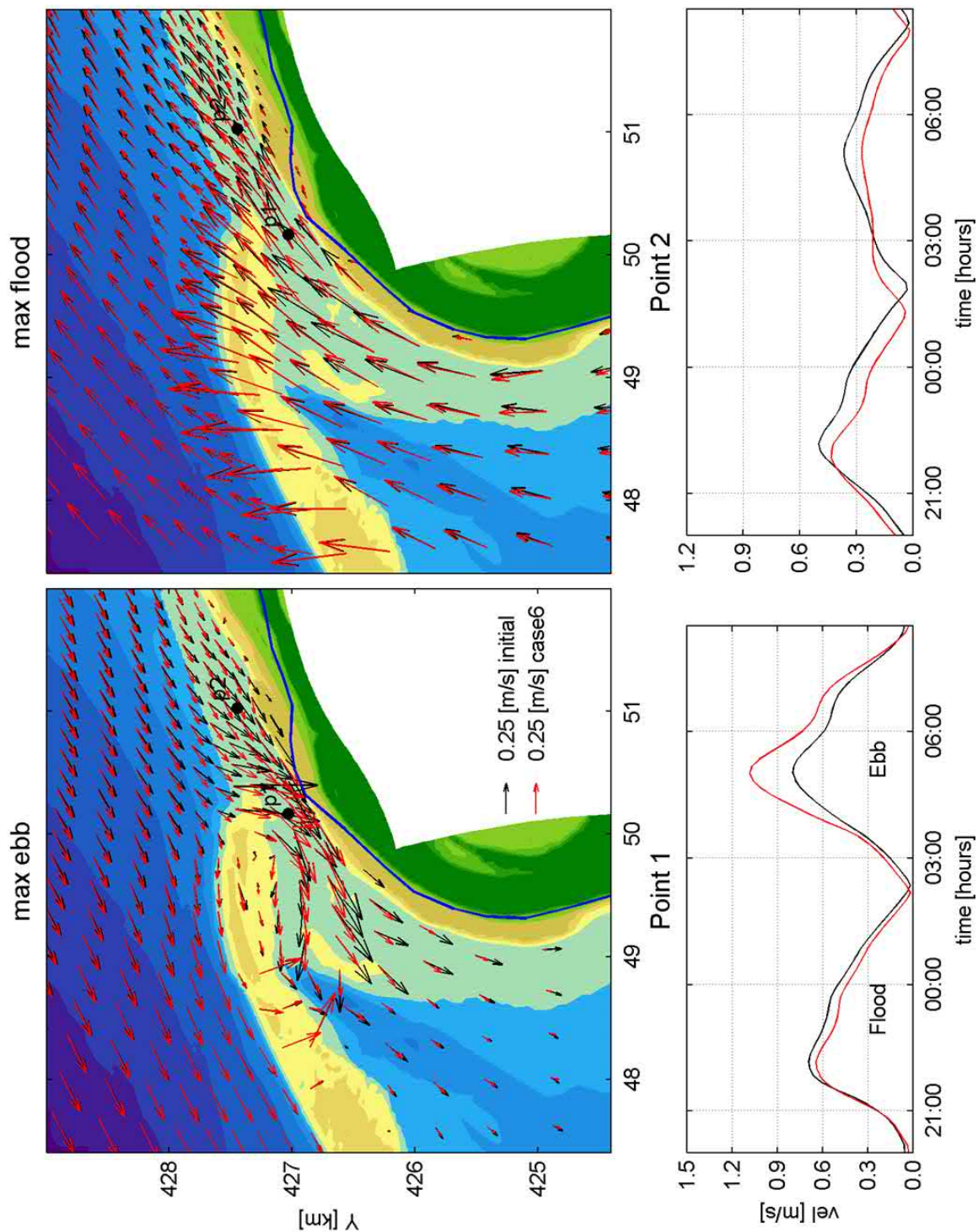
¹ In alle vector plots van model resultaten zijn de vectoren met



Figuur A-4: Berekende stroomsnelheden voor maximale eb- en vloedsnelheden voor referentiesimulatie en alternatief 4: opvullen van de geulwanden tpv Bollen van de Ooster tot maximaal 3m diepte + verbinding Bollen van de Ooster met kust van Goeree.



Figuur A-5: Berekende stroomsnelheden voor maximale eb- en vloodsnelheden voor referentiesimulatie en alternatief 5: Geulwandsuppletie langs de kust van Goeree (3.64 miljoen m³).



Figuur A-6: Berekende stroomsnelheden voor maximale eb- en vloedsnelheden voor referentiesimulatie en alternatief 6: Geulwandsuppletie langs de kust van Goeree + opvullen van de geulen tot maximaal 3m diepte.