

**Stormvloedkering Oosterschelde:
ontwikkeling ontgrondingskuilen en
stabiliteit bodembescherming**

Deelrapportage Morfologie



Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming

Deelrapportage Morfologie

1206907-004

Titel

Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming

Opdrachtgever

Rijkswaterstast Waterdienst

Project

1206907-004

Kenmerk

1206907-004-GEO-0003

Pagina's

50




Trefwoorden

Oosterschelde, grootschalige morfologie, zandtransporten door de kering

Samenvatting

Om de veranderingen in de waterbeweging in de Oosterschelde en de buitendelta na de ingebruikneming van de Oosterscheldekering na te gaan zijn de resultaten van een aantal modelberekening beschouwd met de bodem van de jaren 1990 en 2010. Tevens is geanalyseerd welke grootschalige morfologische veranderingen zich hebben voorgedaan na het gereedkomen van de kering. De morfologie is vooral aan verandering onderhevig op de buitendelta en met name aan de zuidelijke zijde. De ondiepte vlak bij de kering tussen Oude Roompot en Zuiderlijke Roompot breidt zich in noordelijke richting uit, waardoor de Oude Roompot nabij de kering meer naar het noorden gaat krommen. Op langere termijn zal de Zuiderlijke Roompot waarschijnlijk verder verdiepen. In de grootschalige waterbeweging rondom de kering zijn gedurende de afgelopen 20 jaar (nog) geen significante verschillen waar te nemen. In de komende 20 jaar zou dit wel het geval kunnen zijn de ondiepte de Hompels nog verder naar het noorden uitbreidt en de aan- en afstroming ten opzichte van de kering nog schuiner wordt. Aan de binnenzijde van de kering zijn er langzame grootschalige veranderingen gaande. Zonder menselijke ingrepen mag verwacht worden dat de Hammen verder zal verondiepen met op de lange termijn grote consequenties voor de toe- en afstroming nabij de kering. Het (huidige) stroombeeld is zeer complex. In de doorlaat Roompot komt aan de noordkant een piek in de snelheden voor (bij vloed aan de binnenzijde en bij eb aan de zeezijde). Deze veroorzaken hoogstwaarschijnlijk de aldaar aanwezige asymmetrie in de erosiekuilen (grotere diepten aan de noordkant). Vooral aan de randen van de geulen kan zand richting kering getransporteerd worden en op de blokkenmatten terecht komen. Het lijkt vooral dit zand te zijn dat door de kering kan worden getransporteerd. Het netto zandtransport door de kering is gering (+/- 1 miljoen m³ per jaar). Er ligt een uitgebreide set metingen uit de jaren 1987 en 1989 (stroomsnelheden en zandtransporten). Een verdere uitwerking van deze metingen is dringend gewenst om meer inzicht in stromingen en zandtransporten te verkrijgen.

Voor de toekomst is het aan te bevelen om een gedetailleerd en goed gevalideerd beheermodel van de stroming rondom de kering gereed te hebben om in geval van belangrijke gebeurtenissen snel in te kunnen zetten (een soort Kerings-dashboard). Grootschalige morfologische veranderingen (Hammen oostzijde en Roompot westzijde) kunnen op de lange termijn grote veranderingen in het stroombeeld veroorzaken. Dit dient periodiek (om de 10 jaar) beschouwd te worden.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2.0	nov. 2012	ir. J.G. de Ronde		prof. dr. ir. Z.B. Wang		ir. L. Voogt	
		dr. A.P. Oost					
		J. de Lima Rego					
		ir. A.C. Bijlsma					

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding en vraagstelling	1
2	Modelberekeningen	3
3	Grootschalige langjarige morfologie	14
3.1	Introductie	14
3.2	Holocene ontwikkeling tot 1800	15
3.3	Ontwikkeling periode 1827-1978 (Figuur 3.2)	15
3.4	Ontwikkeling periode rond en na de aanleg van de Oosterscheldekering	17
3.5	Morfologische ontwikkelingen na 1986 in het Oosterscheldebekken	20
3.6	Morfologische ontwikkelingen Voordelta	25
3.7	Interactie tussen grootschalige morfologie en erosiekuilen	31
3.8	Conclusies	32
4	Zandtransporten door en rondom de kering	34
5	Enkele gedachten ten aanzien van toekomstige metingen	43
6	Conclusies en aanbevelingen	45
7	Referenties	47
	Bijlage(n)	
A	Modelling the effect on current patterns (2DH) by varying the KustZuid models bathymetry: case studies with 1990 and 2010 depths	A-1

1 Inleiding en vraagstelling

Achtergrond:

Rijkswaterstaat voert momenteel een studie uit naar de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen aan weerszijden van de Oosterscheldekering en de gevolgen daarvan op de kering en de aanliggende oevers. Met als doel een analyse te geven van de huidige situatie en aanbevelingen op te stellen voor het beheer, inclusief monitoring.

Deltares is gevraagd bij te dragen aan genoemde studie door de volgende deelprojecten uit te voeren:

- databeheer en monitoring
- quick scan ontgrondingen
- evaluatie criteria hellinginstabiliteit
- quick scan grootschalige morfologische ontwikkelingen

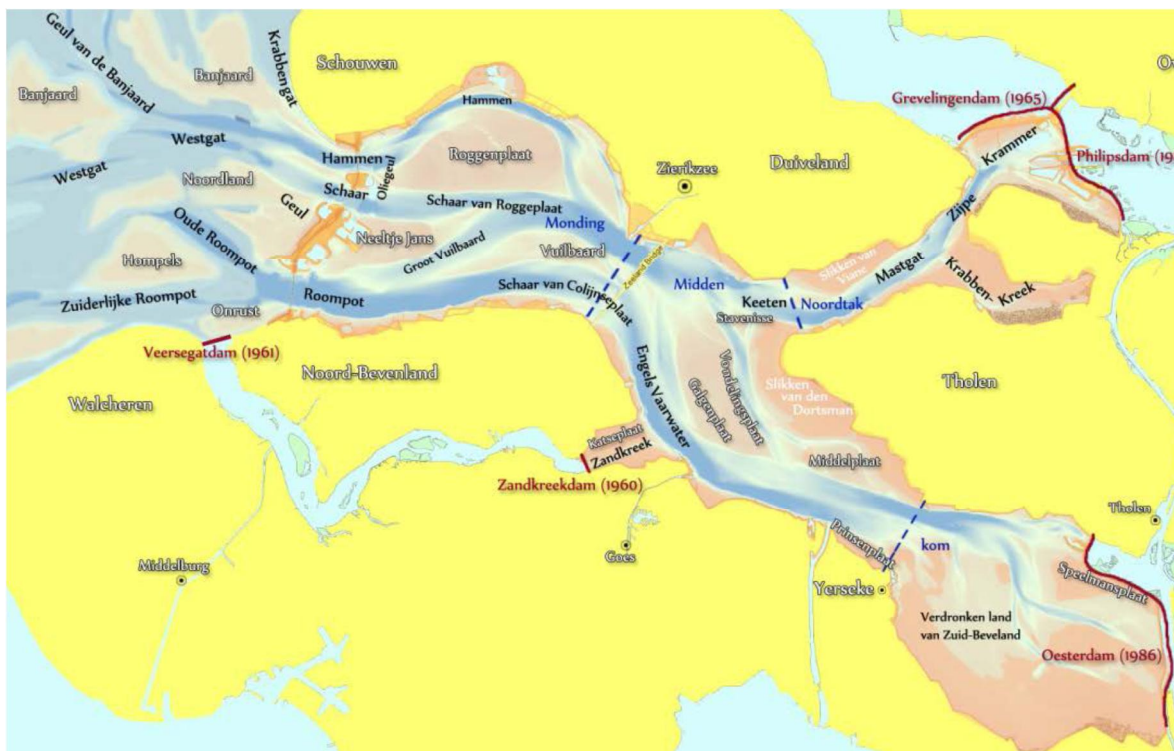
De voorliggende deelrapportage heeft betrekking op de grootschalige morfologische ontwikkelingen.

Na het gereedkomen van de kering is de morfologische situatie aan weerszijden van de kering niet in evenwicht. Aan de binnenzijde is sprake van een zogenaamde zandhonger. Door de afname van het getijvolume zijn de resterende geulen relatief te groot en de snelheden te klein. De platen en slikken in de Oosterschelde laten daardoor een gemiddelde erosie zien van ongeveer 1 cm per jaar. Hoewel de geulen “te groot” zijn, wil dat niet zeggen dat ze morfologisch dood zijn. Uit de metingen blijken nog behoorlijk grote morfologische veranderingen in de geulen, zeker ook in de nabijheid van de kering. Dit wordt veroorzaakt door de veranderde debietverdeling door de gaten.

De buitendelta is eveneens uit evenwicht. Het volume van de buitendelta is te groot en zal geleidelijk afnemen. Ook hierdoor zullen de geulpatronen zich wijzigen.

Vraagstelling:

Ten aanzien van de grootschalige morfologie is het de vraag hoe deze veranderd is na het gereedkomen van de kering en hoe deze zich verder zal gaan ontwikkelen. Welke invloed heeft dit op de stroming rondom de Oosterscheldekering en de erosiekuilen? Een eraan gerelateerde vraag is ook of er een interactie is tussen de grootschalige morfologie rondom de kering en de kleinschalige morfologie van de erosiekuilen. Rondom de kering en op de blokkenmatten zet zich op sommige plekken zand af, de vraag is hoe groot de zandtransporten naar en door de kering zijn. Indien er verdere metingen nodig zijn, waaraan moet dan gedacht worden. De afrondende vraag is wat de consequenties zijn voor de huidige monitorings- en beheerstrategie.



Figuur 1.1: Kaart met de namen van de geulen en ondiepten.

Leeswijzer:

In deze rapportage wordt ingegaan op de resultaten van een aantal modelberekening (hoofdstuk 2) om de veranderingen in de waterbeweging na het gereedkomen van de kering na te gaan. Hoofdstuk 3 is vervolgens gewijd aan de morfologische veranderingen. Het sediment transport door de kering en de wijze waarop zand zich richting kering en richting blokkenmatten verplaatst, wordt in hoofdstuk 4 behandeld. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op een aantal aspecten ten aanzien van eventuele toekomstige metingen. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies en aanbevelingen.

In dit rapport worden de namen zoals weergegeven in figuur 1.1 gebruikt.

2 Modelberekeningen

Ten behoeve van de analyse van de morfologische veranderingen na het gereedkomen van de kering en ten behoeve van de berekeningen aan de erosiekuilen zijn een aantal modelberekeningen uitgevoerd. Uitgangspunt was een beperkte studie. Daarom is gebruik gemaakt van een bestaand 2D model van de Oosterschelde (de Bruijn, 2012). In Bijlage A staat over dit model en de resultaten ervan meer informatie gegeven.

Er is van uitgegaan dat het model dat door de Bruijn afgeregeld was op waterstanden voor deze studie direct gebruikt zou kunnen worden. Dit bleek echter helaas niet het geval te zijn. De verschillende drempeldieptes werden in de modellering niet meegenomen. Om de snelheidsverdeling over de drie stroomgaten juist weer te geven is dit echter wel een belangrijk vereiste. Na het inbouwen hiervan bleek het model opnieuw afgeregeld te moeten worden, omdat de getijslag in de Oosterschelde ruim te klein was. In het model is de kunstmatig vergrote weerstand (middels "poreuze platen") aan weerszijden van de kering, bedoeld om de effecten van de verhoogde turbulentie weer te geven. Door deze knop opnieuw in te stellen is het model opnieuw afgeregeld met behulp van de waterstanden van Stavenisse. Voor een meer uitgebreide studie is het aan te bevelen om het model af te regelen op zowel waterstanden als stroomsnelheden en debieten. Bij de aanbevelingen wordt hierop nader ingegaan.

Vanuit de kering gezien is het een belangrijke vraag of de waterbeweging (stroomsnelheden, stroomrichting en debieten) in de loop van de tijd veranderd is en of deze mogelijk in de toekomst gaat veranderen. Na het gereedkomen van de kering is door de sterk veranderde waterbeweging de morfologie in de nabijheid van de kering veranderd (zie H 3) en verder is er ook nog steeds sprake van autonome ontwikkelingen van de morfologie. Door deze veranderde morfologie kan vervolgens weer de waterbeweging veranderen etc., etc.

Door met het waterbewegingsmodel berekeningen uit te voeren voor de situatie na gereedkoming van de kering (1990) en voor de meest recente situatie (2010) kan door middel van een vergelijking van deze resultaten een indruk verkregen worden van deze veranderingen. Vragen die hierbij naar voren komen zijn:

- Is de debietverdeling van de drie stroomgaten onderling aan verandering onderhevig,
- Is de snelheidsverdeling per stroomgat veranderd (verdeling parallel aan de kering) en
- In hoeverre is de stroming na de kering instabiel (zwabberen van de stroomrichting) en heeft dit effecten op de laterale uitbreiding van de ontgrondingskuilen. Met het voor deze studie gebruikte modelinstrumentarium is dit echter niet te onderzoeken.
- Zijn de stroompatronen verder van de kering af veranderd?

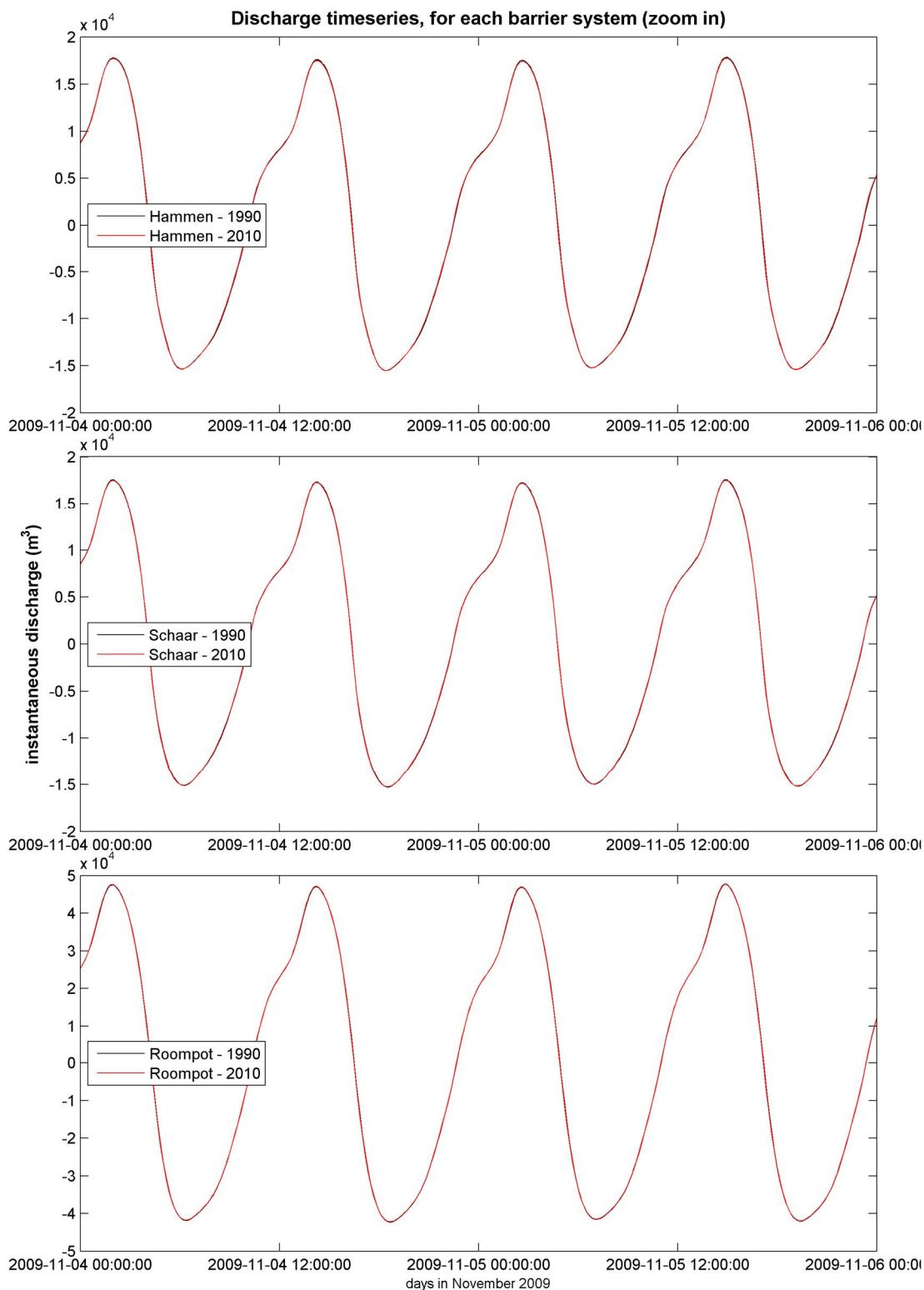
De bodemveranderingen tussen 1990 en 2010 worden later in H 3 behandeld.

N.B. De modelresultaten moeten vooral kwalitatief beschouwd worden. Het gebruikte model is 2D en is bij de kering relatief grof. De stroomgaten in de kering zijn als één grote poort ingebouwd en niet als een set kleine poorten met tussenschotten. De stroming in het model kan daarom ook enigszins schuin door de kering stromen. In werkelijkheid is dit niet het geval.

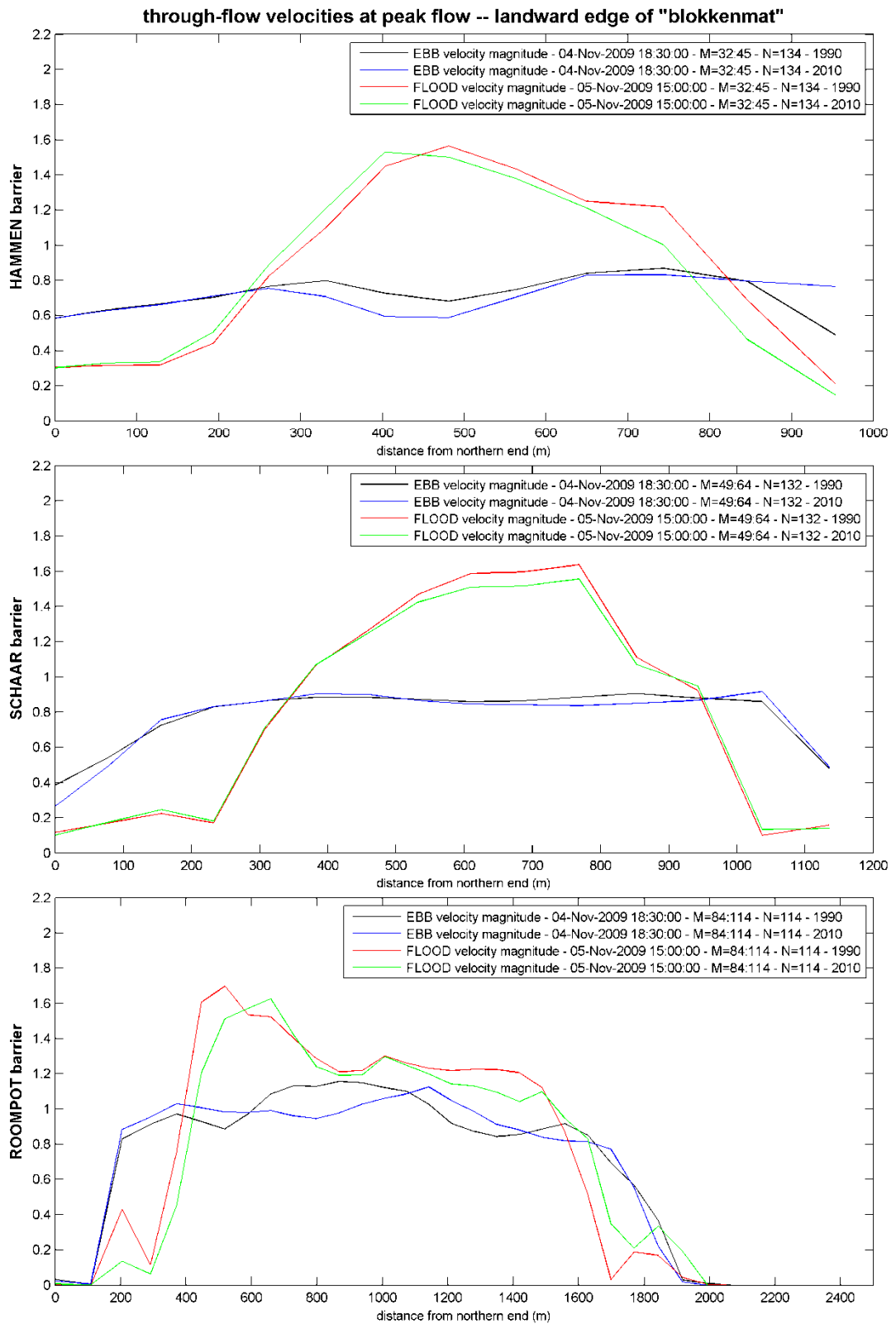
Debietverdeling over de drie stroomgaten

De debieten tijdens springtij staan in figuur 2.1 weergegeven voor de drie stroomgaten. Bovenaan staan de resultaten voor de Hammen, in het midden die voor de Schaar van de Roggenplaat en onderaan die voor de Roompot. De verschillen tussen 1990 en 2010 zijn dermate klein dat de zwarte lijn voor 1990 nauwelijks tot niet te zien is. De verschillen tijdens maximum eb en maximum vloed zijn kleiner dan 0,6 %. Het grootste verschil (verkleining met 0,58 %) doet zich voor in de Hammen tijdens het maximum van de vloedfase. De Roompot neemt in de maximale vloedfase 0,3 % toe. Deze verschillen mogen echter verder verwaarloosd worden. Voor de toekomst worden ook geen significante verschillen verwacht in de verdeling van de debieten over de drie stroomgaten. Ook de stroomverdelingen over de breedterichting van de stroomgaten (parallel aan de kering) ondergaat tussen 1989 en 2010 geen significante veranderingen (zie Bijlage A voor een aantal figuren tijdens springtij, let op de schaal van de figuren van de snelheden op de drempel, de verschillen zijn hier sterk uitvergroet). De snelheid van meer dan 3 meter per seconde op de drempel in de Roompot komt qua orde van grootte overeen met de metingen verricht in het HISMIL station (3 á 4 meter per seconde tijdens springtij, tijdens een storm is zelfs 6 meter per seconde gemeten). Naast een sectie over de drempels van de kering zijn er ook secties bekeken op de rand van de blokkenmat (zowel zeewaarts als landwaarts) ongeveer 550 meter uit het hart van de kering (ongeveer 50 meter van de rand van de erosiekuil).

De verschillen (zie figuur 2.2 voor de landzijde en Bijlage A, figuur 25 voor de zeezijde) zijn groter dan boven de drempel, maar zijn in de meeste gevallen kleiner dan 15 % (In de schaar zijn de verschillen tussen 0 en 300 meter groter dan 15 %, vanwege de geringe snelheden is dit verschil echter niet van belang). De pieken in het midden van de geul nemen tijdens eb iets toe (5%) en tijdens vloed (5%) iets af. Al met al lijken deze verschillen niet relevant.



Figuur 2.1: Debiëten over de drie stroomgaten voor de jaren 1990 en 2010, de zwarte lijn ligt onder de rode lijn en is daarom nauwelijks zichtbaar.



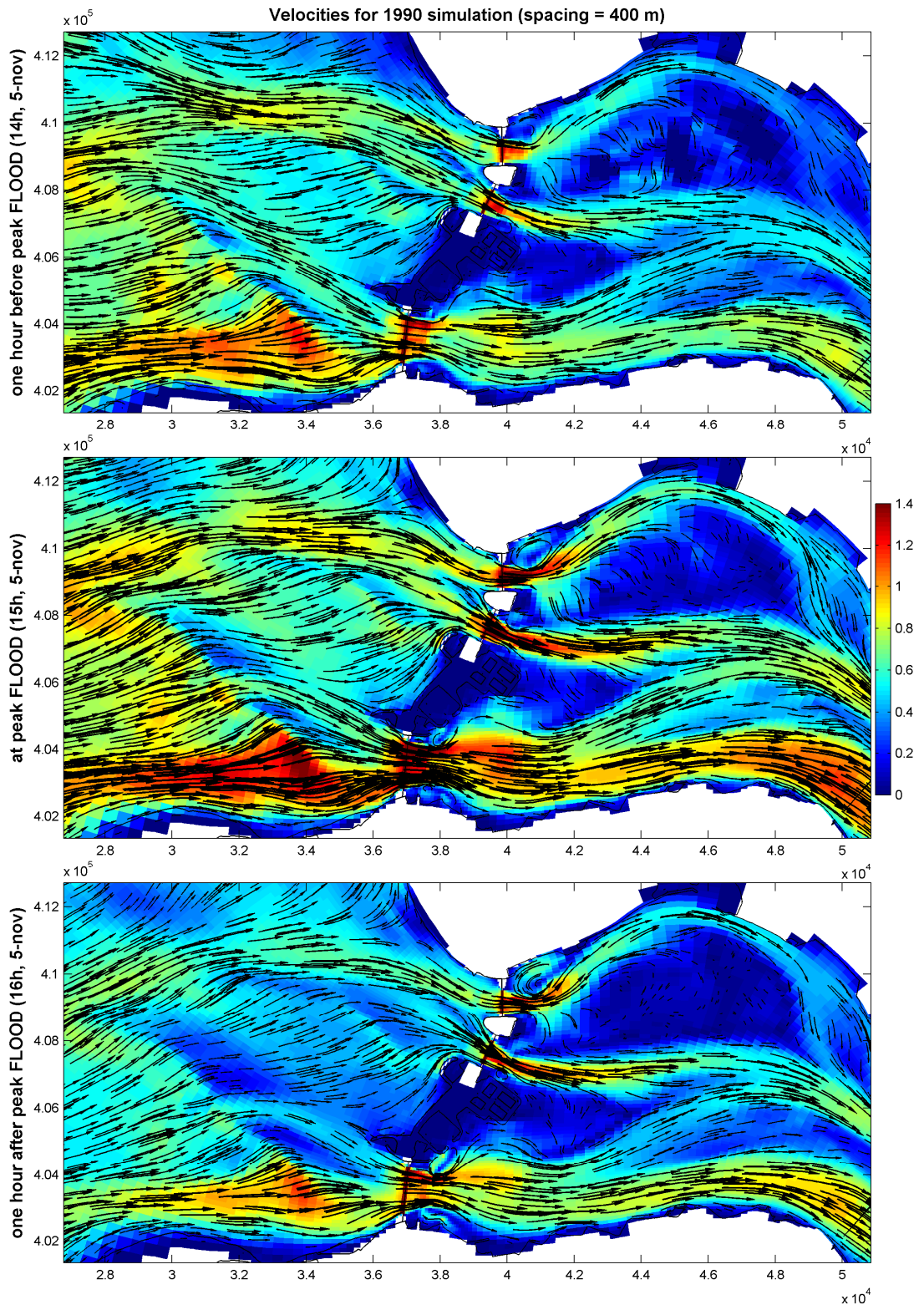
Figuur 2.2: Stroomverdeling landzijde (550 m uit de kering) tijdens eb en vloed voor de jaren 1990 en 2010 (Het nulpunt van de x-as is de noordkant van de sectie).

De verschillen tussen eb en vloed zijn in de secties op de blokkenmatten aanzienlijk. De stroming is na het passeren van de kering veel groter dan vlak voor de kering. Dit is te verklaren doordat de stroming na het passeren van de kering veel meer gebundeld is in een turbulente straalstroom.

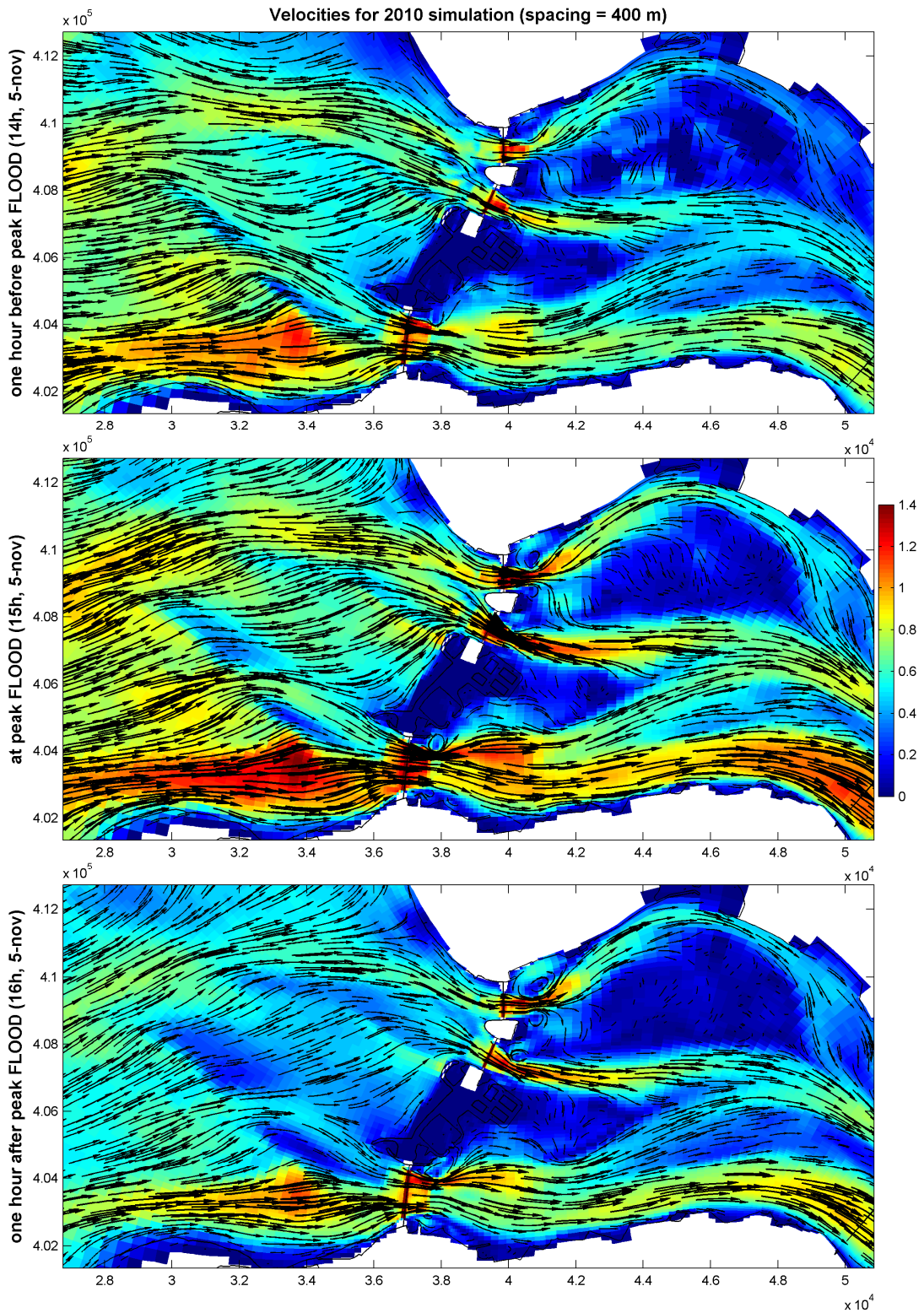
Zeer opvallend is de sterk asymmetrische uitstroming bij de Roompot aan het einde van de blokkenmatten met een piek (zowel bij eb aan de zeezijde als bij vloed aan de landzijde, zie figuur 2.2 en Bijlage A figuur 25) aan de noordelijke zijde. Deze asymmetrie is al aanwezig in het stroombeeld van 1990 en volgt ook uit de metingen van de jaren 1987 met AMETEK en Ottmolen (Rijkswaterstaat, 1987). De asymmetrische vorm van de erosiekuilen bij de Roompot (diepste delen aan de Noordzijde) wordt hoogstwaarschijnlijk hierdoor veroorzaakt. Bij de Hammen en de Schaar komt deze asymmetrie niet voor.

De oorzaak moet hoogstwaarschijnlijk gezocht worden in de hoogteverhouding tussen drempelhoogte en hoogte blokkenmat. Deze is aan de noordkant afwijkend ten opzichte van het midden en de zuidkant. Een hogere drempel of een lager gelegen blokkenmat ter plaatse van de optredende piek zou de noordelijke piek in de stroomsnelheden verhelpen. Waarom dit tijdens het ontwerp niet opgemerkt c.q. aangepast is op dit moment niet duidelijk. In 1987 bleek het al wel uit de metingen en de destijds uitgevoerde WAQUA berekeningen (Rijkswaterstaat, 1987).

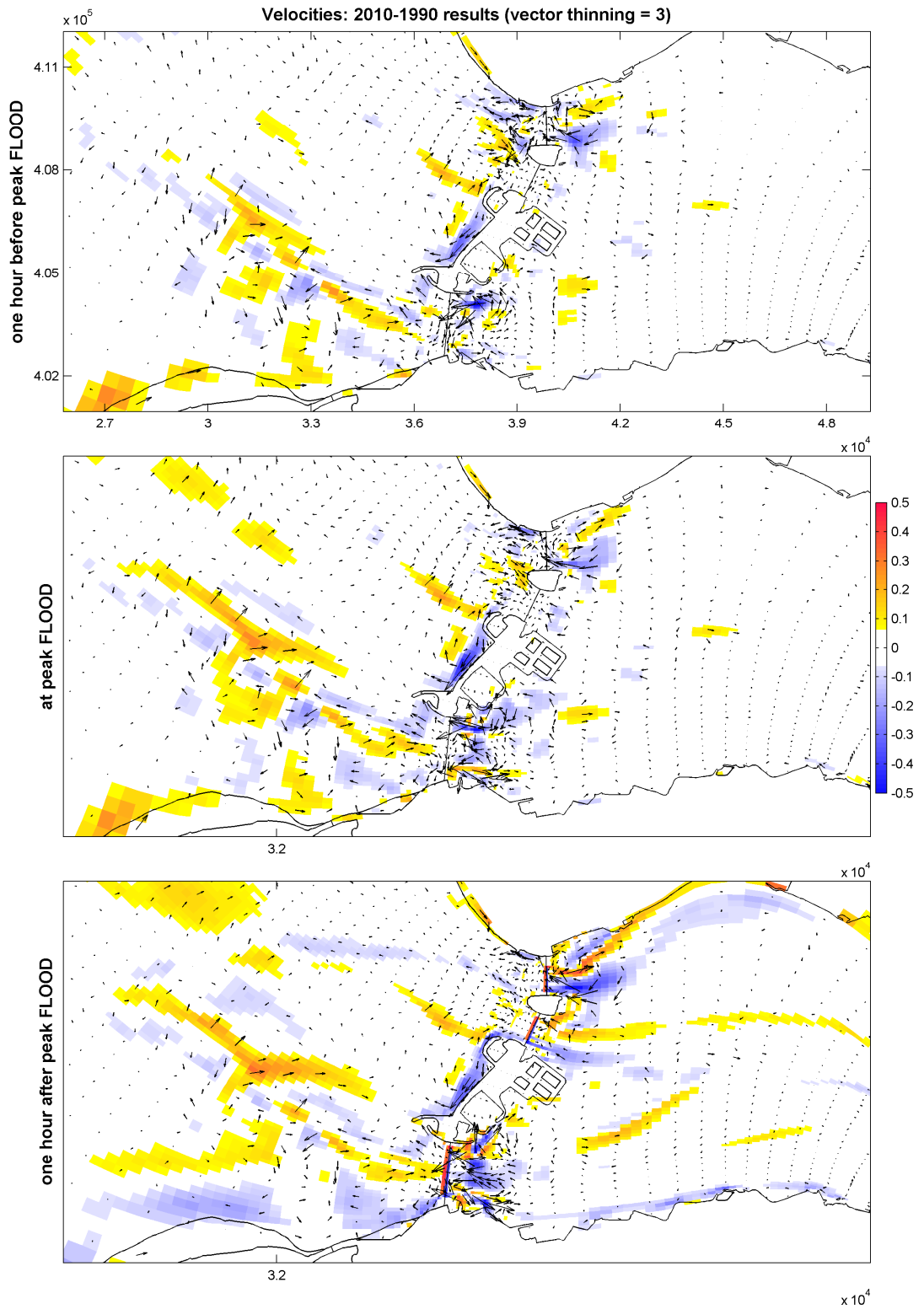
Stroompatronen verder van de kering af



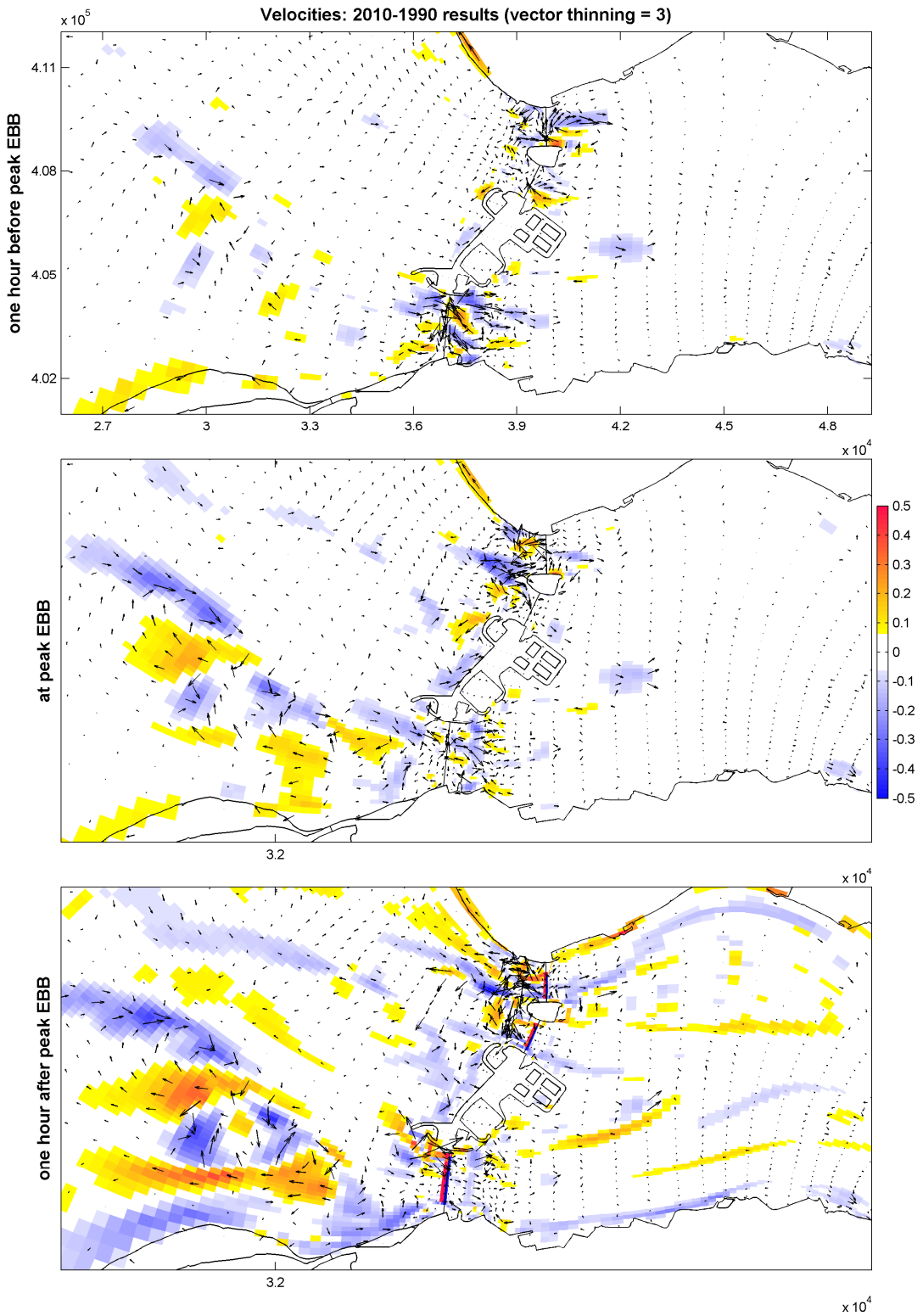
Figuur 2.3 a : Stroomsnelheden in 1990 tijdens maximale vloed (midden), 1 uur ervoor (boven) en 1 uur erna (onder).



Figuur 2.3 b : Stroomsnelheden in 2010 tijdens maximale vloed (midden), 1 uur ervoor (boven) en 1 uur erna (onder).



Figuur 2.3 c : Verschil in stroomsnelheden tussen 2010 en 1989 (oranje is groter in 2010), tijdens maximale vloed (midden), 1 uur ervoor (boven) en 1 uur erna (onder).



Figuur 2.4 : Verschil in stroomsnelheden tussen 2010 en 1989 (oranje is groter in 2010), tijdens maximale eb (midden), 1 uur ervoor (boven) en 1 uur erna (onder).

De figuren 2.3 a, b en c laten de stroombeelden zien tijdens vloed voor de jaren 1990 en 2010 en hun verschil. De middelste figuur is tijdens maximale stroming in de kering, de bovenste figuur is een uur daarvoor en de onderste figuur een uur daarna.

Opvallend zijn de grote stroomsnelheden ten westen van de kering langs Noord Beveland (Zuiderlijke Roompot) voordat de stroming de kering bereikt en de geringe snelheden in de hoofdgeul (Oude Roompot). De grote snelheden worden veroorzaakt door de ondiepte waar het water overeen moet. Op de lange duur zal de morfologie zich hier zeker verder gaan aanpassen (zie H 3). Verder valt op dat stroomrichting en geulrichting slecht met elkaar overeenkomen en dat er ook over de ondiepte tussen Oude Roompot en Schaar (Noordland) nog forse snelheden staan. Stroming en morfologie passen slecht bij elkaar, de stroming loopt van zuidwest naar noordoost terwijl de geulen lopen van noordwest naar zuidoost. Dit beeld doet zich zowel voor in 1989 als in 2010. De veranderingen over de afgelopen 20 jaar zijn nog beperkt, doordat de ondiepten dwars op de stroomrichting nog steeds aanwezig zijn. De komende 20 jaar zou dit beeld echter sneller kunnen veranderen als de ondiepte verder erodeert.

Nabij de kering zijn aan de uitstroomzijde grote neren te zien (die zijn er al jaren, waarom zou dan nu ineens de morfologie sneller erop gaan reageren?). De resolutie van het model is niet voldoende om deze nauwkeurig weer te geven. De verschillen laten een gedifferentieerd beeld zien, dat ook van uur tot uur deels verandert. De grootste verschillen doen zich ten westen van de kering voor in het gebied tussen Zuiderlijke Roompot en de Oude Roompot rondom de ondiepte tussen Onrust en Hompels. Nabij de kering zijn er ook verschillen. Vooral de afname van de stroomsnelheden ter plekke van de erosiekuilen valt op. Dit is direct te verklaren uit de diepere erosiekuilen in 2010. Ten oosten van de kering in de Hammen is een vermindering van snelheden te zien. Op het tijdstip één uur na maximale vloed zijn in de Oosterschelde een aantal banen van verhoogde snelheden te zien, deze zijn er niet tijdens de maximale vloed. De veranderingen zijn grotendeels beneden de 0,3 meter per seconde. Alleen op de buitendelta zijn ze groter.

De verschilfiguur voor eb (figuur 2.4) laat een vergelijkbaar beeld zien. Grotere verschillen op de buitendelta vooral ter plekke van Zuiderlijke Roompot, Oude Roompot. Opvallend is dat de grootste verschillen optreden 1 uur na maximale eb. Uit de figuren van de stroomsnelheden zelf (zie Bijlage A) blijkt echter dat de snelheden op dit tijdstip nog even groot zijn als het uur ervoor. De figuren zijn op uurbasis gekozen. Het werkelijke maximum zal dan ook hiertussen liggen.

Conclusies:

- Het stroombeeld op de zuidelijke buitendelta tijdens vloed richting kering is zeer complex met lage snelheden in de hoofdgeul Oude Roompot en zeer hoge snelheden over de ondiepte tussen de beide Roompotten (Onrust, Hompels).
- In de Roompot nabij de kering is bij uitstroming het stroombeeld aan het einde van de blokkenmatten (nabij de randen van de erosiekuilen) sterk asymmetrisch met een piek aan de noordelijke zijde (zowel bij eb aan de zeezijde als bij vloed aan de landzijde). Dit geldt zowel voor de situatie 1990 als 2010. De asymmetrische vorm van de erosiekuilen bij de Roompot (diepste delen aan de Noordzijde) wordt hoogstwaarschijnlijk hierdoor veroorzaakt. Bij de Hammen en de Schaar is dit niet het geval. De oorzaak moet hoogstwaarschijnlijk gezocht worden in de hoogteverhouding tussen drempelhoogte en hoogte blokkenmat ter plekke van de optredende piek.

- Over de periode 1990 – 2010 is de debietverdeling over de drie stroomgaten gelijk gebleven.
- De stroomverdeling over de breedte van de stroomgaten (parallel aan de kering) ter plekke van de drempel is eveneens weinig veranderd.
- Op de einden van de blokkenmatten (nabij de randen van de erosiekuilen) zijn de verschillen groter maar niet significant.
- Grote systematische snelheidsveranderingen zijn niet aanwezig. Veranderingen zijn gekoppeld aan de veranderde morfologie met name aan de zuidelijke kant van de buitendelta en aan de verdieping van de erosiekuilen.

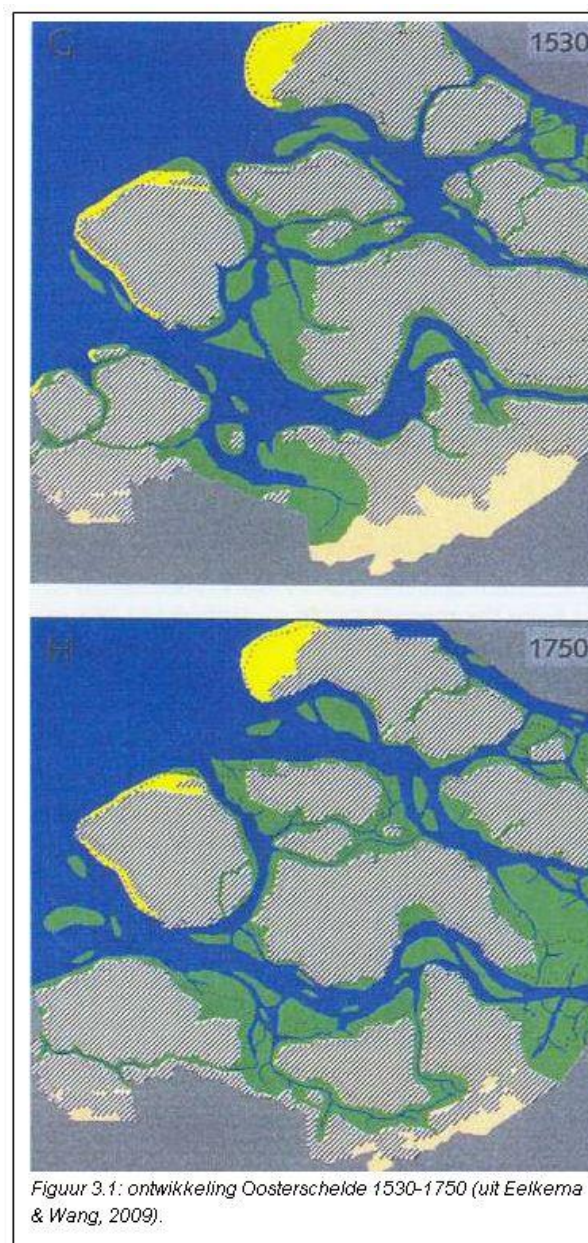
Aanbevelingen:

- De waterbeweging nabij en rondom de kering is zeer complex, om deze goed te kunnen duiden is een meer gedetailleerd model nodig met voldoende resolutie rondom de kering. Onderzocht moet worden of dit een 3D model moet zijn. Dit is mede afhankelijk van de beheersvragen. Voor vragen ten aanzien van de erosiekuilen is zonder meer 3D modellering nodig.
- Ga na of toename van de asymmetrische stroomverdeling in de Roompot te voorkomen is. Wat zijn de voordelen, wat zijn de kosten?

3 Grootschalige langjarige morfologie

3.1 Introductie

Hieronder volgt eerst een overzicht van de morfologische ontwikkeling van de Oosterschelde. Zoals altijd wordt voor een beter begrip op verschillende tijd- en ruimteschalen gekeken. Op de grootste schaal (de Holocene ontwikkeling) wordt een kort overzicht gegeven van de ontwikkeling van het gebied. Daarna volgt in iets meer detail de ontwikkeling 1827-1978 aan de hand van kaarten. Tenslotte wordt vooral gekeken naar de ontwikkeling vanaf 1978 tot en met 2010, waarbij aandacht wordt gegeven aan de individuele geulen rond de kering.



3.2 Holocene ontwikkeling tot 1800

De Oosterschelde zoals we die nu kennen is het product van een lange ontwikkeling. Na de laatste IJstijd stroomde de Schelde aanvankelijk langs de Steilrand van Bergen op Zoom naar het noorden via het huidige Tholen en Sint Philipsland door het huidige Overflakkee naar het Maas-Rijndal. Getijdegeulen begonnen zich te vormen met het stijgen van de zeespiegel na de laatste IJstijd.

Tussen 5.500-4.300 v.Chr. ontstond daardoor een geul die beschouwd kan worden als de voorloper van de huidige Oosterschelde. Deze geul maakte contact met de rivier de Schelde, waardoor de laatste haar afwatering daarheen verlegde. Oorspronkelijk was dit een veenrivier die haar weg zocht door de uitgestrekte veengebieden die aanwezig waren. Tot in de Middeleeuwen was de Oosterschelde een vrij kleine rivierarm.

In de loop van de daarop volgende eeuwen won de Oosterschelde echter steeds meer terrein op het land. De zware stormen van 1530 en 1532 erodeerden het bekken sterk waarbij het getijvolume verdubbelde. Het bekken ontwikkelde zich in de richting van een nieuw evenwicht met bredere en diepere geulen waarbij het zand buitengaats werd afgevoerd en daar bijdroeg aan een grotere buitendelta. Dit proces van toename van het getijvolume en een daarop volgende vergroting van de dimensies van de geulen en de buitendelta hield ook in de navolgende eeuwen aan (van den Berg, 1986; De Bruijn, 2012). Daardoor groeide de Oosterschelde met ca. 50% in de periode 1530-1750 (Eelkema et al., 2009.; figuur 3.1) uit tot een flinke zeearm. Het is dus vooral een erosieverschijnsel. Daar waar de geulen van de zeearm nooit de ondergrond hebben doorploegd zijn de oude afzettingen van veen, klei en zand nog aanwezig. De buitendelta en het zeegat van de Oosterschelde bestaan overwegend uit zand, met alleen dunne klei- en veenlagen die aangetroffen worden in de diepste geulen (De Bok, 2002). Uit de beschrijving van de geologische ontwikkeling van de Oosterschelde is bekend dat meer binnengaats er lokaal veenlagen in de ondergrond van de slikken en schorren aanwezig zijn. Dit is in het bijzonder het geval in het gebied tussen Zuid-Beveland en Bergen op Zoom.

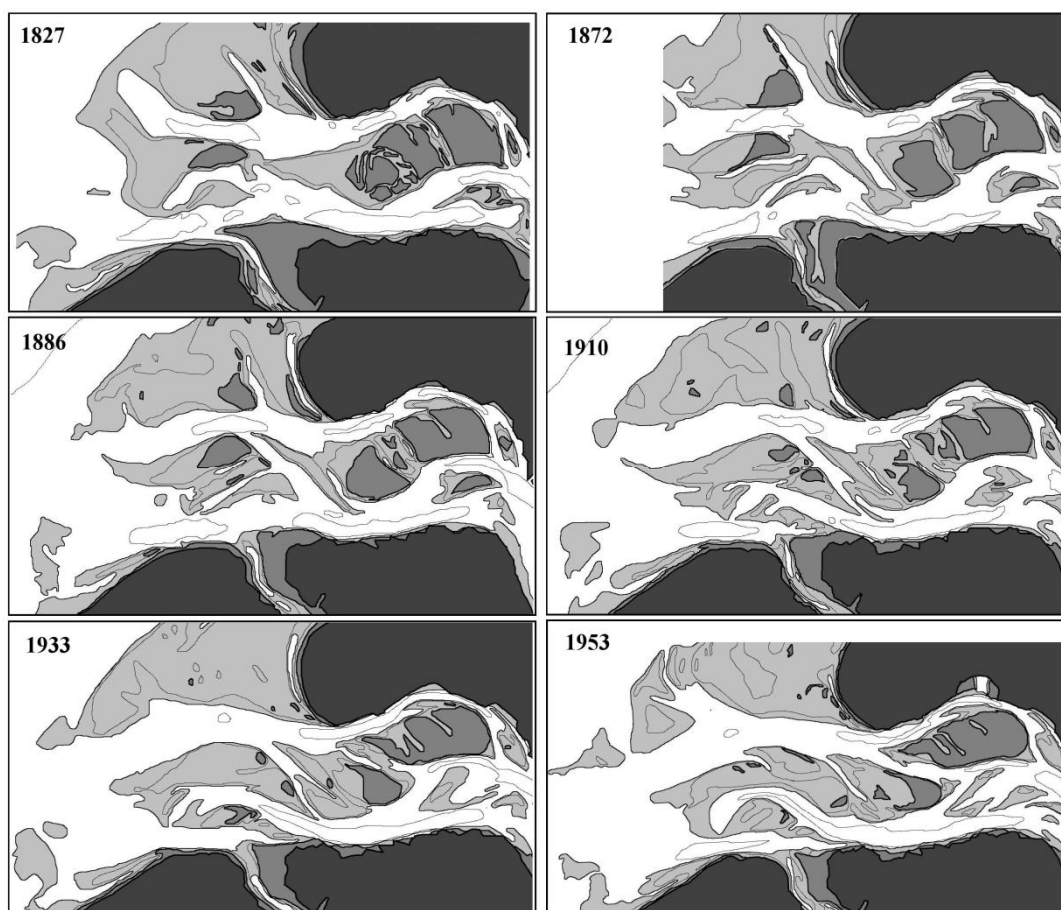
Door inpolderingen en het aanleggen van dijken heeft de Oosterschelde de laatste eeuwen haar huidige omvang gekregen. Deze ontwikkelingen waren zo grootschalig dat de invloed daarvan nog tot op de dag van vandaag de sedimentatiepatronen beïnvloed (Eelkema et al., 2009). Rond 200 v Chr. ontstond de voorloper van de huidige Westerschelde, een het land binnendringende getijdengeul. Pas tegen het einde van de 15e eeuw werd Antwerpen via de Westerschelde bereikt: dit werd de hoofdafvoer van de Schelde. De verbindingsgeul tussen de Westerschelde en de Oosterschelde verzandde geleidelijk.

3.3 Ontwikkeling periode 1827-1978 (Figuur 3.2)

In grote lijnen is de ontwikkeling sinds 1827 tot de aanleg van de Kering goed te volgen met behulp van kaarten die tot 1978 vervaardigd zijn. Op de grootste schaal bekeken was het geulenstelsel in het bekken opmerkelijk stabiel: De Hammen met het Westgat en de Roompot met de Schaar van Onrust waren vrij constant aanwezig en over het algemeen belangrijke geulen. Wel is het zo dat in de buitendelta na 1978 de Roompot weer belangrijker werd en de situatie weer meer ging lijken op de situatie 1827, toen de verbinding tussen Roompot en Schaar van Onrust de belangrijkste was.

Op een iets kleinere schaal komen de volgende punten naar voren:

- 1) Op de voordelta is een soort cirkelgang gemaakt waarbij de situatie van 1978 – geholpen door de mens- op hoofdlijnen sterk leek op die van 1827: er was sprake van 2 geulensystemen die eigenlijk twee aparte buitendelta's vormen voor respectievelijk Hammen en Roompot.
- 2) De buitendeltageulen waren altijd erg bewegelijk en stonden ook alle mogelijke richtingen op (van ZO tot NNW e.e.a. waarschijnlijk gerelateerd aan de faseverschillen tussen de getijbewegingen in de Oosterschelde en in de Voordelta, waardoor zowel vloed-vloed, eb-eb als vloed-eb en eb-vloed situaties optreden).
- 3) In het Oosterschelde bekken zelf is het een komen en gaan van eb- en vloedscharen, die gerelateerd zijn aan de Roompot en de Hammen, waarbij de vloed veelal de binnenbocht pakt en de eb de buitenbocht. Ook dit zal zo blijven en leiden tot sterke uitkolking waar stromen samenkomen of juist verticale sprongen waar een eb- of vloedschaar de hoofdgeul verlaat.



Figuur 3.2: ontwikkeling Oosterscheldemonde en Voordelta 1827-1953

- 4) De kortsluitgeul(en) Vuilbaard (en Schaar van Vuilbaard) tussen Roompot en Hammen geven aan dat een behoorlijk deel van het ebwater zijn uitweg zoekt en zoekt via de Roompot.

- 5) De grote plaat in de monding die in 1827 nog aanwezig was werd uiteindelijk in twee delen gescheiden door de Schaar van Roggenplaat in de Roggenplaat en Neeltje Jans.
- 6) De buitenbochtwerking van de Roompot in de Oosterschelde was de belangrijkste oorzaak voor de aantasting van de kust van Noord Beveland; ook het brokkelige dijkpatroon verraadt een lange historie van dijkvallen en inlagen. Opmerkelijk is dat aan de kant van Schouwen Duiveland de Hammen ligt, maar dat daar de kust een stuk minder kartelig is. Enerzijds laat zich dit zeker verklaren uit de grotere omvang en diepte van de Roompot, anderzijds zou ook daar erosie verwacht worden. Het zou wenselijk zijn om beide kusten eens te vergelijken in termen van ondergraving en bescherming en mogelijke verschillen in de geologie.
- 7) Belangrijke aanpassingen waren nog de afsluitingen van het Sloe en het Kreekrak in 1870 (Scheldeconnectie).
- 8) Ook trad, voorafgaand aan de aanleg van de Oosterschelde-werken, in de afgelopen eeuw een toename van ca. 15% in getijdvolume en bekkeninhoud op, door de voortdurende kunstmatige verruiming van het binnenwaarts gelegen bekken (Krammer-Volkerak-Hellegat-Hollandsch Diep-Nieuwe Merwede-Amer-Biesbosch) door o.a. de volgende werken (van Vechgel, 1977; De Bruijn, 2012):
 - doorgraving Amer-Bergsche Maas 1904
 - verruiming Nieuwe Merwede 1920-1930
 - aanleg Hellegatdam 1931
 - baggerwerkzaamheden ten behoeve van de scheepvaart
 - Grevelingenafsluiting 1962 (zuid) & 1964 (noord)
 - Volkerak 1969
 Het getij drong door deze werken verder landinwaarts door, wat leidde tot de toename in getijdvolume.
- 9) Verder is een belangrijke ingreep de afsluiting van het Veersche Gat geweest, waardoor een getijdvolume van 70 miljoen m³ niet langer in- en uitstroomde. De afsluiting had slechts een geringe invloed van enkele procenten op het getijdvolume dat via de Roompot naar binnen stroomde. Ook in het getij (fig. 3.3) is geen significante verandering te bemerken. Al in de periode 1950-1961 werd de verbinding tussen de Zuiderlijke Roompot en de Oude Roompot sterker; na de afsluiting zette deze ontwikkeling zich versneld voort (DBD, 1964).

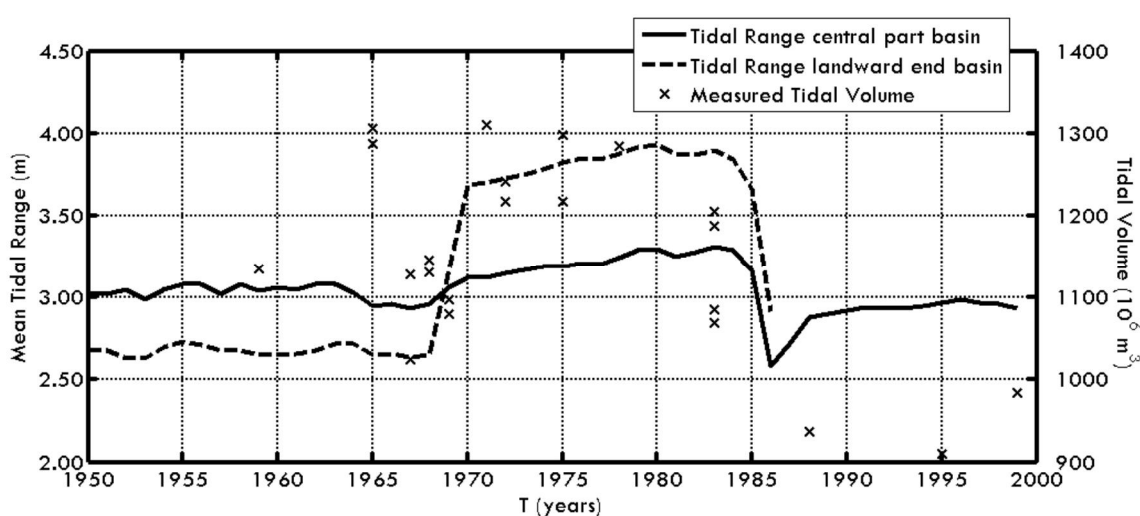
3.4 Ontwikkeling periode rond en na de aanleg van de Oosterscheldekering

Door de aanleg van de Oosterscheldekering in 1987 zijn het Oosterscheldebekken en de bijbehorende voordelta vrijwel van elkaar gescheiden v.w.b. morfologisch gedrag. Weliswaar stroomt het getijdenwater nog door de spuigaten heen en weer, maar sedimentuitwisseling is beperkt en voordelta en bekken maken grotendeels hun eigen ontwikkeling door. Na het gereedkomen van de kering is de morfologische situatie aan weerszijden van de kering niet in evenwicht. In het algemeen blijkt de trend van de grootschalige ontwikkeling van de Voordelta en het gebied tussen de kering en de Zeelandbrug sinds 1960 echter niet wezenlijk te zijn veranderd.

Hoewel de eerste ingrepen bij de voordelta al dateren van 1961 (Veerse Gat afgesloten) zijn, behoudens een volume-toename in de Zuiderlijke Roompot, de grootste veranderingen vooral daarna opgetreden. Op de voordelta wordt het gedrag vooral overheerst door de ontwikkeling

van geulen (migratie en uitschuring/opvulling) en sedimentvolumina door de werking van golven en de achtereenvolgende vergroting (tijdens de fase dat de Volkerakdam er al was en de compartimenteringsdammen nog niet) en verkleining van het getijdevolume (na het gereed komen van Oosterscheldekering en compartimenteringdammen). Na de verkleining van het getijdevolume was het volume van de buitendelta te groot en nam deze geleidelijk af. Ook de geulpatronen zullen zich hierdoor, ook in de toekomst, nog wijzigen.

In het bekken overheerst tot op heden vooral het effect van de verkleining van het getijvolume ten gevolge waarvan de geulen "willen" opvullen ten koste van de platen. Hoewel de geulen "te groot" zijn, wil dat niet zeggen dat ze morfologisch dood zijn. Vanuit de metingen blijken nog behoorlijk grote morfologische veranderingen in de geulen, zeker ook in de nabijheid van de kering. Dit wordt veroorzaakt doordat de debietverdeling (ten opzichte van de situatie zonder kering) door de gaten veranderd is en ook de in- en uitstroomrichting. De asymmetrische ontwikkeling van de erosiekuilen (in de richting langs de kering varieert de diepte van de kuilen aanzienlijk bij elk van de doorstroomopeningen) heeft hier ook een belangrijk aandeel in.



Figuur 3.3: verandering getijvolume en getijdeslag. Een sterke toename na de aanleg van de Volkerakdam in 1969 achterin het Oosterscheldebekken werd gevolgd door een sterke val na ca. 1985 toen de Oosterscheldekering haar eindstadium naderde (bron: Eelkema et al, 2012).

Door aanleg van de Volkerakdam in 1969 tussen Oostflakkee en Noord-Brabant (Rijnconnectie) veranderde het Oosterschelde-estuarium in een zeearm (Nienhuis & Smaal 1994; Van Berchum & Wattel, 1996). Tevens nam de getijdeslag en het getijvolume sterk toe (fig. 3.3). Na de aanleg van de Volkerakdam is o.a. de Hammen ten oosten van de kering verdiept. De belangrijkste menselijke ingrepen in het bekken zijn degene die in de jaren zeventig en tachtig hebben plaatsgevonden in het kader van de Deltawerken, vooral de aanleg van de Oosterscheldekering (zie voor stappen tabel I).

Om te voorkomen dat de getijdeslag te klein zou worden en om een zoetwaterverbinding te verkrijgen tussen Schelde en Rijn werden er twee compartimenteringsdammen (de Oesterdam en de Philipsdam) aangelegd. Daardoor werd de oppervlakte van het bekken verkleind van 452 km² naar 351 km² en werd de getijdeslag minder gereduceerd. Maar het blijkt vooral de aanleg van de Volkerakdam te zijn geweest die de ontwikkelingen na de aanleg sterk compenseerde. Sinds de aanleg van de Kering stroomt per getij 27% minder water in en uit de Oosterschelde. De afname van het debiet is voor zestig procent het gevolg van de Oosterscheldekering, die de doorstroomopening in de Oosterscheldemonding heeft verkleind, en voor veertig procent het gevolg van de afkoppeling van Markiezaat en Volkerak. De verblijftijd van het water verdubbelde terwijl zoetwaterinvloed, stroomsnelheid en troebelheid verminderden (De Bruijn, 2012).

Tabel I: overzicht van verschillende belangrijke fasen van de Deltawerken voor de Oosterschelde (vooral naar De Bok, 2002).

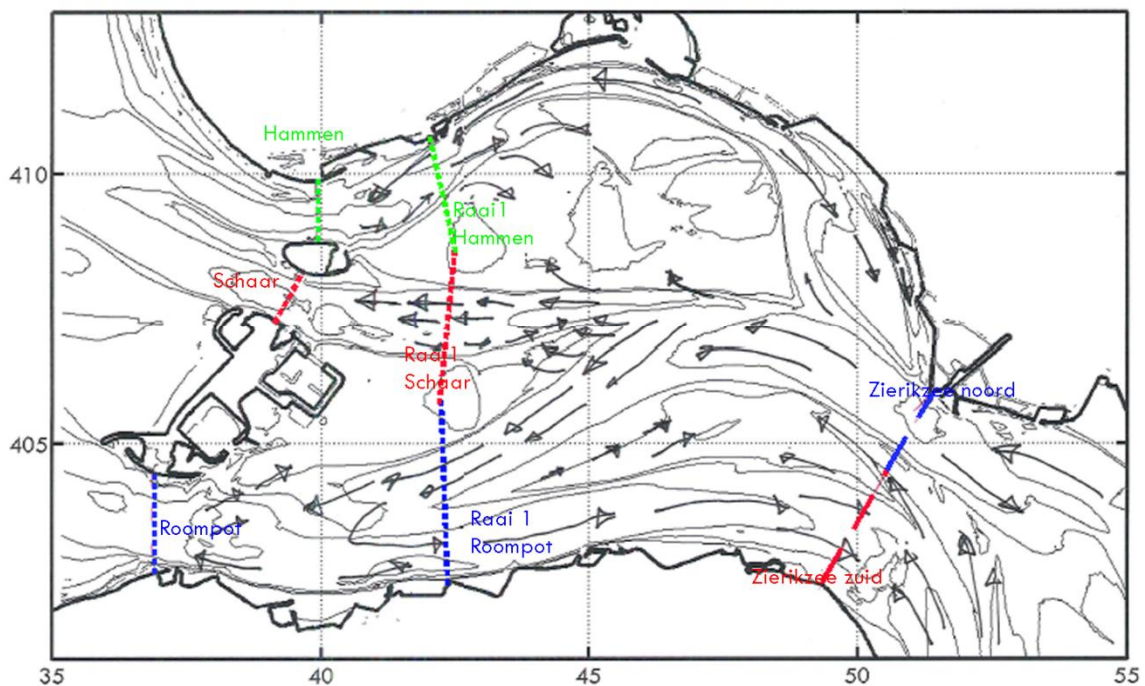
Periode	Actie
1957	Deltawet aangenomen
1959	Begin voorbereidend werk (hydraulische metingen en sedimentaire opbouw)
1961	Afsluiting Veersche Gat
1962	Grevelingenafsluiting (zuid)
1964	Grevelingenafsluiting (noord)
1967-1968	Ontwikkeling werkhaven Schelphoek
1968-1969	Ontwikkeling werkhaven Sophiapolder
22 januari 1969	Vaststelling locatie afsluitdam Oosterschelde
1969	Afsluiting Volkerak
April 1969-april 1970	Ontwikkeling werkeiland op intergetijdenvlakte Roggeplaat
Maart 1970-begin 1971	Ontwikkeling werkeiland & werkhaven Neeltje Jans
April 1971-begin 1972	Ontwikkeling van werkeiland Noordland die verbonden is met Neeltje Jans
Juni 1972-september 1972	Opvullen Geul met zand
Augustus 1973	Commitee voor beter alternatief afsluitdam
Maart 1974	Voorstel voor de Oosterscheldekering
Eind 1974	Tijdelijke stop van de Oosterscheldewerken
Vanaf september 1976	Verwijdering van deel van de zeebed-protectie op de locatie waar de pylonen kwamen te staan
Eind 1976-begin 1978	Aanleg werkeiland op de Plaat van Vliet ten behoeve bouw Philipsdam
Begin 1978-1983	Bouw Krammersluizen Philipsdam voor binnenvaart en pleziervaart
1979-1980	aanleg werkeiland t.b.v. bouw Oesterdam
1980-1986	Aanleg Oesterdam
Augustus-november 1983	Pylonen geplaatst in de Hammen
Februari-April 1984	Pylonen geplaatst in de Schaar
April 1984-september 1984	Pylonen geplaatst in de Roompot
Augustus-November 1984	Plaatsing deuren Hammen
Augustus 1984-begin 1986	Plaatsing deuren Schaar en Roompot
6 augustus 1986	Opening Oosterschelde Oosterscheldekering
Februari 1987	Philipsdam gereed op de locatie van de Grevelingendam
1989	Aanleg weg over Oesterdam
1994	Bouw tweede sluis voor pleziervaart in de Philipsdam

3.5 Morfologische ontwikkelingen na 1986 in het Oosterscheldebekken

Waterbeweging in het Oosterscheldebekken

De stroomsnelheden zijn in de zuidelijke tak van het bekken met 20-40% afgenomen, terwijl in de noordelijke tak de stroomsnelheden met gemiddeld 70% zijn afgenomen. Daardoor verminderde ook de beweeglijkheid van de geulen en de kenmerkende dynamiek (Withagen, 2000), wat echter niet wil zeggen dat geuldynamiek niet meer bestaat.

Daarnaast is er sprake van een verandering van de getijdominante richtingen in een deel van de geulen. In 1968 was de situatie nog zodanig dat er één eb-gedomineerde geul was in het midden van de Oosterschelde-monding (de Schaar van Roggeplaat) geflankeerd door twee vloedgedomineerde geulen, waarbij vooral de noordelijke Hammen een groot deel van de vloedstroom verzorgde en de Zuiderlijke Roompot wat minder (De Bruijn, 2012). Inmiddels is dit veranderd. Het reststromingspatroon zoals nu tevoorschijn komt uit computerberekeningen laat zien dat de Hammen, Schaar van Roggeplaat en Vuilbaard-Roompotverbinding ebgedomineerd zijn. De vloed lijkt met name via de Roompot naar binnen te komen (figuur 3.4; Eelkema et al., 2012).



Figuur 3.4: Resttransportpatronen in de westelijke Oosterschelde (bron: Eelkema et al, 2012)

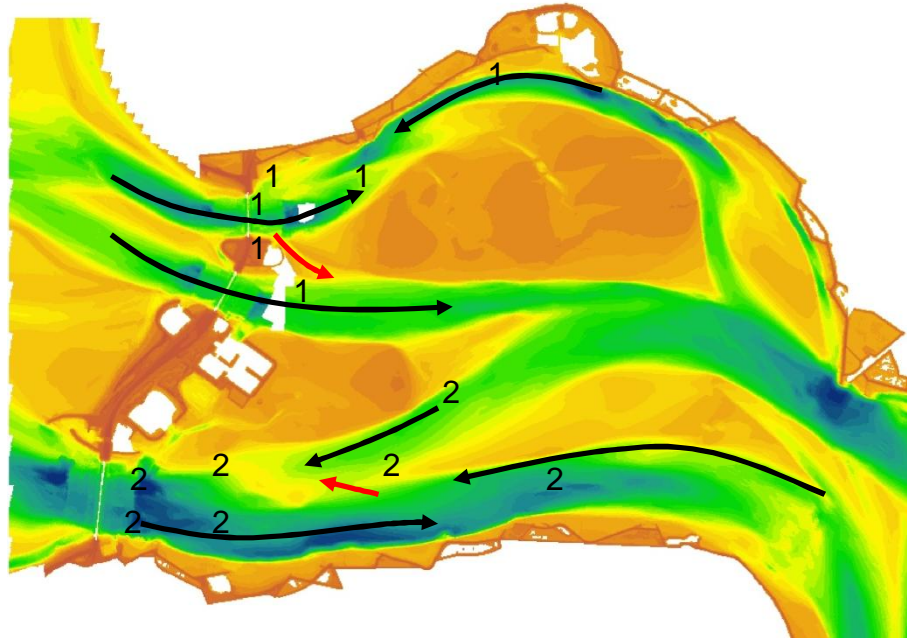
De volgende ontwikkelingen zijn van belang in het Oosterscheldebekken:

1. Veel van de grotere morfologische veranderingen in het kombergingsgebied vinden nabij de kering plaats. In de directe omgeving van de kering zijn ontgrondingskuilen ontstaan. Dit zand is hoogstwaarschijnlijk in de directe omgeving van deze gebieden afgezet (tot ca. 5 km uit de as). Complicerende factor daarbij is dat de ruggen en drempels die gevormd zijn vaak op het contactpunt van de kuil en een geul ontstaan. Ook is het nog onbewezen dat het sediment van de aanzanding daadwerkelijk uit de ontgrondingskuil tevoorschijn is gekomen. Bij wijze van voorbeeld: in de Roompot ten oosten van de kering (op 1,5 -2,0 km) heeft zich voor de Schaar van Vuilbaart een drempel gevormd. De vraag is wat er met dergelijke drempels gebeurt als de eventuele voeding vanuit de ontgrondingskuil stopt, en daar een evenwichtssituatie ontstaat. Daarnaast traden er in de Schaar van Colijnsplaat sterke morfologische veranderingen op (figuur 3.6).

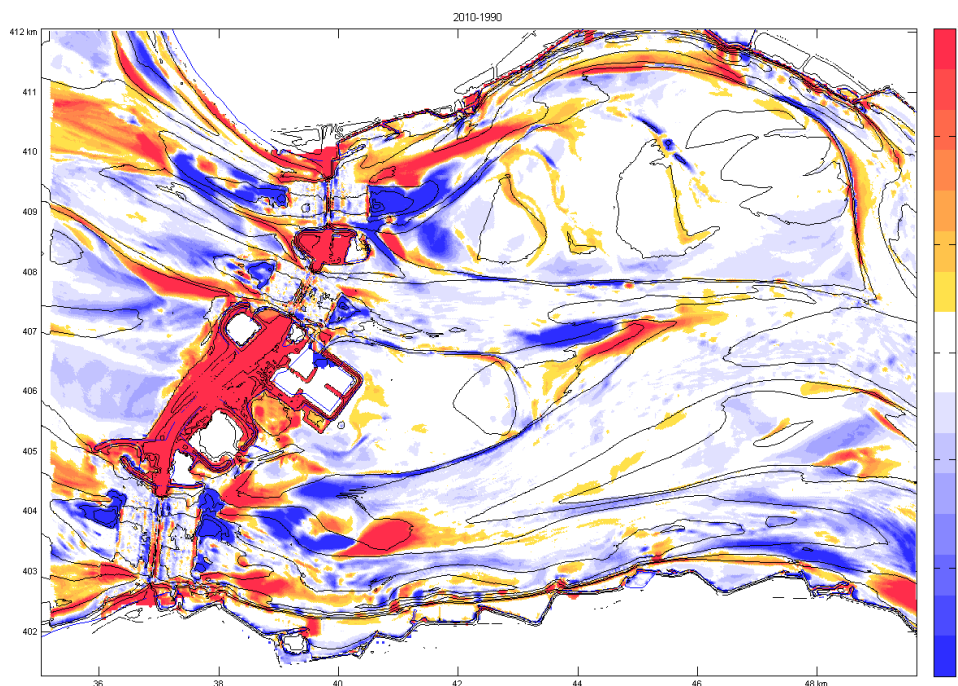
Er zijn twee aandachtsgebieden nabij de kering met forse sedimentatie en erosie, namelijk bij de Hammen-landwaarts en bij de Roompot-landwaarts (zie voor nummers aandachtsgebieden figuur. 3.5).

1) Bij de landwaartse erosiekuil (1a) van de Hammen (1b) vond aan weerskanten sedimentatie plaats op de flanken. Met name op de noordelijke flank (1c) waar de in ieder geval sinds 1960 uitbochtende Hammen de erosiekuil ontmoette was sprake van sterke sedimentatie en vormde zich tussen 1984 en 1988 een drempel die de noordelijke ebschaar (1b) scheidde van de zuidelijke vloedschaar (1d). . Zuidelijk daarvan vormde een vloedschaar (1d). Op termijn moet rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat de noordelijke Hammen minder water gaat voeren als de vloedschaar contact krijgt via het Oliegeultje (1e) met de Schaar van Roggenplaat (1f). Indien dat gebeurt, krijgen we te maken met een compleet nieuw stromingspatroon, waarbij het huidige Oliegeultje tot een grote geul kan gaan uitbreiden die vervolgens erosie kan veroorzaken aan de achterkant van de Kering. Mocht in de (verre) toekomst de noordelijke geul de Hammen tussen Schouwen-Duiveland en de Roggenplaat verder verzanden en tegelijk de ontwikkeling van de nieuwe Hammen vloedschaar en de ebgeul het Oliegeultje zich doorzetten, dan zullen de consequenties voor de kering naar verwachting groot zijn. Aanbevolen wordt om dit te blijven monitoren m.b.v. lodingen en om met gefingeerde bodems voor mogelijke toekomstige situaties modelsimulaties uit te voeren.

2) Vanuit de oostelijke erosiekuil (2a) van de Roompot (2b) lijkt het sediment, vrijkomende bij de doorgaande verdieping van de kuil, vooral terecht gekomen te zijn voor de kust van Noord-Beveland (2c) en langs Neeltje Jans (2d; figuur 3.6). De sedimentatie wordt vermoedelijk ook mede bepaald door de er tegenin werkende ebstroom. Het leidde tot een zekere vernauwing en daarmee tot een toename van de stroomsnelheden in het centrale deel van de spui-aanloop. De sedimentatie langs Neeltje Jans hindert de uitstroom via de Roompot-Vuilbaard geul (2e) die daardoor een steeds zuidelijker weg zal moeten zoeken. Hand in hand met de ontwikkeling van de sedimentatie verdiepte ook het noordelijk deel van de erosiekuil van Roompot-landwaarts. De oorzaak hiervoor wordt vooral gezocht in het asymmetrische stromingspatroon door de kering. Hierbij komt nog het zorgpunt dat tussen Roompot-Vuilbaard en Schaar van Colijnsplaat-Roompot (2f) sedimentatie plaats vond. Deze (2g) vernauwde samen met de plaatgroei bij Neeltje Jans (2d) de uitgang van de Roompot-Vuilbaard wat leidt tot hogere stroomsnelheden. Daarnaast wordt de langzaam noordwaarts uitbochtende Schaar van Colijnsplaat-Roompot gedwongen om zich een weg langs deze uitgroeiende spit te zoeken. Dit zou in de toekomst het gevolg kunnen hebben dat deze haar weg zoekt via de Roompot-Vuilbaard, wat de stroomsnelheden nog verder zou opjagen. Indien de stroming dicht bij de Kering uitmondt, kan dat daar tot erosieproblemen leiden.



Figuur 3.5: Dynamiek die mogelijk haar invloed uitoefent of gaat uitoefenen op de Oosterscheldekering en de dijken langs de Oosterscheldekering. Zwarte pijlen = hoofdstroomrichting op basis van morfologie en modelwerk; rode pijlen = mogelijke toekomstige ontwikkelingen van nieuwe verbindingseulen.



Figuur 3.6: westelijke deel Oosterschelde verschildiepte 2010-1990. Bij de thalweg (lijn die het diepste deel van de geul volgt) van de meest zuidelijke geul is een afwisseling van erosie en sedimentatie aan de kust waar te nemen.

Schaar van Roggenplaat

De landwaartse erosiekuil van de Schaar van Roggenplaat kent alleen wat sedimentatie aan de flanken, maar dit lijkt niet te leiden tot een wezenlijke beïnvloeding van geulen. Omgekeerd lijkt ook het geulenpatroon niet erg te veranderen.

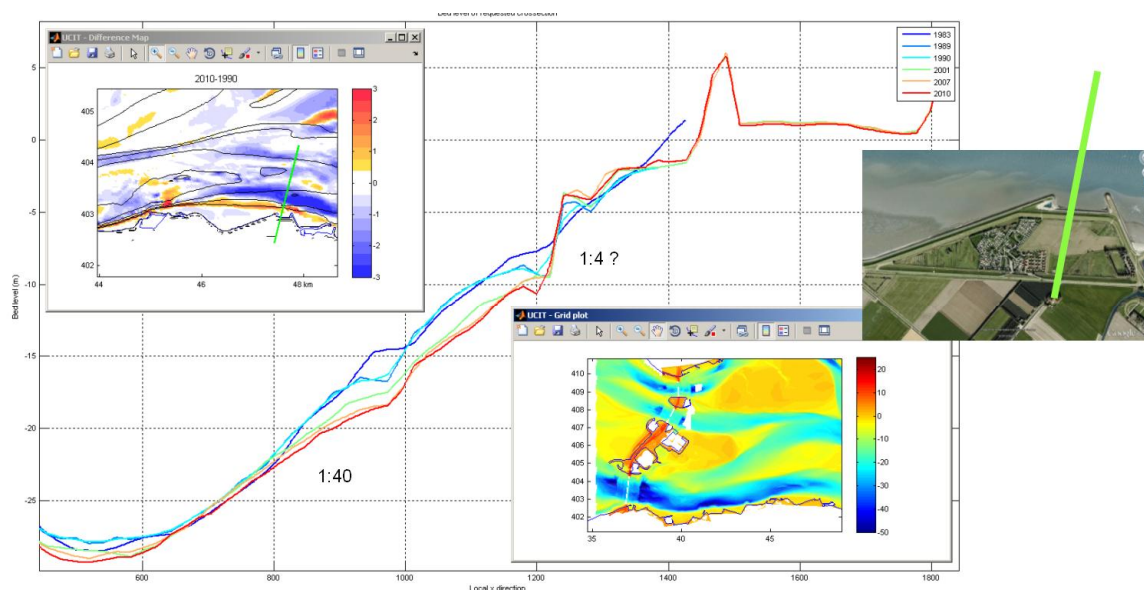
Verdere ontwikkelingen

De bovengenoemde ontwikkelingen verlopen naar verhouding nog langzaam (over decennia). Aanbevolen wordt dit periodiek (bv. ledere 10 jaar) te onderzoeken met metingen (MWTL) en met modellen waarbij de ingeschatte toekomstige morfologische situatie wordt doorgerkend op stromingseffecten. Daarbij zijn vooral de ontwikkelingen rond de Roompot en de Hammen belangrijk. Toekomstige ontwikkelingen zouden sneller kunnen gaan omdat sedimenttransporten nu eenmaal met een 5^e macht verbonden zijn met stroomsnelheden: eenmaal doorgebroken kunnen de ontwikkelingen daardoor snel verlopen..

Erosie geulwanden nabij dijken

Het diepste deel (figuur 3.5) van deze geul meandert langs de kust. Bekijken we de geulontwikkeling over de periode 1990-2010 dan zien we dat er een afwisseling van erosie en sedimentatie optrad die zwak samen viel met binnenbochten (sedimentatie) en buitenbochten (erosie). Ook harde structuren speelden duidelijk een lokale rol in de erosie en sedimentatiepatronen.

Buiten het nabije keringgebied is tussen kering en Zeelandbrug nagegaan of er zich belangrijke morfologische ontwikkelingen voordoen met eventuele gevolgen voor de dijken. Er is één locatie gevonden waar dit het geval lijkt te zijn. Het betreft de geul Schaar van Colijnsplaat nabij Colijnsplaat (rechtterkant van figuur 3.6). Deze laat een sterke verdieping zien die gepaard gaat met een zuidwaartse verplaatsing van de zuidelijke geulwand. In de dwarsdoorsnede (figuur 3.7) is tussen NAP -10m en NAP -5m een steil oevergedeelte ontstaan, waar instabiliteit een rol kan gaan spelen ten aanzien van de veiligheid van de dijk van Noord Beveland. Aanbevolen wordt om met de gegevens van het waterschap (ZEEKOE-data) dit verder te onderzoeken.



Figuur 3.7: Ontwikkeling schaar van Colijnsplaat, zuidwaartse verplaatsing geulwand. De groene lijn geeft de locatie van de dwarsdoorsnede aan.

Verband waterbeweging morfologie

De veranderingen in de waterbeweging (H 2) sluiten goed aan bij de veranderingen in de morfologie en vice versa. Daar waar stroomsnelheidsveranderingen het sterkst zijn veranderd over de periode 1990-2010 daar treden ook de sterkste morfologische veranderingen op. Daarbij blijkt ook op een aantal punten dat de morfologie de waterbewegingen volgt (zoals de asymmetrische uitschuring van de kuilen bij de Roompot doorlaat).

3.6 Morfologische ontwikkelingen Voordelta

Algemeen

De voordelta van de Oosterschelde is opgebouwd uit geulen, ondiep gelegen platen en eb- en vloedcharen. De achtereenvolgende vergroting (tijdens de fase dat de Grevelingendam er al was en de compartimenteringdammen nog niet) en verkleining (als gevolg van de aanleg van de kering en compartimenteringdammen) van het getijdvolume heeft een sterke invloed uitgeoefend op de ontwikkeling van de voordelta, zoals hieronder wordt besproken.

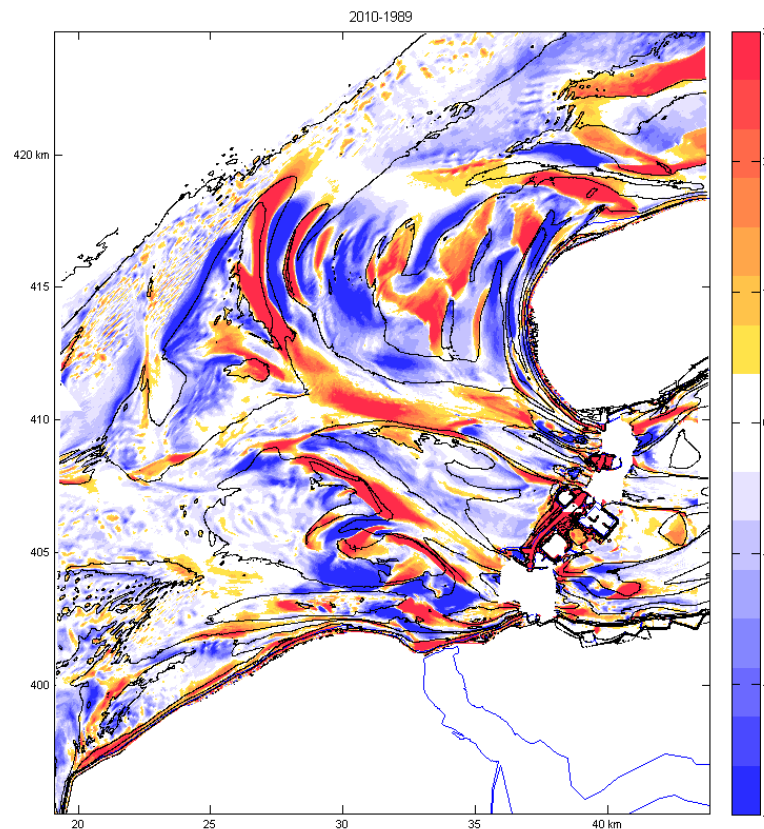
De hoogteligging van de ondiep (tot ca. -5 m NAP) gelegen platen wordt zowel door de golven als het getij beïnvloed. De ondiepe delen worden doorsneden door vloed- en ebscharen. Op de voordelta zijn drie hoofdgeulen aanwezig van noord naar zuid:

- het Westgat gekoppeld aan de Hammen en de Schaar van Roggenplaat
- de Oude Roompot gekoppeld aan de Roompot in het Oosterscheldebekken
- de Roompot/Schaar van Onrust gekoppeld aan de Roompot in het Oosterscheldebekken.

De buitendelta is door de aanleg van Neeltje Jans en het opvullen van de Geul voor een belangrijk deel gescheiden in twee aparte buitendelta's waarbij de Zuiderlijke Roompot-buitendelta binnen de buitendelta van Schaar & Hammen ligt.

Na de totstandkoming van de Oosterscheldkering (met een reductie van het getijdvolume als gevolg) trokken de meest zeewaarts gelegen buitenste delen van de geulen zich terug (Oude Roompot) of werden smaller (Westgat), figuur 3.8. Ook het sedimentvolume veranderde iets. Eelkema et al, 2012 berekende dat na het gereedkomen van de kering op de buitendelta erosie plaatsvond ter grootte van 60 miljoen m³ over de periode 1988-2008, waarbij het sediment hoogstwaarschijnlijk in noordelijke richting werd afgevoerd. Dit is conform wat verwacht mocht worden bij een afname van het getijdvolume. Het grootste verlies vond plaats in de gebieden boven -10 m NAP. De gebieden onder -10 m NAP blijven ongeveer constant qua gemiddeld sedimentvolume (Eelkema, pers. com.). Lokaal zijn er echter wel grote verschillen (zie onder). Hier bovenop vonden de "natuurlijke", cyclische morfologische ontwikkelingen plaats: het ontstaan, de groei, de migratie en het verdwijnen van getijdegeulen, eb- en vloedcharen en zandbanken, waarvan het grootste deel met de wijzers van de klok meedraait. Daarbij nog verder geholpen door de golven ontstaat er een sterke dynamiek die ook in de toekomst een rol zal blijven spelen.

Cleveringa (2008) concludeert dat de positie van de Roompot vrij stabiel is; de overige geulen roteren naar het noorden tot noordoosten. Daarnaast moet rekening gehouden worden met een herverdeling van het zand binnen de buitendelta waarbij de ondiepten naar het NO migreren en daarbij zelfs de buitenbochten van de geulen voor zich uit drukken (Eelkema, pers. com). Van tijd tot tijd ontstaan er nieuwe geulen vanuit de eb- en vloedcharen over de ondiepten heen.

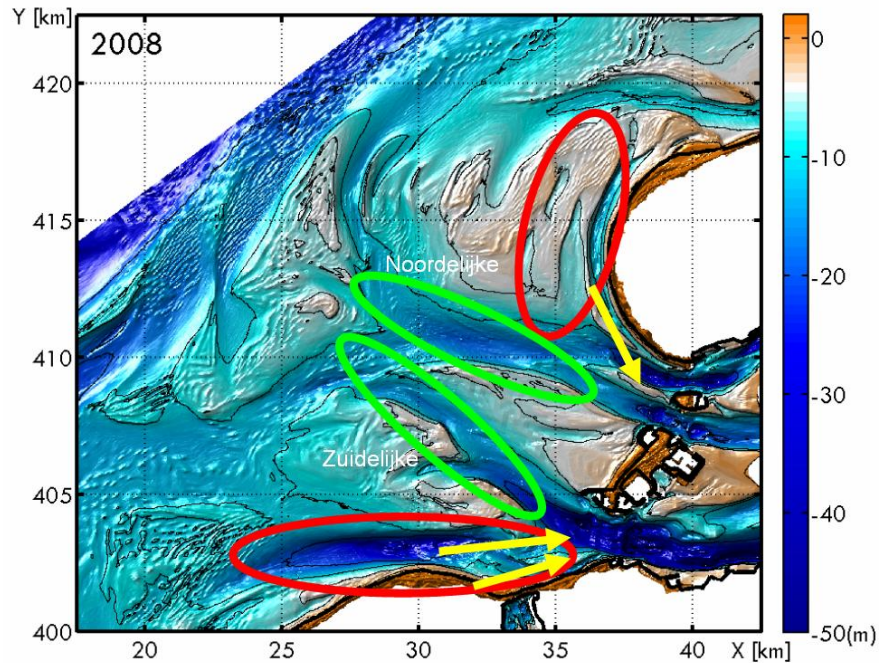


Figuur 3.8 verschil bodemhoogte Voordelta 1990-2010

De grootschalige ontwikkelingen na het gereedkomen van de kering

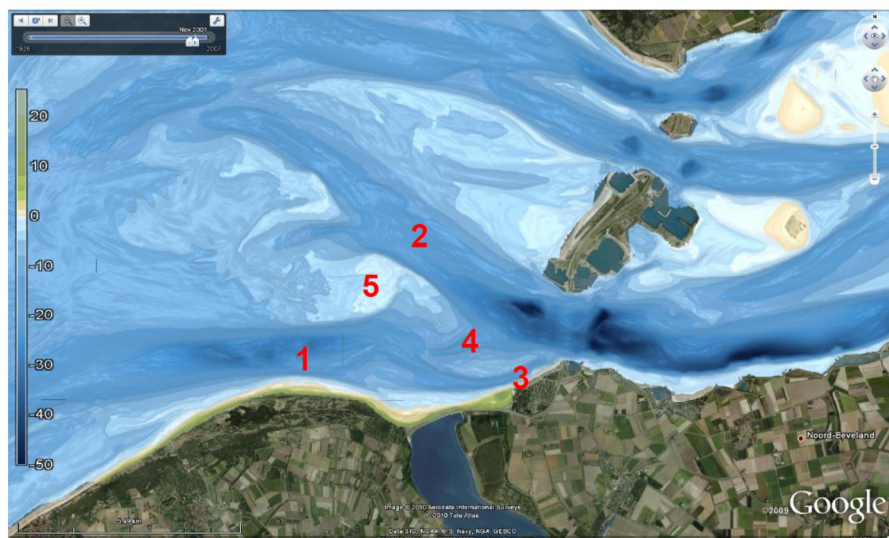
De belangrijkste ontwikkelingen staan weergegeven in figuur 3.8 & 3.9. De twee hoofdgeulen Oude Roompot en Westgat worden ondieper en de twee geulen langs de kust Zuiderlijke Roompot en Krabbengat verdiepen. Op de lange termijn zullen deze geulen problemen (blijven) veroorzaken ten aanzien van de kustlijnhandhaving van de nabijgelegen kusten. De ondiepte tussen de Oude Roompot en de Zuiderlijke Roompot (gele pijlen in figuur 3.9) veroorzaakt grote stroomsnelheden ter plekke (zie Hoofdstuk 2, figuur 2.3 a en b). Dit gedeelte is vloeddominant en het geërodeerde zand wordt vooral afgezet op de zuidelijke geulrand van de Oude Roompot. Deze verplaatst zich daardoor enigszins in noordelijke richting waardoor de stroming van en naar de kering onder een grotere hoek komt te staan met mogelijk negatieve consequenties voor de verdere ontwikkeling van de erosiekuilen. De veranderingen in de waterbeweging (H 2) sluiten goed aan bij de veranderingen in de morfologie en vice versa. In de afgelopen 20 jaar zijn de verschillen van zowel morfologie als waterbeweging nog beperkt geweest. In de toekomst, bijvoorbeeld als de verbinding tussen de beide Roompotten “doorbreekt”, kunnen de verschillen veel groter zijn met eventuele consequenties voor de kering.

Hieronder is de ontwikkeling verder uitgewerkt voor de zuidelijke en noordelijke buitendelta.

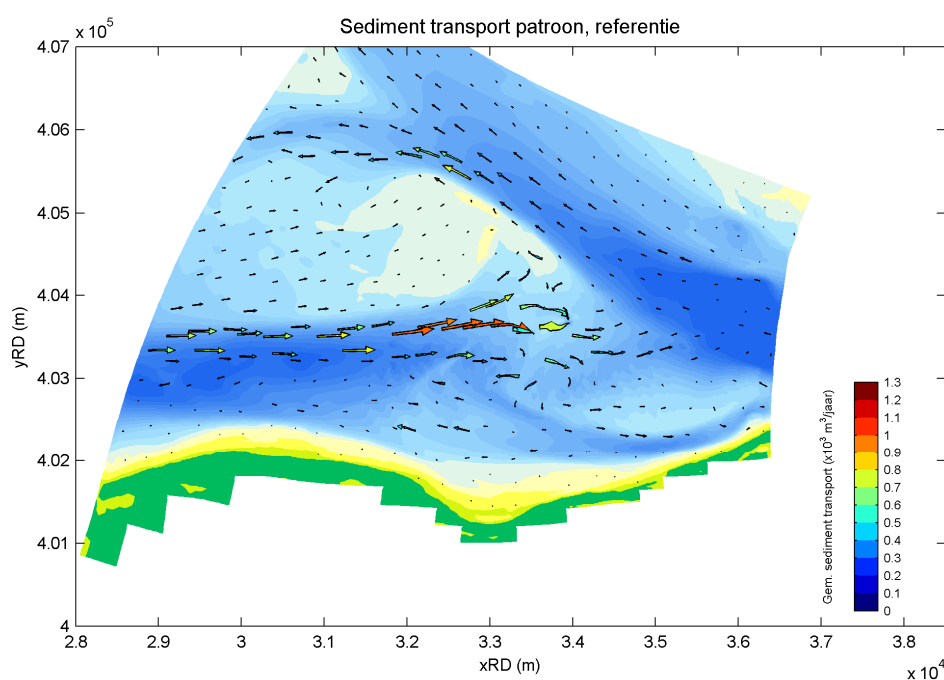


Figuur 3.9: Voordelta met in het centrale deel groen omlind de Oude Roompot en noordelijk ervan het Westgat, die beide ondieper worden na de aanleg van de Oosterscheldekering. Aan de flanken rood omlind de kustwaarts migrerende en verdiepende Roompot + Schaar van Onrust voor Walcheren en voor Schouwen het dito Krabbengat met de westwaarts ervan gelegen ebschaar. Schuine aanstroming van de Oosterscheldekering is weergegeven door de gele pijlen.

De zuidelijke buitendelta



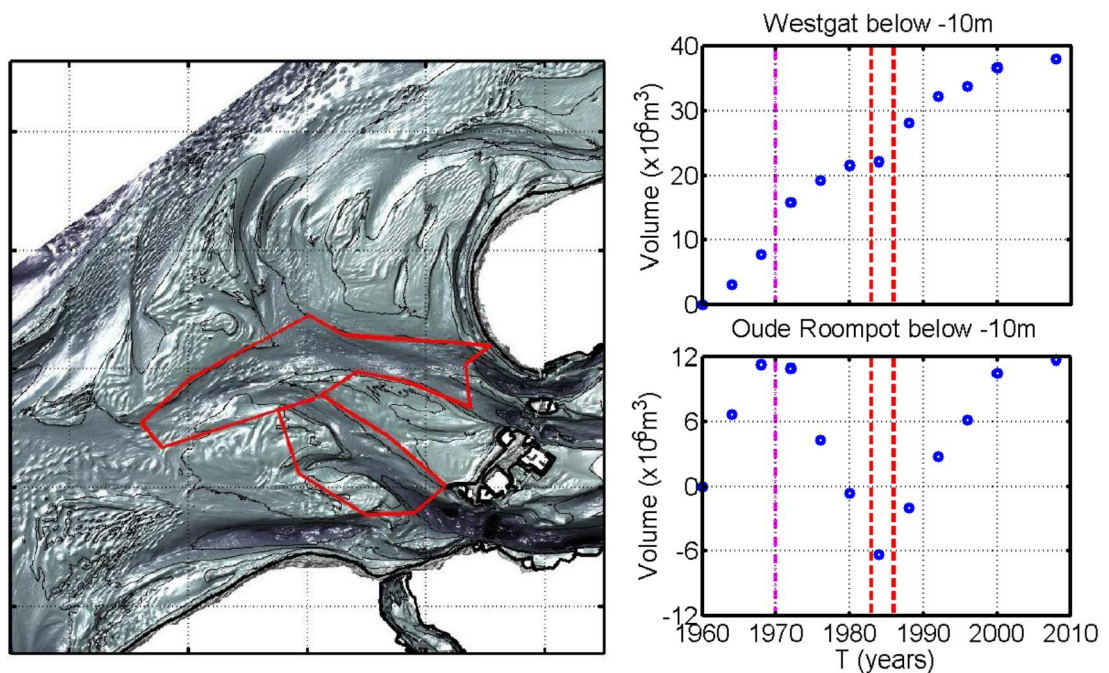
Figuur 3.10: Morfologische elementen van de ebdelta van de Oosterschelde nabij Noord-Beveland: 1) de Zuidelijke Roompot, 2) de Oude Roompot, 3) de Schaar van Onrust, 4) de Roompot-Hompels en 5) de Hompels. Bron: de Bruijn, 2012.



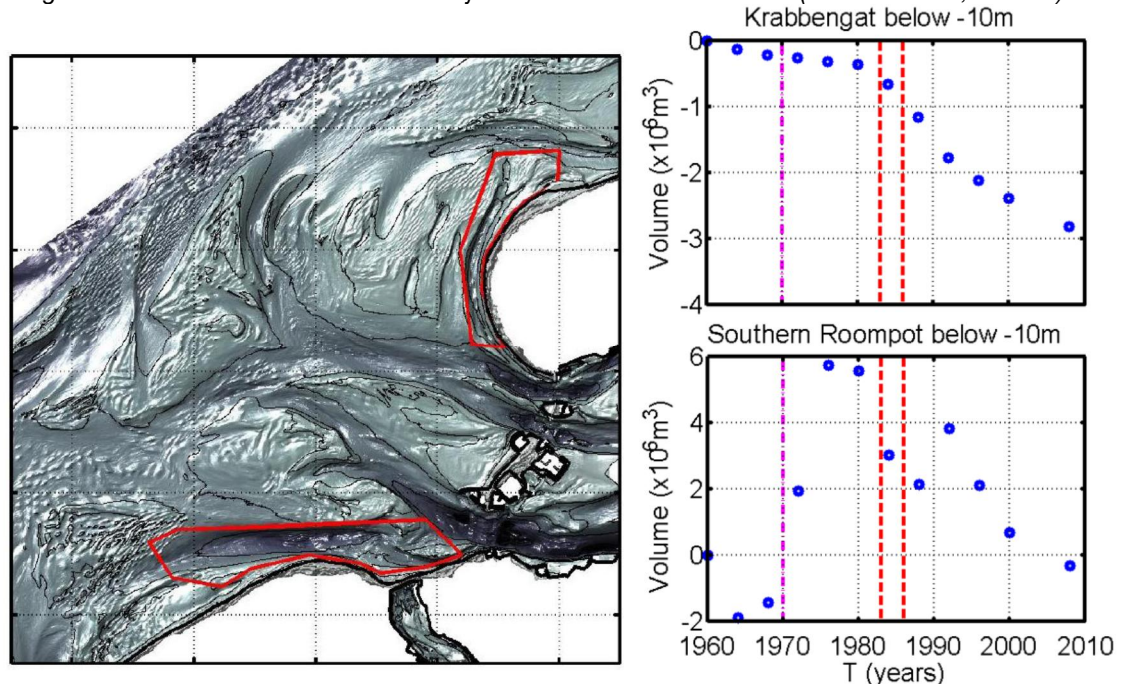
Figuur 3.11 Sediment transport patroon langs West-Walcheren.)

De zuidelijke buitendelta bestaat uit twee hoofdgeulen (Figuur 3.10 de Zuiderlijke Roompot (1) langs de kust van Noord-Beveland en de Oude Roompot (2) die tussen de ondiepte Hompels (5) en Noordland ligt. De vloedgedomineerde geul Zuiderlijke Roompot, splitst in de vloedgedomineerde Schaar van Onrust (3) en de ebschaar Roompot-Hompels (4); fig. 3.11 Van der Werf et al., 2010). Uit sedimenttransportmodelleringen komt overigens naar voren dat de Roompot-Hompels een vloed-gedomineerd residueel sedimenttransport kent (figuur 3.11 berekeningen Deltares). 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, met maximale snelheden van ca. 10-20 m/jaar.

Figuur 3.12 en 3.13 tonen de ontwikkeling van het sedimentvolume van de belangrijkste geulen in de buitendelta van de Oosterschelde: de (Zuiderlijke) Roompot, de Oude Roompot, het Westgat en het Krabbengat. Hierin is 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 Zuiderlijke 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 getijvolume: de geul is te ruim voor het debiet. Ook de watervolumes door de Zuiderlijke 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 erodeerde. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door een verandering in het (residuele) waterstandsverhang langs de geul als gevolg van de Deltawerken (van der Werf et al., 2010).



Figuur 3.12 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. (bron: Eelkema, TUDelft)



Figuur 3.13 Ontwikkeling sedimentvolume van het Krabbengat en de Zuiderlijk Roompot. De paarse lijnen duiden de aanleg van de Volkerakdam aan en de rode lijnen de Oosterscheldewerken. (Bron Eelkema, TUDelft)

Schaar van Onrust

Voor de kust van Noord-Beveland dringt de vloed-schaar Schaar van Onrust op naar de kust. Regelmatig is er op bescheiden schaal morfologisch gebaggerd waarbij hoeveelheden tot $0,5 \text{ Mm}^3$ werden gebaggerd uit de noordwestelijk ervan gelegen ebschaar Roompot-Hompels en

gestort in de Schaar van Onrust in de jaren '93, '96, '00, '04 en '08. De effecten ervan waren beperkt. Er zijn geen aanwijzingen dat dit morfologische baggeren heeft geleid tot structurele afvlakking van de negatieve MKL trends. Wel verminderde het oprukken van de Schaar van Onrust, maar dit wordt toegeschreven aan de aanleg van de Oosterscheldekering. Tegelijk lijkt de hele Roompot wat meer water te trekken, waarbij geen verschuiving optrad van de debieten van de Schaar van Onrust naar Roompot-Hompels. Volgens Van der Werf et al. (2010) blijkt uit de bodempeilingen duidelijk het dichtdrukken van de Schaar van Onrust. De kustwaartse beweging van de geul was in de periodes 1964-1968 en 1976-1989 het sterkste (~10-20 m/jaar). De oorzaak lijkt deels te liggen in de plaat die zich opbouwde in de periode 1984-2010 tussen de Schaar van Onrust en de Roompot-Hompels. Deze plaat werd waarschijnlijk deels gevoed met zand dat vrijkwam uit het spuigat: aan weerskanten ervan is namelijk sedimentatie opgetreden: aan de zuidkant betreft het de genoemde plaat. Momenteel wordt nagedacht over grootschalig ingrijpen (morfologisch baggeren e.d.) in de Schaar van Onrust. Aanbevolen wordt om bij deze beslissing ook de interactie tussen Schaar, Zuiderlijke Roompot en Kering in beschouwing te nemen.

Erosiekuil zeezijde Roompot

De ondiepte vlak bij de kering tussen Oude Roompot en Zuiderlijke Roompot breidde zich in noordelijke richting uit, waardoor de Oude Roompot nabij de kering meer naar het noorden ging krommen. Het stroombeeld is zeer complex met grote stroomsnelheden op de ondiepte en lage snelheden in de geul de Oude Roompot (zie hoofdstuk 2). Op langere termijn zal de Zuiderlijke Roompot mogelijk meer in belang toenemen dan de Oude Roompot. De schuine aanstroming via de Schaar van Onrust naar de kering en de vergroting van de residuele vloedstroming zouden mogelijk kunnen leiden tot meer turbulentie bij de kering zelf. Aanbevolen wordt om dit te monitoren en om met een gefingeerde bodem voor een toekomstige situatie modelsimulaties uit te voeren. Verder zorgt de vloeddominantie van de Roompot ook voor sedimentaanvoer vanaf de zuidzijde van de erosiekuil Roompot-zeekant: dit zal (deels) erosiekuilontwikkeling onderdrukken in dat gebied. Dit effect zal aan de noordzijde minder uitgesproken zijn.

De Noordelijke buitendelta

Het is opmerkelijk dat de twee geulen Schaar van Roggenplaat en Hammen, die samen maar 40% van het water vervoeren, een buitendelta hebben gevormd die meer zeewaarts ligt en groter is in volume dan de buitendelta van Roompot. Deels is dit een erfenis uit het verleden, omdat oorspronkelijk meer water via de noordelijke takken stroomde en omdat zand vanuit het zuidwesten naar het noorden wordt vervoerd. Dit leidt tot sterke bewegingen van de platen naar het ONO, terwijl een deel van de noordelijk gelegen buitendeltageulen door hun buitenbochtwerking probeert te verplaatsen naar het ZW. Dit leidde en leidt tot sterke dynamiek op de buitendelta. Op grond van het getijvolume en de zandaanvoer moet ook in de toekomst rekening gehouden worden met sterke sedimentbewegingen in de noordelijke buitendelta.

Het Westgat verlengde in de periode van 1960 tot circa 1980 via de vorming van een NW georiënteerd uiteinde. Vervolgens trok dit uiteinde zich terug terwijl het werd "overreden" door een zandplaat die zich aan de oostkant ervan vormde ten gevolge van de vorming van een nieuwe geul. Als geheel werd het Westgat ondieper (figuren 3.12 & 3.13). Dit was voor een belangrijk deel het gevolg van de reductie van het getij dat nog via het Westgat stroomde na aanleg van de kering. Een ander deel van de verklaring van het ondieper worden moet gezocht worden in de reeks van ebscharen en een enkele vloedschaar die zich vormden over

de ondiepe platen gelijk zeewaarts van Schouwen die een deel van de watervoerende functie overnamen.

Erosiekuil Schaar van Roggenplaat zeewaarts

De geul van de erosiekuil van de Schaar van Roggeplaat is verlengd in zeewaartse richting en lijkt een deel van het meer westwaartse watertransport over te nemen van de Hammen. Gezien de ongehinderde stroming aan de binnenkant via de Schaar en de gehinderde stroming van de Hammen lijkt dit een logische ontwikkeling. Inderdaad wijzen ook de stroombeelden op een geringe toename van de stroomsnelheden via de Schaar ten koste van de Hammen over de periode 1990-2010.

Erosiekuil Hammen zeewaarts

In de erosiekuil van de Hammen (zeekant) is in de periode 1989-2010 verdieping opgetreden. Zeewaarts (westwaarts) van deze erosiekuil is sedimentatie opgetreden en heeft zich een drempel gevormd. De geul tussen de kering en deze drempel is meer georiënteerd geraakt op de serie geulen en ebscharen die zich heeft gevormd over de ondiepe platen westwaarts van Schouwen. Een belangrijk voorbeeld is het Krabbengat, die in de periode na aanleg van de kering veel dieper is geworden (figuur 3.13) en tegenwoordig een doorgaande verbinding vormt om de kop van Schouwen heen. Momenteel lijkt de ebschaar zeewaarts ervan zich te gaan verhelen met het Krabbengat. Als dit gebeurt zal een zeer grote getijgeul zich dicht onder de kust van het eiland bevinden. Gezien de zanddruk van de zandplaten westwaarts ervan in NO richting moet rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat de geul nog dichter onder de kust zal gaan liggen in de toekomst. Deze zal de erosiekuil van de Hammen schuin aanstromen wat dus sterk lijkt (zij het spiegelbeeldig) op de situatie voor Walcheren met de Roompot/Schaar van Onrust-situatie. Onbekend is wat het precieze getijdebeeld is (dit in tegenstelling tot de Roompot). Indien doorbraak aan de binnenzijde plaatsvindt van de Hammen-opening van de Kering naar de Schaar van Roggenplaat zal een belangrijker deel van het getijdewater langs deze route kunnen gaan stromen (figuur 3.13). Onduidelijk zijn de effecten op de Kering. Aanbevolen wordt om dit te monitoren en om met gefingeerde bodems voor mogelijke toekomstige situaties modelsimulaties uit te voeren.

3.7 Interactie tussen grootschalige morfologie en erosiekuilen

In hoeverre er sprake is van interactie tussen grootschalige morfologie en erosiekuilen is een vraag van deze studie. Resumerend kunnen we stellen dat er een paar plaatsen zijn waar nu al aanwijsbaar sprake is van interactie:

- De vernauwing van de Roompot-Vuilbaard geul, waarbij zandafzetting aan weerskanten de geul vernauwt; de stroom door deze belangrijke ebgeul komt met andere snelheden en onder een andere hoek bij de Kering, wat mogelijk leidt tot erosie.
- Het belangrijker worden van de vloedstroom via de Zuiderlijke Roompot waardoor de Kering schuiner wordt aangestroomd. Omdat er tevens zand voor de buitenzijde van de Kering wordt gebracht vanuit het zuiden, wordt waarschijnlijk erosiekuilvorming onderdrukt.

Voor de toekomst moet door de interactie tussen grootschalige morfologie en erosiekuilen ook rekening gehouden worden met veranderingen rond de Hammen:

- Aan de landzijde vormt zich nu al een drempel tussen de Kering en de Hammen en vormt zich een nieuwe Hammen vloedschaar zuidelijk ervan. Als deze doorbreekt naar de Schaar van Roggenplaat dan zal de aanstroming van de Kering heel anders lopen en gaan leiden tot erosie ter plekke.

- Aan de zeezijde is het Krabbengat zich aan het ontwikkelen. Afhankelijk van hoe belangrijk deze wordt voor de doorvoer van getijwater zal een situatie ontstaan vergelijkbaar met de Zuiderlijke Roompot.

3.8 Conclusies

- Menselijke ingrepen met name na 1970 beïnvloeden de hydrodynamica in de Oosterschelde en de bijbehorende voordelta. Deze beïnvloeden de morfologische ontwikkelingen nog steeds. Op hun beurt oefenen die weer invloed uit op de Kering en de dijken: dit zal ook de komende decennia nog van belang blijven. Relevant voor de Kering is vooral de ontwikkeling van de geulen in de nabijheid ervan (tot ca. 10 km uit de kering).
- De belangrijkste ontwikkelingen doen zich voor rond de Roompot-doorlaat zeezijde en rond de Hammen-doorlaat landzijde.
 - **Roompot-doorlaat zeezijde.** De ondiepte Hompels vlak bij de kering tussen Oude Roompot en Zuiderlijke Roompot breidt zich in noordelijke richting uit, waardoor de Oude Roompot nabij de kering meer naar het noorden gaat krommen. Het stroombeeld is zeer complex met grote stroomsnelheden op de ondiepten en lage snelheden in de geul de Oude Roompot (H 2). Op langere termijn zal de Zuiderlijke Roompot waarschijnlijk nog verder in belang toenemen ten kost van Oude Roompot. Dit alles beïnvloedt de toe- en afstroming naar de Roompot-doorlaat.
 - **Hammen-doorlaat landzijde.** Op dit moment wordt het noordelijke deel van de Hammen geul ten zuiden van Schouwen Duivenland ondieper. Op de lange termijn (20 – 100 jaar) kan dit deel van de Hammen verder gaan verondiepen met grote consequenties voor de toe- en afstroming richting Hammen- en Schaar-doorlaat.
- Hammen-doorlaat zeezijde. De geul voor de kust van Schouwen, het Krabbengat, verdiept en vergroot. Dit leidt tot een meer schuine aan- en afstroming van de Kering bij de verbinding naar de Hammen. Samen met de mogelijke ontwikkeling Hammen-Schaar Roggenplaat connectie kan dit leiden tot sterk veranderende stromingspatronen rond de Hammen-doorlaat.
- In het gebied van de Roompot-doorlaat landzijde zijn vooral de vorming van een zandplaat tussen Roompot-Vuilbaard en Schaar van Colijnsplaat-Roompot, een plaat langs Neeltje Jans en de sedimentatie langs de kust van Noord-Beveland die effecten kunnen hebben op de Kering.
- In het gebied van de Schaar van Roggenplaat-doorlaat zijn de ontwikkelingen tot nu toe gering.
- Interactie grootschalige en kleinschalige morfologie. Het effect is vooral van grootschalige morfologie naar de kleinschalige morfologie rondom de kering. Dit geldt voor toekomstige grootschalige veranderingen in geulen, zoals die mogelijk kunnen gaan optreden.
- De morfologische ontwikkelingen verlopen over het algemeen langzaam, met af en toe een versnelling (geuldoorbraken, zettingsvloeiingen, e.d.). Aanbevolen wordt om deze ontwikkelingen met behulp van aangepaste,(frequentie, opnametechniek)

MWTL metingen te blijven volgen en mogelijke toekomstige ontwikkelingen met modellen te simuleren ten aanzien van de waterbeweging.

- Bij plannen voor grootschalig ingrijpen in de Schaar van Onrust (zandsluiting e.d.) wordt aanbevolen om de mogelijke effecten hiervan op de Kering grondig mee te nemen.

4 Zandtransporten door en rondom de kering

In de jaren 1987 – 1990 zijn er na het gereedkomen van de kering metingen verricht om o.a. de sedimenttransporten door de kering te bepalen. Hiertoe zijn in het hart van de kering in de Roompot metingen op één locatie verricht (HISMIL meetstation, Ten Brinke, 1990). Daaraan voorafgaand zijn metingen verricht met schepen met AZTM's (Jonkers, 1992).

In 1988 is in een groots opgezette meetcampagne getracht het sedimenttransport door de Oosterschelde kering te schatten. In een zestal meetdagen zijn achtereenvolgens voor de drie stroomgaten het sedimenttransport gedurende een eb- en een vloedperiode gemeten door 5 à 6 schepen bovenstrooms en op 500m afstand van de kering, zie hoofdstuk 4. Het sedimenttransport is afgeleid uit AZTM metingen op 5 à 6 niveaus in de verticaal, zie Jonkers (1992). De AZTM's meten de sedimenttransporten. De magnitude en de richting van de stroomsnelheid zijn gemeten met een Elmar (Elmar is een stroomsnelheidsmeter met torpedo, een soort grote Ottmolen). De informatie ten aanzien van de stroommetingen is opgeslagen in twee archiefdozen van Rijkswaterstaat Dienst Zeeland. Een vergelijking van de Elmar snelheidsmetingen met modelresultaten of eerdere metingen is (nog) niet gevonden. Eerder zijn snelheidsmetingen met AMETEK stroommeters (een ADCP type stroommeter) uitgevoerd op 640m van de kering om de WAQUA modellen te verifiëren, zie Spanhof et al. (1992). Deze metingen zijn benedenstrooms van de kering uitgevoerd, d.w.z. bij vloed aan de oostzijde en bij eb aan de westzijde, dus in elk stroomgat in het zog van de gezamenlijke openingen. Dit ter vergelijking van de AMETEK metingen met de WAQUA modellen voor diverse bouwfases (WL, 1986a, 1986b), en voor de eindsituatie met oude en nieuwe barrier formulering (WL, 1987). Deze AMETEK metingen werden kennelijk toch als onvoldoende nauwkeurig gekwalificeerd, en daarom zijn van 6 tot 10 juli 1987 aanvullende metingen uitgevoerd met Ottmolens op 650m van de kering, zie Rijkswaterstaat Directie Zeeland (1987).

HISMIL metingen

In de jaren 1988 – 1990 zijn gedurende anderhalf jaar vergelijkbare metingen verricht in het HISMIL (HISStos MILieu) station, een onderdeel van het HISTOS (Hydro-Meteo Informatie Systeem Oosterschelde) meetnet. Het station was ingericht in doorstroomopening Roompot 22 (Driemaandelijks Bericht Deltawerken, nr. 118, nov 1986). Metingen zijn zowel bij rustig weer als bij storm uitgevoerd. Bij de metingen werd op vier verschillende hoogtes boven de dorpelbalk water afgezogen; naderhand werd van de genomen watermonsters de hoeveelheid droge stof vastgesteld en werden de slib- en zandfracties bepaald. Met behulp van buizen met wateraanzuiging werden om het kwartier op verschillende hoogtes watermonsters genomen. Om de scheepmetingen en de HISMIL metingen te kunnen vergelijken zijn ter hoogte van het latere HISMIL station op 500 meter uit de kering begin 1988 scheepsmetingen uitgevoerd.

Ten aanzien van zandconcentraties en zandtransporten zijn de volgende conclusies getrokken (Ten Brinke, 1990):

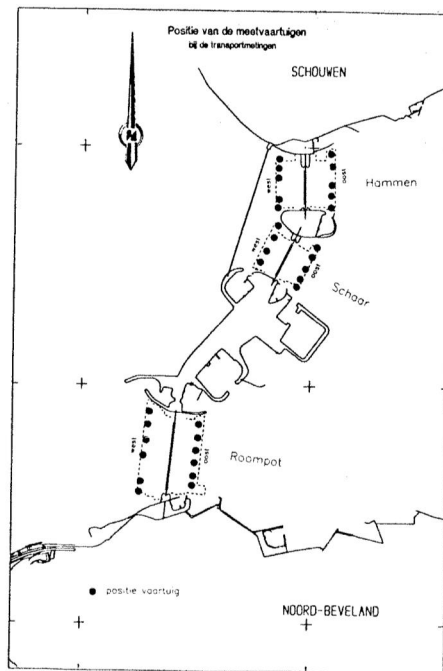
- Voor de aanleg van de kering waren de sedimentconcentraties een factor 10 hoger dan erna. Voor zand is deze factor nog een stuk groter.

- Tijdens vloed komen de hoogste zandconcentraties voor in het zuidelijke deel van de Roompot en aan de randen van de geulen Hammen en Schaar. De dieptegemiddelde concentraties (gemeten met de schepen) zijn over het algemeen lager dan 25 mg/l.
- De concentraties aan de bodem zijn hoger dan aan het oppervlak, met name op de locaties aan de randen van de geul. In het midden van de geulen betreft dit ongeveer een factor twee. Aan de randen is de concentratie aan het oppervlak slechts een fractie van die aan de bodem. Ten Brinke (1990) geeft geen getallen.
- Ter hoogte van het latere station HISMIL (midden van de geul) zijn de concentraties lager dan aan de rand van de geul.
- Bij rustig weer variëren de zandconcentraties in het HISMIL meetpunt van nagenoeg 0 bij doortij tot enkele mg/l bij springtij.
- Bij storm tijdens springtij zijn de concentraties in het HISMIL meetpunt aanzienlijk hoger (maximaal is 20 mg/l gemeten). Op het totale jaarlijkse transport dragen stormen minder dan 10% bij.

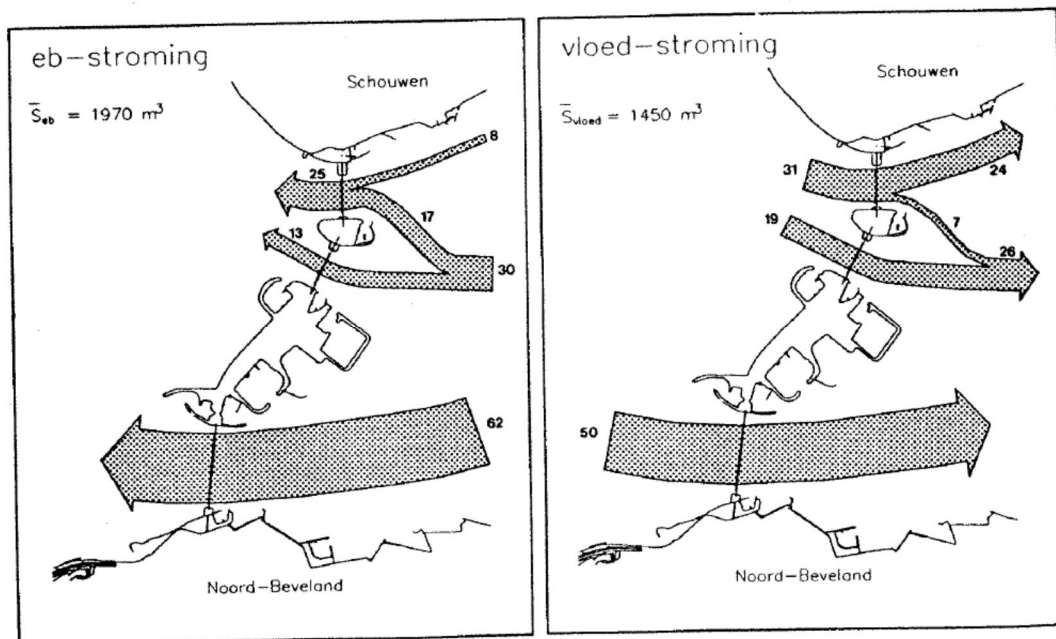
Met behulp van de HISMIL metingen is het niet mogelijk om tot een betrouwbare schatting van de zandtransporten te komen. Dit komt doordat er alleen in het midden van de geul is gemeten en door de verschillende correctiefactoren voor eb en vloed en de onbetrouwbaarheid daarin (Ten Brinke, 1990).

Scheepsmetingen

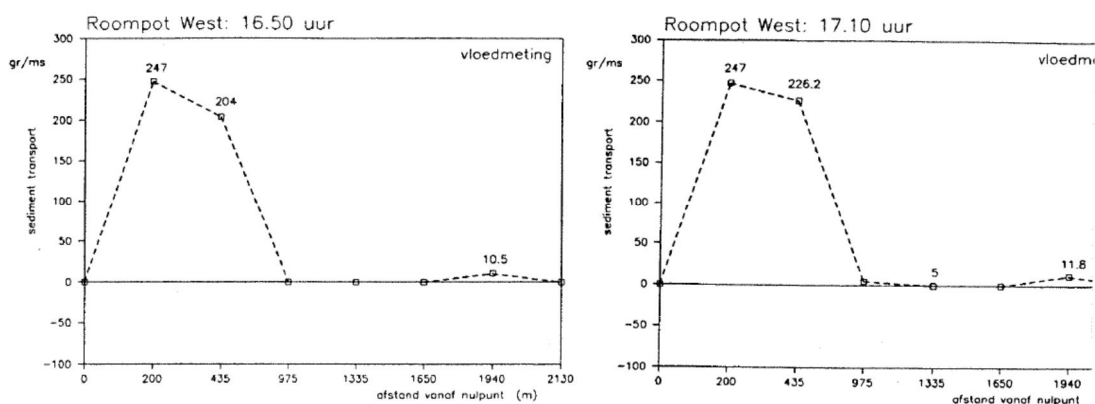
Voor en na het gereedkomen van de kering zijn er sedimentconcentratie metingen verricht met schepen van zowel zand als slib (< 53 µm). In 1987 en 1988 zijn met behulp van AZTM metingen op 5(6) dieptes op 5 schepen (6 voor de Roompot) metingen van sedimentconcentraties verricht in de drie stroomgaten tijdens vloed aan de binnenzijde en tijdens eb aan de buitenzijde op ongeveer 500 meter afstand van de kering. De AZTM metingen zijn gerapporteerd door de Meetdienst Zeeland in 6 verslagen (ZLMD-88.N26/27/30/31/38/45). In Jonkers (1992) staan de uitgewerkte resultaten beschreven. Figuur 4.1 geeft de posities van de boten, figuur 4.2 geeft de uitkomsten ten aanzien van de zandtransporten door de kering. Figuur 4.3 geeft een voorbeeld van de concentratieverdeling langs de kering.



Figuur 4.1; posities van de boten gebruikt voor de zandtransportmetingen.



Figuur 4.2: Resultaten zandtransportmetingen. N.B. de metingen zijn niet simultaan verricht en de getijomstandigheden waren niet gelijk. Tevens stonden enkele van de schuiven dicht.



Figuur 4.3: Voorbeeld van de verdeling van het sedimenttransport door de kering. Het getoonde voorbeeld is de vloedsituatie in de Rooppot tijdens de maximale transporten. Vooral de zuidkant toont de hogere transporten.

De metingen geven na correctie van het opgetreden getij naar een gemiddeld getij of naar springtij de volgende absolute zandtransporten, zie onderstaande tabel. Als correctie is schaling toegepast aan de hand van de getijverschillen tot de derde macht. De gebruikte verhouding van het getijverschil tussen springtij en gemiddeld tij is 1,11. Het is lastig om iets over de betrouwbaarheid van de absolute zandtransporten te zeggen. De onbetrouwbaarheid ervan wordt ingeschat op 20 à 50%.

Tabel 4.1 Zandtransporten door de kering tijdens eb en vloed

Springtij		
Zandtransport in m3 gedurende de eb c.q. vloedfase		
Eb	-510	Hammen
	-1273	Rooppot
	-267	Schaar
	-2050	Totaal
Vloed	472	Hammen
	701	Rooppot
	293	Schaar
	1465	Totaal
Gemiddeld getij		
Zandtransport in m3 gedurende de eb c.q. vloedfase		
Eb	-355	Hammen
	-892	Rooppot
	-187	Schaar
	-1434	Totaal
Vloed	326	Hammen
	518	Rooppot
	203	Schaar
	1047	Totaal

Het gemiddelde zandtransport dat door Jonkers bepaald is komt neer op een export van 0,3 à 0,44 miljoen m³ zand per jaar. Modellen geven nog weinig betrouwbare resultaten ten aanzien van gemiddelde transporten, dus de range 0,3 à 0,44 mag zeker niet als de betrouwbaarheid opgevat worden. Ten Brinke (1990) die over dezelfde gegevens beschikte, naar we mogen aannemen, noemt een transport door de kering tussen de 1 en -1 miljoen m³ zand per jaar. Het gemiddelde zandtransport dat door Jonkers bepaald is betreft rustige omstandigheden. Door wind en golven kunnen de gemiddelde transporten nog significant beïnvloed worden.

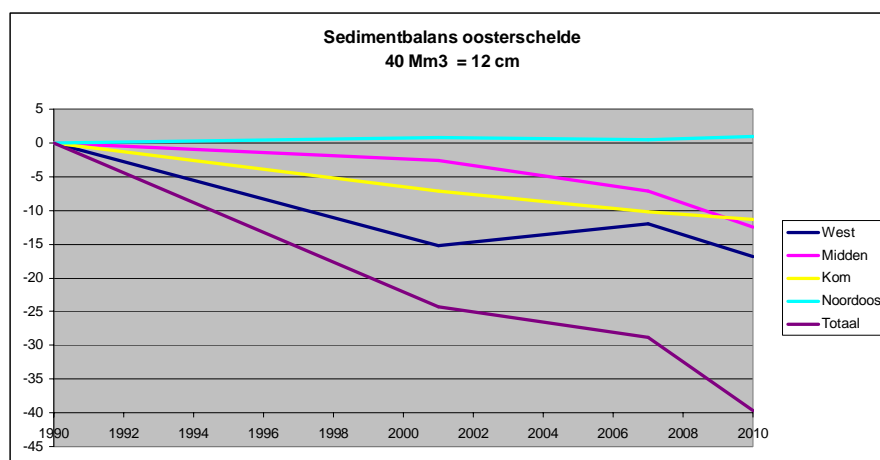
Het zandtransport door de kering wordt vooral beperkt door de aanwezigheid van de erosiekuilen. Deze werken als zandvang en laten weinig zand door richting kering. In Jongeling, 2007, zijn de volgende conclusies getrokken ten aanzien van de zandtransporten:

- De kering zelf vormt hoogst waarschijnlijk geen belemmering voor transport van zand door de kering heen.
- Het denkbeeld dat ontgrondingskuilen naast de bodemverdediging ter weerszijden van de kering werken als zandvang lijkt realistisch.
- Onduidelijk is of er in de huidige situatie in substantiële mate zand door de kering heen wordt getransporteerd. Het lijkt aannemelijk dat er per saldo zand door de Oosterscheldekering wordt gevoerd, waarschijnlijk alleen in kleine hoeveelheid, en mogelijk voornamelijk langs de randen van de stroomgeulen.

In het werk van Hoogduin (2009) is met modellen (2DH en 2DV) onderzocht hoe groot de zandtransporten door de kering zijn en hoe deze vergroot zouden kunnen worden. Het 2DV model betreft een lijnmodel loodrecht op de kering, waarbij de tweede dimensie met meerdere lagen in de diepte is. Er is o.a. bekeken of het invullen en afdekken van de erosiekuilen zou kunnen helpen. Hun conclusie is dat er in de huidige situatie slechts geringe zandtransporten door de kering zijn. Het gedeeltelijk opvullen van de erosiekuilen kan de zandtransporten door de kering vergroten.

Sedimentbalans van de Oosterschelde

Aangezien er verder geen toe of afvoer van sediment is naar of van het Oosterscheldebekken zou een sedimentbalans ervan een antwoord moeten geven op de vraag of er en hoeveel sediment er door de kering komt. Voor de sedimentbalans zijn 4 bodems beschikbaar uit de jaren 1990, 2001, 2007 en 2010. Deze laten een afname van de sedimenthoeveelheid zien van ongeveer 40 miljoen m³ in 20 jaar (zie figuur 4.4). Verdeeld over de oppervlakte van de Oosterschelde is dit 12 cm.



Figuur 4.4; Sedimentbalans van het Oosterscheldebekken. De grafiek toont de veranderingen in sedimentvolume ten opzichte van 1990 voor de Oosterschelde als geheel(totaal) en voor de deelgebieden West, Midden, Kom en Noordoost.

Gezien de onnauwkeurigheid van de bodemmetingen (10 – 20 cm over kleinere gebieden, 5 – 10 cm over grotere gebieden) en de consistentie in de 4 jaren en de 4 deelgebieden (alleen het kleine gebied Noordoost) laat geen erosie zien) is de conclusie dat er een negatieve zandbalans is en er geen significante hoeveelheid sediment door de kering komt. De negatieve balans is mogelijk te verklaren door:

- Export naar zee
- Klink van veenlagen in het oostelijk deel
- Onnauwkeurigheid van de bodemmetingen
- Aanpassing NAP (2 á 3 cm)

Deze verklaringen zijn echter niet erg bevredigend en verder onderzoek aan de hand van metingen is nodig.

Zandtransport naar en door de kering

Vanuit de bodemmetingen blijkt dat er zich op enkele plaatsen op de blokkenmatten zand heeft afgezet. Dit zand is met name langs de noord en zuid-randen op de blokkenmatten terecht gekomen. Het meest duidelijk is dit in de Roompot aan de buitenzijde. Op het zuidelijke gedeelte bevindt zich enkele meters zand. Door de jaren heen is de dikte van deze laag vrij stabiel, wel zijn lopende zandribbels duidelijk waarneembaar, zie figuur 4.5. hetzelfde geldt in mindere mate voor Roompot-zuid-landzijde, Hammen-zuid-landzijde, Hammen-noord-landzijde, Hammen-noord-zeezijde, Schaar-noord-landzijde en Schaar-noord-zeezijde. In de overige gevallen ligt er nauwelijks tot geen zand op de blokkenmatten.

Een verklaring hiervoor is te vinden in de grote getijasymmetrie van de stroomsnelheden aan de randen (noord en zuid) van de blokkenmatten. In figuur 4.7 (detail van figuur 2.2), voor de landwaartse kant van de Roompot doorlaat is bij vloed aan de randen een situatie te herkennen met lage vloodsnelheden en hogere ebsnelheden (rode ellipsen). Dit levert een zandtransport op richting de Kering. In het midden zijn de vloodsnelheden groter en is het zandtransport van de kering af. De lage vloodsnelheden aan de zijanten worden veroorzaakt door contractie (in combinatie met neren). In figuur 4.6 doet deze situatie zich voor beneden

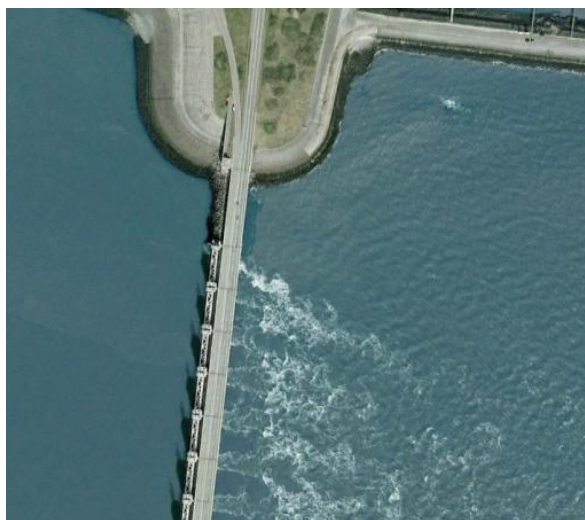
de rode lijn. Ook in een Google Earth plaatje is dit convergerende stroombeeld makkelijk te herkennen.

Deze stroombeelden en zandtransporten gelden voor alle 6 de blokkenmatten (figuur 2.2 en Bijlage A figuur 25). Substantiële zandhoeveelheden zijn echter niet in alle gevallen aanwezig.

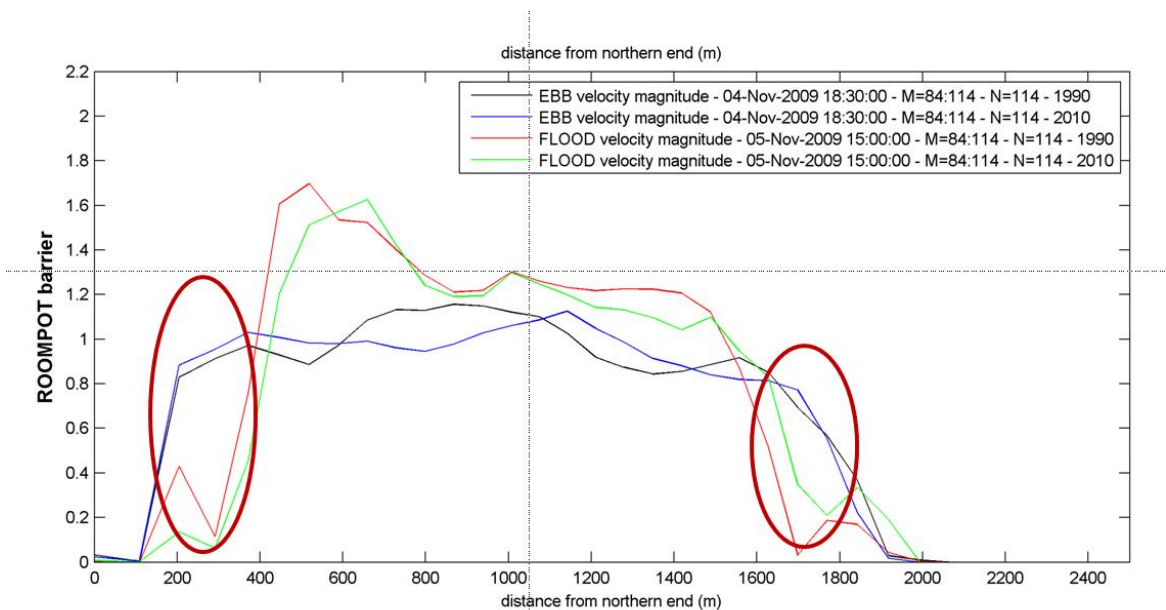
Er is dus transport naar en over de blokkenmatten naar de kering toe en dus ook door de kering heen (Jongeling, 2007). Het gemiddelde transport is echter relatief gering (minder dan 1 miljoen m³ per jaar, waarbij niet aan te geven is of dit naar binnen of naar buiten is).



Figuur 4.5: lopende zandgolven op het zuidelijke deel van de blokkenmatten in de Roompot zeezijde.

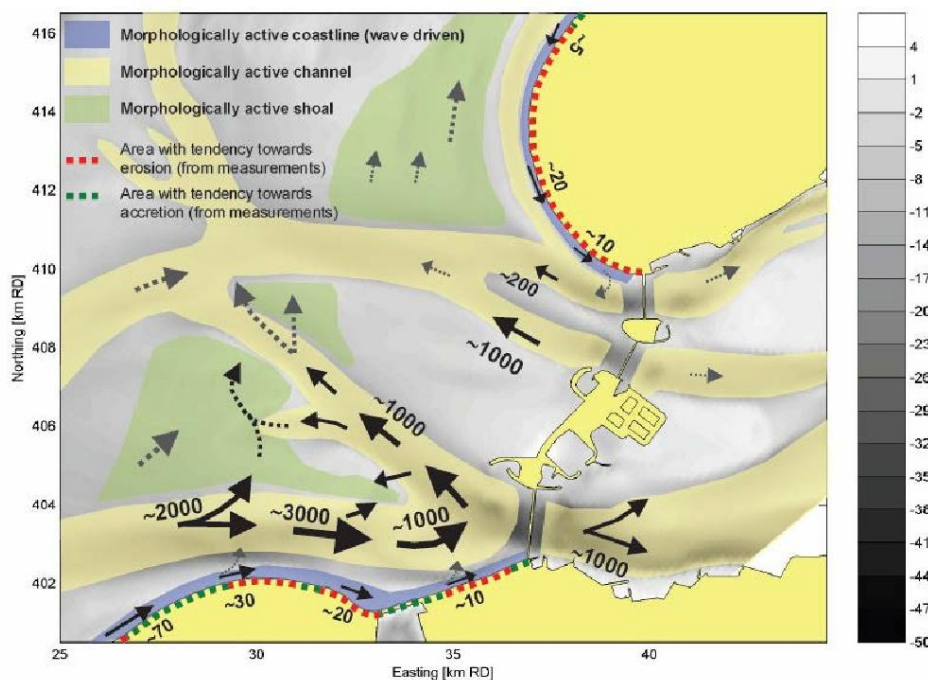


Figuur 4.6: Stroombeeld Roompot m.b.v. Google Earth. Nota bene dit is niet bij maximale stroming.



Figuur 4.7: Snelheidsverdeling Roompot landzijde op de blokkenmat (550 m uit het hart van de kering), detail van figuur 2.2.

De studie van Huisman, 2009, laat zien dat er langs de kust van Walcheren en Noord-Beveland een relatief groot gemiddeld zandtransport is richting kering (zie figuur 4.8), hetgeen een relatie heeft met het gevonden zand op de blokkenmat van Roompot-zuid-zeezijde.



Figuur 4.8: Gemiddelde zandtransporten rondom de kering in 1000 m^3 per jaar.

Verdere gedetailleerde modelstudies, gecombineerd met extra metingen, met name aan de randen, kunnen meer inzicht verschaffen in de zandtransporten rondom de kering.

Conclusies

- Door ten Brinke (1990) is het zandtransport door de kering geschat op een hoeveelheid tussen +1 en -1 miljoen m³ per jaar. Dit vindt vooral plaats aan de randen van de stroomgaten. In het midden zijn de zandconcentraties en zandtransporten gering. Volgens modelonderzoek zijn de zandtransporten door de kering gering, de richting ervan is moeilijk aan te geven.
- Uitgaande van de sedimentbalans zou er gemiddeld sprake kunnen zijn van export.
- De zandtransporten zorgen er wel voor dat er zich zand kan afzetten op de noord c.q. zuidranden van de blokkenmatten. Dit geldt met name voor Roompot-zuid-zeezijde en in mindere mate voor Roompot-zuid-landzijde, Hammen-zuid-landzijde, Hammen-noord-landzijde, Hammen-noord-zeezijde, Schaar-noord-landzijde en Schaar-noord-zeezijde. In de overige gevallen ligt er nauwelijks tot geen zand op de blokkenmatten.
- Om meer inzicht in deze materie te verkrijgen valt te denken aan verdere metingen, vooral aan de randen (zie ook H 5) en uitgebreid onderzoek met gedetailleerde modellen.

5 Enkele gedachten ten aanzien van toekomstige metingen

Bij aanvang van de studie bestond er grote onzekerheid ten aanzien van de stroomsnelheden nabij de kering en in de erosiekuilen. Tevens was er twijfel ten aanzien van de zandtransporten door de kering.

Uit hoofdstuk 4 kunnen we afleiden dat tot dusver sedimenttransport-metingen bovenstreams van de kering of in de keeldoorsnede van de kering uitgevoerd zijn. Sedimenttransportmetingen in de turbulente stroming benedenstreams van de kering zijn vermoedelijk moeilijk of niet uitvoerbaar. Voor stroommetingen met ADCP type instrumenten zijn de restricties minder groot, maar is de nauwkeurigheid van benedenstroomse metingen zeker een punt van discussie.

De nadere bestudering en digitalisering van deze oude metingen is een optie om de onzekerheid ten aanzien van de stroomsnelheden en sedimenttransport te bekijken, maar de vraag is of dat ook efficiënt en effectief is in het licht van de huidige vraagstukken. Voorstelbaar is dat moderne meetmethoden (radarstroommetingen) of moderne meetinstrumenten (met speciale bemonstingsinstellingen) veel geschikter zijn, bijvoorbeeld voor de analyse van de lokale ontgrondingen een betrouwbare dieptegemiddelde stromingsverdeling aan de rand van de blokkenmat, maar ook de stromingsverdeling in de verticaal en de turbulentiegraad.

Bij de overweging van nieuwe metingen is wel het nodig goed na te gaan wat de informatie behoefte uiteindelijk is. Een meer integrale benadering is daarbij noodzakelijk, omdat nieuwe metingen voor diverse processen relevant kunnen zijn: de grootschalige waterbeweging (debieten per stroomgat) en morfologie, de lokale stromingsverdeling per stroomgat, het sedimenttransport door de kering, de lokale ontgrondingen aan de rand van de bodemverdediging, etc. Het gebruik kan variëren van inzicht verkrijgen in de optredende verschijnselen, tot de toepassing voor calibratie en validatie of verificatie van modellen onder diverse condities. Afstemming met metingen voorzien in het Monitoringplan Oosterschelde 2010-2020 (RWS Zeeland) zal bovendien nodig zijn.

Op dit moment is het belangrijker om eerst de bestaande metingen verder uit te werken (zie ook Hoofdstuk 4). Met deze metingen (stroming en zandtransporten) zijn nog geen detailanalyses uitgevoerd. Hieruit kan nog veel informatie verkregen worden. Het opstellen van een meetplan is daarom nu minder zinvol. In het geval de metingen verder uitgewerkt zijn en er verder behoefte is aan verdere metingen, bevelen we aan eerst een verkenning uit te voeren naar de informatie behoefte en de mogelijke inzetbare meetmethoden, met bijdragen van de diverse betrokken partijen (beheerders, onderzoekers, meetdiensten van RWS en externe partijen zoals bv. Fugro). Afhankelijk van de uitkomsten kan tot een verdere afstemming (informatiebehoefte, uitgangspunten) met betrokken partijen besloten worden, om vervolgens een gedetailleerd meetplan uit te werken.

Wellicht kan voor de belangrijkste vragen (met oog op de beheerstrategie) al het nodige bereikt worden met een beperkte meetinspanning: bijv. (half-) uurlijkse luchtfoto's van de ontwikkeling van het stroombeeld/zog gedurende een volledige getijcyclus, een verankerde ADCP op een cruciale plaats, eventueel ondersteunt d.m.v. enkele gevaren ADCP (debiet) raaien. Ten aanzien van de zandtransporten zijn vooral de randen van de geul en de kering doorlaat van belang. Hier vinden de grootste transporten plaats. Vooral metingen in de as van de kering aan de randen van de drie doorlaatopeningen ontbreken op dit moment en kunnen het inzicht ten aanzien van de zandtransporten vergroten.

6 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies ten aanzien van huidige situatie

- Over de periode 1990 – 2010 is de debietverdeling over de drie stroomgaten gelijk gebleven.
- Grote systematische snelheidsveranderingen zijn (nog) niet aanwezig. Veranderingen zijn gekoppeld aan de veranderende morfologie, met name aan de zuidelijke kant van de buitendelta en aan de verdieping van de erosiekuilen.
- Het stroombeeld op de zuidelijke buitendelta tijdens vloed richting kering is zeer complex met relatief lage snelheden in de hoofdgeul Oude Roompot en zeer hoge snelheden over de ondiepte tussen de beide Roompotten (Onrust, Hompels).
- In de Roompot nabij de kering is bij uitstroming het stroombeeld aan het einde van de blokkenmatten (nabij de randen van de erosiekuilen) sterk asymmetrisch met een piek aan de noordelijke zijde (zowel aan de westzijde bij eb als aan de oostzijde bij vloed). De oorzaak moet hoogstwaarschijnlijk gezocht worden in de hoogteverhouding tussen drempelhoogte en hoogte blokkenmat ter plekke van de optredende piek. Bij toestroming doet dit fenomeen zich niet voor. Bij de Hammen en de Schaar is geen sprake van een asymmetrie.
- De asymmetrische vorm van de erosiekuilen (zeezijde en landzijde) bij de Roompot, met de diepste delen aan de Noordzijde, wordt hoogstwaarschijnlijk door de asymmetrie in de stroming veroorzaakt. De stroomverdeling over de breedte van de stroomgaten (parallel aan de kering) ter plekke van de drempel is weinig veranderd in de afgelopen 20 jaar. De asymmetrische vorm bij de Roompot lijkt enigszins toe te nemen).
- De grote verschillen in eb en vloodsnelheden op en nabij de blokkenmatten op de noord- en zuidranden van de doorlaten zorgen voor zandtransport naar die plekken. Dit geldt met name voor Roompot-zuid-zeezijde en in mindere mate voor Roompot-zuid-landzijde, Hammen-zuid-landzijde, Hammen-noord-landzijde, Hammen-noord-zeezijde, Schaar-noord-landzijde en Schaar-noord-zeezijde. In de overige gevallen ligt er nauwelijks tot geen zand op de blokkenmatten.
- Door ten Brinke (2009) is het zandtransport door de kering geschat op een hoeveelheid tussen +1 en -1 miljoen m³ per jaar. Dit vindt vooral plaats aan de randen van de stroomgaten. In het midden zijn de zandconcentraties en zandtransporten gering. Volgens modelonderzoek zijn de zandtransporten door de kering gering, de richting ervan is moeilijk aan te geven.

Conclusies ten aanzien van toekomstige situatie

- Menselijke ingrepen beïnvloeden de hydrologie en morfologie in de Oosterschelde en de bijbehorende voordelta. Dit beïnvloedt de morfologische ontwikkelingen nog steeds, die op hun beurt weer invloed uitoefenen op de Kering en dijken. Dit zal ook de komende decennia nog van belang blijven. Van relevantie voor de Kering is vooral de ontwikkeling van de geulen in de nabijheid ervan (tot ca. 10 km uit de kering).
- De belangrijkste morfologische ontwikkelingen ten aanzien van de kering zijn:
 - Roompot-doorlaat zeezijde. De ondiepte Hompels vlak bij de kering tussen Oude Roompot en Zuiderlijke Roompot breidt zich in noordelijke richting uit, waarbij de Oude Roompot nabij de kering meer naar het noorden gaat krommen. Dit alles zorgt voor een toename van de hoek waaronder de toe en

afstroming naar de Roompot-doorlaat geschiedt. Op langere termijn zal de Zuiderlijke Roompot waarschijnlijk in belang toenemen ten koste van de Oude Roompot.

- Hammen-doorlaat landzijde. Op dit moment wordt de Hammen geul ten zuiden van Schouwen Duivenland ondieper. Verwacht wordt dat deze verondieping verder zal doorzetten in deze eeuw. Tegelijk is tussen 1984-1988 een nieuwe zuidelijke vloedschaar van de Hammen ontstaan bij de doorlaat. Mocht deze contact krijgen met de Schaar van Roggenplaat, dan zal dit leiden tot een stroming achterlangs de Oosterscheldekering.

- Verdere toename van de asymmetrie in de stroomverdeling in de Roompot is ongewenst. Nagegaan dient te worden hoe verdere toename te voorkomen is.

Op één locatie van het onderzoeksgebied (tussen kering en Oosterscheldebrug) is een situatie aangetroffen waarbij een oeverdeel erodeert en er mogelijk sprake is van een zich ontwikkelende instabiliteit. Dit betreft de dijk langs de schaar van Colijnsplaat nabij Colijnsplaat. Aanbevolen wordt om met de gegevens van het waterschap (ZEEKOE-data) dit verder te onderzoeken.

Aanbevelingen:

- De waterbeweging nabij en rondom de kering is zeer complex, om deze goed te kunnen duiden is een meer gedetailleerd en goed gevalideerd model nodig met voldoende resolutie rondom de kering. Onderzocht moet worden of dit een 3D model moet zijn. Dit is mede afhankelijk van de vragen. Voor vragen ten aanzien van de erosiekuilen is zonder meer 3D modellering nodig.
- De asymmetrische stroomverdeling in de Roompot is van invloed op de ontwikkeling van de erosiekuilen. Onderzoek waardoor deze precies veroorzaakt wordt en hoe deze te verminderen is, is van belang.
- Om meer inzicht te verkrijgen in de zandtransporten rondom de kering moet gedacht worden aan analyse van de bestaande metingen, verdere metingen - met name aan de randen - en gedetailleerd modelonderzoek.
- Verdere morfologische veranderingen zijn voor het keringbeheer en voor kustlijn­zorg van belang. Continuering van de MWTL monitoring en verdere analyses (bv. om de 10 jaar) zijn hiervoor nodig.
- Een beperkte meetinspanning, met bijv. (half-) uurlijkse luchtfoto's van de ontwikkeling van het stroombeeld/zog gedurende een volledige getijcyclus, een verankerde ADCP op een cruciale plaats, eventueel ondersteund door enkele gevaren ADCP (debiet) raaien, kan al zeer veel informatie opleveren.

Aanbeveling ten aanzien van de monitoring en beheerstrategie

- Grootschalige morfologische veranderingen (Hammen oostzijde en Roompot westzijde) kunnen op de lange termijn grote veranderingen in het stroombeeld veroorzaken. Dit dient periodiek (bv. om de 10 jaar) beschouwd te worden.
- Voor de toekomst is het aan te bevelen om een goed gevalideerd gedetailleerd beheermodel van de stroming rondom de kering gereed te hebben om in geval van belangrijke gebeurtenissen snel in te kunnen zetten (een soort Kerings-dashboard).

7 Referenties

Berg, D.J.H., van den, 1986, Aspects of Sediment- and Morphodynamics of Subtidal Deposits of the Oosterschelde (The Netherlands), Den Haag: Rijkswaterstaat Communications.

Berg, D.J.H. van den, 1988, Tussenbalans zandbalans metingen OSVK, notitie NXL 88.34

Berchum, A.M. van & G. Wattel, 1996, De Oosterschelde, van estuarium naar zeearm. Bekkenrapportage 1991-1996. Rapport RIKZ-97.034, ISBN 90-369-3481-8.

Bok, C., de, 2002, Long-term Morphology of the Eastern Scheldt, The Hague: Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Bruijn de, R.A., 2012, The future of the Oosterschelde with a new inlet channel, Aug 2012, Msc Thesis, TuDelft, Rijkswaterstaat.

Cleveringa, J. 2008, Morphodynamics of the Delta Coast (south-west Netherlands): Quantitative analysis and phenomenology of the morphological evolution 1964-2004, Emmeloord: WL| Delft Hydraulics & Rijkswaterstaat RIKZ.

Driemaandelijks Bericht Deltawerken (DBD) november 1964, nr. 30. blz. 523.

Eelkema, M., Wang, Z. & Stive, M., 2009, Historical morphological development of the Eastern Scheldt tidal basin (The Netherlands). Coastal Dynamics 2009.

Eelkema, M., Wang, Z. & Stive, M., 2012, Impact of back-barrier dams to the development of the ebb-tidal delta of the Eastern Scheldt. In press, pp. 1-29.

Geurts van Kessel, A.J.M., 2004, Verlopend tij, Oosterschelde, een veranderend natuurmonument; RIKZ, rapport RIKZ/2004.028 | ISBN 90-369-3458-3.

Geurts van Kessel, A.J.M., B.J. Kater, T.C. Prins, 2003, Veranderende draagkracht van de Oosterschelde voor kokkels. Rapportage van thema's 2 en 3 uit het lange termijn onderzoeksprogramma voedselreservering oosterschelde, in het kader van de tweede evaluatie van het Nederlands schelpdiervisserijbeleid, EVA II.

Hesselink, A., 2003, Verandering van de morfologie van de Oosterschelde door de aanleg van de Deltawerken, Den Haag: Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

Hoogduin, L., 2009, Sediment transport through the Eastern Scheldt storm surge barrier, Msc Thesis, TuDelft, may 2009.

Huisman, B. en Luijendijk, A., 2009, Sand demand of the Eastern Scheldt: Morphology around the barrier, Delft, Deltares. Rapport 1002446-000 HYE.

Jongeling, T.H.G., 2007, Zandhonger Oosterschelde, Maatregelen ter vergroting van doorstroomcapaciteit en zanddoorvoer stormvloedkering Oosterschelde, WL Delft, Rapport Q4264, 2007.

Jonkers, W., 1992, Sedimenttransport door de monding van de Oosterschelde in 1988, werkdocument GWAO-92.809X.

Louters, T., Van den Berg, J. & Mulder, J., 1998, Geomorphological Changes of the Oosterschelde Tidal System During and After the Implementation of the Delta Project. Journal of Coastal Research, pp. 1134-1151.

Maldegem D.C. van & J.A. van Pagee, 2005, Zandhonger Oosterschelde een verkenning naar mogelijke maatregelen Werkdocument RIKZ/ZDA/2005.802w.

Nienhuis, P.H., 1982, De oecologische consequenties van de deltawerken, in: Wolff, W.J. (Ed.) (1982). Wadden, Duinen, Delta: De verantwoordelijkheid van wetenschap en beleid van ons kustgebied. pp. 101-132,

Nienhuis, P.H. & Smaal, A.C. (Ed.), 1994, The Oosterschelde Estuary (The Netherlands): a case-study of a changing ecosystem. Reprinted from Hydrobiologia, vols 282/283. Hydrobiologia, 97. Kluwer Academic: Dordrecht. 597 pp.

Rijkswaterstaat Directie Zeeland, 1987. Voorstel grenzen gebied I/II bodembescherming. Notitie nr. 230BNW-M-87111. 24 augustus 1987.

Spanhoff, R, T. van Heuvel, J.C. Borst & H. Verbeek, 1992. Quai-synoptic uni-sensor in-situ 3D current measurements in estuaries. Coastal and Estuarine Studies, Vol. 36, p. 229-234.

Ten Brinke, W.B.M., 1990, Zandtransport door de stromvloedkering bij storm: Rapport GEOPRO 1990.05 Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht.

Ten Brinke, W.B.M., 1991, De uitwisseling van slib en particulier organische koolstof (POC) tussen de Oosterschelde en de Noordzee na voltooiing van de Oosterscheldewerken, Rapport GEOPRO 1991.02, Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht.

Vechgel van, R.H.W., 1977, Morfologische ontwikkeling in de Oosterschelde. Rijkswaterstaat Nota W-77.009.

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

Withagen, L., 2000. DELTA 2000, Inventarisatie huidige situatie Deltawateren. Rapport RIKZ, 2000.47. RIKZ: Middelburg. 144 pp

WL, 1986a. Stormvloedkering Oosterschelde; twee-dimensionale modellen van de monding van de Oosterschelde; verificatie aan de hand van prototype metingen getij 30 juli 1984 en getij 1 augustus 1984. Verslag berekeningen, R2093-01. januari 1986.

WL, 1986b, Stormvloedkering Oosterschelde; twee-dimensionale modellen van de monding van de Oosterschelde; reproductie stroombeeld tijdens dorpelbalk-plaatsingen (Ametek meting). Verslag berekeningen, R2093-02/Q323-02. november 1986.

WL, 1987, Stormvloedkering Oosterschelde; twee-dimensionale modellen van de monding van de Oosterschelde; reproductie stroombeeld eindsituatie (Ametek meting). Verslag berekeningen, R2093-20/Q323-20. Oktober 1987.

Zanten van, E en Adriaanse, J., 2008, Verminderd getij: verkenning naar mogelijke maatregelen om het verlies van platen, slikken en schorren in de Oosterschelde te beperken, Rijkswaterstaat, 2008.

A Modelling the effect on current patterns (2DH) by varying the KustZuid models bathymetry: case studies with 1990 and 2010 depths

1. Model Setup

The model used in this study, henceforth “KZ-Barrier”, is an adapted version of the *KustZuid* model of Delft3D used in De Bruijn (2012), henceforth “KZ-De Bruijn”. That model, in turn, was adapted from the earlier “*KustZuid*” Delft3D model, converted from a similar SIMONA (WAQUA) model of Rijkswaterstaat (see McCall and Wang, 2009).

These 2DH (depth-averaged) models simulate water levels and flow at the Southern part of the North Sea, the Oosterschelde and the Westerschelde. The boundary conditions consist of 94 astronomical tidal components defined on 49 open boundary sections. The most relevant change is in the vicinity of the storm surge barriers, as they are modeled differently. Water levels and flow velocities are almost the same in all three models.

The computational grid had been improved to create model KZ-De Bruijn, and no changes were made here to the grid after that, to create KZ-Barrier. The KZ-De Bruijn and KZ-Barrier models have resolutions as coarse as $1450 \times 950 \text{ m}^2$ (some parts of open boundary) and as fine as $30 \times 70 \text{ m}^2$, along the barriers. The original *KustZuid* model has resolutions as coarse as $1450 \times 950 \text{ m}^2$ (open boundary) and as fine as $135 \times 135 \text{ m}^2$, on the barriers.

Improvements from *KustZuid* to KZ-De Bruijn (see De Bruijn, 2012) include:

- higher resolution around the storm surge barrier (and throughout);
- an improved schematization of the storm surge barrier;
- updated bathymetry in the whole domain to represent 2010;
- a detailed bottom protection of 2011 is implemented;
- a more realistic schematization of the land boundaries;
- new model calibration and validation.

The KZ-DeBruijn model still has a porous plate with a quadratic friction coefficient of 1.5, “because the barrier sill depth is not totally correct” (see DeBruijn, 2012). This value had been calibrated for the best porous plate coefficient and barrier sill to best reproduce M2 and M4 constituents. The porous plate had a friction coefficient of 3.7 in *KustZuid*. See De Bruijn (2012) for more details.

This KZ-DeBruijn configuration was obtained on 27 July, 2012, by email. To create the enhanced KZ-Barrier version, used in the present study, the following adjustments were made:

1. sill heights updated, using info from Figure 26, Figure 27, Figure 28 in the Delft3D depth file (*.dep);
2. sill “width” increased in the Delft3D depth file (i.e. forcing two depth rows to represent the sill, instead of only one);
3. recalibration by tweaking friction of “porous plates”, to compensate for above while keeping realistic tidal prism;
4. generation of 1990 bathymetry.

In order to keep proper channel and floodplain representation in the model configuration, it is desired that certain numerical parameters are kept the same. As a result, the Depth at grid cell centres is set to Maximum (keyword: Dpsopt = #MAX#) and the Depth at grid cell faces is set to Mor (keyword: Dpuopt = #MOR#). The first is relevant for the continuity equation (determining water levels), whereas the second is relevant for the momentum equation (determining u- and v-currents).

Because MAX was (and is) chosen, the sill cannot be represented in the depth file as a single row of (shallower, design) values. The sill values are then “forced” along two consecutive rows – see Figure 2. These specific values were not entirely correct in KZ-DeBruijn, and were thus further adjusted based on Figure 26, Figure 27 and Figure 28. On Figure 2 small depth differences can also be seen between KZ-De Bruijn 2010 and KZ-Barrier 2010 immediately seaward and immediately landward of each barrier. This is because not only the barriers themselves were adjusted to represent sill depths better, but also it was desired that the vicinity of the barriers were exactly the same for both KZ-Barrier-1990 and KZ-Barrier 2010 simulations. Thus, at each barrier, six rows of grid depth values were the same in both cases (the sill’s and two rows on each side), and the smoother 1990 values were selected (see also Figure 3).

Figure 4 illustrates the methodology for generating the 1990 bathymetry. Raw (x,y,z) data was obtained from RWS (2011) on the form of multiple netcdf files. The dataset of 1989 was used as first choice (as available). At the small area behind the Oosterchelde barriers without 1989 data, 1987 values were used. In other areas (far offshore or in Westerschelde) the model depths from De Bruijn (2012) were kept.

The depth difference between KZ-De Bruijn-2010 and the KZ-Barrier-1990 configurations is show in Figure 5 and Figure 6 (Roompot barrier), and in Figure 7 and Figure 8 (Schaar and Hammen barriers).

In order to estimate tidal prism differences due to sheer change in volume, hypsometric curves were derived for both model bathymetries, for the regions illustrated in Figure 9. On Figure 10 and Figure 11 one can see that differences are very small. At the level of 0m NAP, the volume difference in the “interior” domain is of about 0.5%. From this it is expected that modeled tidal prisms, overall flow/ebb discharges and waterlevels will not differ by much (consistent with Figure 13). However, current patterns may differ slightly near the barriers themselves.

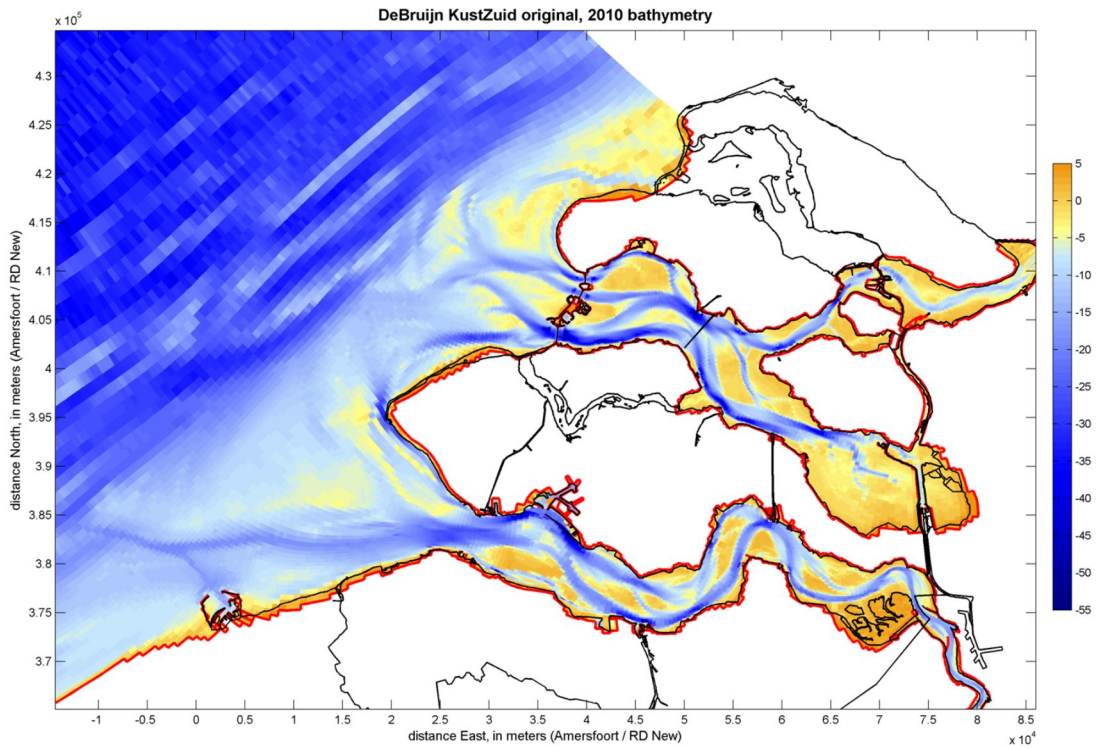


Figure 1: Overview of KustZuid models grid and bathymetry (KZ-Barrier shown).

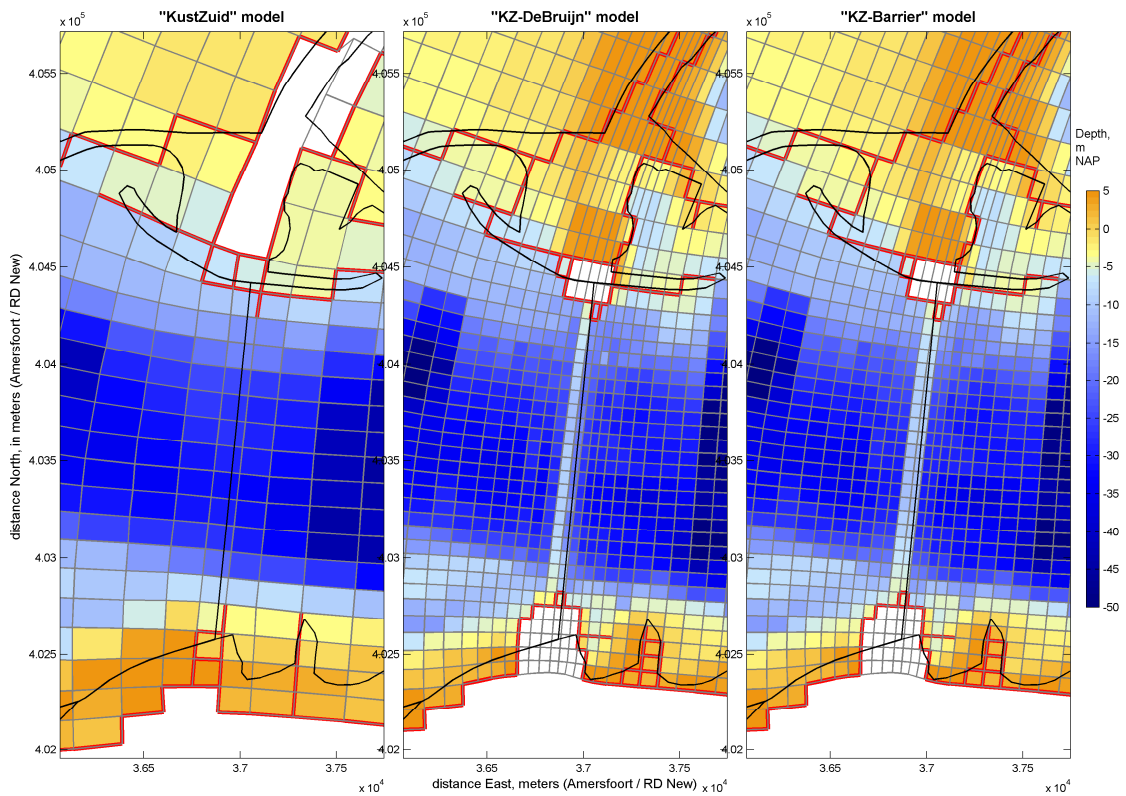


Figure 2: Comparison of grids and depths for all three different KZ model versions (varying resolution, depth, extent and thin dams).

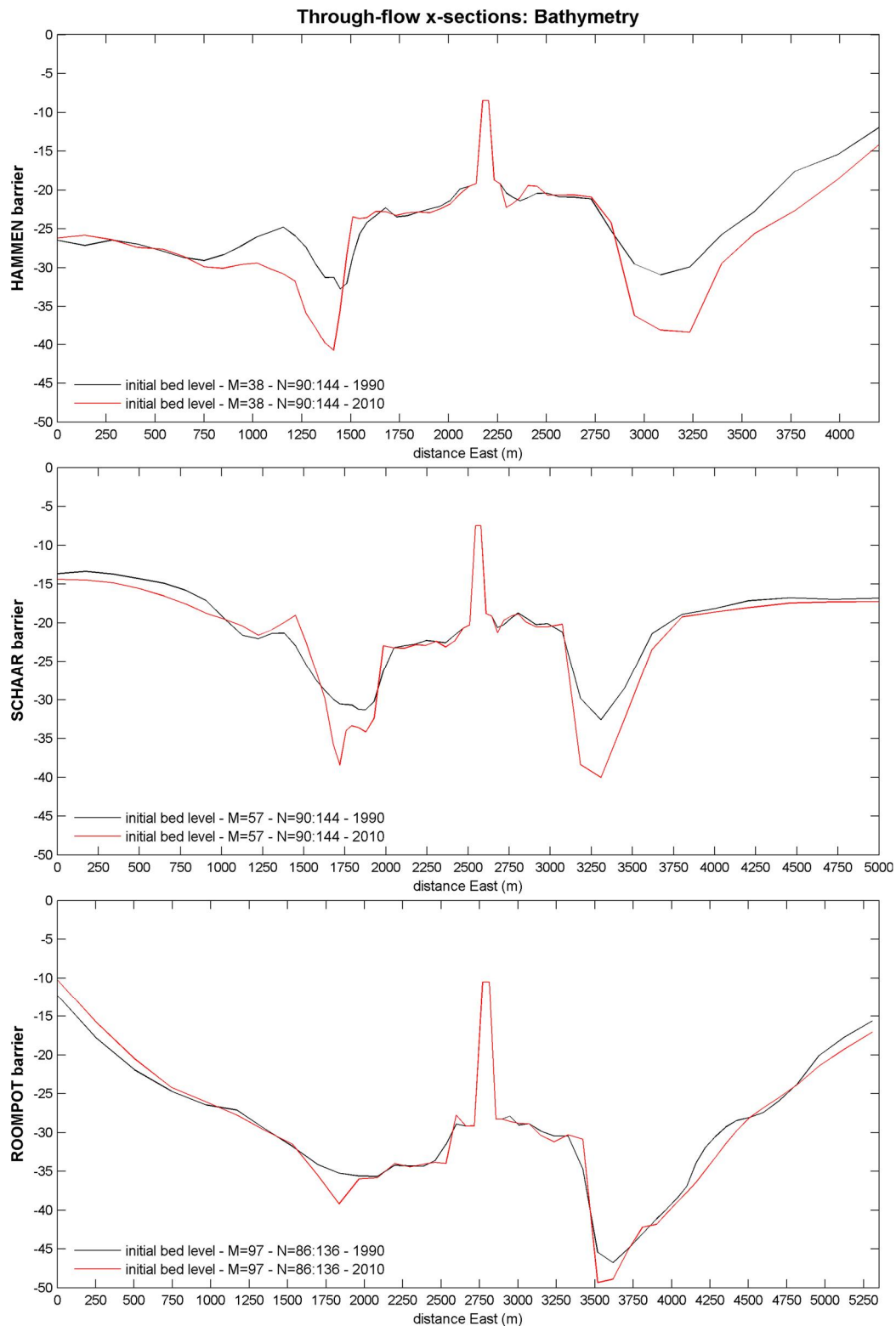


Figure 3: Depth representation from seaward (left) to interior Oosterschelde (right), along center line of each of three barriers. Comparison between bathymetry of 1990 (black) and 2010 (red) configurations of KZ-Barrier. At each barrier, six rows of grid depth values – centered on the sill – were exactly the same in both cases.

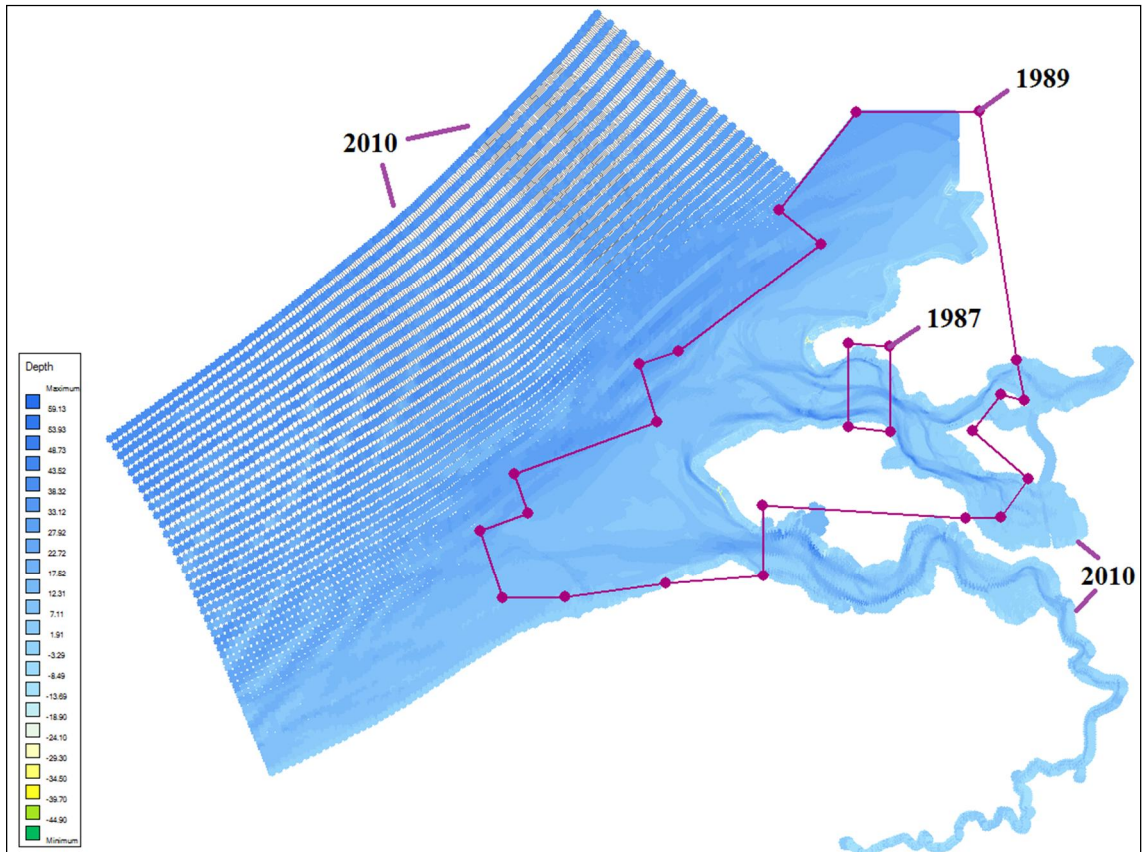


Figure 4: Map with depth samples used, from 1987 & 1989 (from RWS, 2011), and from DeBruijn (2012) representing 2010 conditions. KZ-Barrier model grid also shown.

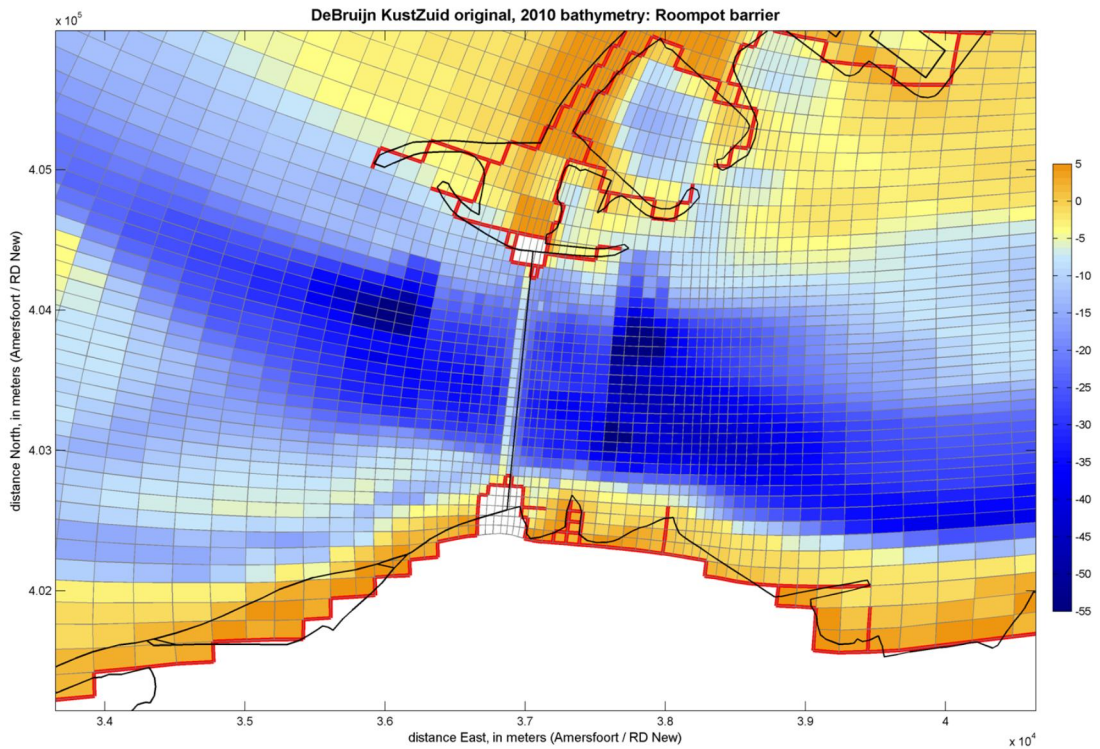


Figure 5: KZ-DeBruijn model grid and original 2010 bathymetry (zoom-in on Roompot barrier).

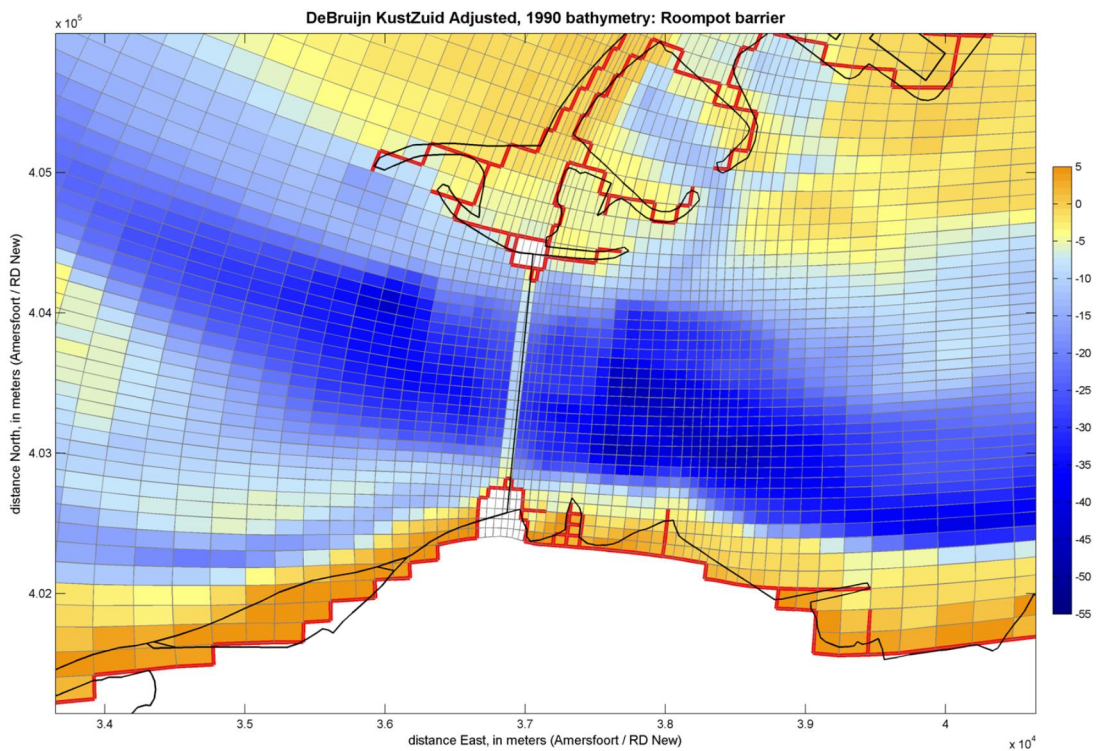


Figure 6: KZ-Barrier model grid and newly-generated 1990 bathymetry (zoom-in on Roompot barrier).

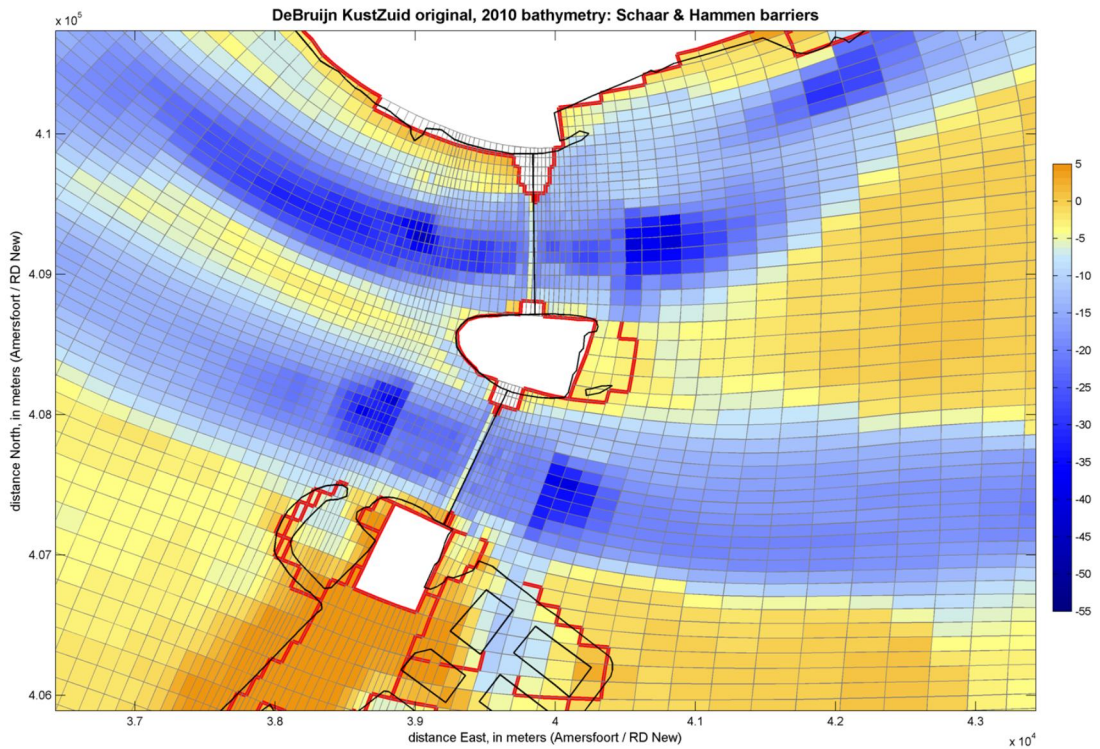


Figure 7: Same as Figure 5, but zoom-in on Barriers Schaar and Hammen.

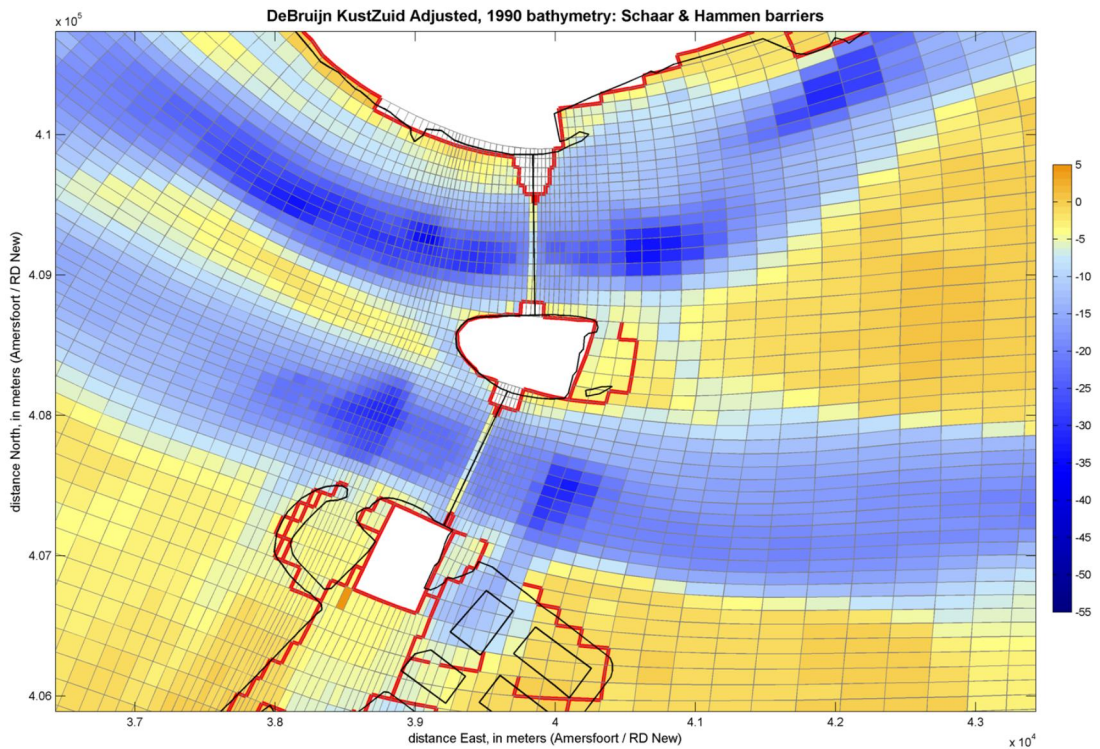


Figure 8: Same as Figure 6, but zoom-in on Barriers Schaar and Hammen

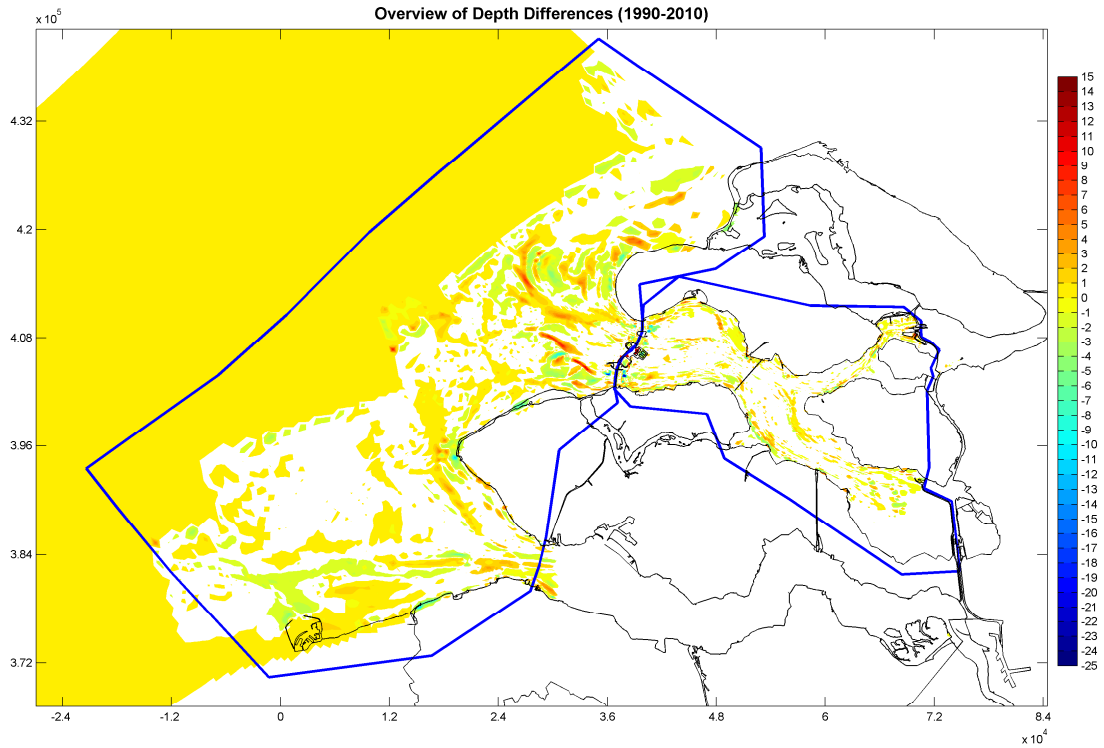


Figure 9: Map showing depth differences (2010-1990) and the two extents over which hypsometric curves were derived – see figures below.

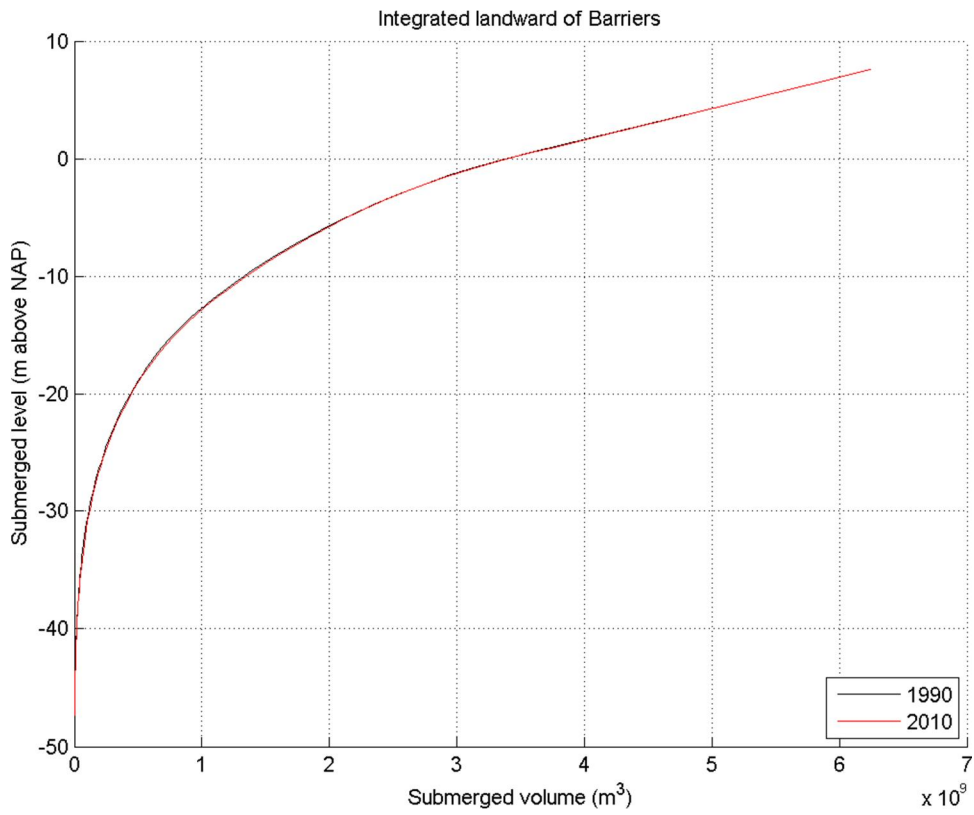


Figure 10: Hypsometric curve for the "interior domain" (see Figure 9).

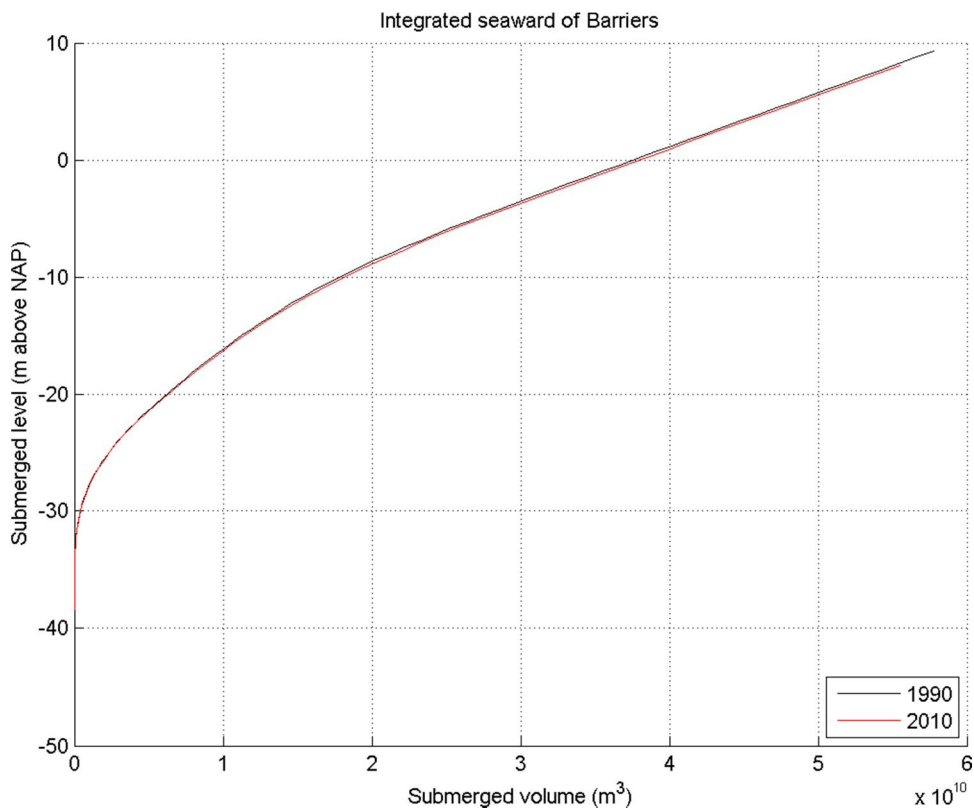


Figure 11: Hypsometric curve for the "exterior domain" (see Figure 9).

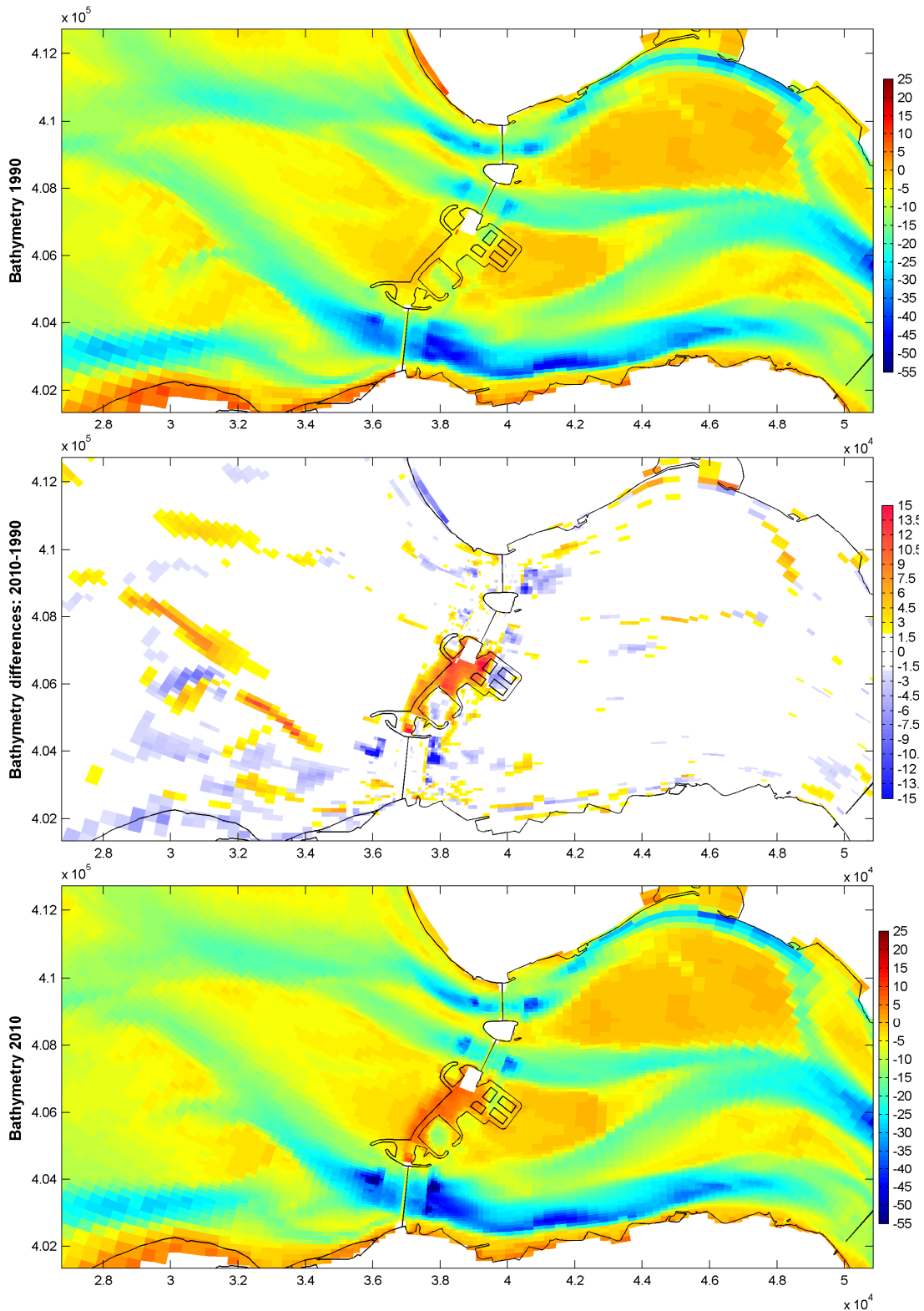


Figure 12: Maps covering the entire Barrier region, showing (top) KZ-Barrier 1990 depths, (bottom) KZ-Barrier 2010 depths, and (middle) depth differences, 2010 "minus" 1990. Negative ("colder") values indicate deeper patches.

Figure 12 shows maps with the 1990 (top) and 2010 (bottom) depths. A map with the differences is also included (middle), where warmer colors (positive values) represent a shallower situation in 2010. One can see that the scour holes just seaward and just upstream from the barriers have deepened. One can also see that the main gully seaward of the Roompot barrier and the gully seaward of the Schaar and Hammen barriers have “curved” northward slightly.

The only single difference between 1990 and 2010 simulations was the initial depths information. The simulations date was the same (i.e., November 2009) in both cases, in order to simulate the exact same neap-spring cycle. The KZ-Barrier model was run with a 1-minute timestep, between 28-10-2009, 00h and 15-11-2009, 00h.

Given the changes to the bathymetry at the sill, which significantly affected (decreased) the tidal prism by constricting the flow, a new calibration was necessary. This was made by decreasing the friction coefficient of the porous plates as configured in KZ-DeBruijn. In order to obtain approximately the same waterlevel tidal curve at Stavenisse (Figure 13), a new coefficient of 0.15 is now used in stead of the 1.5 used by de Bruijn.

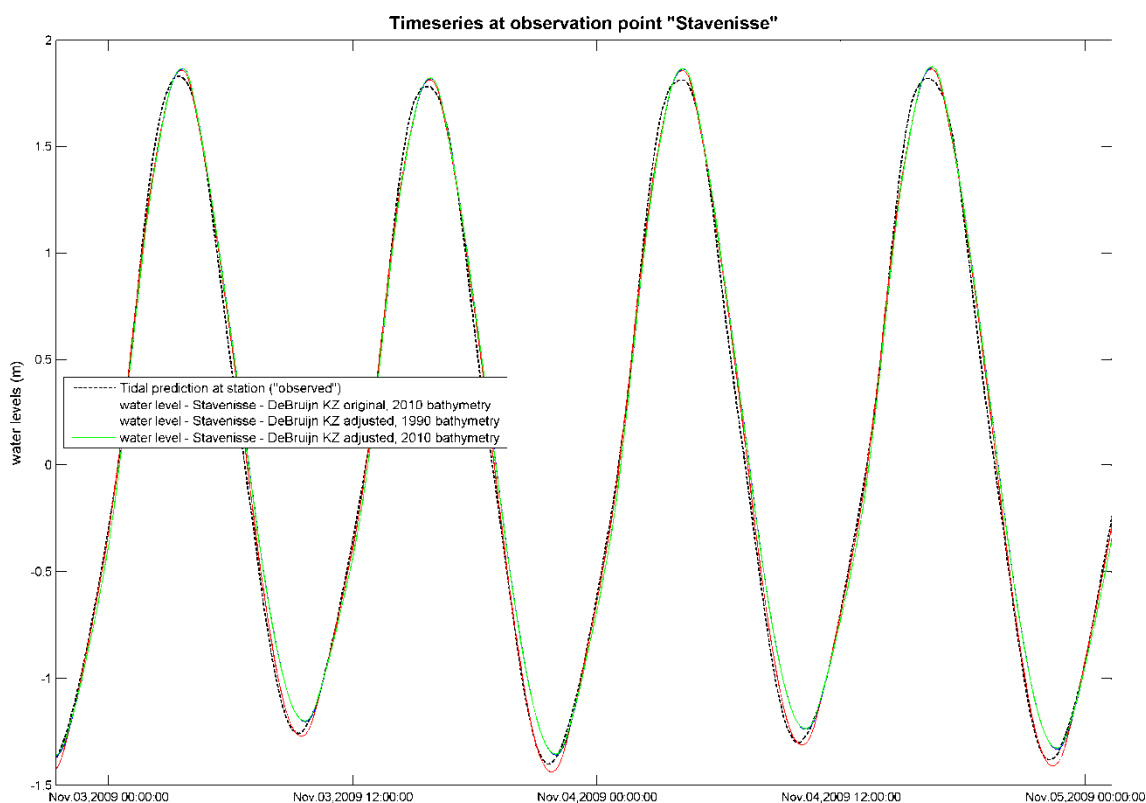


Figure 13: **Timeseries of water levels at station Stavenisse (timezone is MET. The “observed” curve is derived from tidal constituents; the modeled curves are forced by tides alone (like all model results discussed in this report). Red curve represents output from KZ-De Bruijn (older sill depth representation and plate friction of 1.5); blue and green curves represent output from KZ-Barrier (1990 and 2010 bathymetries), i.e. after new calibration (proper sill depth representation and plates friction of 0.15).**

2. Model Results

All model results discussed next are solely obtained from KZ-Barrier model (with both 1990 and 2010 bathymetry).

Figure 14 and Figure 15 show timeseries with the total discharge through each barrier system; the former shows 14 days of output, the latter only 2 days for a closer inspection. Table 1 summarizes the discharge differences at peak ebb and at peak flood. The strongest ebb and flood of the entire simulation, defined as: with the highest instantaneous discharge through Roompot, were chosen. At Hammen during flood the biggest difference has been found, a decrease of 0,6 % in 2010 relative to 1990. At Roompot, the largest barrier, this difference is about 0.26 % at both peak ebb and peak flood. These differences can be considered as being very small (during the total tidal cycle the differences are somewhat larger, but still not significant).

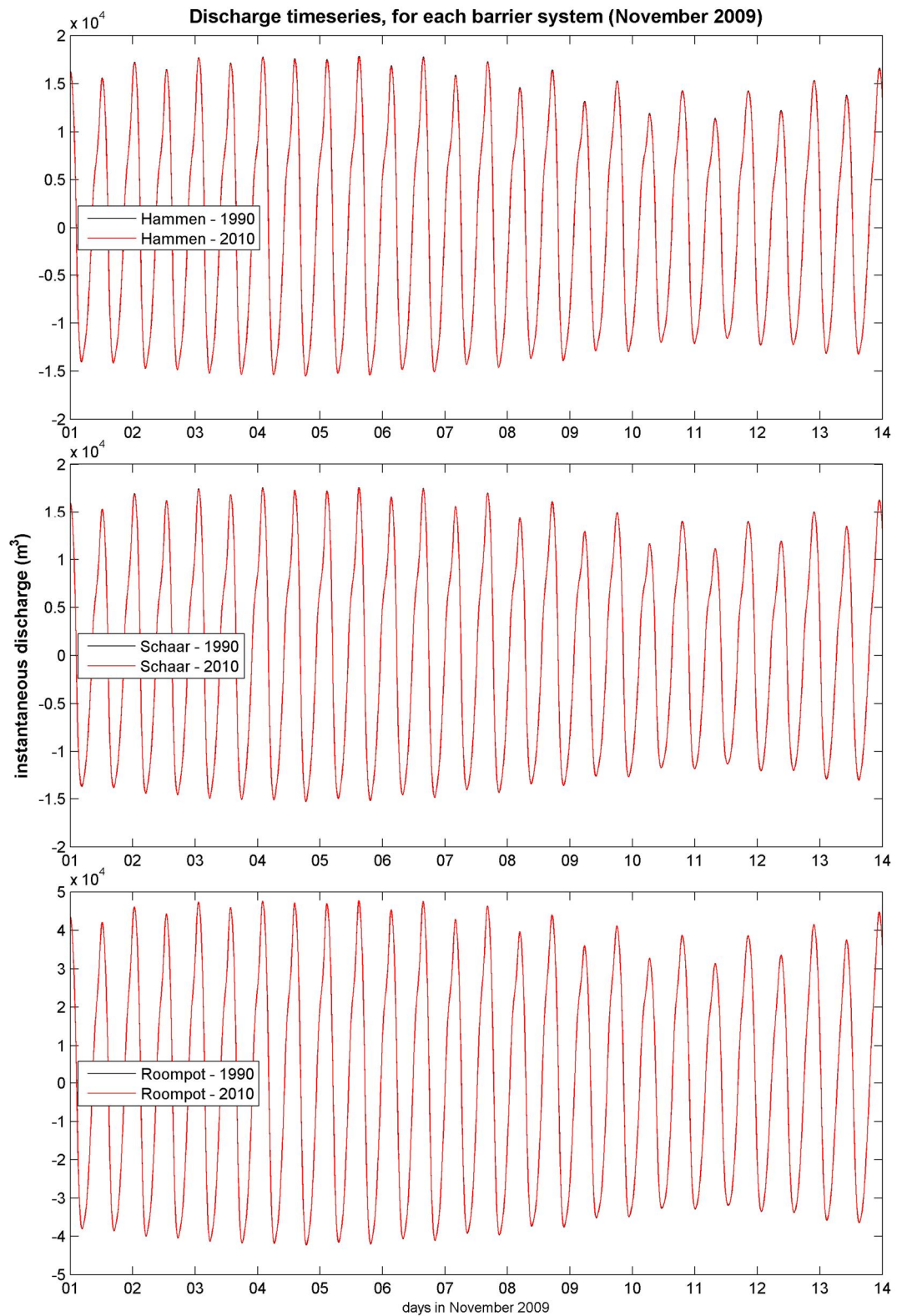


Figure 14: **Timeseries of discharges along each barrier (top: Hammen; middle: Schaar; bottom: Roompot). Positive (negative) values represent Flood (Ebb) flow through the barriers – i.e. along increasing (decreasing) N-direction.**

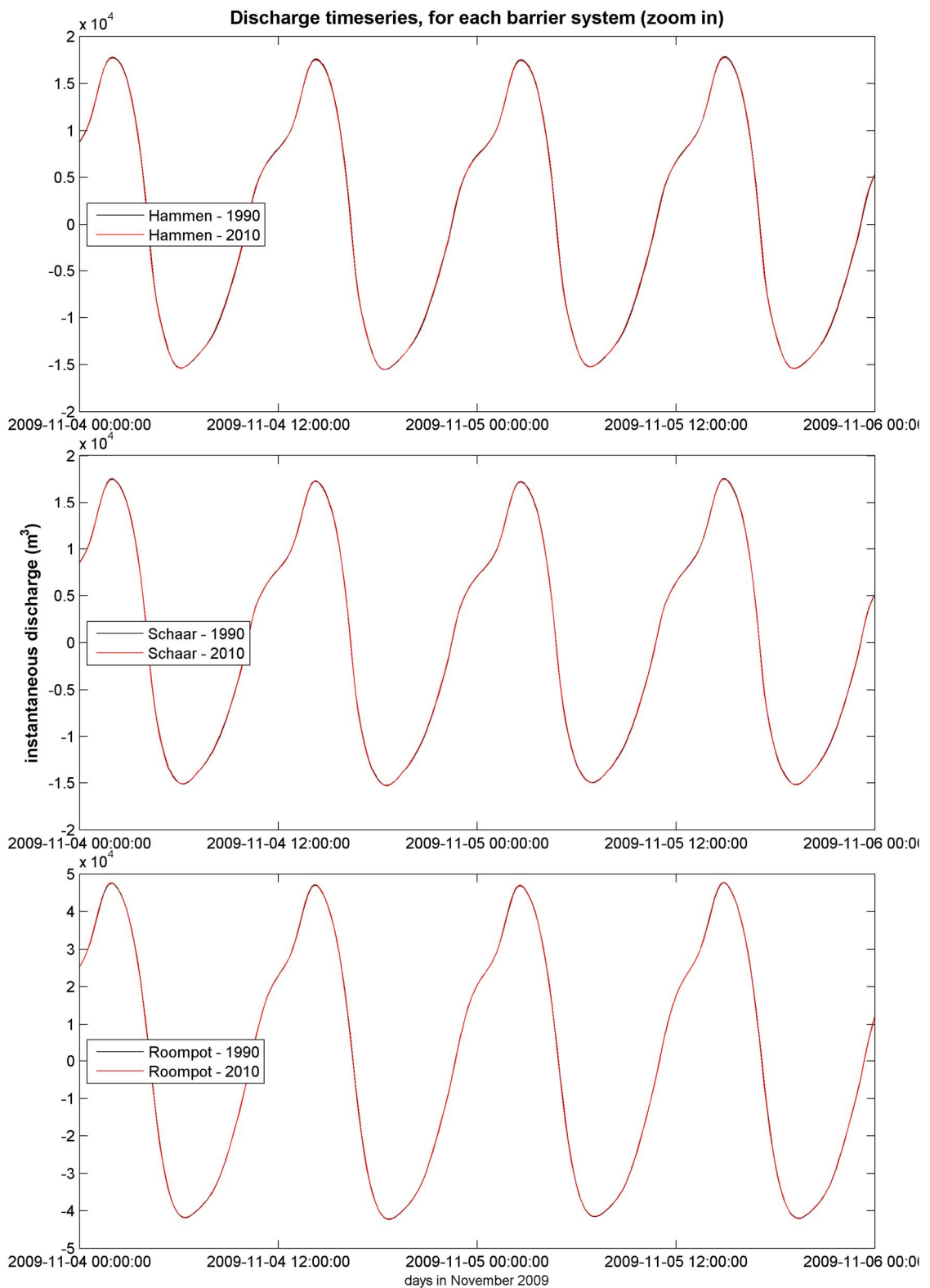


Figure 15: Same as Figure 14, but focusing on shorter period. Peak spring tide is shown, in early November 2009.

Table 1: Summary of peak discharge differences, when running the KZ-Barrier model with 1990 and with 2010 bathymetries. Note that typically peak differences did not coincide (in time) with peak discharges. The mean difference for ebb and flood are not exactly the same, as they should be, due to inaccuracies.

Barrier	Peak Ebb (Nov. 2009 Spring tide)			Peak Flood (Nov. 2009 Spring tide)		
	Avg. Peak (m ³)	Larger?	Diff. (%)	Avg. Peak (m ³)	Larger?	Diff. (%)
Hammen	-1.55 × 10 ⁴	1990	0.07	1.78 × 10 ⁴	1990	0.58
Schaar	-1.53 × 10 ⁴	1990	0.18	1.75 × 10 ⁴	1990	0.30
Roompot	-4.23 × 10 ⁴	1990	0.25	4.77 × 10 ⁴	2010	0.27

Despite the very small differences of Table 1 (showing discharges through entire barriers, or “integrated flows”), one can still expect some features of the flow to have changed. The vector field of currents contains slightly different patterns which may also vary in time, during the tidal cycle.

Figure 16 and Figure 17 (1990 and 2010 bathymetries, respectively) show flow patterns at peak Ebb, including snapshots one hour before and one hour after peak (Figure 29 and Figure 30, A, contain the same information, but zoomed-in on the barriers). The maximum has been chosen by looking at hourly values. The real maximum is between the middle and the lower figure.

Figure 19 and Figure 20 (1990 and 2010 bathymetries, respectively) show flow patterns at peak Flood, including snapshots one hour before and one hour after peak (Figure 31 and Figure 32 contain the same information, but zoomed-in on barriers).

Figure 18 and Figure 21 show the peak ebb and peak flood current differences, respectively, comparing the KZ-Barrier simulations with 1990 and with 2010 depths. As expected, there are similarities with Figure 12, i.e. the major differences are near the scour holes and along the gully seaward of Roompot barrier. These differences typically reach ± 0.3 m/s.

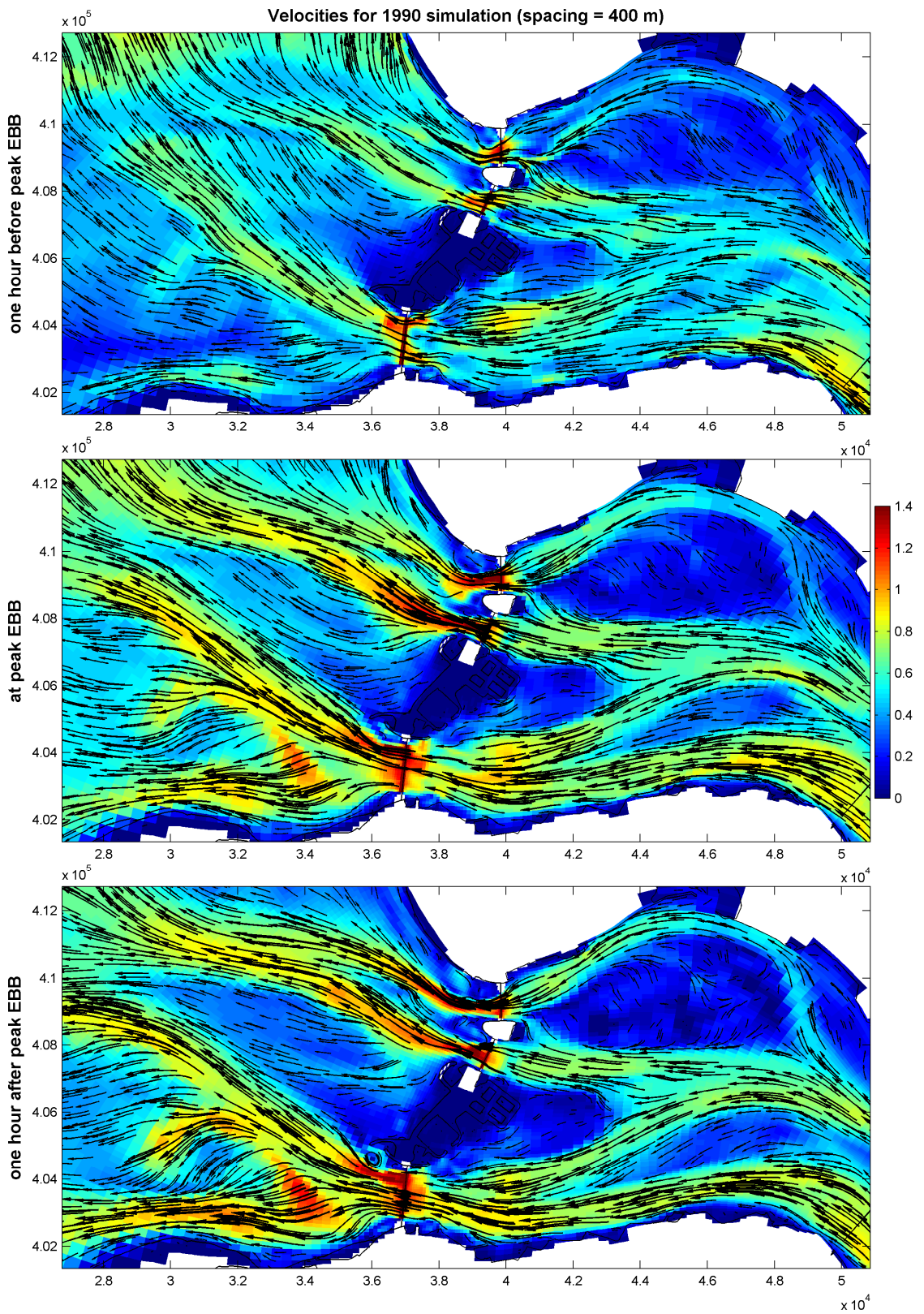


Figure 16: **Maps of currents close to peak Ebb; depths of 1990 (same zoom level as Figure 12).**

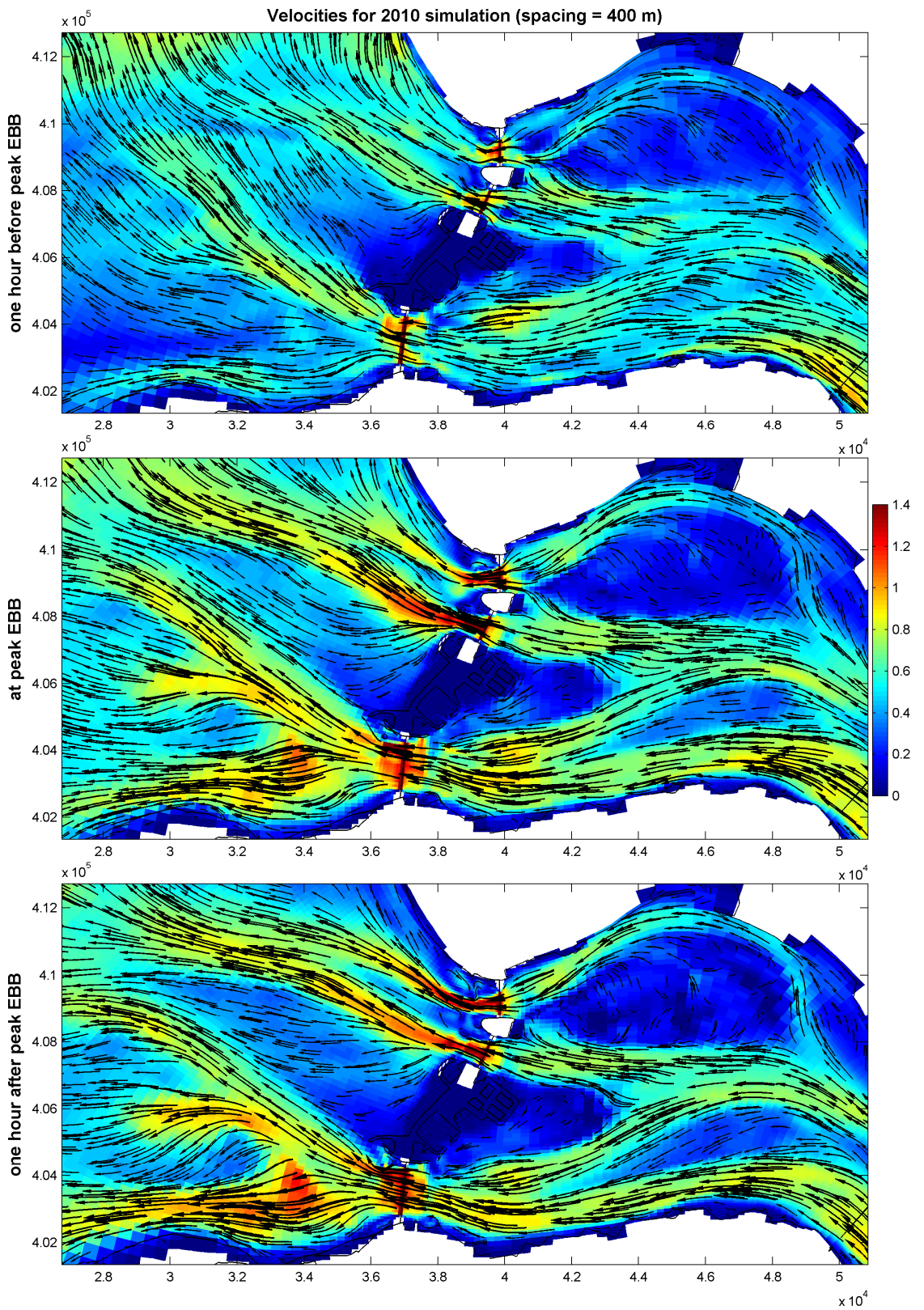


Figure 17: Same as Figure 16 but with depths of 2010.

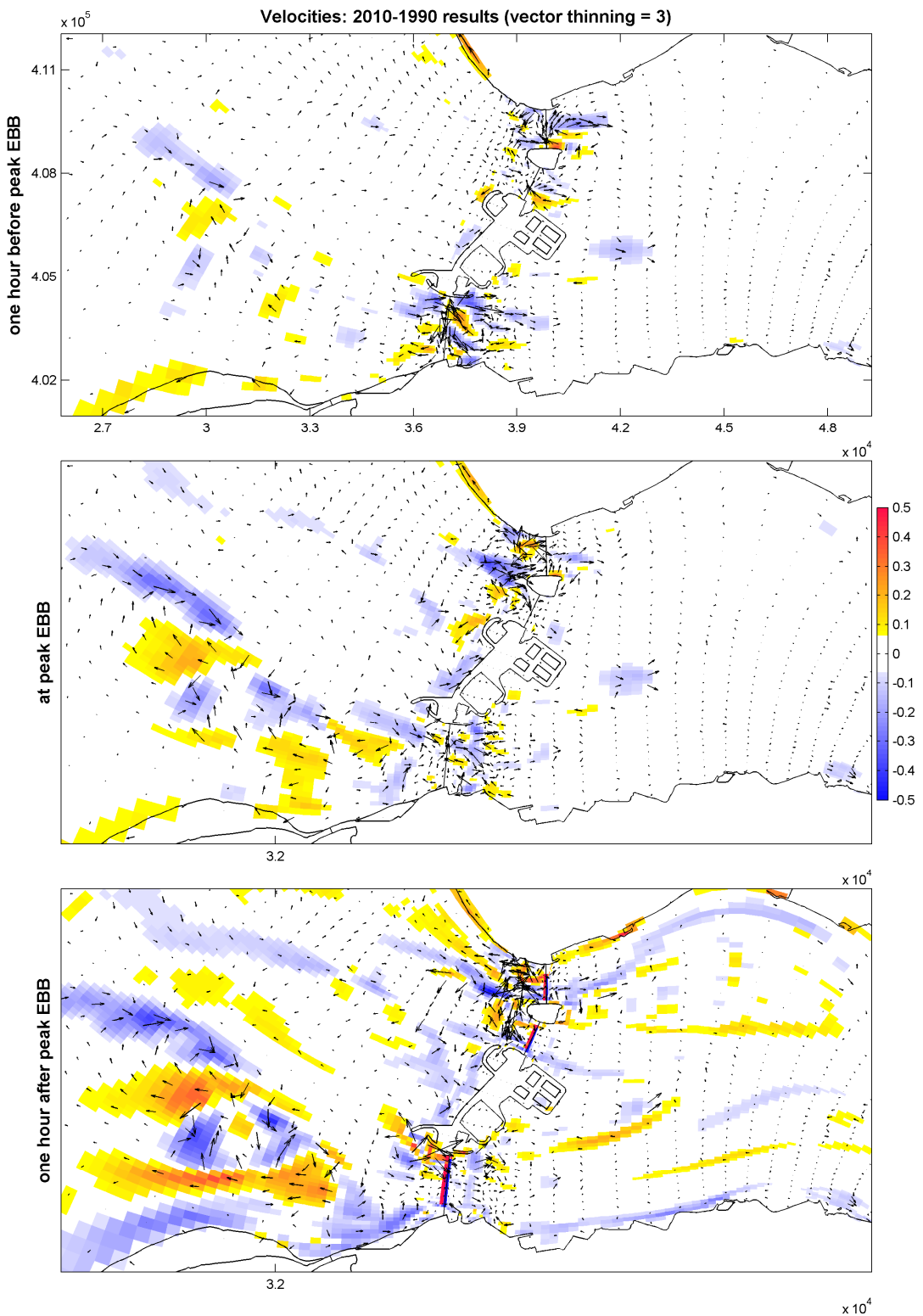


Figure 18: **Map of current differences at peak Ebb (using output in Figure 16 and Figure 17). Color patches show difference in current magnitude, whereas vectors represent vector differences. Thus, 1990 and 2010 vectors may have the same magnitude (white patch) but very different directions (non-zero vector here).**

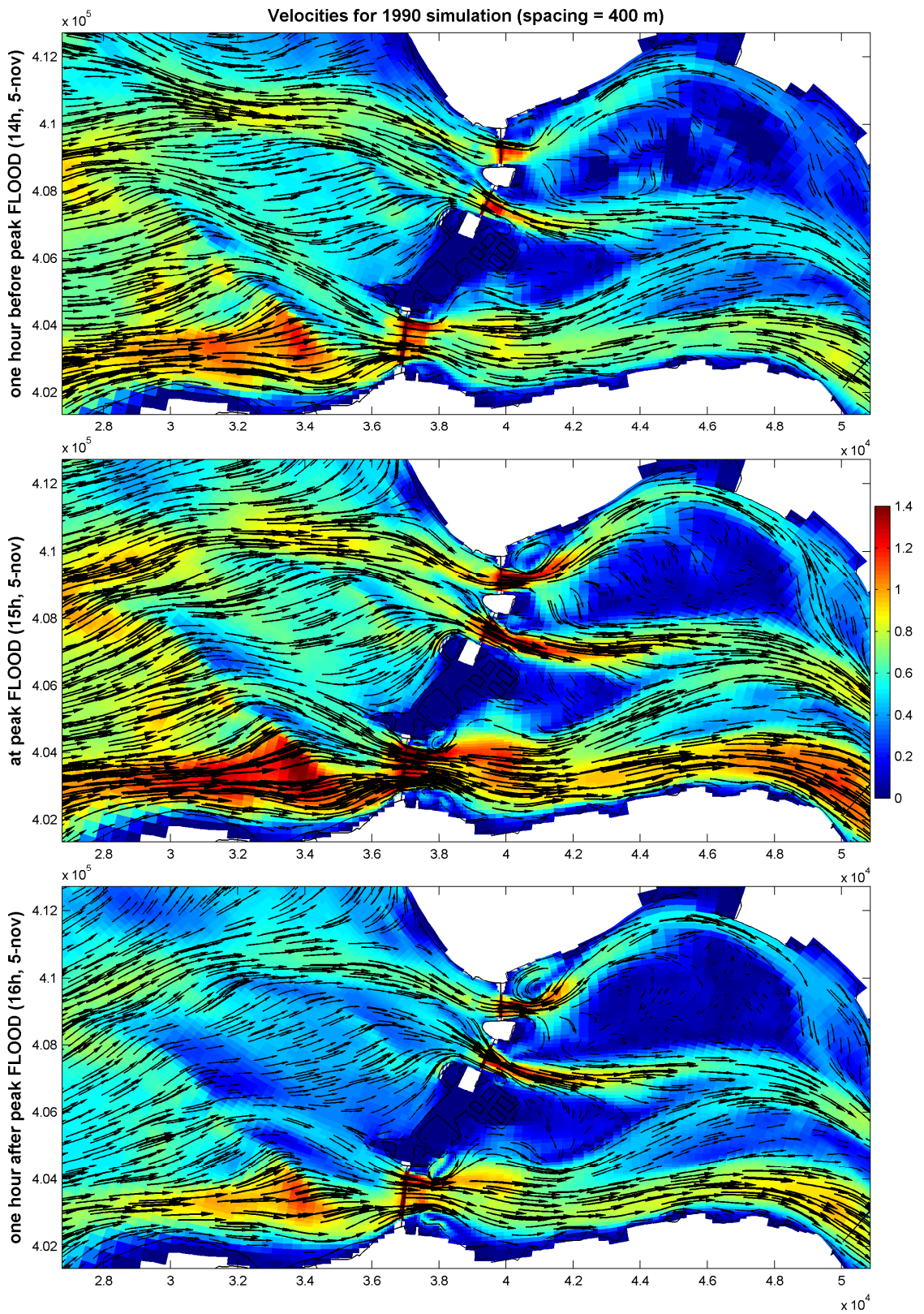


Figure 19: Maps of currents close to peak Flood; depths of 1990 (same zoom level as Figure 12).

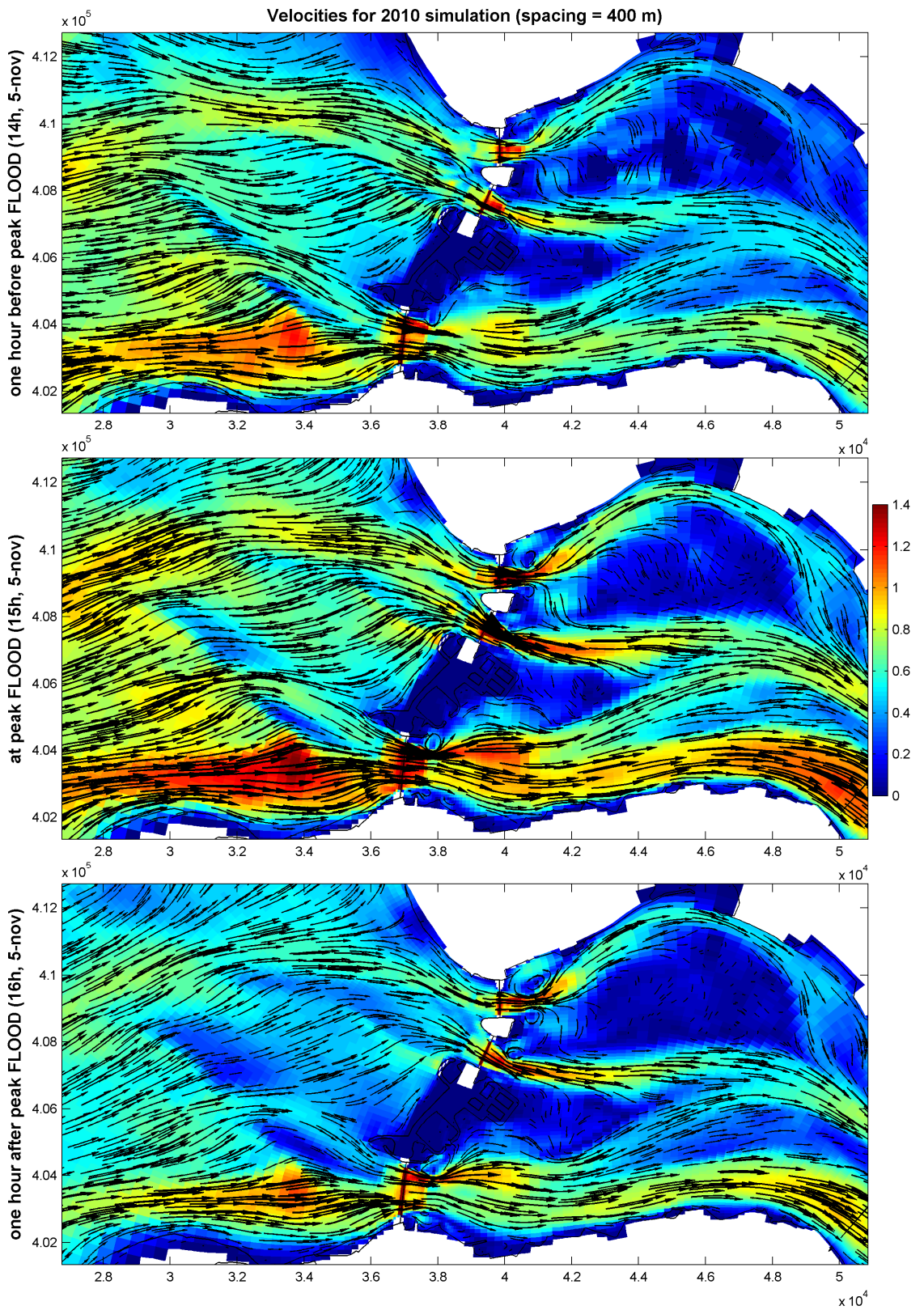


Figure 20: Same as Figure 19 but with currents of 2010.

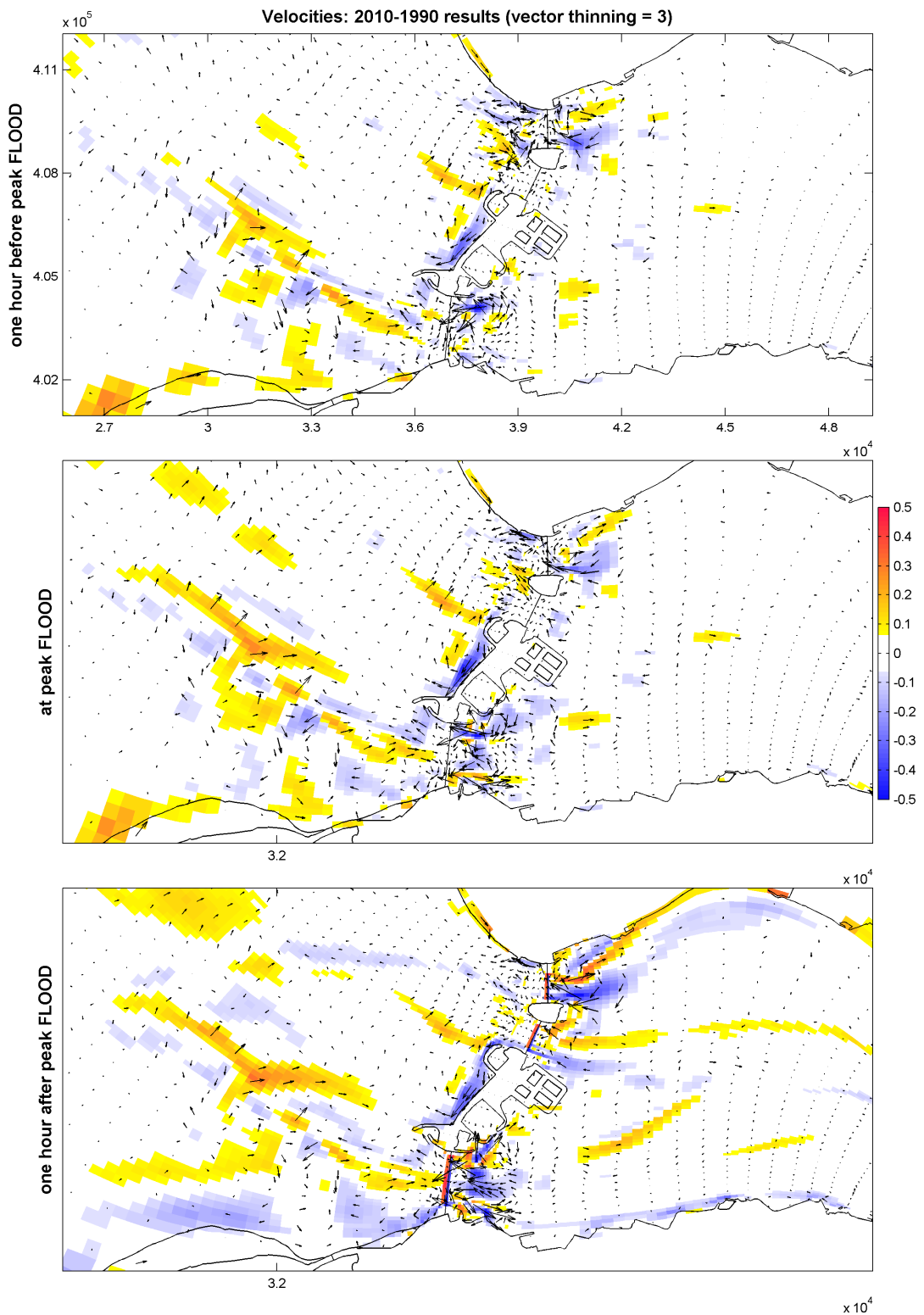


Figure 21: **Map of current differences at peak Flood (using output in Figure 19 and Figure 20). Color patches show difference in current magnitude, whereas vectors represent vector differences. Thus, 1990 and 2010 vectors may have the same magnitude (white patch) but very different directions (non-zero vector here).**

For an impression of how current magnitudes vary along a section perpendicular to the barrier see Figure 22 (notice the same length scale as Figure 3). Be aware that this is not along a flow line. Differences between 1990 and 2010 simulations are small (yet non-negligible); differences between Ebb and Flow patterns are remarkable, but only at the smaller (Schaar and Hammen) barriers. In all cases, peak velocities are about 3.2 m/s over the sills.

Figure 23 illustrates how these current magnitudes vary across the flow, over the sill of each barrier. The largest barrier (Roompot) is where differences are greater, between 1990 and 2010 output, but notice the velocity scale – these differences are all below 5%.

Figure 24 and Figure 25 show similar plots, but at the edge of the bed protection, i.e. about 550m upstream and 550m downstream of the barriers, respectively. These patterns show small 1990 vs 2010 differences, yet large Ebb-to-Flood differences. This is easily explained, as at the down-current location (e.g., seaward side during ebb) the currents are larger, due to the jet stream.

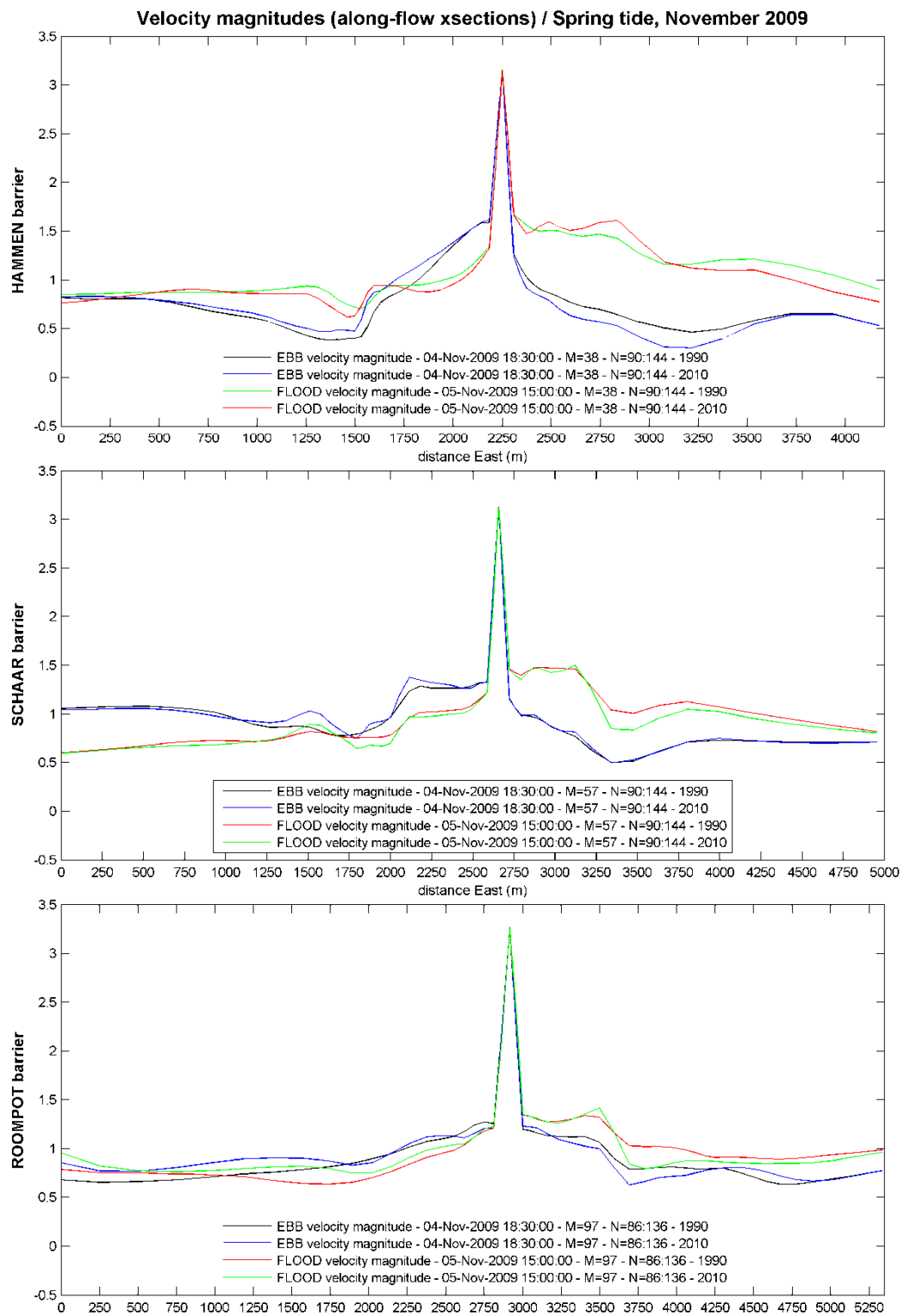


Figure 22: **Magnitude of current velocities, from seaward (left) to interior Oosterschelde (right), along center line of each of three barriers. Same length scale as Figure 3. Curves representing velocities at instant of peak discharge (Ebb in blue and black; Flood in red and green) at the barriers, or nearest half-hour.**

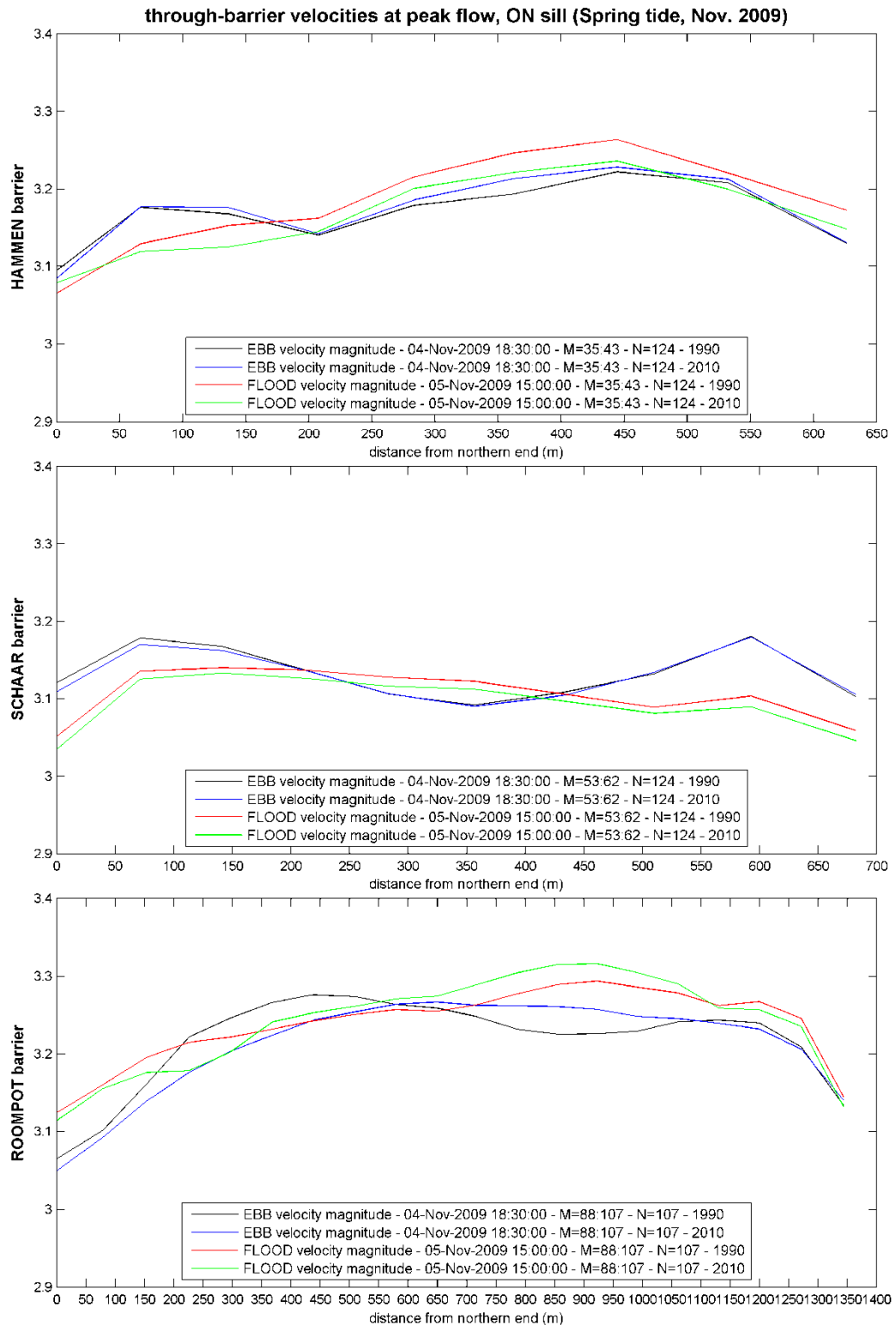


Figure 23: Same as Figure 22, but along the sill of each barrier.

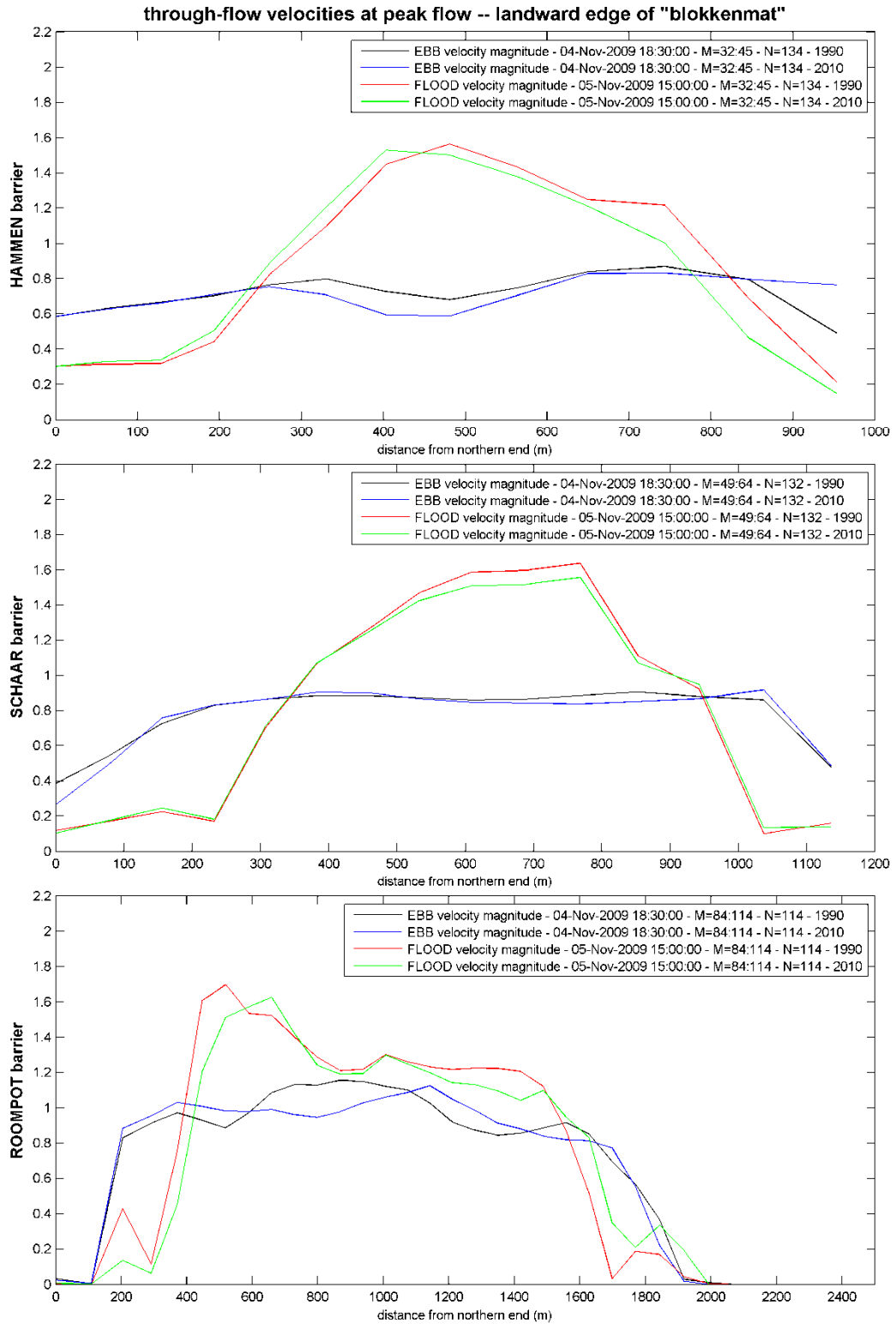


Figure 24: Same as Figure 23, but at the upstream edge of the bed protection.

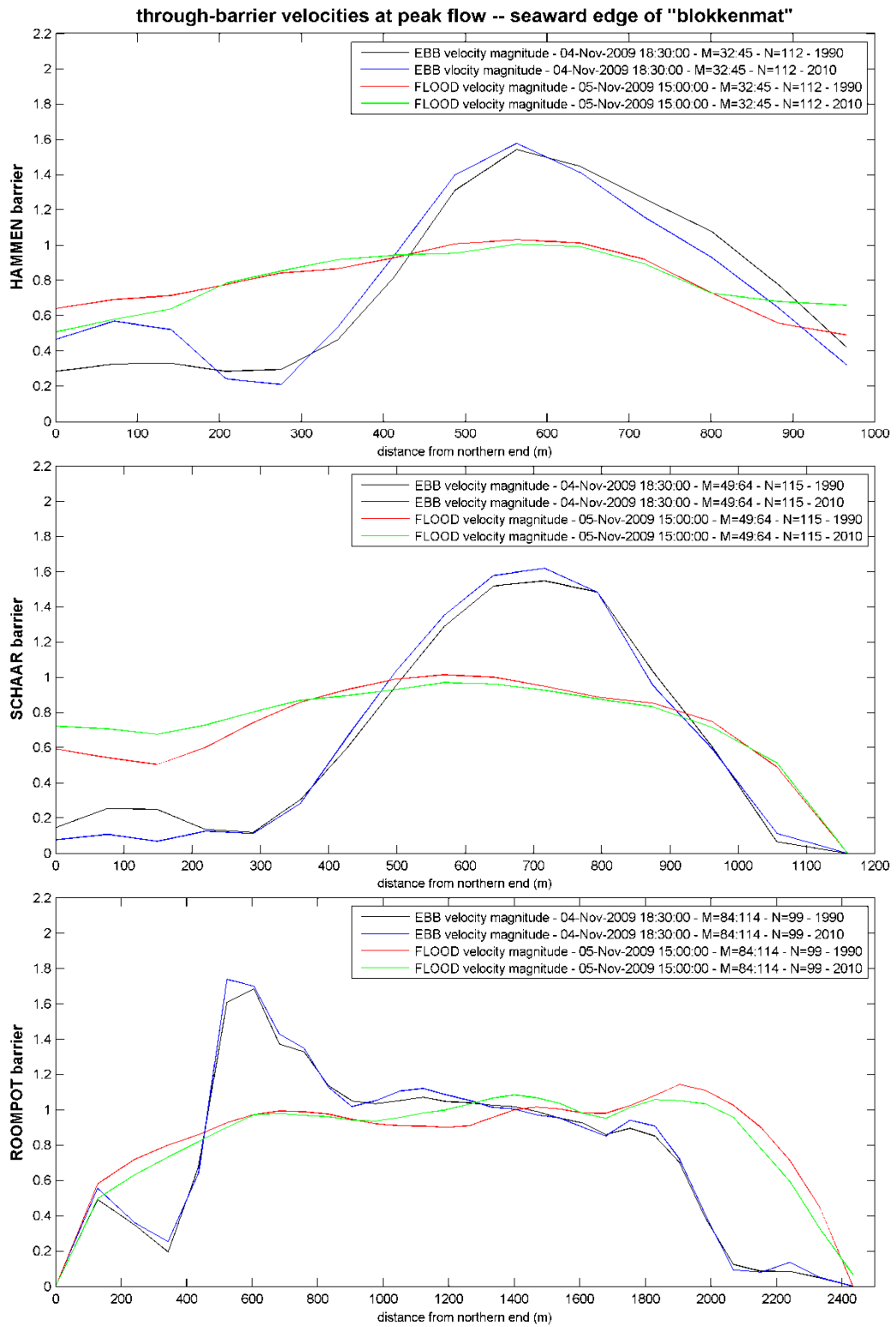


Figure 25: Same as Figure 23, but at the downstream edge of the bed protection.

3. Appendices

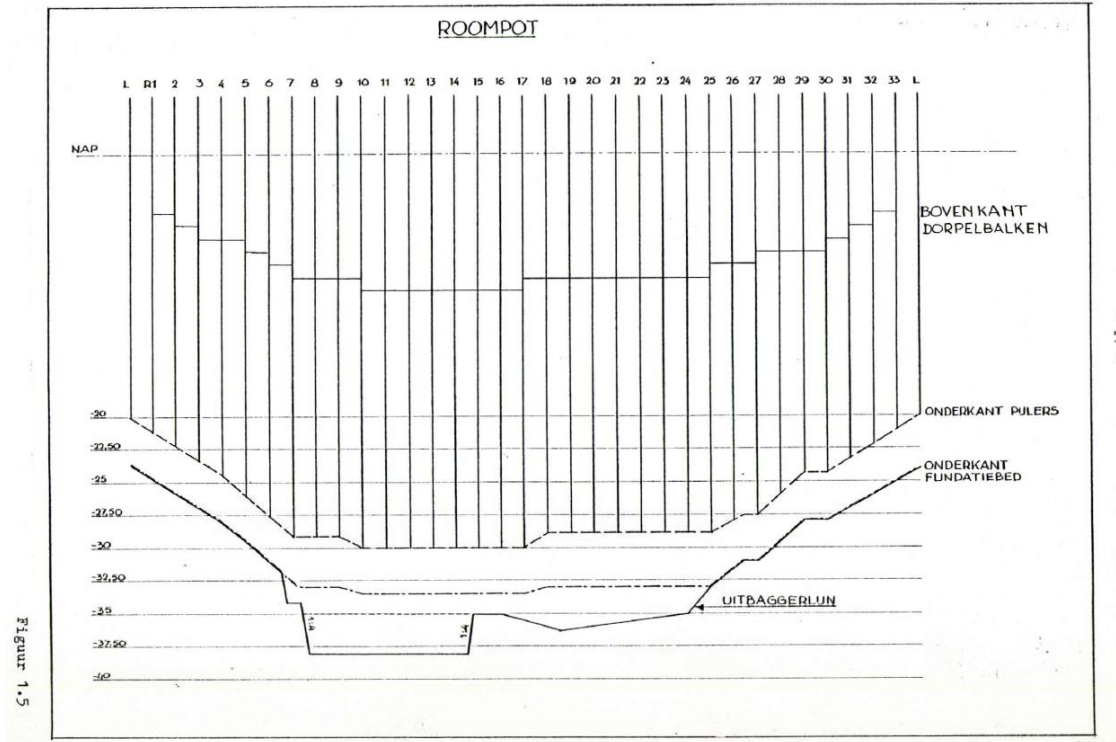


Figure 26: Sill elevations for gates along Roompot barrier.

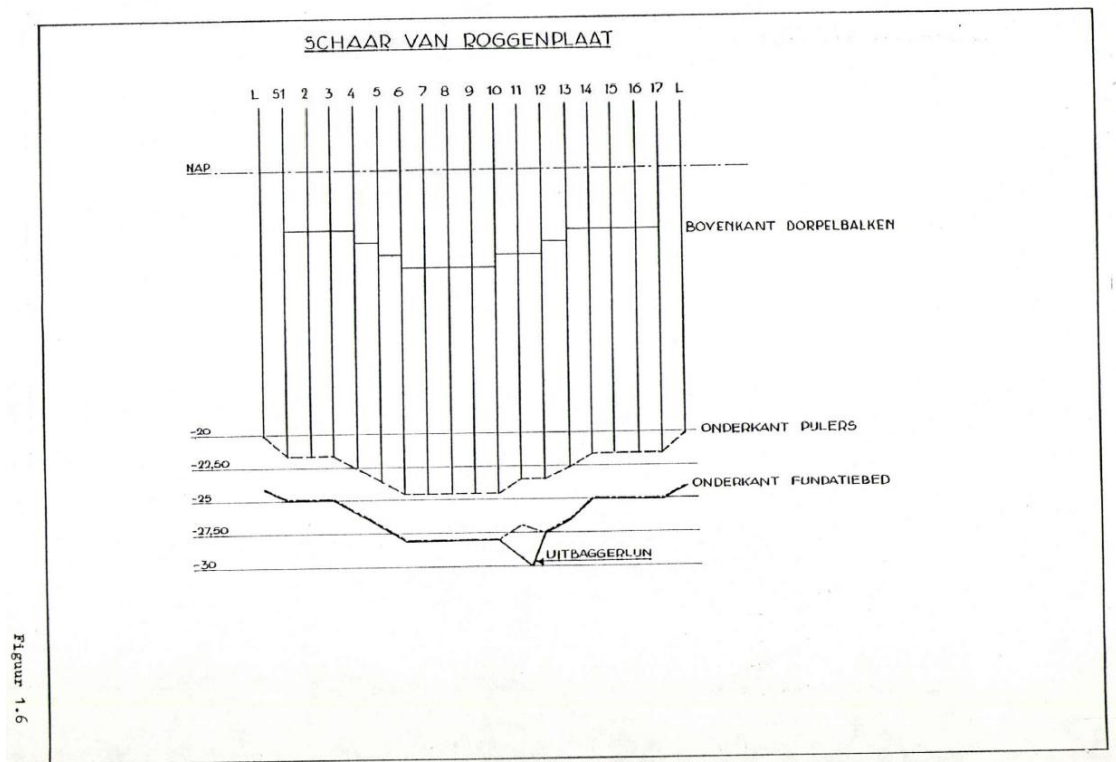


Figure 27: Sill elevations for gates along Schaar barrier.

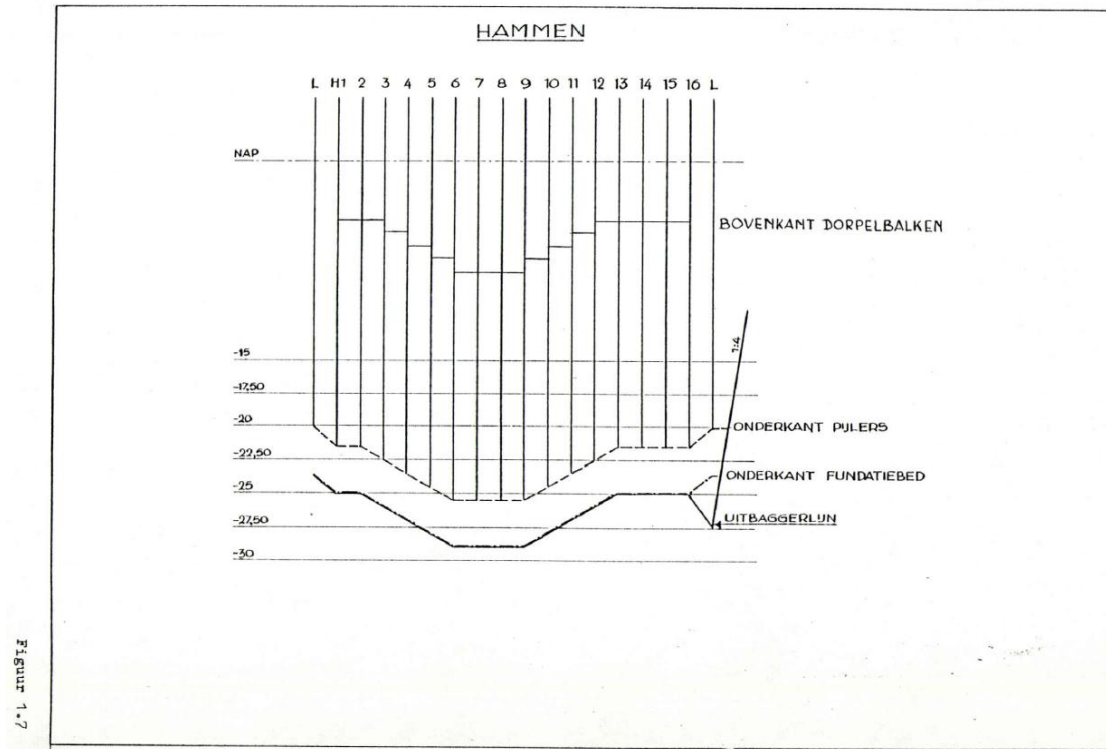


Figure 28: Sill elevations for gates along Hammes barrier.

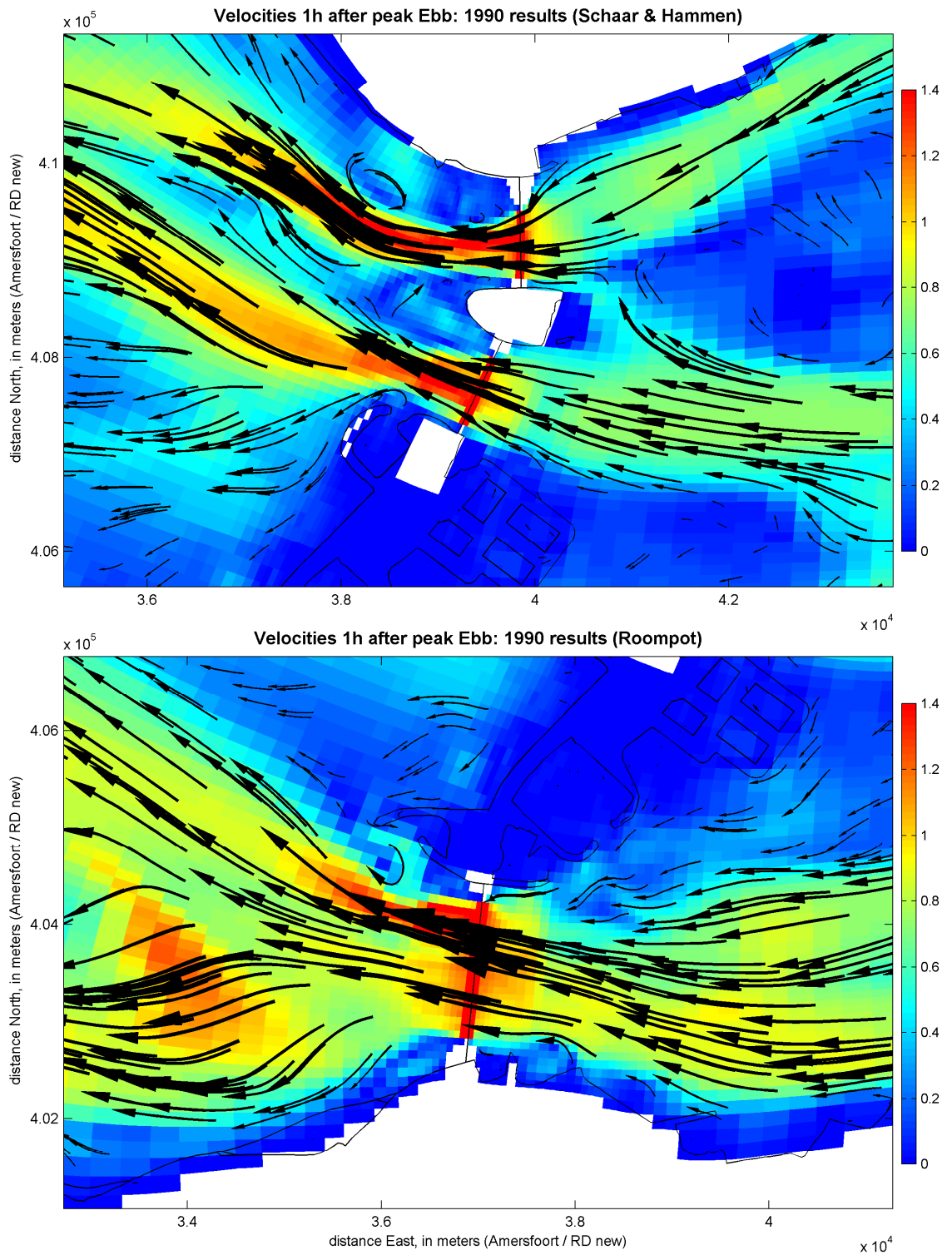


Figure 29: Maps of current velocities one hour after peak Ebb discharge (top: Schaar and Hammen barriers; bottom: Roompot barrier). KZ-Barrier results using 1990 bathymetry. Vector thinning =2.

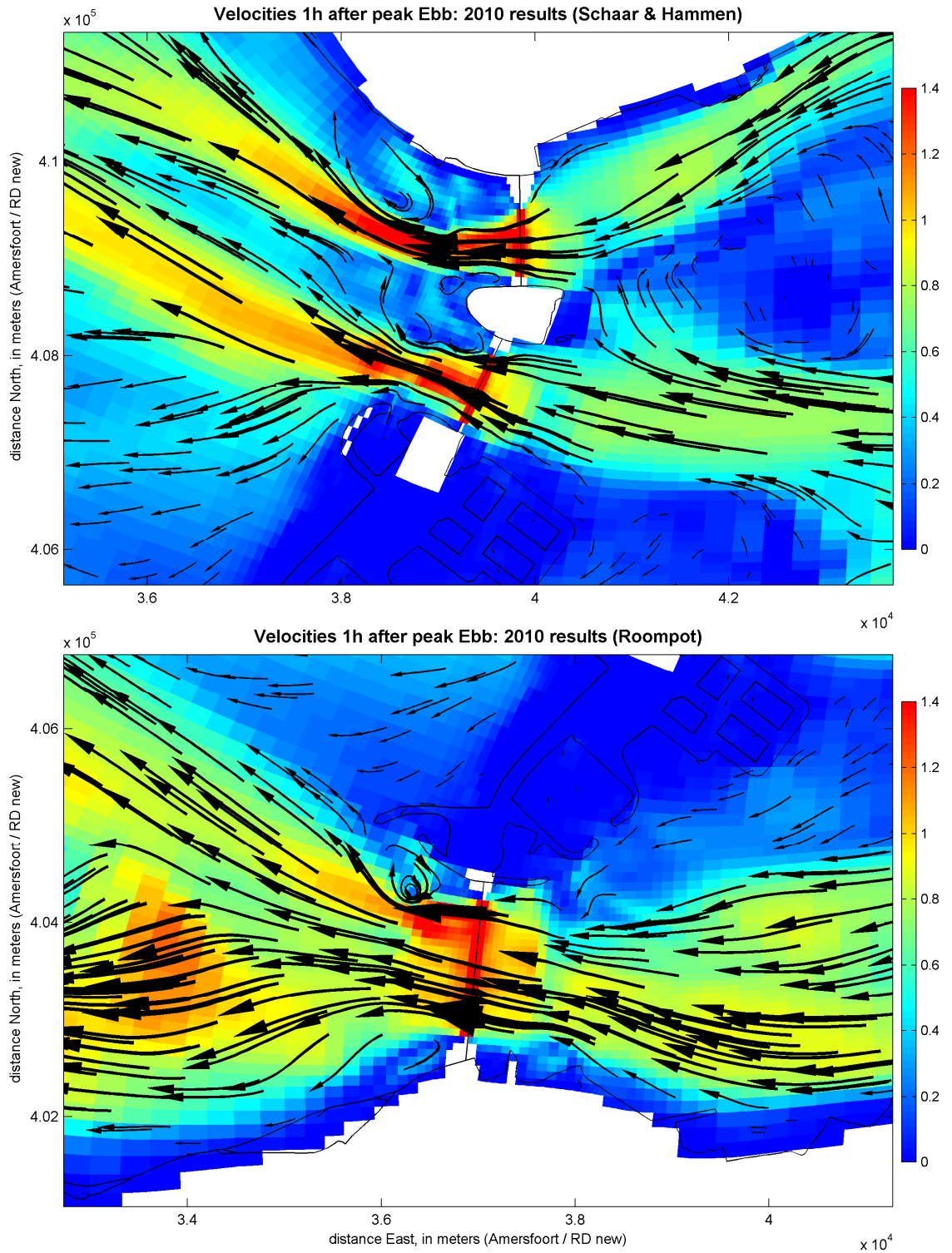


Figure 30: Same as Figure 29, but using 2010 bathymetry.

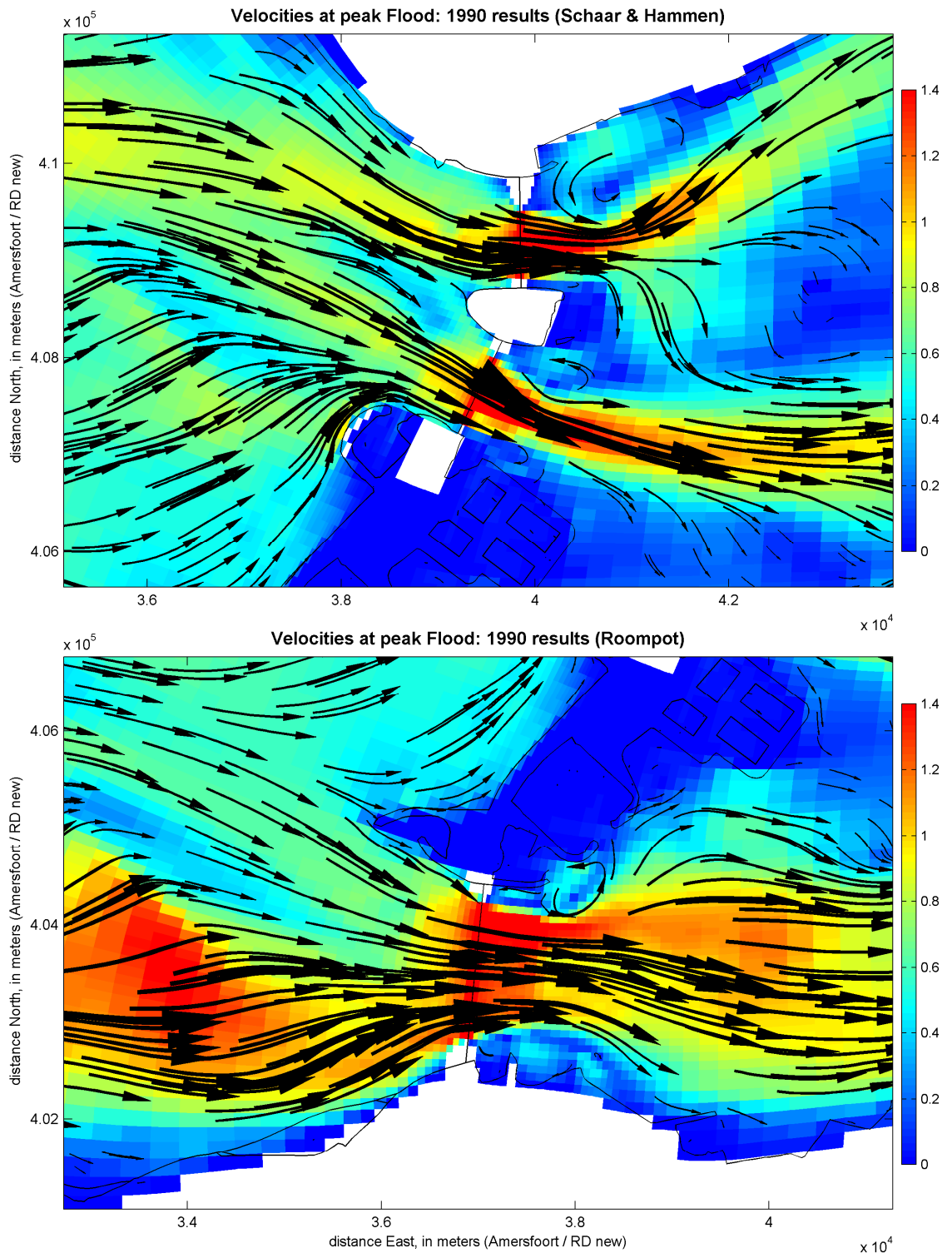


Figure 31: Same as Figure 29, but at peak Flood discharge (top: Schaar and Hammen barriers; bottom: Roompot barrier). KZ-Barrier results using 1990 bathymetry. Vector thinning =2

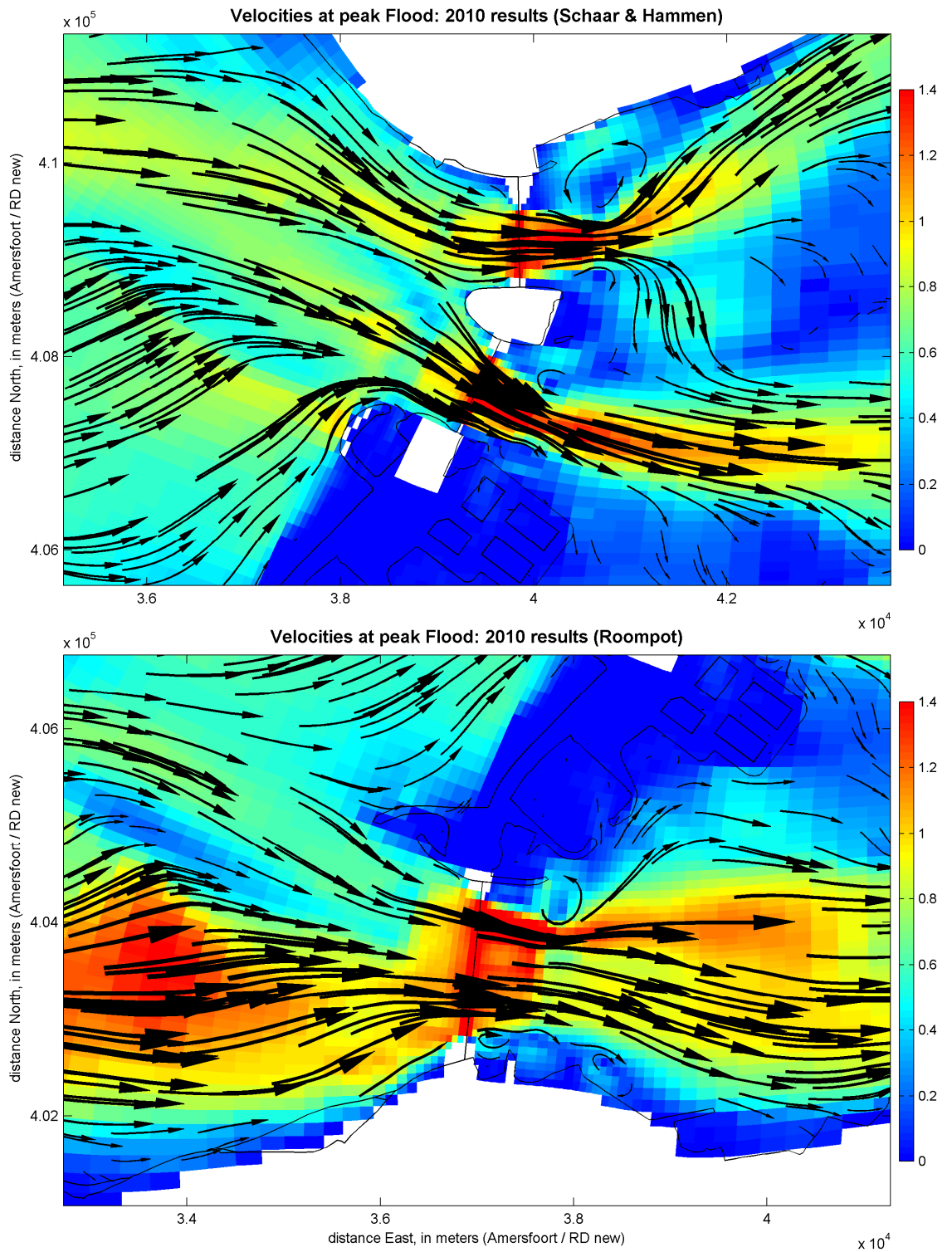


Figure 32: Same as Figure 31, but using 2010 bathymetry.

4. Referenties

DeBruijn, R.A., 2012. "The future of the Oosterschelde with a new inlet channel". Delft University of Technology, Masters Thesis, 82pp.

McCall, R., and Wang, Z., 2009. "Set-up of wave model for KustZuid". Deltares report 1002334-000, 21pp.

RWS, 2011. Rijkswaterstaat vaklodingen data. Available online at http://opendap.deltares.nl/thredds/catalog/opendap/rijkswaterstaat/vaklodingen_r2011/catalog.html