

# Westerschelde: storten in diepe putten

Technische rapportage: mesoschaal morfologische ontwikkelingen rond de Put van Hansweert



## **Westerschelde: storten in diepe putten**

Technische rapportage: mesoschaal morfologische ontwikkelingen rond de Put van Hansweert

### **Auteur(s)**

Ymkje Huisman

Helena van der Vegt

Bas Huisman

Ana Colina Alonso

## Westerschelde: storten in diepe putten

Technische rapportage: mesoschaal morfologische ontwikkelingen rond de Put van Hansweert




<b>Opdrachtgever</b>	Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie
<b>Contactpersoon</b>	Frederik Roose
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Westerschelde, Put van Hansweert, proefstortingen, mesoschaal morphodynamiek, storten in diepe putten, storten en meergeulenstelsel.

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	20-01-2021
<b>Projectnummer</b>	1210301-015
<b>Document ID</b>	1210301-015-ZKS-0011
<b>Pagina's</b>	99
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Ymkje Huismans	
	Helena van der Vegt	
	Bas Huisman	
	A Colina Alonso	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Ymkje Huismans 	Zheng Wang 	Toon Segeren 	
	Helena van der Vegt			
	Bas Huisman			
	Ana Colina Alonso			

# Samenvatting

De vaargeul van de Westerschelde wordt onderhouden middels baggeren en de gebaggerde specie wordt in het estuarium teruggestort. De afspraken tussen Vlaanderen en Nederland met betrekking tot het Schelde-estuarium gaan uit van een stortstrategie die is gericht op alle gebruiksfuncties, namelijk veiligheid, natuur en bevaarbaarheid. De huidige uitvoering van de stortstrategie is gebaseerd op storten op plaatranden, in nevengeulen en in de hoofdgeulen. De afdeling Maritieme Toegang (aMT) van de Vlaamse overheid stelt voor de uitvoering van de stortstrategie aan te passen bij de aanvraag van een nieuwe onderhoudsvergunning. Doel is om meer stortcapaciteit te creëren door gebruik te maken van bergende ruimte in de diepe delen van de hoofdgeul. Deltares voert in opdracht van afdeling Maritieme Toegang van de Vlaamse overheid (aMT) studies uit naar de invloed van de alternatieve beheerstrategie op de hydrodynamica en morfologie van de Westerschelde, én de invloed op het baggerbezwaar.

Deze studie richt zich op de morfologische ontwikkelingen na proefstortingen in en rond de Put van Hansweert, welke gelegen is in een scherpe bocht van de Westerschelde. Deze locatie is een belangrijke stortlocatie in de alternatieve beheerstrategie. Op basis van een combinatie van data-analyse van de proefstortcampagne en numerieke berekeningen is in kaart gebracht waar het gestorte zand zich naartoe verspreidt en hoe snel dit gebeurt. Met deze kennis is een conceptueel model opgesteld van de mesoschaal morfodynamiek rond de Put van Hansweert. De belangrijkste conclusies hiervan zijn dat tijdens het storten naar schatting 10% à 20% van het sediment wordt meegevoerd met de getijstroom en verspreid over een groter gebied binnen het estuarium. Het sediment dat terechtkomt in de put verlaat binnen een aantal maanden tot een jaar de put en komt naar verwachting via suspensietransport voornamelijk op de binnenbocht terecht (>70%). Vanaf de binnenbocht gaat het sediment óf terug de put in via een zettingsvloeiing óf wordt het langs de binnenbocht landwaarts getransporteerd.

Naar verwachting komt een groot deel van het sediment via deze route, en anders via de hoofdgeul, op de drempel van Hansweert terecht, waar gebaggerd wordt. Hoeveel sediment er extra richting de drempel van Hansweert wordt getransporteerd valt op basis van de huidige gegevens niet nader te kwantificeren. Het overige sediment verplaatst zich in andere richtingen. Het effect op het Middellandse Zeegebied is daarbij gering. Er zijn sterke aanwijzingen dat het gebied rondom de Put van Hansweert sterk wordt beïnvloed door de stortingen in SH41, een stortlocatie nabij het gat van Ossensisse, enkele kilometers ten zuidwesten van de put. Ook dit sediment transporteert zich noordoostwaarts, waar het samen met de stortingen in de Put van Hansweert zorgt voor accumulatie van sediment op de binnenbocht. Door de veranderende morfologie van de binnenbocht wordt ook het doorstroomoppervlak bij de Put van Hansweert beïnvloedt, resulterend in een lokale versterking van de erosieve trend op de ondiepe watterand van de Platen van Ossensisse.

Op basis van huidige metingen en berekeningen is het niet mogelijk om te kwantificeren wat er gaat gebeuren indien er frequenter en grotere hoeveelheden sediment in de put gestort gaan worden. Met het oog op de onzekerheden, wordt geadviseerd om bij het uitvoeren van de alternatieve beheerstrategie de omgeving te blijven monitoren middels frequente bodempeilingen. Indien er zich ongewenste effecten voordoen kan dit tijdig worden vastgesteld en zo nodig een alternatieve stortlocatie worden gekozen. Zo kan de stortstrategie verder worden geoptimaliseerd.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	7
1.3	Aanpak en leeswijzer	9
1.4	Projectteam	9
<b>2</b>	<b>Sedimentdynamica rond de Put van Hansweert: de metingen</b>	<b>10</b>
2.1	Inleiding	10
2.2	Details proefstortcampagne Put van Hansweert	10
2.3	Methode	11
2.4	Resultaten	14
2.4.1	Initiële verspreiding tijdens het storten	14
2.4.1.1	Analyse	14
2.4.1.2	Discussie en conclusies	17
2.4.2	Uitruimen van de put	18
2.4.2.1	Analyse	18
2.4.2.2	Discussie en conclusies	21
2.4.3	Verspreiding van sediment buiten de put	22
2.4.3.1	Algemene observaties uit bodempeilingen	22
2.4.3.2	Kwantificatie volumeveranderingen hele gebied	26
2.4.3.3	Transport richting de binnenbocht	28
2.4.3.4	Transport richting Zuidergat en drempel van Hansweert	31
2.4.3.5	Transport richting Overloop van Hansweert	34
2.4.3.6	Transport richting Middelgat	36
2.4.3.7	Discussie en conclusies	38
2.5	Synthese	39
<b>3</b>	<b>Sedimenttransport processen: de berekeningen</b>	<b>41</b>
3.1	Inleiding	41
3.2	Aanpak	41
3.2.1	3D hydrodynamisch Delft3D-FM model	41
3.2.1.1	Het model	41
3.2.1.2	De berekeningen	41
3.2.1.3	Doorvertaling naar proxy voor sedimenttransportcapaciteit en sedimentatie en erosie	42
3.2.2	2D morfodynamisch Delft3D-model	43
3.2.2.1	Het model	43
3.2.2.2	De berekeningen	44
3.3	Resultaten	44
3.3.1	Detail hydrodynamica in de Put van Hansweert	44
3.3.2	Sedimenttransportcapaciteit	47
3.3.3	Sedimentatie en erosieprocessen na storten	52
3.4	Discussie en synthese	55
<b>4</b>	<b>Synthese: conceptueel model sedimentdynamica na storten in diepe delen</b>	<b>57</b>
4.1	Conceptueel model sedimenttransport rond Put van Hansweert na storting	57
4.2	Implicaties voor beheer	58
4.2.1	Baggerinspanningen Drempel van Hansweert	59

4.2.2	Aanzanding Middelgat	59
4.2.3	Effect frequentere of grotere stortingen in de Put van Hansweert	59
4.2.4	Invloed locatie van de stortingen in de kuil	60
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>61</b>
5.1	Conclusies	61
5.1.1	Het uitruimen van de put en de verspreiding van sediment naar omliggend gebied	61
5.1.2	Invloed van stortingen elders op de sedimentdynamiek rond de Put van Hansweert	62
5.1.3	Verwachtingen bij grotere hoeveelheden of frequentere stortingen	62
5.2	Aanbevelingen	62
5.2.1	Optimalisatie stortbeleid middels storten en monitoren	62
5.2.2	Meetadvies voor het bepalen van de invloed van de stortlocatie op sedimentverspreiding	62
5.2.3	Invloed aangroei binnenbocht op ontwikkeling plaatrand	63
5.2.4	Scheiden invloed van andere werkzaamheden op de ontwikkelingen rond de stortlocatie	63
5.2.5	Inzet numerieke modellering	63
5.2.6	Inschatting effect van storten in andere diepe delen	63
	<b>Referenties</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Bodem en volumeveranderingen</b>	<b>66</b>
A.1	Bodemverandering per 3 jaar	66
A.2	Bodemveranderingen per meting, alle opnames	69
A.3	Bodemveranderingen per meting van T00, alleen de grote opnames	83
A.4	Volumeveranderingen op de binnenbocht, subdomeinen “oost-oost” en “hoog”	85
<b>B</b>	<b>Delft3D-FM 3D modelresultaten</b>	<b>86</b>
B.1	Validatie	86
B.2	Stromingspatronen gedurende 1 getijcyclus voor berekening met en zonder zout	87
B.3	Stromingspatronen gedurende 1 getijcyclus voor berekening met en zonder storting van 1 Mm <sup>3</sup> in de put van Hansweert	91
B.4	Stromingspatronen gedurende 1 getijcyclus voor berekening met en zonder storting van 6 Mm <sup>3</sup> in de put van Hansweert	95

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

De vaargeul van de Westerschelde wordt onderhouden middels baggeren en de gebaggerde specie wordt in het estuarium teruggestort. De afspraken tussen Vlaanderen en Nederland met betrekking tot het Schelde-estuarium gaan uit van een stortstrategie die is gericht op alle gebruiksfuncties, namelijk veiligheid, natuur en bevaarbaarheid. De huidige stortstrategie is gebaseerd op storten op plaatranden, in nevengeulen en in de hoofdgeulen. De Vlaamse overheid stelt voor deze stortstrategie aan te passen bij de aanvraag van een nieuwe onderhoudsvergunning. Doel is om meer stortcapaciteit te creëren.

Momenteel wordt in opdracht van de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie (VNSC), middels de projectgroep 'Storten en meergeulenstelsel', onderzocht welke alternatieve beheerstrategieën het meest gunstig zijn. Dit in voorbereiding op de aanvraag voor de nieuwe vergunning in 2020. Bij de voorkeursstrategie wordt sediment zoveel mogelijk in de diepe delen van de Westerschelde gestort (i.e. in de bochten). Om de effectiviteit van deze strategie te onderzoeken wordt momenteel een proefstortcampagne uitgevoerd, waarbij in diverse putten sediment wordt gestort en de ontwikkeling middels bodempeilingen en metingen van de stroomsnelheden en sedimentconcentraties wordt gevolgd (meest recente IMDC rapportage: (Pandelaers and Kragiopoulou 2019). Aanvullend wordt in diverse modelleerstudies de sedimentdynamica tijdens het storten (Decrop 2019) en de detailhydrodynamica in de putten in kaart gebracht (van der Wegen et al. 2019). Voorliggende studie richt zich op de morfologische ontwikkelingen tijdens en na het storten. In feite is het de vraag waar het gestorte zand zich naartoe verspreidt én hoe snel dit gebeurt. De focus ligt hierbij op de Put van Hansweert, omdat hier naar verwachting in de toekomst het meest gestort zal worden (Huisman et al. 2018).

## 1.2 Doel

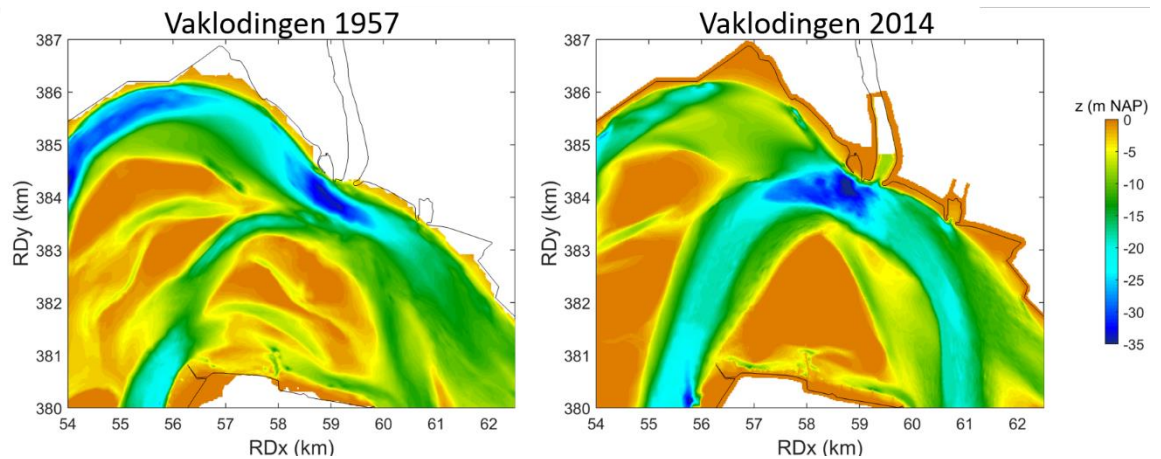
Doel van deze studie is het in kaart brengen van de mesoschaal morfologische ontwikkelingen rond de Put van Hansweert. De Put van Hansweert is een diepe put (< -35 m NAP) in het middendeel van Westerschelde, zie Figuur 1.1.



*Figuur 1.1 Satellietbeeld van de Westerschelde (Google Earth ©), met het interessegebied (gele kader) rond de Put van Hansweert (aangegeven met oranje stip).*

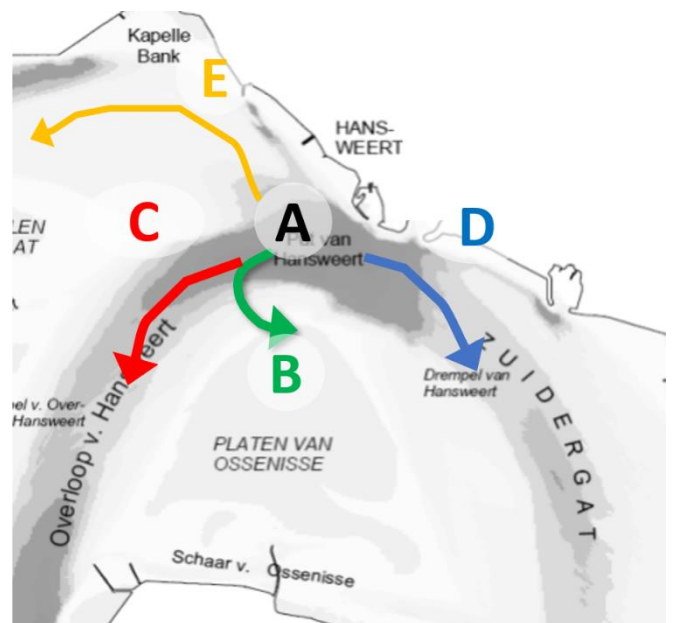
Door de samenvloeiing van getijgeulen en de ligging in de scherpe bocht is deze diepe put ontstaan. Al in de eerste vaklodingen uit 1957 is de put aanwezig, zie Figuur 1.2. In de loop van de tijd is door de wisseling van hoofdgeul, de vorm van de put sterk veranderd. De diepte is nauwelijks veranderd.

Conform de nieuwe stortstrategie zal naar schatting 3 miljoen m<sup>3</sup> van de 12 miljoen m<sup>3</sup> per jaar aan baggerd volume in de Put van Hansweert worden gestort (Huisman et al. 2018). De Put van Hansweert vormt daarmee een belangrijke schakel in de nieuwe strategie. Huidige studie heeft als doel in kaart te brengen hoe het sediment zich na het storten verspreid, zie Figuur 1.3, en welke implicaties dit heeft voor het beheer. Belangrijke vragen zijn daarbij of het Middelgat verder zal aanzanden (relevant voor de ecologie) en of de baggervolumes op de Drempel van Hansweert toe gaan nemen (baggerbezwaar).



Figuur 1.2 Bodemligging in 1957 (links) en 2014 (rechts).

- A** : Opvullen diepe put
- B** : Binnenbocht
- C** : Overloop van Hansweert
- D** : Zuidergat
- E** : Middelgat



Figuur 1.3 Denkmodel sedimentdynamica na het storten van sediment in de Put van Hansweert.



### 1.3 Aanpak en leeswijzer

Om in kaart te brengen hoe het sediment zich na het storten verspreid is een combinatie gebruikt van data-analyse en numerieke berekeningen. Rond de proefstortperiodes is de bodemligging frequent ingemeten met multibeam echolood. Op basis van de geobserveerde bodemveranderingen zijn voor elke deelgebied de volumeveranderingen in kaart gebracht (Hoofdstuk 2). Dit geeft een beeld van waar het sediment na storten naartoe gaat en hoe dit de morfodynamiek verandert. Dit beeld is aangevuld met behulp van modelberekeningen (Hoofdstuk 3). Hierbij zijn 3D hydrodynamische berekeningen gebruikt om inzicht te krijgen in de lokale hydrodynamica en het effect op het sedimenttransport uit de put. Met 2D morfodynamische berekeningen is nader in kaart gebracht hoe het sediment zich verspreid als het eenmaal de put heeft verlaten. De kennis uit de data-analyse en berekeningen is vervolgens samengevat in een conceptueel model, van waaruit ingegaan wordt op een aantal beheervragen (Hoofdstuk 4). Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 5).

### 1.4 Projectteam

Het projectteam is als volgt samengesteld:

Ymkje Huismans	data-analyse, 2D morfodynamische berekeningen, analyse modelresultaten en rapportage
Helena van der Vegt	opzet en verbetering 2D morfodynamische berekeningen
Ana Colina	3D hydrodynamische berekeningen
Bas Huisman	Deelprojectleider en expert.
Zheng Bing Wang	Expert en reviewer

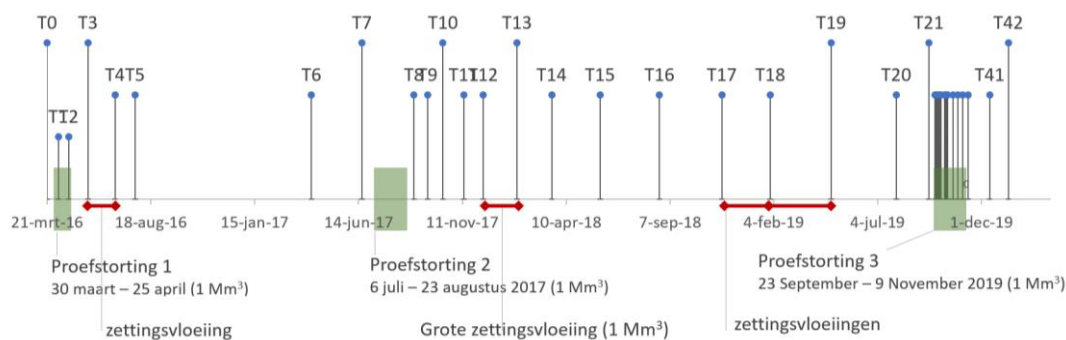
## 2 Sedimentdynamica rond de Put van Hansweert: de metingen

### 2.1 Inleiding

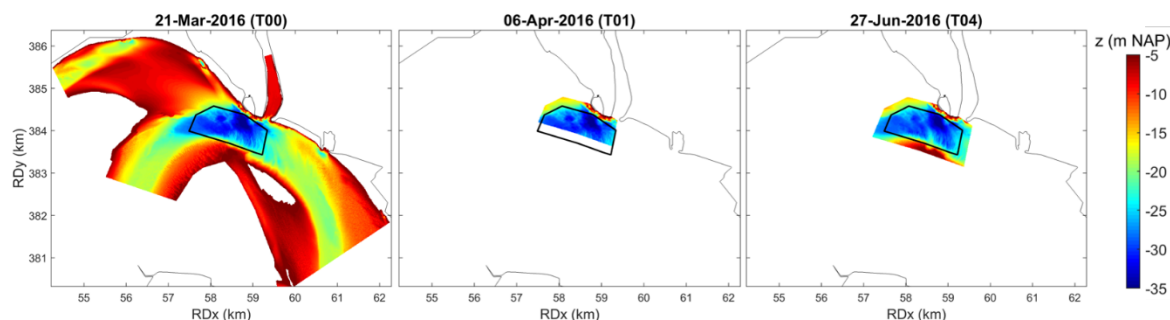
Om het effect van het storten in diepe delen in kaart te brengen worden op diverse locaties proefstortingen uitgevoerd. In de Put van Hansweert is in 2016 en 2017 1 miljoen m<sup>3</sup> (vanaf hier afgekort met Mm<sup>3</sup>) sediment gestort. Om in kaart te brengen hoe dit sediment zich verspreidt, worden in dit hoofdstuk de multibeam peilingen geanalyseerd. Dit is een uitbreiding op de initiële analyses die in opdracht van de VNSC zijn uitgevoerd door het IMDC in de maandrapporten zijn gerapporteerd (Pandelaers and Kragiopoulou 2019).

### 2.2 Details proefstortcampagne Put van Hansweert

Een overzicht van de stort- en monitoringsmomenten in de Put van Hansweert is weergegeven in Figuur 2.1. Tot nog toe zijn er drie stortcampagnes uitgevoerd, waarbij elke keer een totaal in-situ volume van 1,0 Mm<sup>3</sup> is gestort. De eerste stortcampagne vond plaats tussen 30 maart en 25 april 2016 (410 stortingen met een gemiddeld in-situ volume van 2.400 m<sup>3</sup>), de tweede vond plaats tussen 6 juli en 23 augustus 2017 (456 stortingen met een gemiddeld in-situ volume van 2.200 m<sup>3</sup>) en de derde vond plaats tussen 23 september en 9 november 2019 (376 stortingen met een gemiddeld in situ-volume van 2650 m<sup>3</sup>). Het sediment is daarbij gestort in het in Figuur 2.2 aangegeven vergunningspolygoon.



Figuur 2.1 Tijdbalk met stortingen (in groen) en monitoringsmomenten (T0 – T42) van de proefstortcampagne in de Put van Hansweert. De lengte van de staven geeft de grootte van het monitoringsgebied weer, zie Figuur 2.2. Momenten van waargenomen zettingsvloeiingen zijn weergegeven in rood.





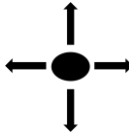
Figuur 2.2 Dekking multibeam echoloodmetingen. Links: dekking peilingen T00, T03, T07, T10, T13, T19, T21 en T42 (D3). Midden: dekking peilingen T01, T02 (D1). Rechts: dekking overige peilingen (D2). In zwart is het vergunningspolygoon weergegeven.

Voor, tijdens en na de stortcampagnes is de bodem frequent ingemeten met een multibeam echolood. De grootte van het ingemeten gebied verschilt per peiling en is weergegeven in Figuur 2.1 en Figuur 2.2.

Naast de proefstortingen, beïnvloedden ook zettingsvloeiingen de sedimentdynamica in en rond de Put van Hansweert. Een zettingsvloeiing is een vorm van instabiliteit die zich voordoet in fijnzandige onderwatertaluds, waarbij in een betrekkelijk korte tijd grote hoeveelheden grond afstromen van de onderwateroever naar dieper gelegen delen. In de binnenbocht van Hansweert is er sprake van zo'n fijnzandig onderwatertalud, waar ten gevolge van aangroei van sediment het onderwatertalud steiler wordt en geregeld sediment afstroomt naar de put van Hansweert (zie Figuur 2.1). Het kan hierbij om aanzienlijke hoeveelheden sediment gaan. Bij de zettingsvloeiing die is opgetreden tussen peilmomenten van 11 december 2017 en 29 januari 2018 is ruim 1 Mm<sup>3</sup> aan sediment afgevoerd van de binnenbocht naar de put.

## 2.3 Methode

De analyse is opgebouwd uit drie onderdelen:

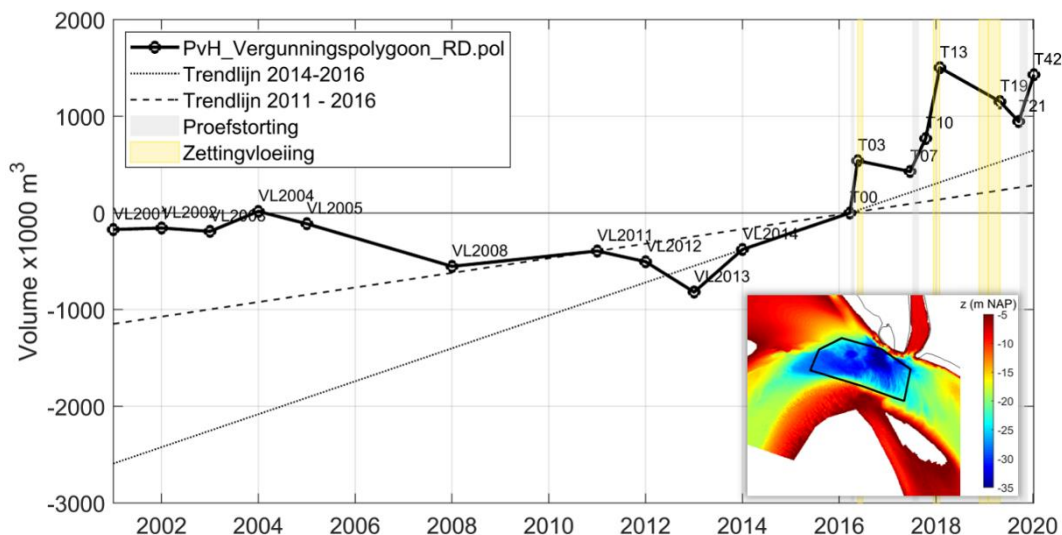
Onderdeel	Tijdschaal	Analysemethoden	Peilingen
 Initiële verspreiding tijdens het storten	Dagen - weken	Volumeveranderingen	T21 – T39
 Uitrusten van de put	Weken - maanden	Volumeveranderingen Verandering van dwarsprofielen en doorstroomoppervlak	T00 – T42
 Verspreiding van sediment buiten de put	Maanden - jaren	Visuele inspectie bodempeilingen Volumeveranderingen per deelgebied	Met name de grote opnames: T00, T03, T07, T10, T13, T19, T21 en T42.

Hieronder volgt een toelichting van de gehanteerde methoden.

### 1. Volumeverandering per deelgebied

Om te kwantificeren hoeveel sedimentatie of erosie ergens heeft opgetreden worden de volumeveranderingen bepaald. Om onderscheid te kunnen maken tussen autonome veranderingen en veranderingen ten gevolge van de storting, is zowel de periode vóór de proefstortingen beschouwd (referentieperiode: 2001 – 2016), als de periode met proefstortingen (2016 – 2019), zie Figuur 2.3. Voor de referentieperiode is gebruik gemaakt van Vaklodingen (aangeduid met “VL” en het betreffende jaar), voor de periode 2016 – 2019 is gebruik gemaakt van de metingen van de proefstortcampagne (aangeduid met “T” en het betreffende meetnummer). De volumeveranderingen zijn bepaald ten opzichte van de T00 peilingen van 21 maart 2016.

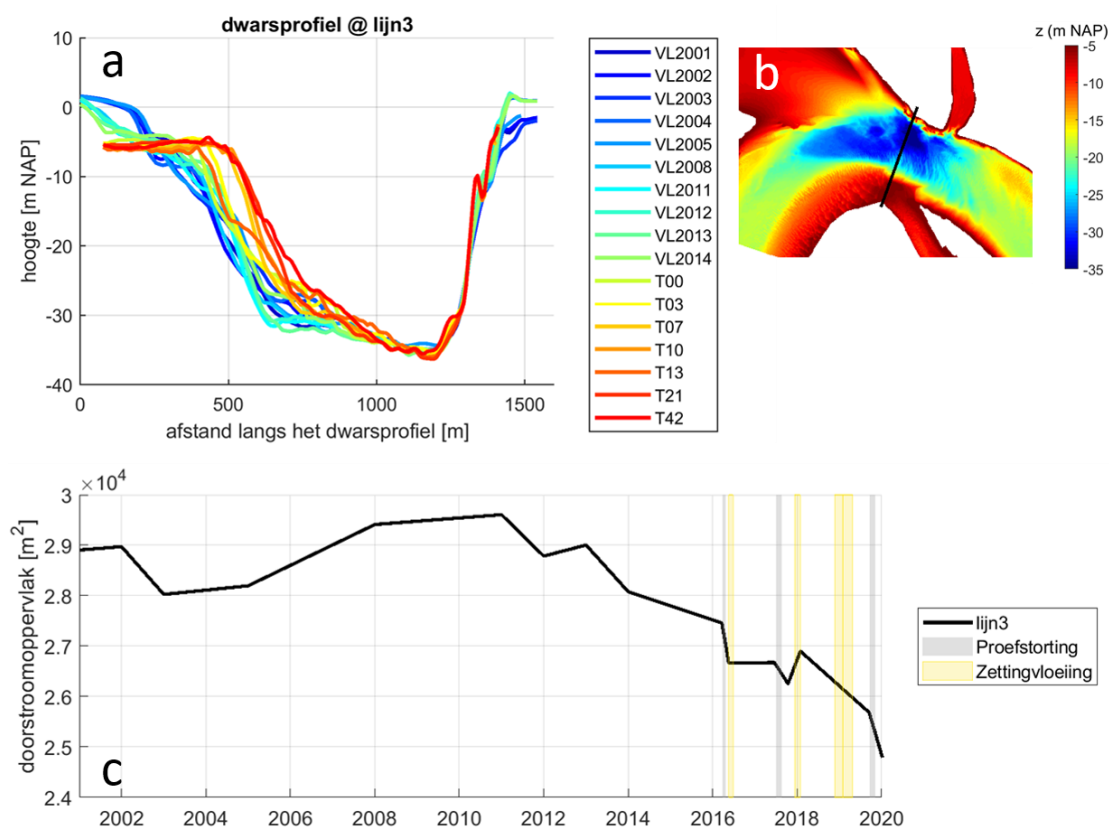
Om een indicatie te krijgen van hoeveel sedimentatie of erosie er heeft opgetreden ten gevolge van de storting, zijn de geobserveerde trends gecorrigeerd voor de trends tussen 2011-2016 en 2014-2016. Dit is geïllustreerd in Figuur 2.3 voor de volumeveranderingen in het stortpolygoon. Tussen T00 en T42 is dit volume toegenomen met 1.43 Mm<sup>3</sup>. Indien de trends tussen 2011-2016 en 2014-2016 zich onveranderd hadden doorgezet was er een volumeverandering van respectievelijk 0.29 Mm<sup>3</sup> en 0.65 Mm<sup>3</sup> opgetreden. Gecorrigeerd voor deze trends heeft de storting naar schatting geresulteerd in een netto sedimentatie van 0.78 à 1.14 Mm<sup>3</sup>.



Figuur 2.3 Bepaling volumeveranderingen voor het vergunningspolygoon. De volumeverandering is bepaald ten opzichte van T00 meting. Voor 2016 is gebruik gemaakt van de Vaklodingen (VLxxxx), vanaf 2016 van de metingen van de proefstortcampagne (Txx).

## 2. Verandering van dwarsprofielen en doorstroomoppervlak

Veranderingen in dwarsprofiel geeft inzicht in op welke bodemhoogte veranderingen plaatsvinden. Of dit hoog of juist laag in het profiel is. Op basis van de hieruit afgeleide doorstroomoppervlak kan bepaald worden of deze toe- of afneemt. Wanneer een systeem in evenwicht is en het doorstroomoppervlak afneemt, zal het systeem dit willen compenseren met erosie en vice versa.

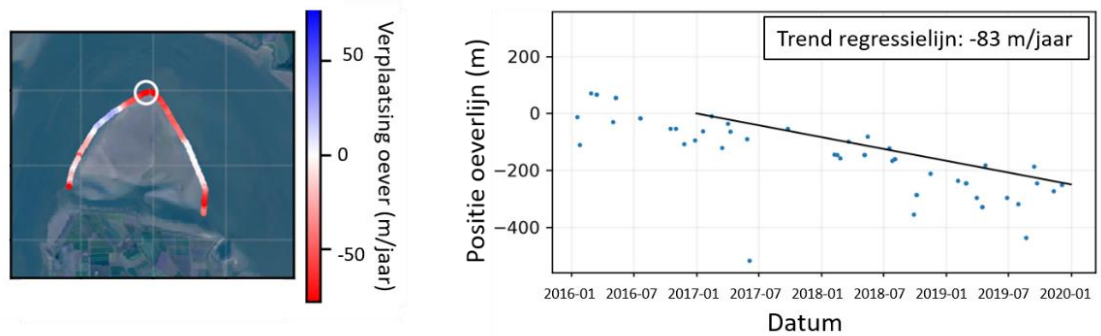


Figuur 2.4 a. Ontwikkeling van het dwarsprofiel, b. locatie dwarsprofiel en c. ontwikkeling van het doorstroomoppervlak.

Een voorbeeld van de bepaling van het doorstroomoppervlak is getoond in Figuur 2.4. Niet alle metingen beslaan de hele dwarsdoorsnede. Voor een consistente analyse van het doorstroomoppervlak is daarom alleen dat deel van de dwarsdoorsnede genomen dat door elke peiling gedekt wordt en zijn alleen de grote dekking metingen gebruikt (D3-metingen, zie Figuur 2.2). Omdat de peilingen van de proefstortcampagne boven de NAP -5 m geen gegevens hebben, is dit deel van het profiel buiten beschouwing gelaten. Voor de bepaling van het doorstroomoppervlak is een gemiddelde waterstand van NAP 0 m aangenomen.

### 3. Analyse satellietbeelden

De bodempeilingen geven alleen de bodemverandering onder NAP -5 m NAP weer. Om in te schatten wat er boven NAP -5 m NAP gebeurt zijn satellietbeelden geanalyseerd. Hieruit kan de locatie van de waterlijn worden afgeleid, zie Figuur 2.5. Omdat er frequent opnamen worden gemaakt, wordt het effect van de variatie van de waterlijn ten gevolge van het getij uitgemiddeld. Vervolgens wordt een trendlijn bepaald, waaruit kan worden afgeleid met welke snelheid de waterlijn zich verplaatst over een bepaalde periode.



Figuur 2.5 Methode om per locatie op de oever (links) de positie van de waterlijn te bepalen (rechts).

## 2.4 Resultaten

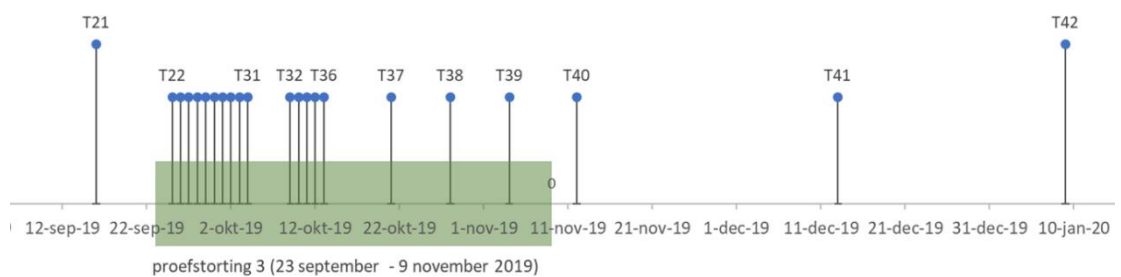
Hieronder worden de resultaten besproken van analyse ten aanzien van de initiële verspreiding (§2.4.1), uitruiming van de put (§2.4.2) en de verspreiding van sediment buiten de put (§0). Elke paragraaf toont eerste de analyse en sluit af met een discussie en conclusie.

### 2.4.1 Initiële verspreiding tijdens het storten

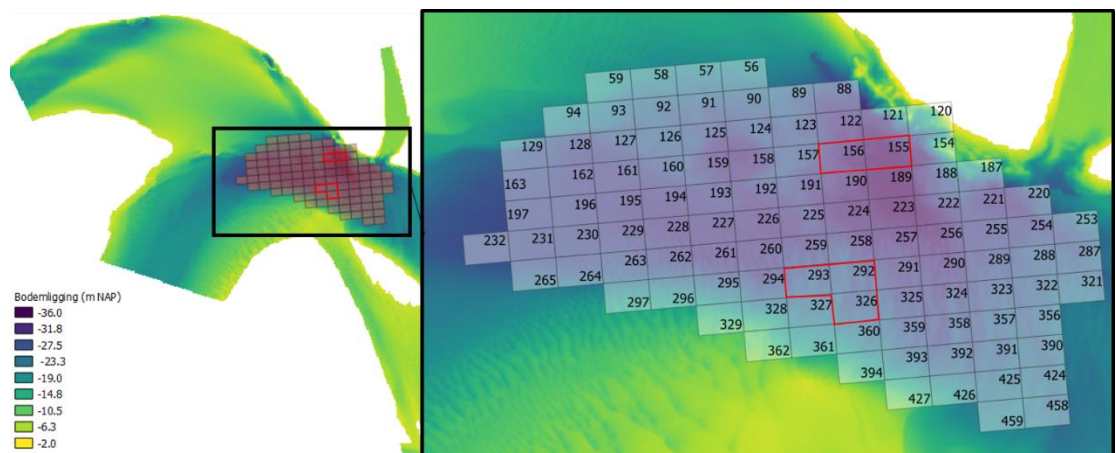
#### 2.4.1.1 Analyse

Het in kaart brengen van de initiële verspreiding tijdens het storten is gedaan voor de laatste proefstortcampagne, omdat er toen veelvuldig is gemeten tijdens het storten. Tijdens deze proefstorting (23 september - 9 november 2019) zijn er 17 peilingen uitgevoerd, waarvan dagelijks tussen 23 september en 4 oktober en tussen 9 en 13 oktober, zie Figuur 2.6. Deze metingen hadden een gemiddelde dekking (D2, zie Figuur 2.2).

Tussen 23 september en 6 oktober (proefstort 3a) is daarbij 0.3 Mm<sup>3</sup> sediment in stortvakken 155 en 156 gestort, tussen 7 oktober en 9 november (proefstort 3b) is er 0.7 Mm<sup>3</sup> in stortvakken 292, 293 en 326 gestort. Een overzicht van de stortvakken is gegeven in Figuur 2.7.

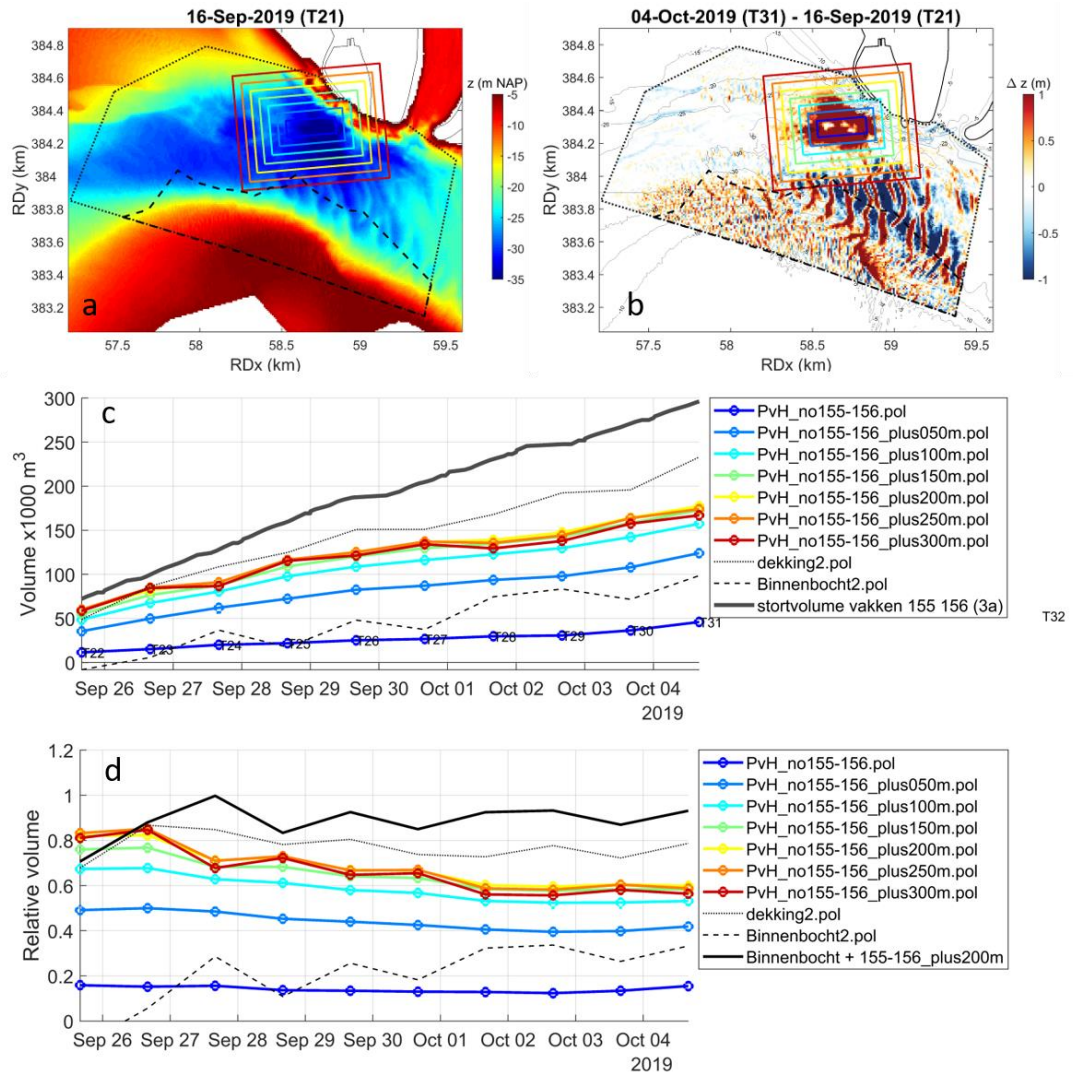


Figuur 2.6 Overzicht metingen tijdens de proefstortcampagne.



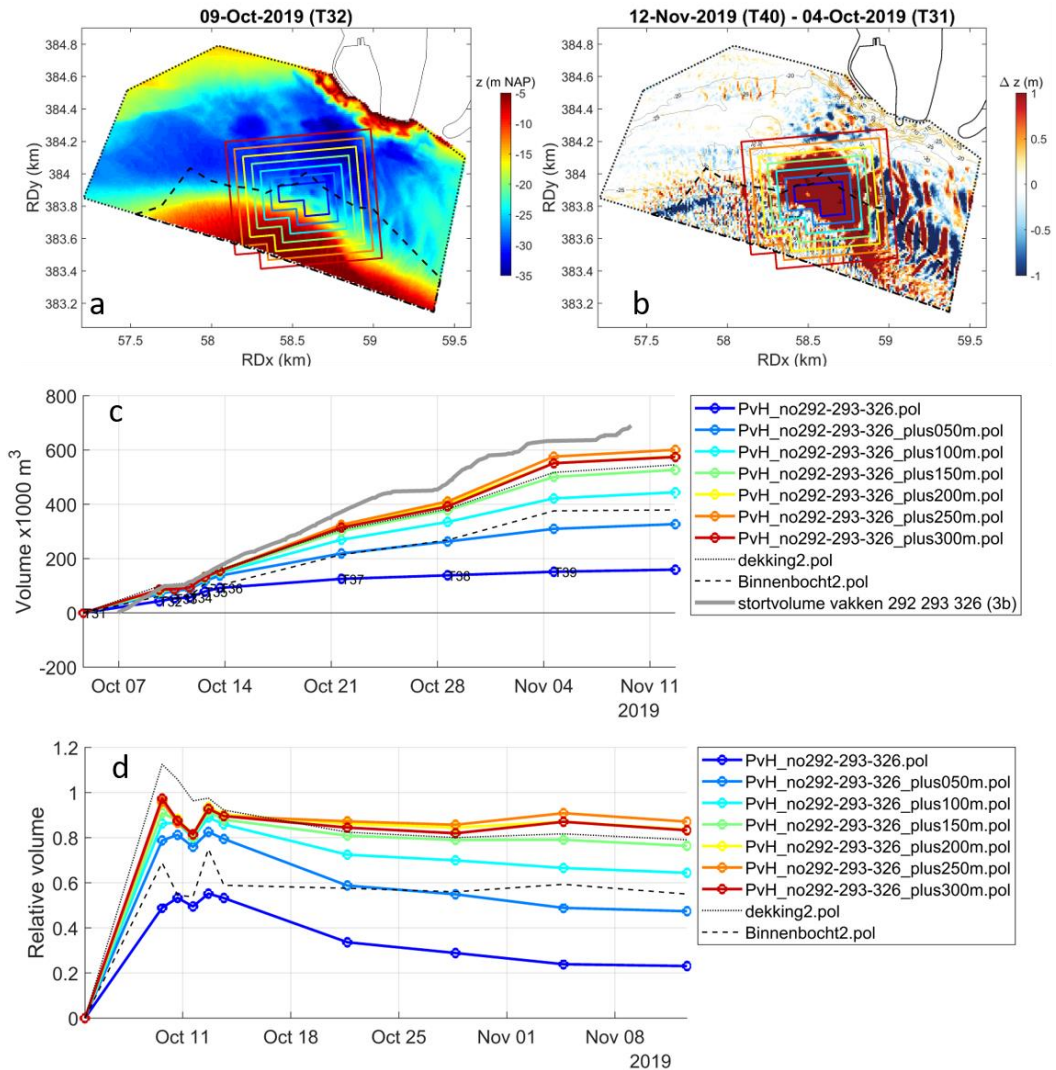
Figuur 2.7 Overzicht van de stortvakken.

In Figuur 2.8 is voor proefstort 3a de verspreiding tot een bereik van maximaal 300 m buiten het stortvak in kaart gebracht. Hieruit blijkt initieel minder dan 20% van het gestorte sediment terechtkomt in de het stortvak. Uit de verschilbodempeiling in Figuur 2.8b blijkt dat er op de stortlocaties zelf juist geen sediment terechtkomt of zelfs een krater ontstaat. Zo'n 80% van het sediment komt in een bereik van 200 m rond het stortvak terecht. Al binnen enkele dagen is dit nog maar 60% van het gestorte sediment. Dit betekent dat een aanzienlijk deel van het sediment al op een tijdschaal van enkele dagen naar elders wordt getransporteerd. Opvallend is dat deze afname samengaat met een toename op de binnenbocht.



Figuur 2.8 a - bodemligging voorafgaand aan de storting en in kleur de verschillende polygonen. b - verschilbodemligging tussen de peiling voor het storten en de laatste peiling van proefstortcampagne 3a. c – volumeverandering per polygoon en het stortvolume, d – relatief volumeverandering ten opzichte van het stortvolume.

Voor het tweede deel van de proefstortcampagne (3b), komt aanvankelijk rond de 50% van het sediment terecht in de stortvakken. Tussen de 80 en 100% van het sediment komt in een bereik van 200 m rond het stortvak terecht. Dit percentage wordt echter beïnvloed door sediment uit het eerste deel van de proefstorting (3a), dat zorgt voor een extra toename van sediment op de binnenbocht, waar ook de stortpolygoonen liggen van het tweede deel van de proefstorting (3b). Daarnaast is het aannemelijk dat het gebied niet alleen extra sediment ontvangt, maar ook de verliezen lager liggen, omdat het stortgebied tegen de binnenbocht aanligt, en dit het gebied is waar waarschijnlijk een deel van het sediment uit de put naartoe gaat. Dit verklaart waarom het gebied van 200 m rond het stortvak de percentuele volumes niet afnemen, zoals bij proefstorting 3a het geval was.

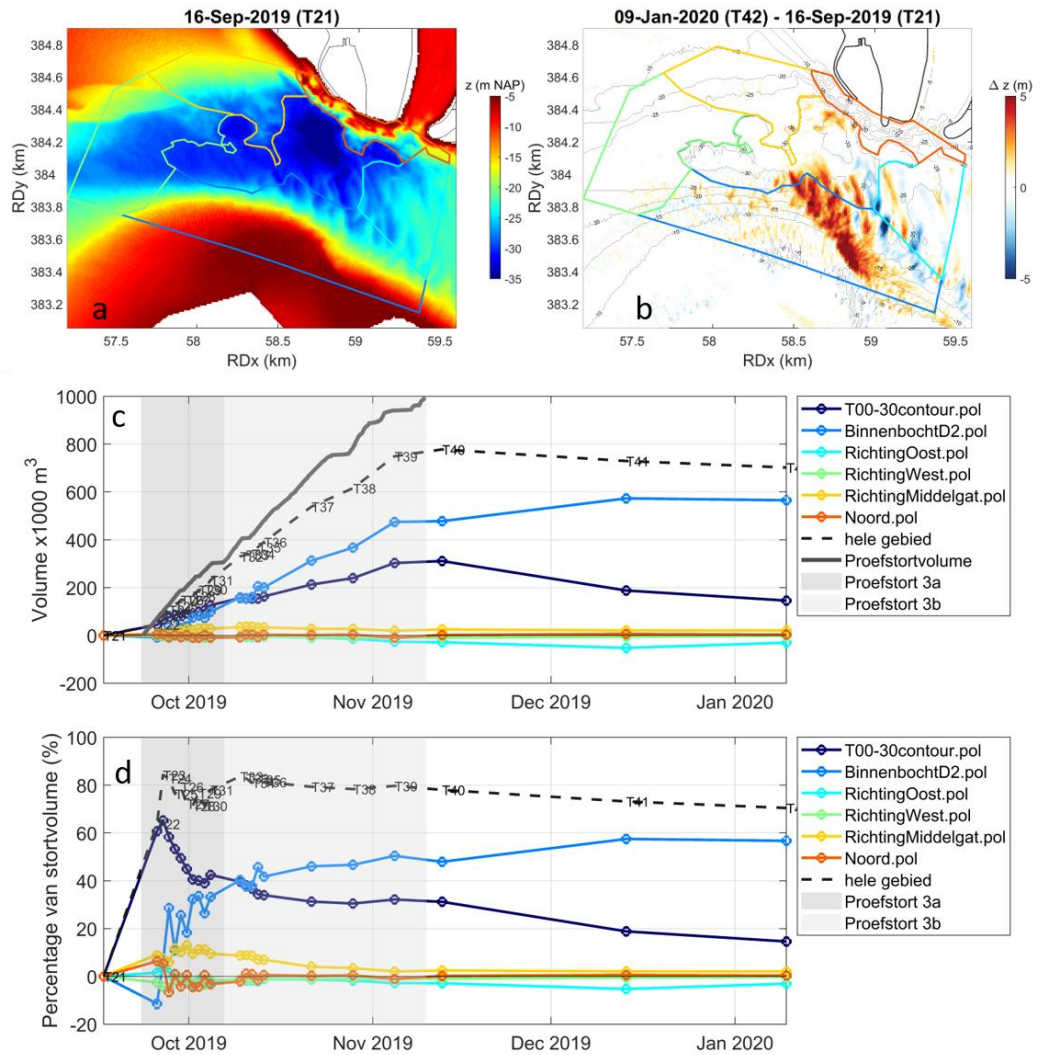


Figuur 2.9 a - bodemligging voorafgaand aan de storting en in kleur de verschillende polygonen. b - verschilbodemligging tussen de peiling voor het storten en de eerste peiling kort na proefstortcampagne 3b. c – volumeverandering per polygoon en het stortvolume, d – relatief volumeverandering ten opzichte van het stortvolume.

Tot slot is het gebied ingedeeld in 6 deelgebieden, zie Figuur 2.10a en b. Het binnenste contour is het diepe deel van de put dat onder -30 m NAP lag tijdens de T00 meting ("T00-30contour"). Daaromheen is het gebied in 5 deelgebieden ingedeeld, namelijk de binnenbocht ("BinnenbochtD2"), het diepe deel van de hoofdgeul ten oosten van de kuil ("RichtingOost"), het diepe deel van de hoofdgeul ten westen van de kuil ("RichtingWest"), het deel van de geul dat de toegang vormt voor het Middelgat ("RichtingMiddelgat") en de noordelijke oever ("Noord"). De volumeveranderingen zijn gepresenteerd in Figuur 2.10c,d. Hieruit blijkt dat aanvankelijk het meeste sediment in het diepe deel van de kuil terecht komt ("T00-30contour"). Al binnen enkele dagen neemt het percentage dat terug te vinden is in het T00-30contour af en is er sprake van een volumetoename op de binnenbocht. Twee maanden na de stortcampagne is de grootste volumetoename te vinden op de binnenbocht. De overige gebieden laten nauwelijks een toename zien of vertonen zelfs een lichte afname.

Omdat tijdens de proefstortcampagne niet het hele gebied is ingemeten, is het niet mogelijk om uitspraken te doen over de verdere verspreiding van het sediment.





Figuur 2.10 a - bodemligging voorafgaand aan de storting en in kleur de verschillende polygoenen. b - verschilbodemligging tussen de peiling voor het storten en de eerste peiling kort na proefstortcampagne 3b. c – volumeverandering per polygoon en het stortvolume, d – relatieve volumeverandering ten opzichte van het stortvolume.

#### 2.4.1.2 Discussie en conclusies

**Verlies van sediment tijdens het storten (minuten – uren):** Tijdens het storten treden er initiële verliezen op van naar schatting 10 à 20%. Dit sediment bereikt de bodem rond de stortvakken (straal van 300 m) niet. Aannemelijk is dat tijdens het storten de fijne fracties met de getijstroom worden meegevoerd en zich over een veel groter gebied verspreiden. Deze hypothese is eerder genoemd in Huisman e. a. (2018) en wordt ondersteund door het feit dat de korrelgrootte in de beun fijner is ( $D_{50} \approx 170 \mu\text{m}$ ) dan het sediment dat direct na storten op de bodem terug te vinden is ( $D_{50} \approx 290 \mu\text{m}$ ) (Plancke e.a. 2019).

Tijdens het eerste deel van de campagne wordt 80% teruggevonden op de bodem, tijdens het tweede deel tot 100%. Dit hogere percentage wordt verklaard uit het feit dat een deel van het sediment uit het eerste deel van de proefstortcampagne zich tijdens het tweede deel van de campagne verplaatst naar het tweede stortgebied. Hierdoor lijkt de sedimenttoename 100% van het gestorte sediment te zijn, maar in werkelijkheid zal dit lager liggen. De verliezen worden daarmee geschat op 10 à 20%.

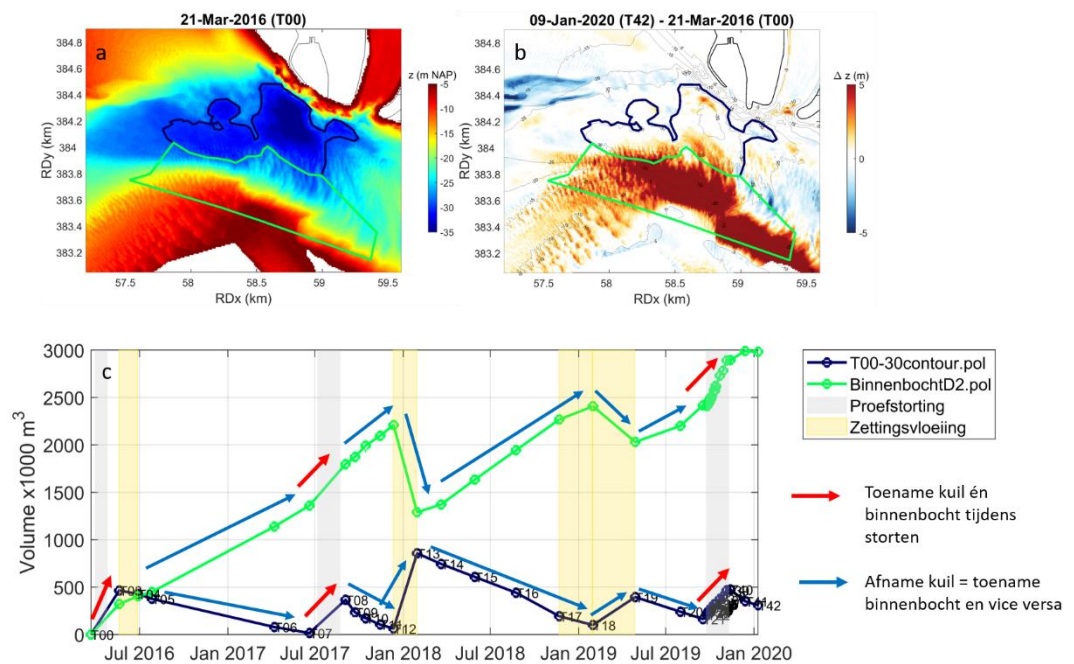
**Verplaatsing van sediment tijdens het storen (dagen):** Al binnen enkele dagen verplaatst rond de 20% van het sediment zich uit het bereik van het stortvak en komt waarschijnlijk op de binnenbocht terecht. Tijdens het tweede deel van de proefstort is een dergelijke verplaatsing niet waargenomen, omdat het stortvak al tegen de binnenbocht aanligt en het sediment daar blijft. Er zijn geen aanwijzingen dat substantiële hoeveelheden zich in de andere richtingen verplaatsen.

**Involed locatie stortvak:** Tijdens deze campagne is op twee verschillende locaties gestort. Het eerste deel ( $0.3 \text{ Mm}^3$ ) is nabij de toegang van het Middelgat gestort, het tweede deel ( $0.7 \text{ Mm}^3$ ) tegen de binnenbocht aan. Op basis van de beschikbare metingen kon niet worden vastgesteld of er bij de storting nabij het Middelgat ook meer sediment naar het Middelgat gaat, omdat tijdens de campagne het Middelgat zelf niet is ingemeten. Daarnaast zijn de gestorte volumes te klein om tot meetbare verschillen in sedimentatie van het Middelgat te leiden. Omdat sediment zich uit de kuil richting de binnenbocht verplaatst, blijft bij een storting tegen de binnenbocht aan het sediment langer in de buurt van het stortvak.

## 2.4.2 Uitrusten van de put

### 2.4.2.1 Analyse

Voor het analyseren van het uitrusten van de put zijn alle metingen met dekking 2 en 3 gebruikt. De volumeveranderingen zijn gepresenteerd in Figuur 2.11. Tijdens storten is er sprake van een toename in de kuil en op de binnenbocht. Na het storten ruimt de kuil uit en neemt de binnenbocht in volume toe. Tijdens een zettingsvloeiing schuift sediment van de binnenbocht af en belandt weer terug in de kuil. Daarna ruimt de kuil weer uit en neemt het volume op de binnenbocht weer toe. De snelheid van het uitrusten van de put verschilt per keer



Figuur 2.11 a - bodemligging voorafgaand aan de proefstortcampagne en in kleur de polygonen. b - verschilbodemligging tussen voor de drie proefstoringen (T00) en na (T42). 3b. c – volumeverandering voor het diepste deel van de put en de binnenbocht.

Uit de volumeveranderingen binnen de -30 m contourlijn blijkt dat het sediment na elke storting of grote zettingsvloeiing weer helemaal of grotendeels uit dit diepste deel van de put verdwijnt. De snelheid waarmee dit gebeurt varieert tussen de  $1130 \text{ m}^3/\text{dag}$  en de  $3030 \text{ m}^3/\text{dag}$ , zie Tabel 2.1. Over kortere tijdspanne ruimt de kuil soms sneller leeg. De hoogst gemeten uitrustingsnelheid is

6000 m<sup>3</sup>/dag. Met betrekking tot de variatie in snelheden is het belangrijk op te merken dat de snelheid is afgeleid uit de peilingen. Indien tussen twee peilingen door een zettingsvloeiing optreedt, die hersteld is vóór de tweede peiling, heeft dit een vertragend effect op het uitruimen en is de werkelijke snelheid van uitruiming hoger. Dit is ook een mogelijke verklaring voor de geobserveerde variatie in snelheden.

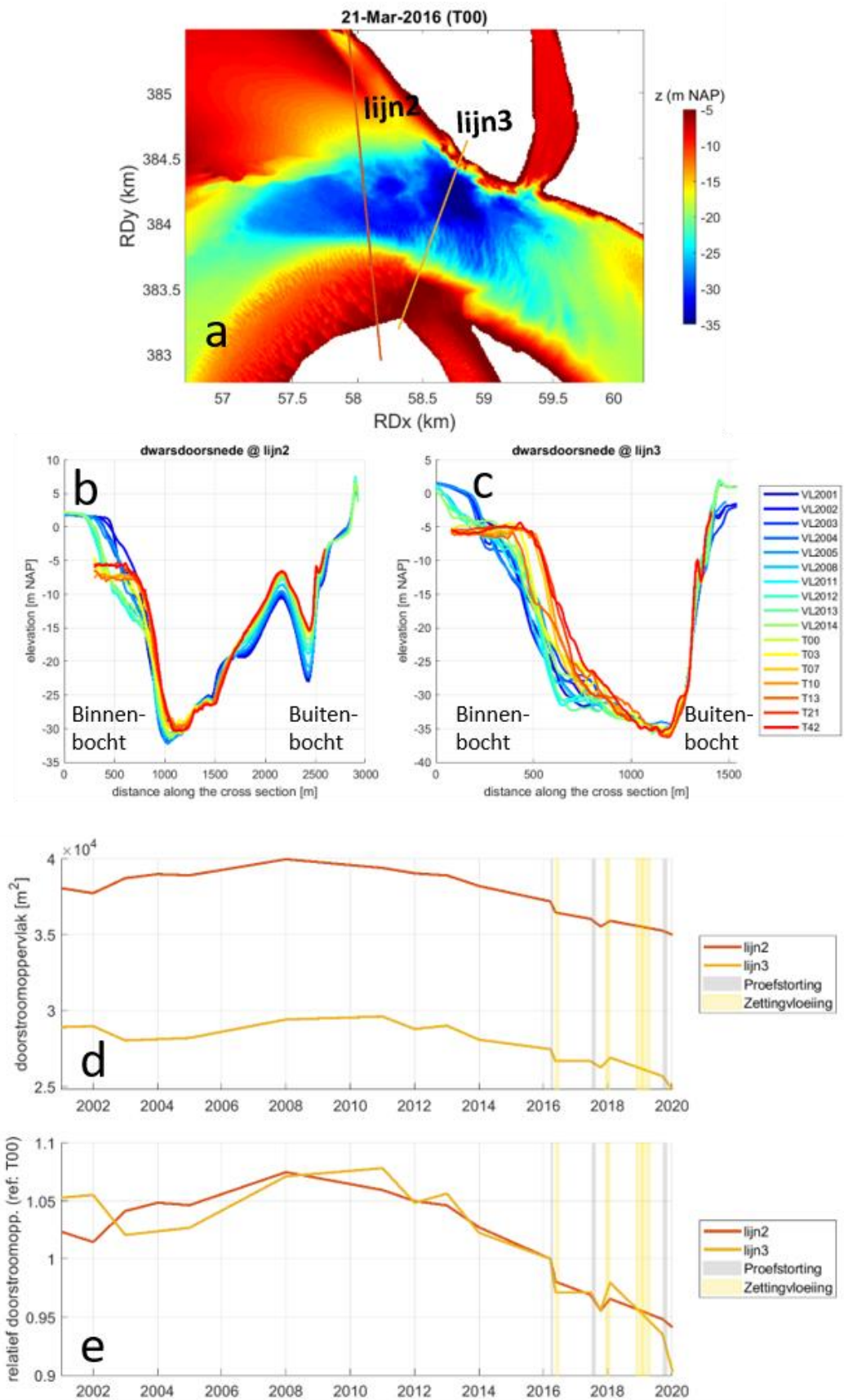
Tabel 2.1 Snelheid waarmee sediment uit het diepste deel (-30 m NAP contour) verdwijnt.

	Volumeverandering	Snelheid [m <sup>3</sup> /dag]	Snelheid [Mm <sup>3</sup> /jaar]
<b>Na proefstort 1</b>	0.45 Mm <sup>3</sup> /396 dagen	1130	0.41
<b>Na proefstort 2</b>	0.30 Mm <sup>3</sup> /100 dagen	3030	1.11
<b>Na zettingsvloeiing 2018</b>	0.76 Mm <sup>3</sup> /366 dagen	2070	0.75
<b>Na zettingsvloeiingen 2019</b>	0.23 Mm <sup>3</sup> /141 dagen	1640	0.60
<b>Na proefstort 3</b>	0.17 Mm <sup>3</sup> /58 dagen	2850	1.04
<b>Maximaal geobserveerde uitruimsnelheid (T08 – T09)</b>	0.13 Mm <sup>3</sup> /20 dagen	6600	2.41

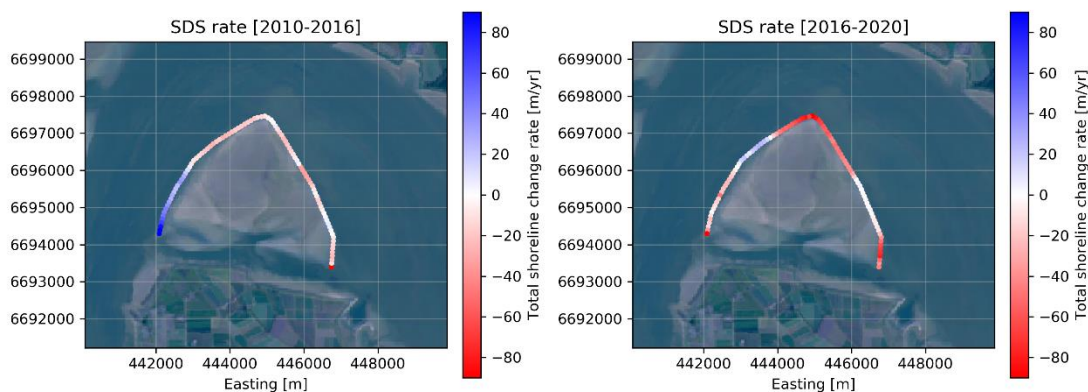
Tot slot lijkt de kuil steeds iets minder goed uit te ruimen. Dit heeft te maken met dat door de uitbreiding van de binnenbocht er ook een toename van sediment in het deel van de kuil nabij de binnenbocht optreedt, zie Figuur 2.11b. Uit dit figuur blijkt tevens dat er ter hoogte van de kuil op de binnenbocht sedimentatie optreedt, maar er geen erosie optreedt in de buitenbocht. Gevolg hiervan is dat het doorstroomoppervlak afneemt. Om te kwantificeren hoeveel het doorstroomoppervlak veranderd, is voor een tweetal dwarsdoorsneden de verandering van het dwarsprofiel en doorstroomoppervlak in kaart gebracht, zie Figuur 2.12. De dwarsprofielen tonen hoe voorafgaand aan de stortcampagne het hooggelegen deel van de binnenbocht (> -15 m NAP) is geërodeerd. Sinds de proefstortingen is de binnenbocht aan het aanzanden. Afhankelijk van de locatie gebeurt dit met name bovenin het profiel (-15 m NAP tot – 5.5 m NAP) of over het hele profiel. Hoe de bodem zich boven de -5.5 m NAP heeft ontwikkeld kan op basis van de proefstortpeilingen niet bepaald worden, omdat boven dit peil geen data beschikbaar is. Voor dwarsdoorsnede 2 vindt er in de buitenbocht en toegangsgoed tot het Middelgat aanzanding plaats. Deze trend was al aanwezig voor de proefstorting. De buitenbocht van dwarsdoorsnede 3 is stabiel.

Het doorstroomoppervlak van beide doorsneden neemt al sinds 2008 à 2010 af. Sinds de proefstorting neemt het doorstroomoppervlak versneld af met 5 à 10% verlies ten opzichte van de T00 meting. Belangrijk om op te merken is dat het hier gaat om een verlies van het doorstroomoppervlak onder de -5.5 m NAP. Uit satellietbeelden blijkt dat de noordelijke put van de plaatrand van Ossensisse sinds de stortingen met 75 à 90 m/jaar is landwaarts is opgeschoven, zie Figuur 2.13. Over 4 jaar tijd betekent dit een verschuiving van 300 à 380 m. Voor de proefstortingen (2010-2016) was er nauwelijks sprake van erosie. Als aangenomen wordt dat de erosie gelijkmatig is opgetreden tussen NAP -5 m en NAP 0 m, dan betekent dit dat 1650 à 2000 m<sup>2</sup> doorstroomoppervlak is bijgekomen, tegenover ~2700 m<sup>2</sup> aan verlies in dwarsdoorsnede 3. Dit is dezelfde orde van grootte en suggereert dat een groot deel van het verlies onder NAP -5.5 m gecompenseerd wordt door erosie bovenin het profiel. In dat geval verandert het doorstroomoppervlak nauwelijks. Indien het doorstroomoppervlak wel afneemt, bijvoorbeeld door herhaaldelijke stortingen of minder erosie dan hierboven geschat, dan nemen de stroomsnelheden toe en wordt verwacht dat de snelheid waarmee de put kan uitruimen ook toeneemt.

Bovenstaande is een grofstoffelijke analyse, maar geeft een eerste inschatting van de trends die optreden en de orde grootte van het effect op het doorstroomoppervlak. Voor gedetailleerdere schattingen zijn aanvullende data nodig van de bodemhoogte boven NAP -5.5 m.



Figuur 2.12 a - bodemligging voorafgaand aan de proefstortcampagne en in kleur de dwarsprofielen. b – ontwikkeling dwarsprofiel “lijn 2”. c – ontwikkeling dwarsprofiel “lijn 3”. d – ontwikkeling doorstroomoppervlak in de tijd. e – ontwikkeling doorstroomoppervlak in de tijd, relatief ten opzichte van T00.



Figur 2.13 verplaatsing van de oeverlijn in m/jaar voor de periode 2010-2016 (links) en 2016-2020 (rechts).

#### 2.4.2.2 Discussie en conclusies

Uit de analyse blijkt dat de put na elke storting grotendeels leegt. De snelheden variëren tussen de 0.4 en 1.1 Mm<sup>3</sup> per jaar. Tijdelijk zijn grotere uitruimsnelheden geobserveerd van maximaal 2.4 Mm<sup>3</sup> per jaar. Gezien het feit dat over langere perioden de snelheden nooit boven de 1.1 Mm<sup>3</sup>/jaar zijn uitgekomen, is het de vraag of er capaciteit is om veel meer dan 1 Mm<sup>3</sup>/jaar uit te ruimen. Het doorstroomoppervlak in de put onder NAP -5.5 m neemt langzaam af. Dit lijkt echter gecompenseerd te worden door erosie hogerop in het profiel. In dat geval verandert het doorstroomoppervlak nauwelijks. Indien het doorstroomoppervlak wel afneemt, bijvoorbeeld door herhaaldelijke stortingen of minder erosie dan geschat op basis van de satellietbeelden, dan nemen de stroomsnelheden toe en wordt verwacht dat de snelheid waarmee de put kan uitrusten ook toeneemt.

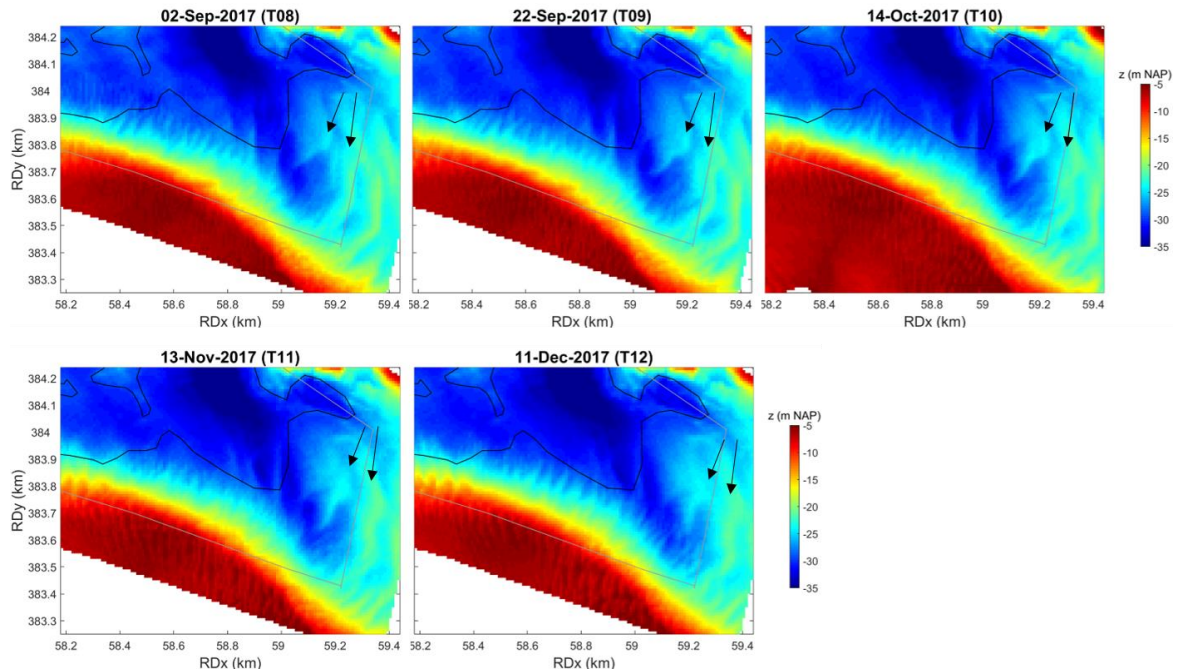
Bij het legen is er sprake van een sterke put-binnenbocht interactie. Tijdens het storten neemt het volume zowel in de put als op de binnenbocht toe. Na het storten, ruimt de put uit en neemt de binnenbocht verder toe in volume. Tijdens een zettingsvloeiing komt dit sediment weer gedeeltelijk terug in de put, waarna de put weer uitrustt en er op de binnenbocht weer sedimentatie optreedt. Hoewel het niet kon worden vastgesteld, lijkt het aannemelijk dat door te toegenomen sedimentatie op de binnenbocht, zettingsvloeiingen ook in intensiteit of grootte toe gaan nemen. Er zullen zich namelijk vaker steile hellingen van losgepakt zand voordoen.

## 2.4.3 Verspreiding van sediment buiten de put

### 2.4.3.1 Algemene observaties uit bodempeilingen

#### Bodemtransport van west naar oost

Uit de analyse van de bodempeilingen blijkt dat de bodemvormen en andere verstoringen zich getijgemiddeld van west naar oost verplaatsen. Dit blijkt het duidelijkst uit de hoogst frequente peilingen T8 – T12, waarbij gemiddeld elke maand gepeild werd, zie Figuur 2.14. De snelheid van migratie van de bodemvormen is ~100 m in 3 maanden, dat wil zeggen ongeveer 1 m/dag.

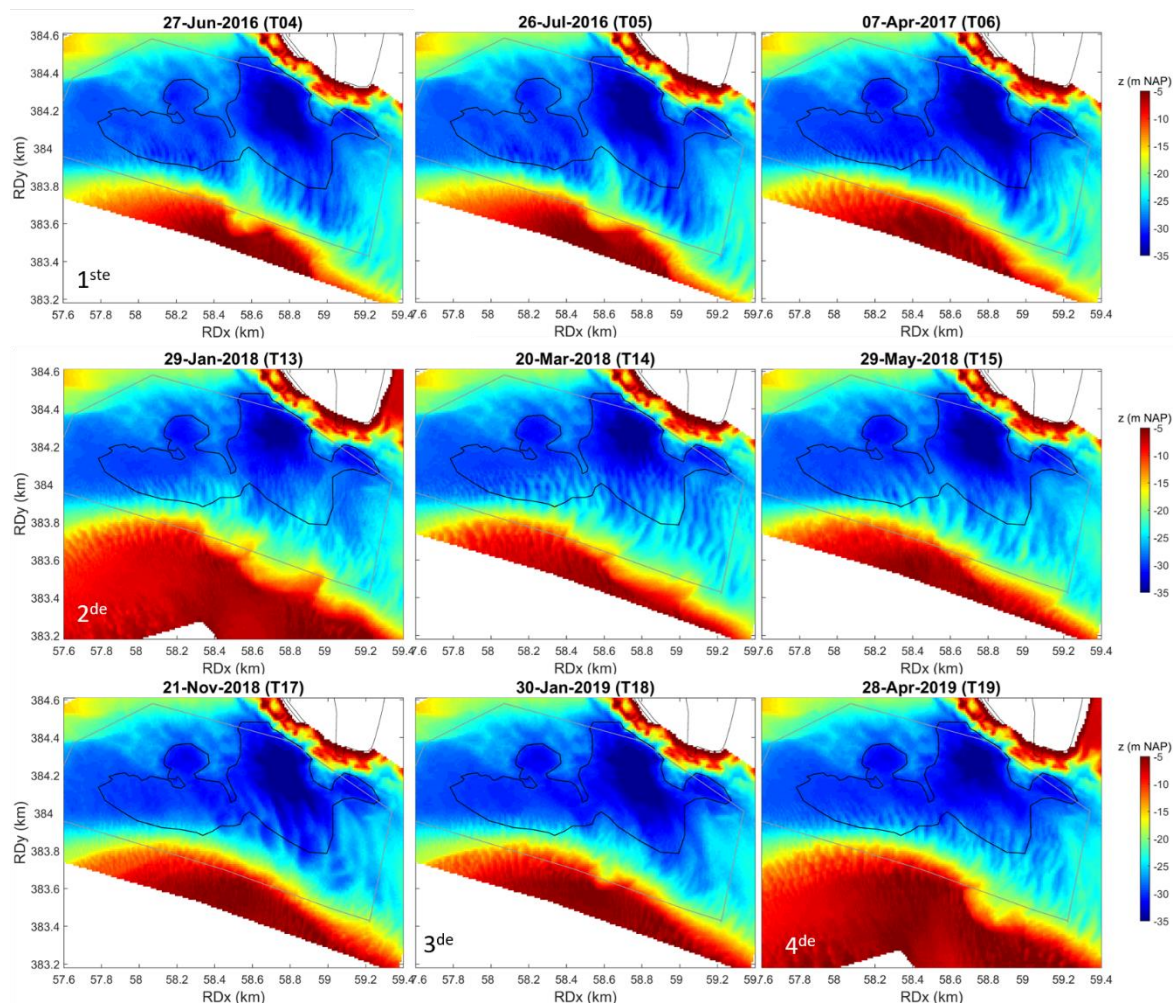


*Figuur 2.14 Bodempeilingen T08 tot en met T12, waarbij is ingezoomd op het zuid-oostelijke deel van de put. Te zien is hoe de bodemvormen migreren van west naar oost. De peilen wijzen twee migrerende structuren aan.*

#### Zettingsvloeiingen

Gedurende de proefstortcampagne zijn vier zettingsvloeiingen waargenomen, zie Figuur 2.15. De eerste waargenomen zettingsvloeiing trad op tussen 19 mei 2016 (T03) en 27 juni 2016 (T04). Na een maand is de binnenbocht gedeeltelijk hersteld (T05) en ergens voor 7 april 2016 (T06) volledig hersteld. De 2<sup>de</sup> en grootste zettingsvloeiing van 1.2 Mm<sup>3</sup> trad op tussen 11 december 2017 (T12) en 29 januari 2018 (T13). Hoewel in mei 2018 (T15) het grootste deel is aangevuld, is 21 november 2018 (T17) de eerste peiling waarop het volledig hersteld lijkt te zijn. Op de eerstvolgende peiling van 30 januari 2019 (T18) is een kleine zettingsvloeiing te zien, welke binnen 3 maanden hersteld is, maar meteen werd opgevolgd door een nieuwe zettingsvloeiing, zoals te zien in de peilingen van 28 april 2019 (T19).

Samengevat zijn er vier zettingsvloeiingen waargenomen, waarvan de grootste (1.2 Mm<sup>3</sup>) binnen 1 jaar is hersteld en de kleinste binnen 3 maanden.



Figuur 2.15 Bodempeilingen waarop de zettingsvloeiingen te zien zijn.

### Sedimentatie en erosie voor en na proefstortcampagne

Om inzicht te krijgen in de sedimentatie- en erosiepatronen voor en na storten zijn de verschilpeilingen geanalyseerd. Een overzicht van alle verschilpeilingen is te vinden in Bijlage A.1.

De trends zijn grofstoffelijk in te delen in 3 perioden:

1. Voor proefstortcampagne "jaren 0": 2001 – 2010
2. Voor proefstortcampagne "jaren 10": 2010 – 2016
3. Proefstortcampagne: 2016 – 2019.

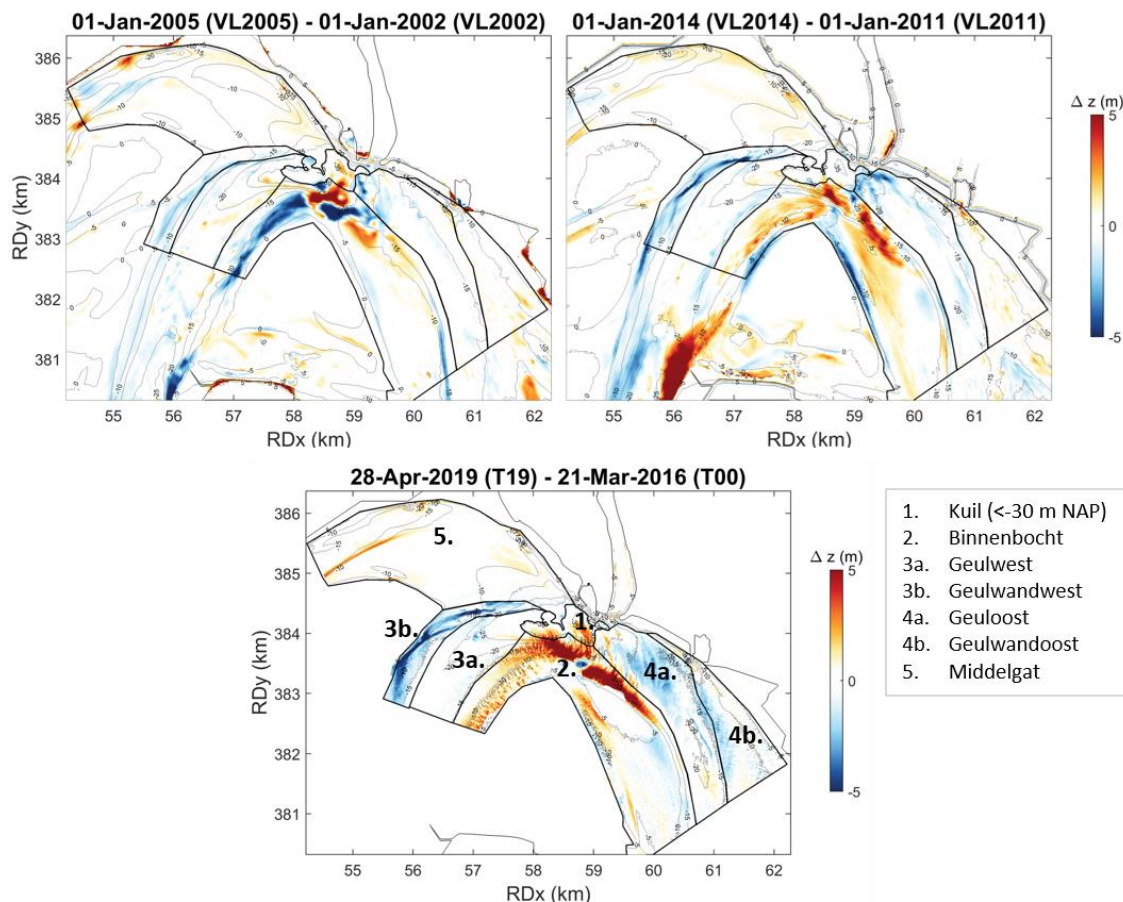
In Figuur 2.16 is per periode een representatieve verschilkaart getoond. De geobserveerde trends worden per deelgebied (put, binnenbocht, Overloop van Hansweert, Zuidergat en Middelgat) weergegeven in Tabel 2.2.

Daarbij vallen de volgende veranderingen op:

1. Vóór de proefstortcampagne is de bodemligging in de put stabiel, sinds het storten is er sprake van sedimentatie in het zuidelijke deel van de put.
2. De sedimentatie op de binnenbocht neemt toe.
3. In de buitenbocht van de westelijke geul treedt erosie op die in de loop van de tijd versterkt.
4. In de hoofdgeul oostelijk van de put neemt de erosie toe en in het ondiepe deel van de geul vindt er een omslag plaats van sedimentatie naar erosie.
5. Op het westelijke deel van de binnenbocht vindt er al vóór de proefstortingen een omslag plaats van erosie naar sedimentatie. Dit valt samen met het storten in SH41, een

stortlocatie nabij het gat van Ossensisse, waar sinds 2011 sediment wordt gestort, zie Figuur 2.17 en Figuur 2.18. Te zien is hoe het sediment van de storting via geulrand richting het noorden beweegt, over de binnenbocht. De snelheid waarmee het front verplaatst is 400 à 800 m per jaar, dat wil zeggen 1 à 2 m/dag. Dit komt overeen met de in §2.4.3.1 geobserveerde snelheid van de verplaatsing van bodemvormen. Dit betekent dat dit sediment pas na enkele jaren de binnenbocht even ten westen van de put bereikt. Dit contrasteert met het feit dat de omslag al vanaf 2012 wordt waargenomen. Mogelijk dat een deel van het gestorte sediment via suspensietransport al veel sneller richting het noorden verplaatst en zodoende nagenoeg meteen bijdraagt aan de sedimentatie op het westelijke deel van de binnenbocht.

Om de geobserveerde trends te kwantificeren worden in de volgende paragraaf de volumeveranderingen per deelgebied in kaart gebracht.

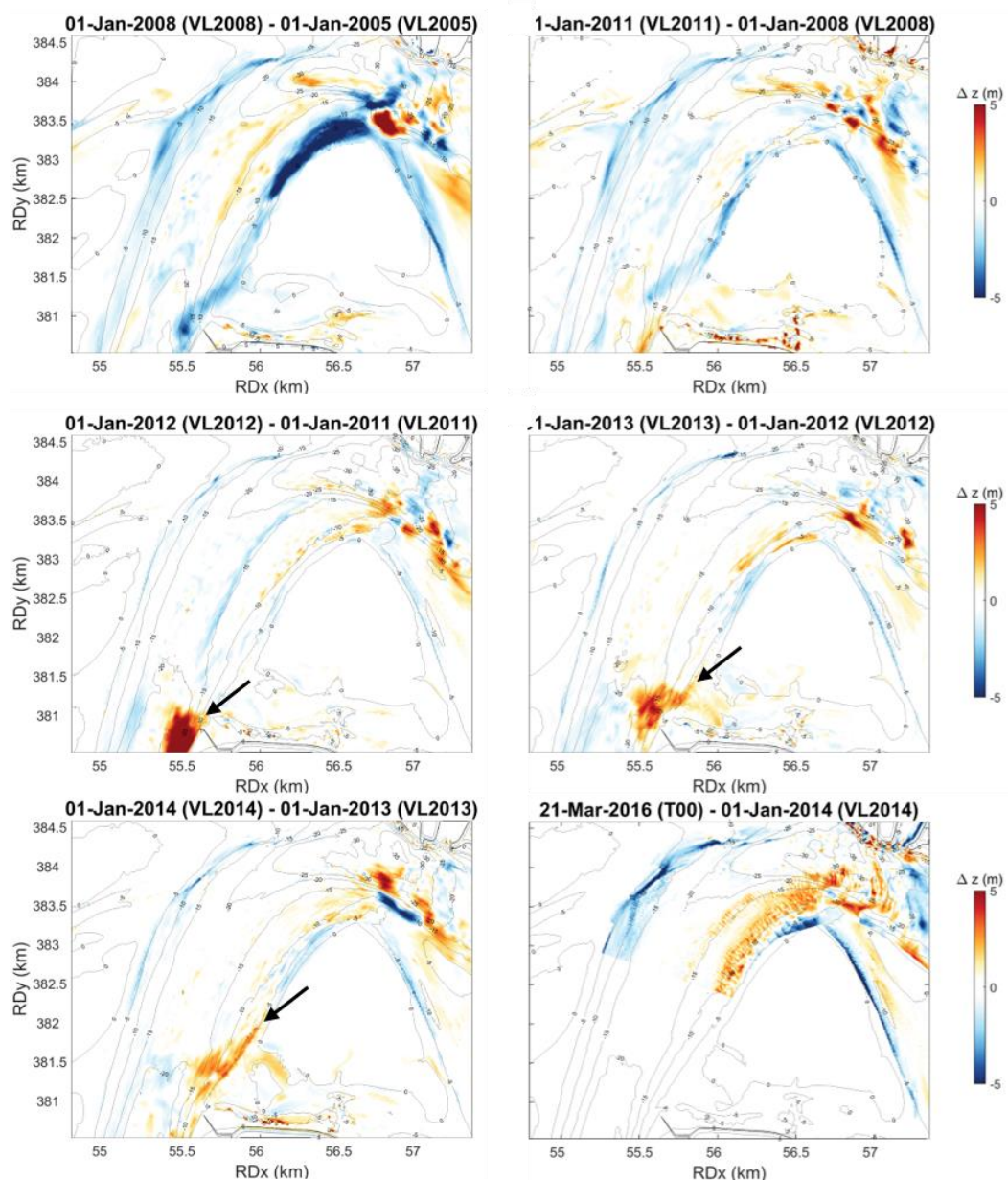


Figuur 2.16 Representatieve verschilpeilingen voor de periode voor proefstorting – “jaren 0”, periode voor storting - “jaren 10”, periode van proefstortingen. Bodemveranderingen zijn geplot voor een periode van 3 jaar, omdat dit overeenkomt met de huidige duur van de proefstortcampagne.

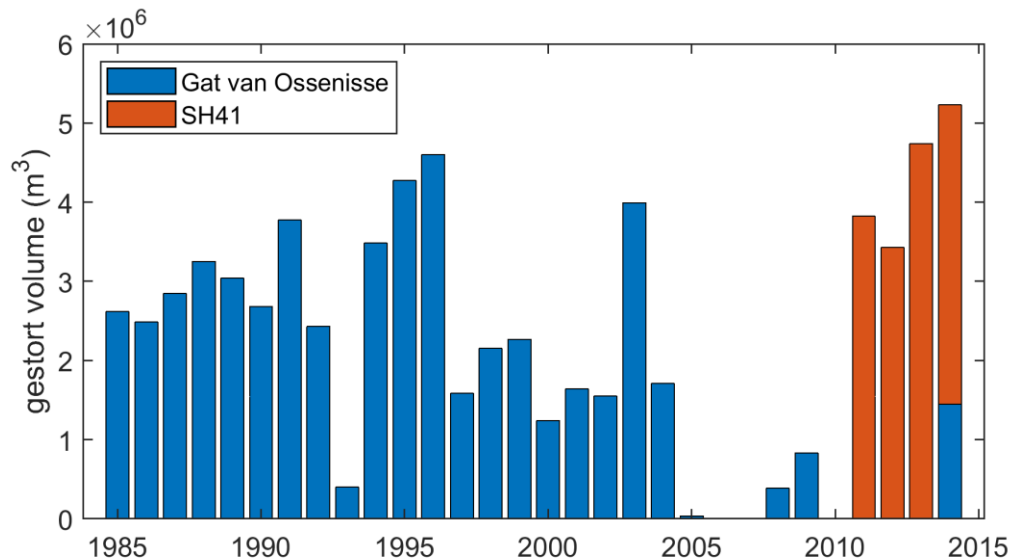
Tabel 2.2 Overzicht van de trends per deelgebied en per periode. In rood zijn de veranderingen weergegeven.

Gebied		2001 – 2010	2011 – 2016	2016 – 2019
1.	Put	stabiel	stabiel	sedimentatie
2.	Binnenbocht	erosie	sedimentatie	sedimentatie
	West	erosie & sedimentatie	erosie & sedimentatie	versterkte sedimentatie
	Midden	lichte sedimentatie	sedimentatie	versterkte sedimentatie
3.	West	stabiel	stabiel	stabiel
	Geul	erosie	versterkte erosie	versterkte erosie
	Geulwand			
4.	Oost	lichte erosie	lichte erosie	erosie
	Geul	lichte sedimentatie	lichte sedimentatie	erosie
	Geulwand			
5.	Middelgat	lichte sedimentatie	lichte sedimentatie	lichte sedimentatie





Figuur 2.17 Overzicht verschilpeilingen waarop de geleidelijk omslag te zien van erosie naar sedimentatie op het westelijke deel van de binnenbocht en te zien is hoe een grote hoeveelheid gestort sediment richting het noorden migreert.



Figuur 2.18 Overzicht stortvolumes in Gat van Ossensisse en stortpolygoon SH41 (Schrijvershof and Vroom 2015). Beide locaties overlappen grotendeels. Sinds 2011 wordt er jaarlijks ruim 4 Mm<sup>3</sup> sediment gestort. Dit was voorheen gemiddeld half zoveel (1985 - 2004) of bijna niets (2005 - 2010).

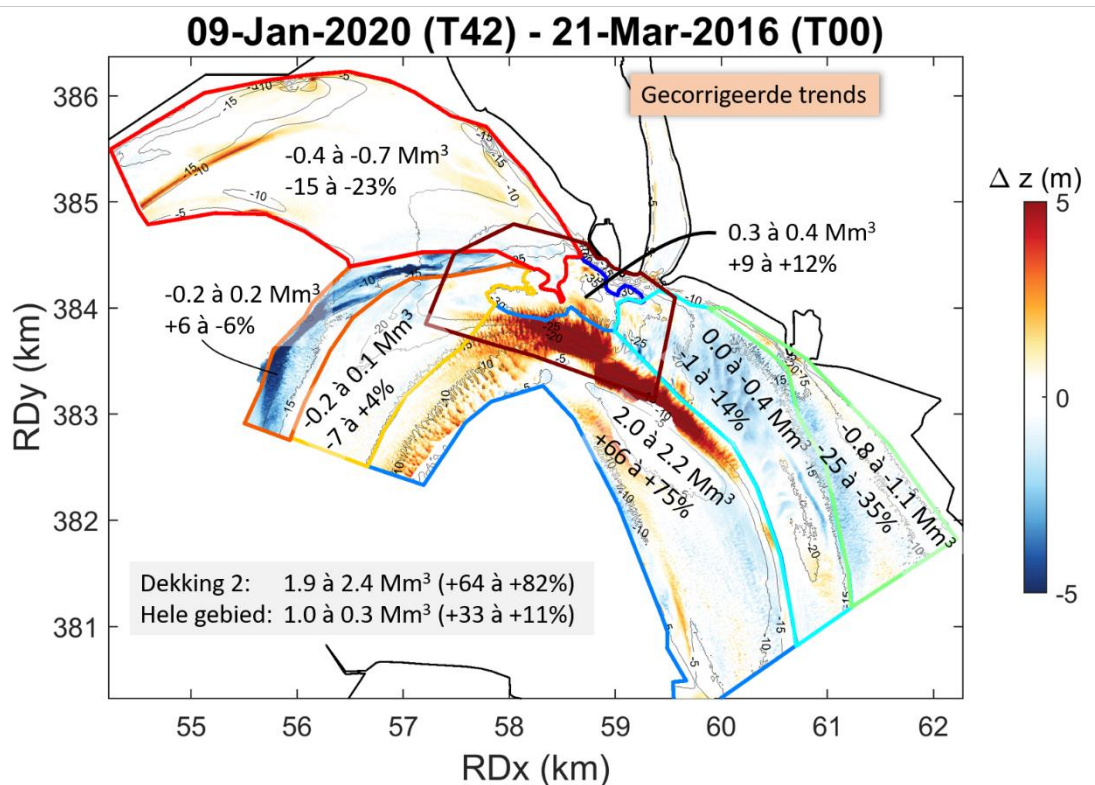
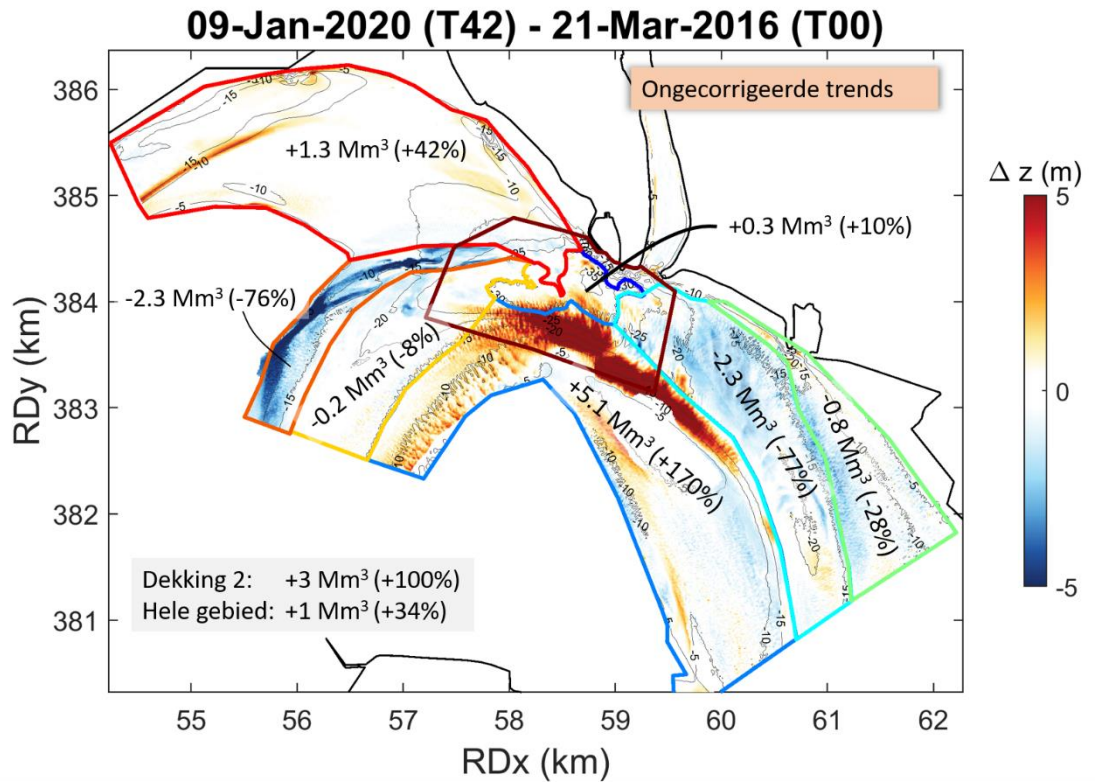
#### 2.4.3.2 Kwantificatie volumeveranderingen hele gebied

In Figuur 2.19 zijn de volumeveranderingen bepaald per deelgebied, uitgedrukt in Mm<sup>3</sup> en in percentage van het totaal gestort volume (3 Mm<sup>3</sup> tussen T00 en T42). Om een indicatie te krijgen van hoeveel sedimentatie of erosie er heeft opgetreden ten gevolge van de storting, zijn in het onderste figuur de trends tussen T00 en T42 gecorrigeerd voor de trends tussen 2011-2016 en 2014-2016. Dit geeft realistischer getallen, zoals onder meer blijkt uit de toenames op de binnenbocht. Zonder correctie, heeft hier een toename plaatsgevonden van ruim 5 Mm<sup>3</sup>, ruim 2 Mm<sup>3</sup> meer dan er gestort is. Dit sediment kan dus onmogelijk alleen van de storting afkomstig zijn. Na trendcorrectie ligt de geschatte toename ten gevolge van de storting rond de 2 Mm<sup>3</sup>.

Deze analyse is herhaald voor de periode T00 – T07 (1<sup>ste</sup> proefstort) en T00 – T21 (1<sup>ste</sup> en 2<sup>de</sup> proefstort). De geobserveerde trends zijn samengevat in Tabel 2.3.

Uit deze analyse blijkt dat:

- De put grotendeels leegt.
- Het meeste sediment op de binnenbocht terecht komt (66 à 100%), maar de hoeveelheid afneemt in de tijd.
- Er een andere bron van sedimenttoevoer is naar de binnenbocht, vermoedelijk uit SH41.
- De hoofdgeul oostelijk van de put versterkt erodeert, met name het ondiepere deel.
- Er geen significante veranderingen zijn in de westelijke geul.
- Het Middelgat minder sterk aanzandt dan voor de stortingen.
- Het meeste sediment in gebied “dekking 2” blijft, maar de hoeveelheid die daar terug te vinden is, afneemt in de tijd.
- In het hele gebied (dekking 3) sprake is van een beperkte toename in sedimentatie. Een deel van de sedimentatie wordt dus gecompenseerd door erosie of baggerwerk.



Figuur 2.19 Bovenste figuur: absolute volumeveranderingen per deelgebied tussen T00 en T42 in  $Mm^3$  en in percentage van het gestort volume ( $3 Mm^3$ ). Onderste figuur: gecorrigeerde volumeveranderingen per deelgebied, het eerste getal geeft daarbij de volumeverandering gecorrigeerd voor de trend tussen 2014-2016 weer en het tweede getal de volumeverandering gecorrigeerd voor de trend tussen 2011-2016.

Tabel 2.3 Overzicht van de trends per deelgebied en per periode. In rood zijn de veranderingen weergegeven.

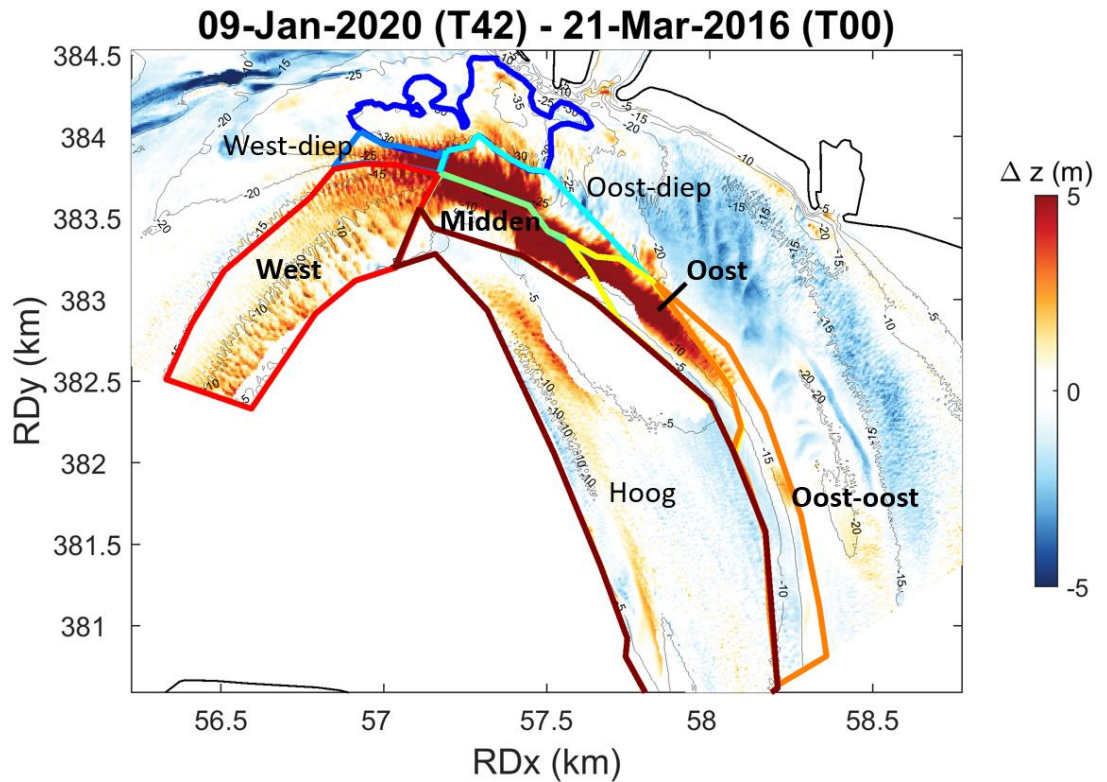
Gebied	14 mnd na PS1	25 mnd na PS2	2 mnd na PS3	Conclusie
<b>Put</b>	+1 à +3%	+7 à +10%	+9 à +12%	Leegt grotendeels, tijdelijke toenames
<b>Binnenbocht</b>	+88 à +97%	+82 à +94%	+66 à +75%	Meeste sediment komt hier terecht. Aanzanding lijkt af te nemen in de tijd
<b>Geuloost</b>	+5 à -7%	-3 à -21%	-1 à -14%	Sinds PS2 (iets) versterkte erosie
<b>Geulwand oost</b>	-10 à -19%	-36 à -49%	-25 à -35%	Versterkte erosie
<b>Geulwest</b>	-21 à -10%	-10 à +5%	-7 à +4%	Sinds PS2 geen significante trend
<b>Geulwand west</b>	+1 à -12%	+7 à -11%	+6 à -6%	Geen significante toename van de erosie
<b>Middelgat</b>	-7 à -16%	-23 à -34%	-15 à -23%	Afname aanzandende trend
<b>Dekking 2</b>	+107 à +124%	+65 à +90%	+64 à +82%	Meeste sedimentatie in dit gebied. Mogelijk neemt capaciteit af in de loop van de tijd.
<b>Dekking 3</b>	+57 à +35%	+24 à -6%	+33 à +11%	Toename sedimentatie in dit hele gebied, maar een deel van het sediment verdwijnt of blijft in dit gebied, maar wordt gecompenseerd door erosie in ander deel van het gebied.

### 2.4.3.3 Transport richting de binnenbocht

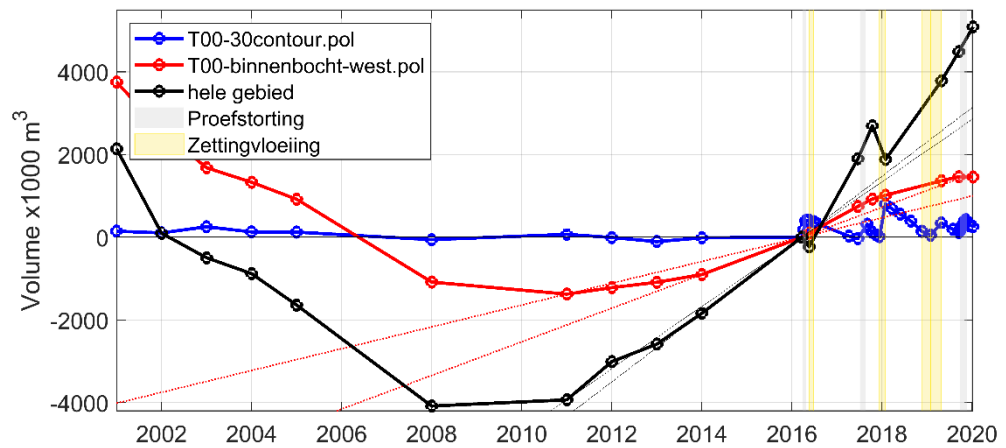
Om de dynamiek van de binnenbocht te analyseren is dit gebied in zeven subdomeinen opgedeeld, zie Figuur 2.20. Voor de subdomeinen die voor het begrip van de sedimentdynamiek op de binnenbocht het meest relevant zijn, worden hieronder de volumeveranderingen nader geanalyseerd. De volumeveranderingen voor de overige subdomeinen zijn weergegeven in Bijlage A.4.

Uit Figuur 2.21 blijkt dat rond 2011 een omslag heeft plaatsgevonden van erosie naar sedimentatie op de gehele binnenbocht. Deze omslag is ook te zien voor het westelijke deelgebied van de binnenbocht. Hoewel dit te maken kan hebben met een natuurlijke omslag, lijkt het aannemelijk dat de omslag wordt veroorzaakt door de stortingen in SH41, zoals besproken in §2.4.3.1. Sinds 2011 wordt jaarlijks ruim 4 Mm<sup>3</sup> sediment gestort. Omdat getijgemiddeld het sediment via de binnenbocht van west naar oost verplaatst, is het aannemelijk dat via bodem- en suspensietransport een deel van het gestorte sediment op de binnenbocht terechtkomt en voor een omslag van erosie naar sedimentatie zorgt.

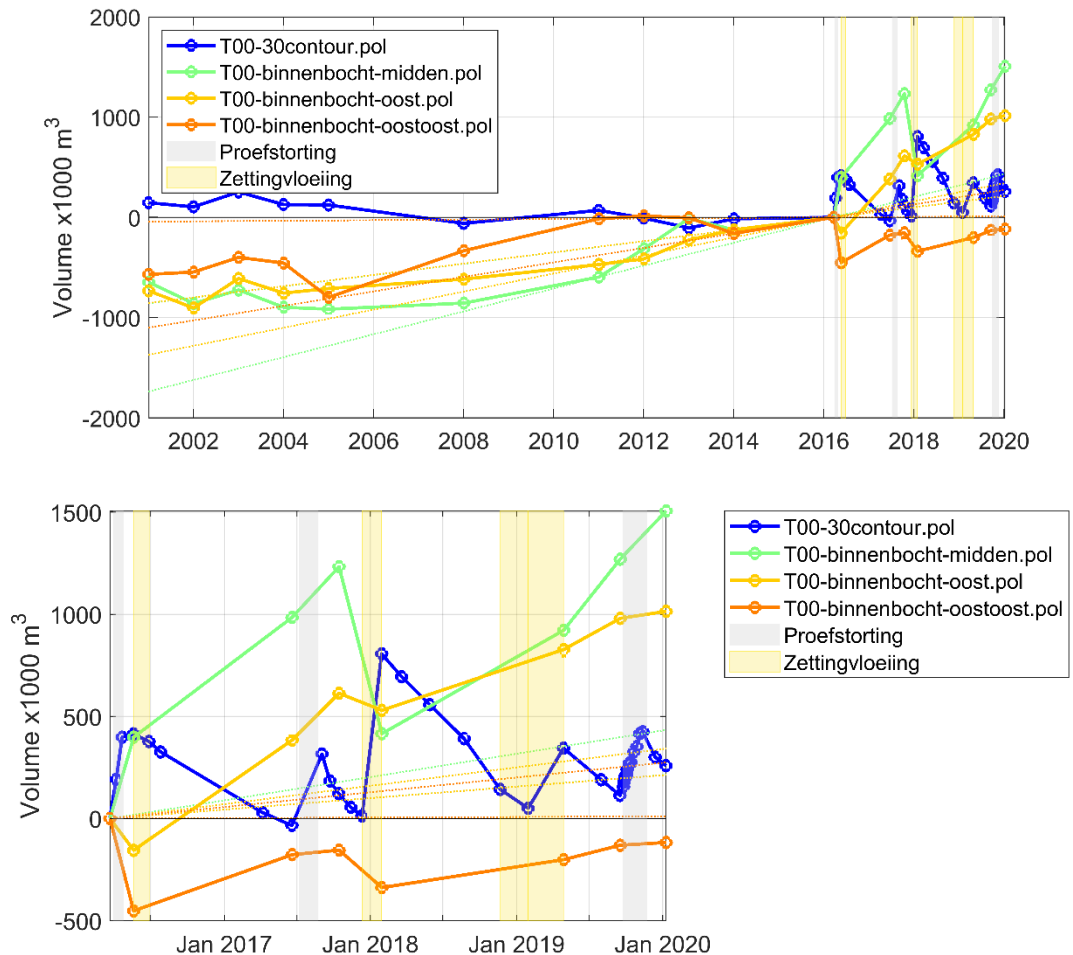
Sinds de proefstortingen is de sedimentatietrend op de gehele binnenbocht toegenomen. Het lijkt niet aannemelijk dat veel van dit sediment op het westelijke deel van de binnenbocht terechtkomt, want de aanzandende trend in dit subdomein neemt sinds de proefstortingen niet significant toe en het sedimenttransport gaat getijgemiddeld van west naar oost.



Figuur 2.20 Indeling binnenbocht en plaatrand in zeven deelgebieden. De deelgebieden die in dit hoofdstuk nader worden geanalyseerd zijn dikgedrukt, namelijk west, midden en oost en oost-oost.



Figuur 2.21 Volumeveranderingen sinds 2001 voor de hele binnenbocht en het westelijke deel van de binnenbocht. De stippellijnen geven de trends over 2011-2016 en 2014-2016 weer.

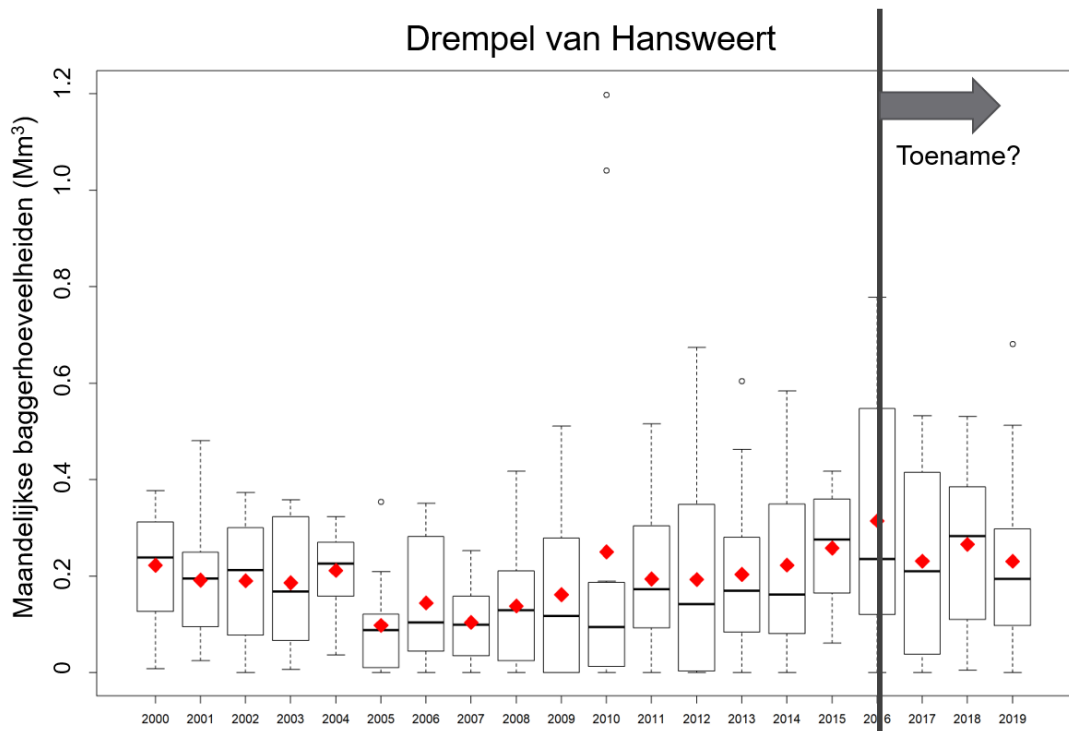


Figuur 2.22 Bovenste figuur: volumeveranderingen sinds 2001 voor het middendeel en de oostelijke delen van de binnenbocht. De stippellijnen geven de trends over 2011-2016 en 2014-2016 weer. Onderste figuur: zoom van de periode van de proefstortingen (2016 - 2020).

In Figuur 2.22 zijn de volumeveranderingen voor subdomeinen midden en oost getoond. In subdomein midden treedt de meeste dynamiek op. Al voor de proefstortingen is dit een dynamisch gebied, waar tussen 2006 en 2013 totaal bijna 1 Mm<sup>3</sup> sedimentatie heeft plaatsgevonden. Waar dit sediment vandaan komt is niet duidelijk. Tussen 2013 en 2016 vindt er nagenoeg geen verandering plaats. Sinds de proefstortcampagne zijn de volumetoenames groter dan de historische toenames (2001- 2016). Uit de analyse in §2.4.2 blijkt dat er een sterke uitwisseling is tussen de put en de binnenbocht. Tijdens het storten neemt de sedimentatie in de put en op de binnenbocht toe. Tijdens het uitruimen van de put neemt het volume in de put af en op de binnenbocht toe. En tijdens een zettingvloeiing neemt het volume op de binnenbocht af en in de put toe. Uit Figuur 2.22 blijkt dat deze uitwisseling met name geldt voor het middendeel van de binnenbocht. Met enige vertraging komt het sediment uit het middendeel ook in het oostelijke deel terecht. Echter, dit sediment schuift niet door naar het meest oostelijke deel ("binnenbocht-oostoost"). Hier is netto over de hele periode zelfs een afname van de sedimentatie te zien. Hoewel het sediment van west naar oost over de binnenbocht migreert, lijkt het er niet op dat het op het meest oostelijke deel van de binnenbocht terechtkomt.

De vraag is of dit op de drempel van Hansweert terecht komt en voor een toename van de baggerinspanningen zorgt. Dit blijkt nog niet uit de baggergegevens, zie Figuur 2.22. Maar gezien het feit dat de hoeveelheden gebaggerd materiaal de afgelopen jaren gemiddeld 2 à 3 keer zo groot is als elke proefstorting, moeten erg grote hoeveelheden op de drempel terecht komen voordat dit

tot merkbare effecten leidt in de baggerhoeveelheden. Indien nu 20% van het sediment op de drempel terecht komt, zal dit leiden tot 0.6 Mm<sup>3</sup> extra baggerbezwaar over 4 jaar tijd. Pas als er meer gestort wordt of voor een langere tijd, kan vastgesteld worden of er sprake is van een toename.



Figuur 2.23 Maandelijks baggerhoeveelheden drempel van Hansweert.

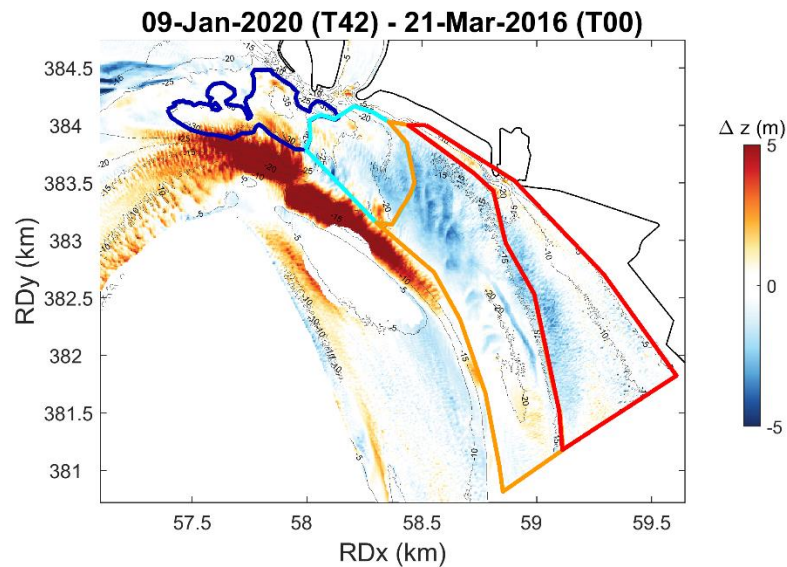
Samengevat:

- Tijdens of kort na storten is er sprake van een significante toename op het middendeel van de binnenbocht. Vermoedelijk komt tijdens de dagen dat er gestort wordt al een aanzienlijk deel van het gestorte sediment op dit deel van de binnenbocht terecht.
- Een groot deel van het sediment uit de Put van Hansweert lijkt in het subdomein midden terecht te komen, van waaruit het of terug de put in vloeit via een zettingsvloeiing of verder oostelijk migreert richting subdomein oost.
- Via de west-oost migratie komt waarschijnlijk een aanzienlijk deel van het in SH41 gestorte sediment op de binnenbocht terecht, waar het zorgt voor een omslag van erosie naar sedimentatie. Via de west-oost migratie komt dit sediment uiteindelijk, net als het sediment uit de Put van Hansweert in subdomeinen midden en oost terecht.
- Door sedimenttoevoer over de binnenbocht uit het westen (vermoedelijk SH41) en de stortingen in de Put van Hansweert, neemt het volume op de gehele binnenbocht toe met 5.1 Mm<sup>3</sup>, naar schatting is ruim 2 Mm<sup>3</sup> daarvan gerelateerd aan de proefstortingen in de Put van Hansweert (totaal 3 Mm<sup>3</sup>).

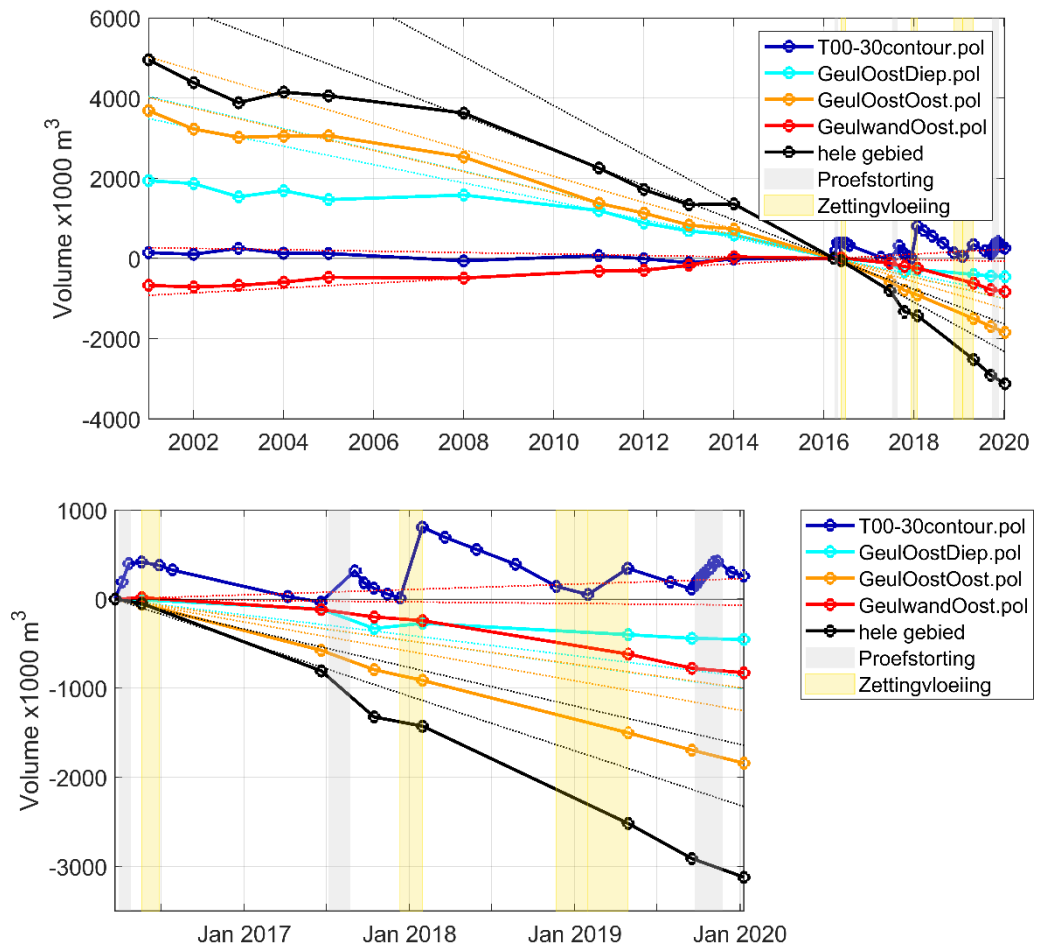
#### 2.4.3.4 Transport richting Zuidergat en drempel van Hansweert

Om de dynamiek richting het Zuidergat en de drempel van Hansweert in kaart te brengen, is dit gebied opgedeeld in 3 subdomeinen, zie Figuur 2.24. Uit de volumeveranderingen gepresenteerd in **Error! Reference source not found.** blijkt dat het diepe deel van de geul tot ~2011 gemiddeld per jaar 0.07 Mm<sup>3</sup>/jaar verliest. Deze trend versterkt geleidelijk naar ~0.25 Mm<sup>3</sup>/jaar tussen 2011 en 2016 en halveert gedurende de proefstortcampagne naar ongeveer 0.13 Mm<sup>3</sup>/jaar. Hoewel de trendverandering sinds de proefstortcampagne niet groter is dan de trendverandering rond 2011, lijkt het wel aannemelijk dat afname van de erosie (gedeeltelijk) veroorzaakt wordt door de

proefstorting. Uit de bodempeilingen blijkt dat sediment via bodemtransport de put uit richting het oosten beweegt (zie §2.4.3.1), dat wil zeggen uit het subdomein van de -30 m NAP contour naar de geul-oost diep contour.



Figuur 2.24 Indeling Zuidergat en Drenpel van Hansweert in drie deelgebieden.

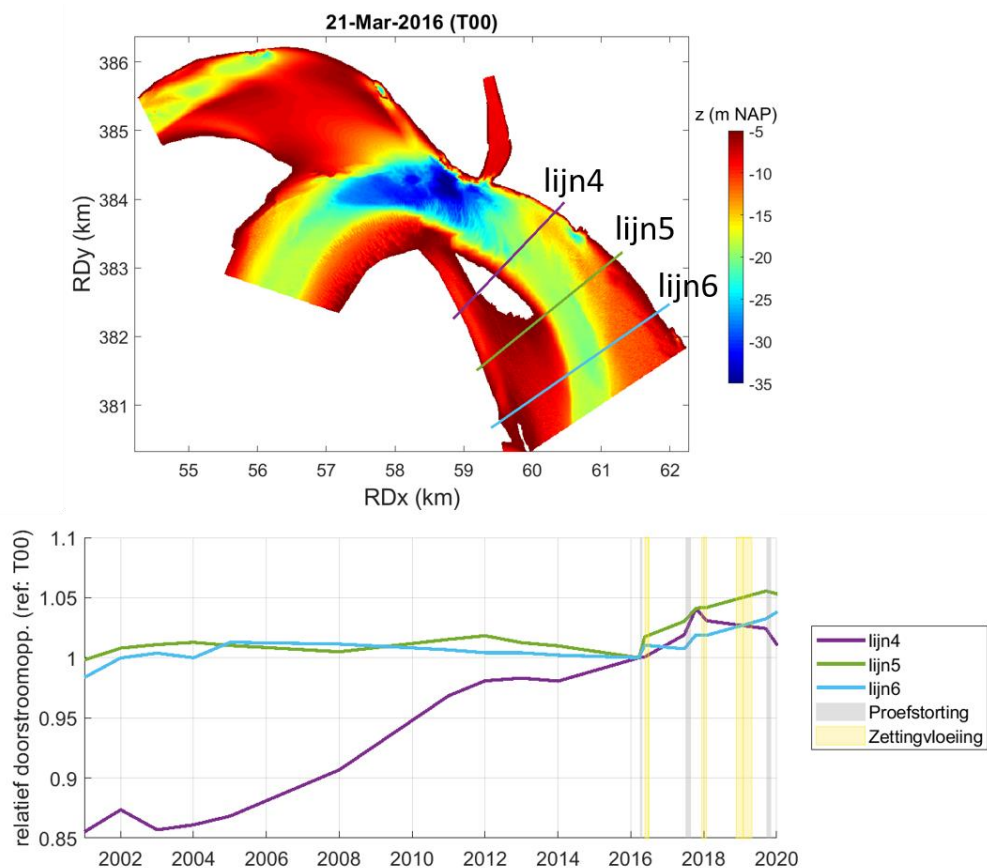


Figuur 2.25 Bovenste figuur: volumeveranderingen sinds 2001. De stippellijnen geven de trends over 2011-2016 en 2014-2016 weer. Onderste figuur: zoom van de periode van de proefstortingen (2016 - 2020).



Er zijn nog geen aanwijzingen dat dit sediment geul oost-oost heeft bereikt. Daar is namelijk sprake van een eroderende trend die in de loop der jaren steeds verder toeneemt en vanaf de proefstortcampagnes enkel een verdere toename laat zien. Mogelijk dat het sediment uit oost-diep het subdomein oost-oost nog niet bereikt heeft. Al met de snelheid van bodemvormen van ~1 m/dag (zie §2.4.3.1) zou het sediment in 3 jaar tijd al een afstand van ruim een kilometer moeten kunnen hebben afgelegd. Dit zou voldoende moeten zijn om in oost-oost aan te komen. Mogelijk dat 1) de hoeveelheid nog onvoldoende is om op zo'n groot domein voor een waarneembare trendbreuk te zorgen, of 2) het sediment vanuit oost-diep de binnenbocht opgestuwd wordt, in plaats van richting oost-oost, of 3) het sediment wordt weggebaggerd. Dit laatste zou moeten blijken uit een toename van de baggervolumes.

Tot slot is er op de geulwand tot 2014 sprake van sedimentatie. Vanaf 2016 slaat dit om naar erosie. Deze omslag wordt mogelijk veroorzaakt door de sedimentatie die optreedt op de binnenbocht, waardoor de geul zich meer richting de buitenkant wil uitbreiden. Andere verklaringen, zoals een natuurlijke omslag, of een omslag ten gevolg van een ander bagger en stortbeleid op andere locaties, zijn ook mogelijk.

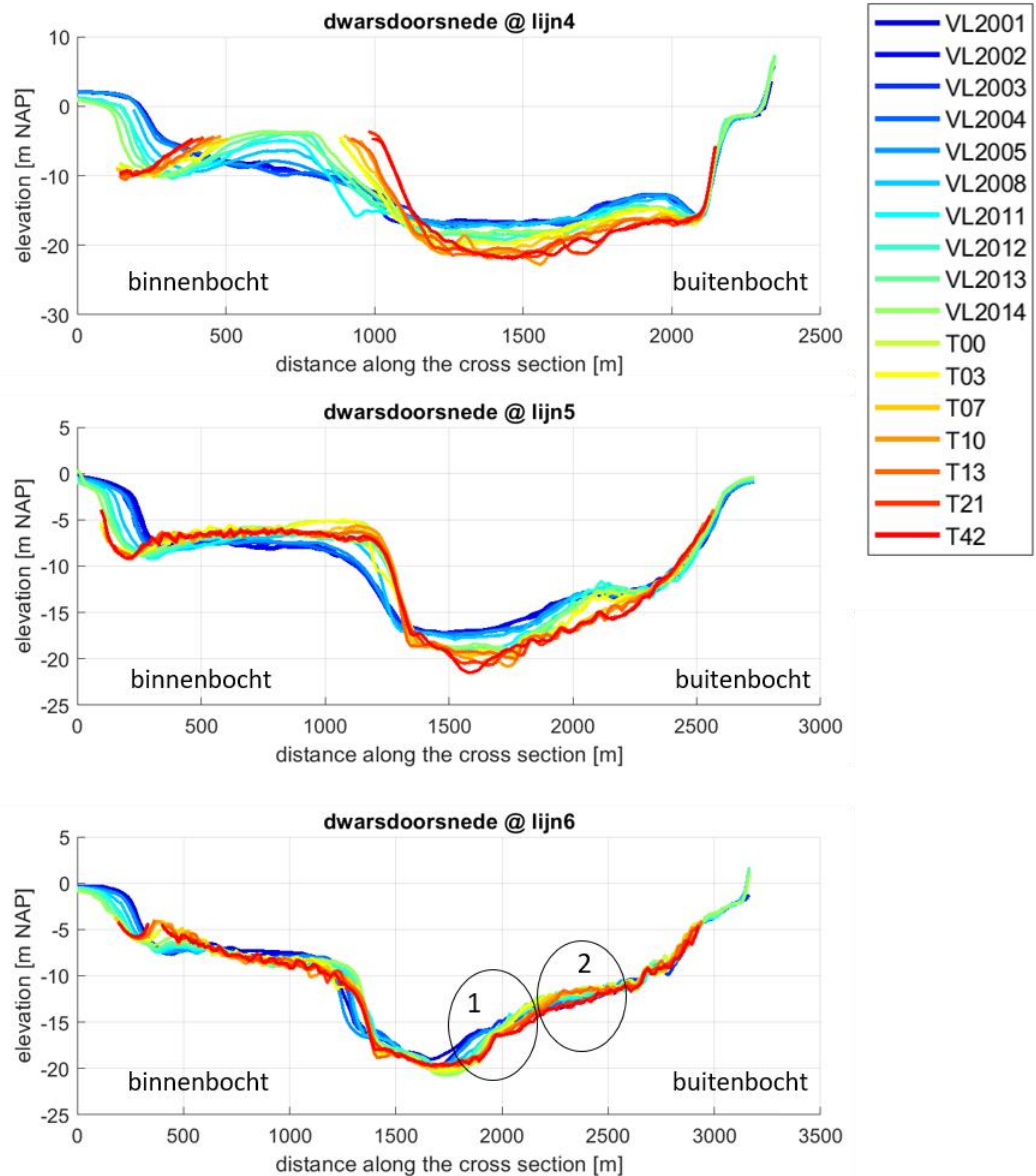


Figuur 2.26 Bovenste figuur: overzicht dwarsdoorsneden. Onderste figuur: ontwikkeling doorstroomoppervlak relatief ten opzichte van het doorstroomoppervlak van T00.

Om meer inzicht te krijgen in op welke bodemhoogte de erosie optreedt, zijn een drietal dwarsprofielen geëvalueerd, zie Figuur 2.26 en Figuur 2.27. Hieruit blijkt dat het doorstroomoppervlak van de profielen toeneemt. Voor dwarsdoorsnede 4 is dit in lijn met de al bestaande trend, voor dwarsdoorsnede 5 en 6 is dit een trendbreuk.

Uit de ontwikkeling van de dwarsprofielen in Figuur 2.27 blijkt dat er bij alle dwarsprofielen sprake is van een uitbouw van de buitenbocht. Deze is het sterkste voor doorsnede 4 en neemt af voor elke opvolgende doorsnede. De erosiegebieden variëren per doorsnede. Bij doorsnede 4 gaat het met name om het diepe deel. Bij doorsnede 5 treedt de erosie op tussen -20 m NAP en -12 m NAP.

Bij doorsnede 6 treedt er erosie op het buitenste deel van de hoofdgeul (aangeduid met "1" in Figuur 2.27) en sinds T13 enige erosie in het ondiepere stuk tussen -12 en -15m (aangeduid met "2" in Figuur 2.27).

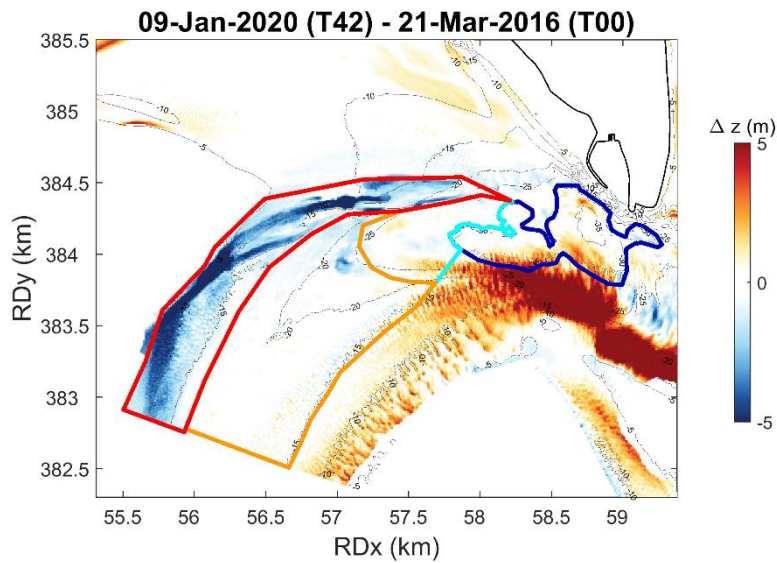


Figuur 2.27 ontwikkeling dwarsprofielen. Locatie zie Figuur 2.26.

#### 2.4.3.5 Transport richting Overloop van Hansweert

Om de dynamiek richting de Overloop van Hansweert in kaart te brengen, is dit gebied opgedeeld in 3 subdomeinen, zie **Error! Reference source not found.** Uit de volumeveranderingen gepresenteerd in **Error! Reference source not found.** en **Error! Reference source not found.** blijkt dat het diepe deel van de geul nauwelijks dynamiek vertoont. Hoewel de netto veranderingen die tijdens de proefstortcampagne optreden vergelijkbaar zijn aan de veranderingen in de periode ervoor, treedt er wel een kleine toename van sediment ( $-0.03 \text{ Mm}^3$ ) op tijdens de eerste en tweede proefstorting. Dit suggereert dat maximaal een paar procent van het gestorte sediment meteen of binnen korte tijd na storting het diepe deel van de Overloop van Hansweert bereikt, maar dit subdomein ook binnen enkele maanden tot een jaar verlaat. Het subdomein "geul west west" is overwegend stabiel, met uitzondering van een sedimentafname tussen 2008-2012. Het grootste deel van de bodem binnen dit domein wordt middels baggeren op diepte gehouden. Dit verklaart de

stabiele bodemligging voor 2008 en na 2012 en ook de afname tussen 2008 – 2012 toen de derde verdieping plaatsvond. Aan de westelijke geulwand is er sprake van erosie die in de loop van de jaren zich versterkt. Sinds 2014 is deze trend stabiel en vertoont geen verdere toe- of afname ten gevolge van de proefstortingen.

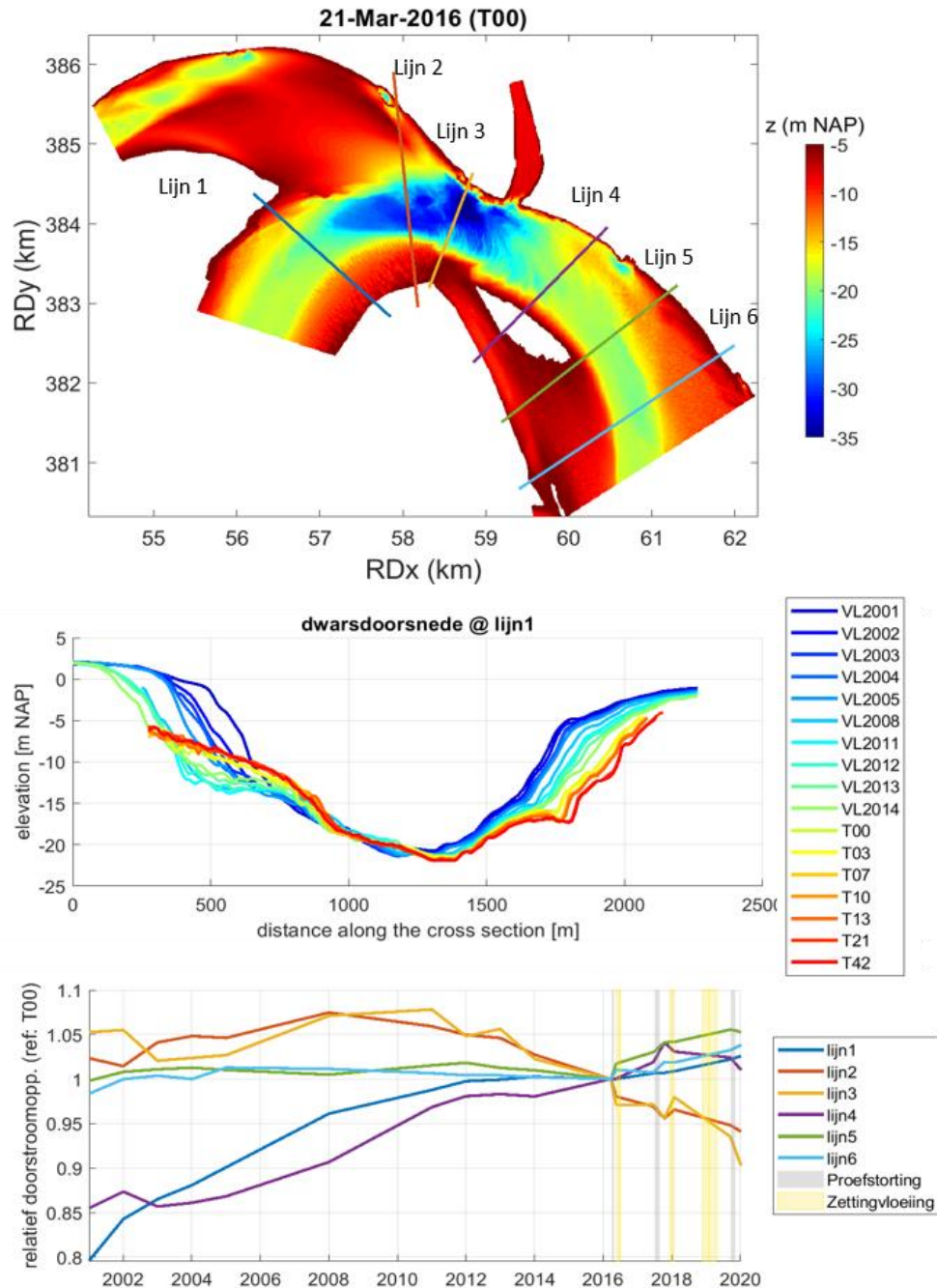


Figuur 2.28 Indeling Overloop van Hansweert in drie deelgebieden.



Figuur 2.29 Bovenste figuur: volumeveranderingen sinds 2001. De stippellijnen geven de trends over 2011-2016 en 2014-2016 weer. Onderste figuur: zoom van de periode van de proefstortingen (2016 - 2020).

Tot slot is ook voor dit deel het doorstroomoppervlak geëvalueerd, zie Figuur 2.30. Hieruit blijkt dat het doorstroomoppervlak toeneemt in de tijd, net als voor de oostelijke hoofdgeul. De erosie op de buitenbocht is dus niet enkel een compensatie van de sedimentatie op de binnenbocht.

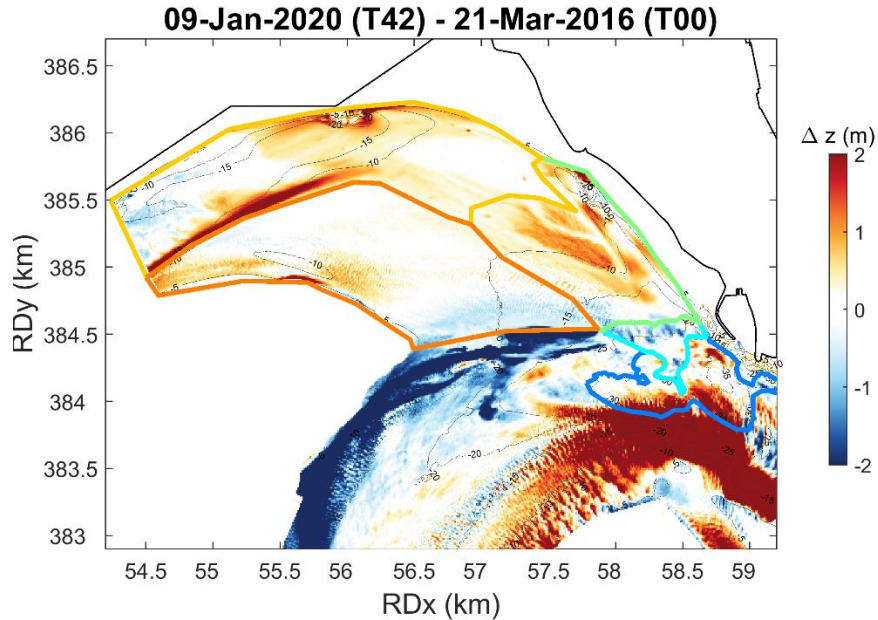


Figuur 2.30 Bovenste figuur: dwarsdoorsneden. Middelste figuur: Ontwikkeling dwarsprofiel 1 in de tijd. Onderste figuur: ontwikkeling relatief doorstroomoppervlak voor alle dwarsdoorsneden.

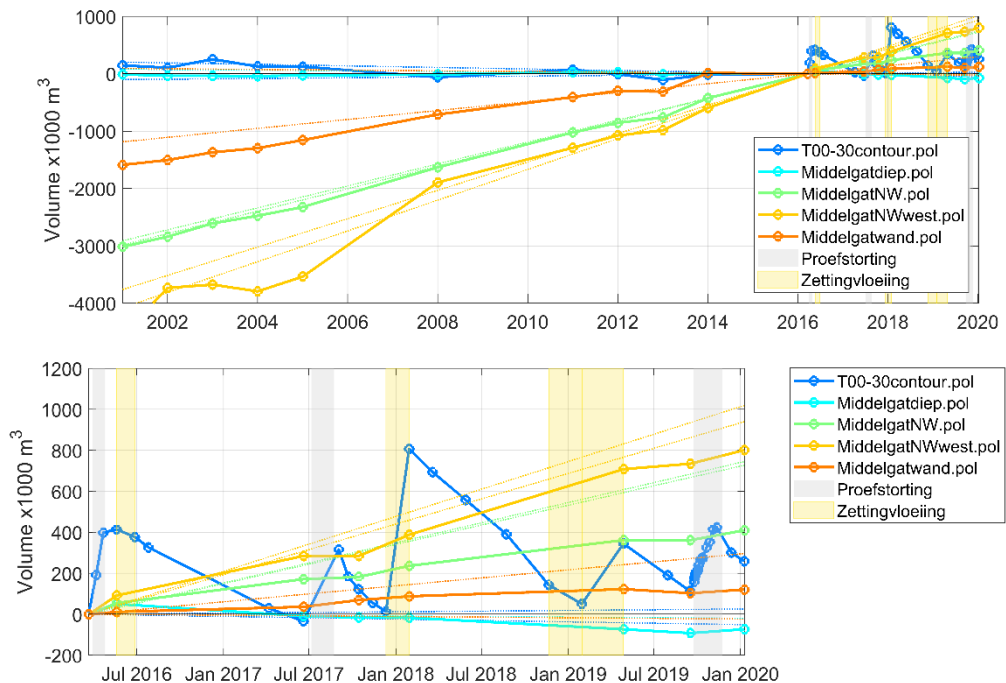
#### 2.4.3.6 Transport richting Middelgat

Voor de evaluatie van de sedimenttransporten richting het Middelgat, is dit gebied opgedeeld in vier subdomeinen, zie Figuur 2.31. Dit zijn het diepe deel (<-20m NAP), het noordwestelijke deel dat aan het diepe deel grenst (Middelgat NW), het meest westelijke deel van het Middelgat (Middelgat NWwest) en het ondiepe deel (Middelgat wand). De volume veranderingen zijn gepresenteerd in Figuur 2.31. Met uitzondering van het diepe deel, is in alle deelgebieden sprake van sedimentatie. Het diepe deel vertoont lichte erosie. Tijdens de proefstortingen neemt het volume in “diep” kort toe met respectievelijk 0.05 Mm<sup>3</sup> en 0.02 Mm<sup>3</sup> voor de eerste en derde proefstorting om vervolgens

weer af te nemen. De netto afname is sterker dan in de periode vóór proefstortingen. In het subdomein “NW”, is er tussen 2001 – 2016 sprake van een stabiele sedimentatietrend van 0.2 Mm<sup>3</sup>/jaar. Tijdens de proefstortcampagne neemt deze af naar ruim 0.1 Mm<sup>3</sup>/jaar. In het subdomein “NWwest” is er ook sprake van een sedimentatietrend, van gemiddeld 0.3 Mm<sup>3</sup>/jaar, welke tijdens de proefstortingen afneemt naar zo'n 0.2 Mm<sup>3</sup>/jaar. In het ondiepe deel (“wand”), is tussen 2001 – 2014 sprake van een sedimentatietrend van gemiddeld ruim 0.1 Mm<sup>3</sup>/jaar. Tussen 2014 – 2016 treedt er nauwelijks volumeverandering op. Tijdens de proefstortcampagne treedt er weer enige sedimentatie op, van gemiddeld 0.04 Mm<sup>3</sup>/jaar.



Figuur 2.31 Indeling Middelgat in vier deelgebieden, namelijk diep (lichtblauw), NW (groen), NWwest (geel) en wand (oranje).NB. de kleurschaal van de verschilbodem is aangepast ten opzichte van de eerder getoonde figuren met verschilbodem.



Figuur 2.32 Bovenste figuur: volumeveranderingen sinds 2001. De stippellijnen geven de trends over 2011-2016 en 2014-2016 weer. Onderste figuur: zoom van de periode van de proefstortingen (2016 - 2020).

Samengevat zijn er geen aanwijzingen dat er sediment naar het Middelgat wordt getransporteerd. In het diepe deel lijken de proefstortingen zelfs, na een tijdelijke sedimentatie tijdens de proefstortingen, voor erosie te zorgen. Ook in de hoofdgeul van het Middelgat ("NW" en "NWwest"), nemen de sedimentatietrends juist af in plaats van toe. De toename in sedimentatie in het ondiepe deel ("wand") kan duiden op transport van sediment uit de kuil naar het luwere deel van het Middelgat. De trend is echter niet significant gegeven het feit dat enkele jaren vóór de proefstortcampagne er ook sprake van sedimentatie was. Op basis van de huidige data kan hier dus geen uitspraak over worden gedaan.

#### 2.4.3.7 Discussie en conclusies

Uit de analyse blijkt dat sediment getijgemiddeld zich van west naar oost verplaatst. Bodemvormen hebben daarbij een migratiesnelheid van rond de 1 m/dag. Al voorafgaand aan de stortingen in de put van Hansweert vindt er een omslag plaats van erosie naar sedimentatie op de binnenbocht. Dit komt waarschijnlijk door het sediment dat gestort wordt nabij de Inloop van Ossenis (in stortvak SH41, ten zuidwesten van de Put van Hansweert). Op de bodempeilingen is te zien hoe het front van één van deze stortingen met een migratiesnelheid van rond de 1 à 2 m/dag over de binnenbocht richting de Put van Hansweert migreert.

Ook het sediment uit de Put van Hansweert lijkt op de binnenbocht terecht te komen. Sinds het begin van de stortcampagne (maart 2016) tot de laatste peiling (januari 2020) is de volumetoename op de binnenbocht ruim 5 Mm<sup>3</sup>, terwijl er slechts 3 Mm<sup>3</sup> gestort is. Naar schatting is ruim 2 Mm<sup>3</sup> afkomstig van de storting en is de overige toename gerelateerd aan de al bestaande trend.

Het sediment dat op de binnenbocht terecht komt, vloeit of terug de put in via een zettingsvloeiing of migreert verder oostwaarts over de binnenbocht. Vermoedelijk neemt door de sterke aangroei van de binnenbocht het aantal zettingsvloeiingen toe.

Waar het sediment naartoe gaat als het het oostelijke deel van de binnenbocht bereikt is niet duidelijk. Uit peilingen blijkt geen toename op het meest zuidoostelijke deel van de binnenbocht. Mogelijk verklaringen zijn dat dit sediment zich hier accumuleert, of verplaatst naar de Drempel van Hansweert. Op dit moment is er nog geen aanwijzing voor een verhoging van de baggervolumes op de Drempel, maar gezien er op de Drempel meerdere Mm<sup>3</sup> per jaar worden gebaggerd, moeten de toenames fors zijn (meer dan 30% à 50% van het huidige gestorte volume van 3 Mm<sup>3</sup> in 4 jaar tijd) voor ze meetbaar zijn. Dit is op dit moment niet het geval.

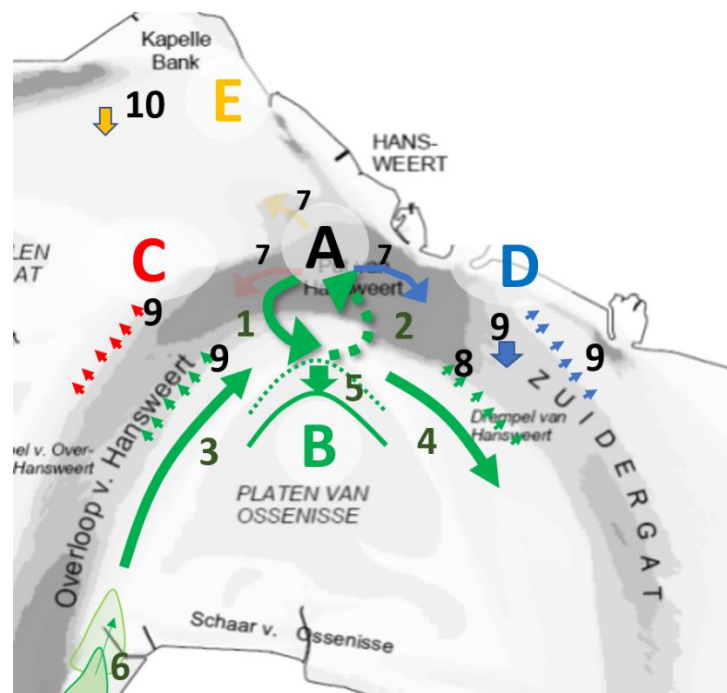
Naast de toename op de binnenbocht zijn er geen andere gebieden waar merkbare toenames optreden. Wel treedt er sinds de stortingen meer erosie op in het Zuidergat. Afhankelijk van de locatie treedt deze erosie op in de hoofdgeul of in het ondiepere deel tussen NAP -12 en -15 m. Ook in de hoofdgeul westelijk van de Put gaat de aanzanding op de binnenbocht samen met erosie van de buitenbocht. Deze trend was echter al aanwezig voor het storten in de Put van Hansweert. Naar verwachting hangt de erosie van de buitenbocht in beide geulen samen met de sedimentatie op de binnenbocht. Door sedimentatie op de binnenbocht wil de geul in de diepte of in de buitenbocht uitbreiden. Opvallend is echter dat het doorstroomoppervlak netto toeneemt.

Tot slot is er ook geen aanwijzing voor dat de sedimentatie in het Middelgat toeneemt door de stortingen in de Put van Hansweert. Sinds de stortingen is de bestaande aanzandende trend in het Middelgat zelfs afgenomen. Of dit verband houdt met de stortingen is niet duidelijk. Mogelijke verklaring is dat door een verandering in stroompatronen er minder sediment naar het Middelgat wordt aangevoerd. Het is ook mogelijk dat het om een autonome niet lineaire trend gaat en dat de geobserveerde afname in sedimentatie geen verband houdt met de stortingen.

## 2.5 Synthese

Tijdens het storten wordt naar verwachting 10% à 20% van het fijne sediment met de getijstroom meegevoerd en verspreid over een groter gebied. Deze observatie wordt ondersteund door het feit dat de korrelgrootte in de beun fijner is ( $D_{50} \approx 170 \mu\text{m}$ ) dan het sediment dat direct na storten op de bodem terug te vinden is ( $D_{50} \approx 290 \mu\text{m}$ ) (Plancke e.a. 2019). Het overige deel van het sediment komt in een straal van rond de 200 m rond de stortvakken terecht. Al binnen enkele dagen verspreid dit sediment zich met name naar de binnenbocht. Vanwege de tijdschaal en het gegeven dat enige tijd na het storten de gemiddelde korrelgrootte grover is geworden ( $D_{50} > 300 \mu\text{m}$ ), is de aanname dat het hier gaat om fijn sediment dat in suspensie raakt en over grotere afstanden getransporteerd wordt en op de binnenbocht terecht kan komen.

Het resterende sediment verdwijnt op een tijdschaal van maanden tot een jaar weer uit de put. De geobserveerde uitruimsnelheden variëren tussen de  $0.4$  en  $1.1 \text{ Mm}^3$  per jaar. Tijdelijk kan de snelheid hoger zijn. De hoogst geobserveerde snelheid is daarbij  $2.4 \text{ Mm}^3$ . Het is daarbij niet zeker of de put voldoende capaciteit heeft om veel hogere volumes dan  $1 \text{ Mm}^3$  per jaar uit te ruimen.



Figuur 2.33 Conceptueel model mesoschaal morfologische ontwikkelingen rond de Put van Hansweert tijdens de proefstortcampagne.

Hoe het sediment vanuit de put zich verder verspreid is schematisch weergegeven in Figuur 2.33, namelijk (nummer tussen hakjes correspondeert met de nummers in de figuur):

- Vanuit de put verplaatst het meeste sediment zich naar het middendeel van de binnenbocht (1), van waaruit het of via een zettingsvloeiing weer in de put terechtkomt (2) of langs de binnenbocht oostwaarts migreert (4).
- In het algemeen is het netto sedimenttransport in de vloedrichting en verplaatst het zich van west naar oost over de binnenbocht (3 en 4). Bodemvormen verplaatsen zich daarbij met een snelheid van 1 à 2 m/dag.
- Op de gehele binnenbocht is er sprake van een omslag van erosie naar sedimentatie, sinds 2011. Hoewel dit een natuurlijke omslag kan zijn, lijkt het aannemelijk dat de omslag veroorzaakt wordt door de stortingen in SH41, waar sinds 2011 gestort wordt ( $\sim 4 \text{ Mm}^3 / \text{jaar}$ ) (5). Op verschilpeilingen is te zien dat dit sediment via de geulwand richting de binnenbocht wordt getransporteerd. Opmerkelijk is wel dat de omslag in 2011 plaatsvindt, terwijl het met de geobserveerde snelheid van het sedimentatiefront enkele

jaren duurt voor het sediment de binnenbocht bereikt. Aannemelijk is dat een groot deel van het sediment via suspensietransport de binnenbocht al veel eerder bereikt.

- Samen met de stortingen in de Put van Hansweert is de sedimenttoename op de gehele binnenbocht tussen maart 2016 en januari 2020 ruim 5 Mm<sup>3</sup>. Naar schatting is ruim 2 Mm<sup>3</sup> daarvan afkomstig uit de Put van Hansweert, waar in die periode 3 Mm<sup>3</sup> gestort is. Sinds 2016 vindt er daarbij een versterkte erosie plaats van de punt van plaat van Ossensisse (5). Het is aannemelijk dat dit gerelateerd is aan de sedimentatie op de binnenbocht, waarbij de resulterende afname van het doorstroomoppervlak onder NAP -5.5 m wordt gecompenseerd door erosie hogerop in het profiel.
- Er lijkt weinig van het gestorte sediment in de andere richtingen te verplaatsen (6). Hoewel het sediment zich netto richting het oosten verplaatst, is er geen extra aanzanding waargenomen in geul ten oosten van de Put van Hansweert. Aannemelijk is dat een deel van het sediment uit de put via de hoofdgeul of via transport over de binnenbocht op de Drempeel van Hansweert terechtkomt. De huidige hoeveelheden zijn echter niet groot genoeg om tot een meetbare toename van baggervolumes (nu enkele Mm<sup>3</sup>/jaar) te leiden.
- Sinds de stortingen treedt er meer erosie op in het Zuidergat (8). Afhankelijk van de locatie treedt deze erosie op in de hoofdgeul of in het ondiepere deel tussen -12 en -15 m NAP. Ook in de hoofdgeul westelijk van de Put gaat de aanzanding op de binnenbocht samen met erosie van de buitenbocht. Deze trend was echter al aanwezig vóór het storten en is vermoedelijk gerelateerd aan de stortingen in SH41. Naar verwachting hangt de erosie van de buitenbocht in beide geulen samen met de sedimentatie op de binnenbocht (7). Door sedimentatie op de binnenbocht wil de geul in de diepte of in de buitenbocht uitbreiden. Opvallend is echter dat het doorstroomoppervlak netto toeneemt.
- Er zijn geen aanwijzingen dat de sedimentatie in het Middelgat toeneemt (9). Heel lokaal is er sprake van enige toename van sedimentatie, maar in het merendeel van het Middelgat is er juist een afname van de sedimentatie. Deze afname kan mogelijk veroorzaakt worden door veranderingen in stroompatronen, waardoor minder sediment uit de omgeving van de put in het Middelgat terechtkomt. Het is ook mogelijk dat het om een autonome niet lineaire trend gaat en dat de geobserveerde afname in sedimentatie geen verband houdt met de stortingen.



## 3 Sedimenttransport processen: de berekeningen

### 3.1 Inleiding

Uit de data-analyse blijkt dat het meeste sediment uit de put op de binnenbocht terechtkomt en van daaruit gedeeltelijk via de binnenbocht richting het zuid-oosten migreert. Een deel lijkt rond de Put van Hansweert te blijven en voor een versterking van de binnenbocht – put interactie te zorgen, waarbij sediment vanuit de put op de binnenbocht terechtkomt en dit sediment via zettingsvloeiingen weer gedeeltelijk terug in de put komt.

In dit hoofdstuk wordt de data-analyse aangevuld met numerieke berekeningen met als doel om:

- inzicht te krijgen in welke processen er voor zorgen dat het sediment op de binnenbocht terechtkomt;
- waar sediment terechtkomt dat niet tot significante trendveranderingen leidt in de metingen of weggebaggerd wordt;
- wat er gebeurt als er grotere volumes worden gestort of herhaaldelijk wordt gestort.

### 3.2 Aanpak

Om de in §3.1 benoemde doelen te bereiken zijn met twee type modellen berekeningen uitgevoerd, namelijk:

1. Een 3D hydrodynamisch Delft3D-FM model. Doel: inzicht in de hydrodynamica in en rond de Put van Hansweert en de effecten op het sedimenttransport.
2. Een 2D morfodynamisch Delft3D-4 model. Doel: inzicht in de morfodynamische respons na proefstorting van 1 Mm<sup>3</sup> en veel grotere (of herhaaldelijke kleine) storting van totaal 6 Mm<sup>3</sup>.

Hieronder worden beide modellen en de uitgevoerde berekeningen nader toegelicht.

#### 3.2.1 3D hydrodynamisch Delft3D-FM model

##### 3.2.1.1 Het model

Om meer inzicht te krijgen in de detailhydrodynamica rond de Put van Hansweert en de Put van Borselle is een 3D model opgezet in Delft3D-FM. Details van de modelopzet en validatie zijn te vinden in van der Wegen e.a. (2019). De berekende stroombeelden en recirculatiecellen komen kwalitatief overeen met de metingen die in het kader van de proefstortcampagne zijn uitgevoerd, zie Bijlage B.1. Uit de validatie is verder gebleken dat de zoutgradiënten cruciaal zijn voor het genereren van de juiste recirculatiecellen.

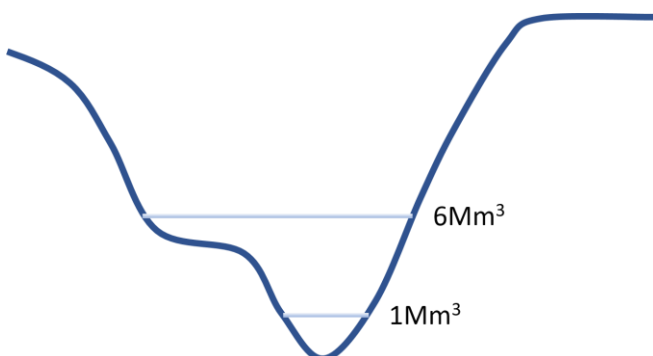
##### 3.2.1.2 De berekeningen

Om een beeld te krijgen van hoe de stroming rond de Put van Hansweert de sedimenttransporten beïnvloedden, voor de situatie met en zonder storten, zijn berekeningen uitgevoerd met de oorspronkelijke bodem en met een bodem waarbij respectievelijk 1 Mm<sup>3</sup> en 6 Mm<sup>3</sup> is gestort in de Put van Hansweert, zie overzicht in Tabel 3.1. Bij de storting is hierbij aangenomen dat het sediment in het diepste deel terechtkomt en de put gelijkmatig vult, zie illustratie in Tabel 3.1.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor december 2018 en met de modelvariant waarbij de verticale resolutie 8 lagen betreft, van gelijke relatieve dikte. Resultaten van de validatie van deze periode aan de hand van stromingsmetingen zijn eveneens te vinden in van der Wegen e.a. (2019).

Tabel 3.1 Overzicht 3D hydrodynamische Delft3D-FM berekeningen.

Naam berekening	Stortvolume	Zout
Ref	0	Aan
Ref, geen zout	0	Uit
Storting klein	1 Mm <sup>3</sup>	Aan
Storting groot	6 Mm <sup>3</sup>	Aan



Figuur 3.1 Illustratie manier van vullen van de putten in de modelschematisatie.

### 3.2.1.3

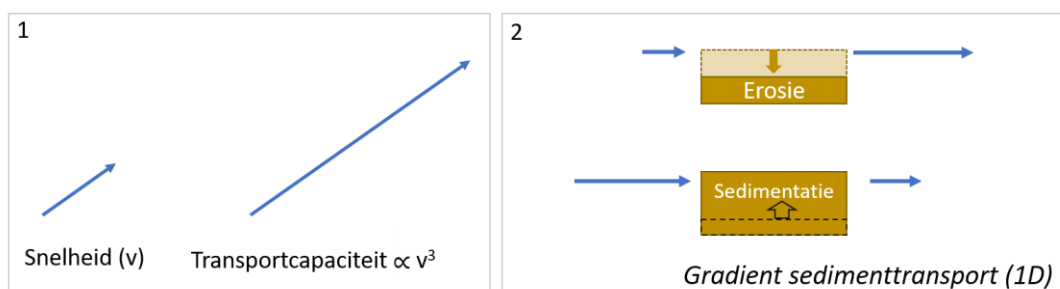
Doorvertaling naar proxy voor sedimenttransportcapaciteit en sedimentatie en erosie

Om een beeld te krijgen van de effecten van de hydrodynamica op bodemtransport, is op basis van de snelheden nabij de bodem (7<sup>de</sup> laag, één na onderste laag) een inschatting gemaakt van de transportcapaciteit en de erosie en sedimentatie.

Als proxy voor de transportcapaciteit is de aanname gedaan dat de transportcapaciteit schaalt met de derde macht van de snelheid. Of er vervolgens sedimentatie of erosie optreedt hangt af van de gradiënt in transportcapaciteit, zie illustratie Figuur 3.2, de sedimentbeschikbaarheid en de erodeerbaarheid. Indien de transportcapaciteit toeneemt over een bepaald gebied, zal er meer sediment worden afgevoerd dan aangevoerd en treedt er – afhankelijke van de erodeerbaarheid – erosie op. Indien de transportcapaciteit afneemt over een bepaald gebied, wordt er – indien beschikbaar - meer sediment aangevoerd dan afgevoerd en treedt er sedimentatie op.

Door over twee getijcycli deze proxy voor de transportcapaciteit te berekenen en de bijbehorende gradiënten in de transportcapaciteit, ontstaat een beeld van waar erosie en sediment verwacht kan worden. Omdat de bodemligging in de berekening statisch is, zegt dit alleen iets over de initiële sedimentatie- en erosiepatroon. In werkelijkheid past de bodem zich aan, verandert hiermee de stroming en verandert het patroon van erosie en sedimentatie in de tijd.

## Bodemtransport afleiden uit snelheidsvelden



Figuur 3.2 Illustratie van hoe uit de stroomsnelheden een proxy voor de transportcapaciteit en de initiële sedimentatie en erosiepatronen worden bepaald.

### 3.2.2 2D morfodynamisch Delft3D-model

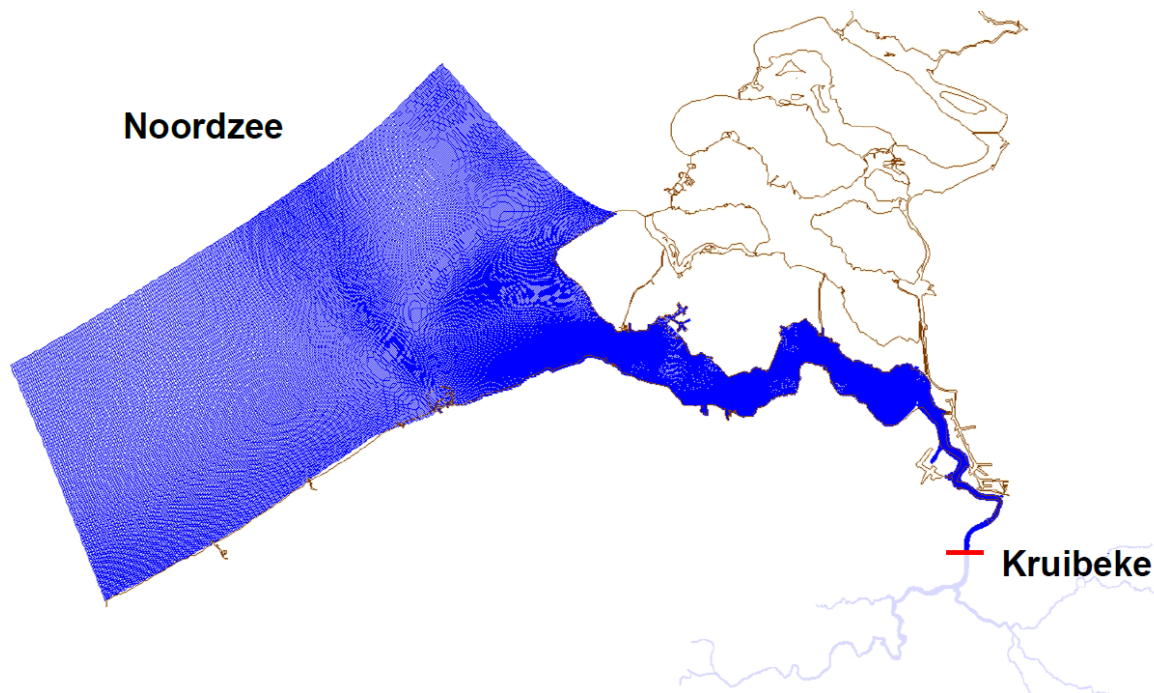
#### 3.2.2.1 Het model

Voor de morfodynamische berekeningen is een uitsnede van het NeVla model gebruikt, zie Figuur 3.3. Details over de modelopzet, kalibratie en validatie zijn te vinden in (Vroom e.a. 2015; Huisman e.a. 2018). Ten opzichte van de variant gebruikt in (Huisman et al. 2018), zijn de volgende aanpassingen gemaakt:

- De schematisatie van de moeilijk erodeerbare lagen is aangepast (Van der Vegt e.a. 2019).
- De initiële bodemligging is aangepast naar de bodemligging van 2015, welke is afgeleid uit de Vaklodingen en geprojecteerd op het midden van de rekencellen.
- De IOPSUS functionaliteit is gebruikt. Deze zorgt ervoor dat de sedimentdiameter van het zwevend transport afhangt van de hydrodynamische condities. Hoe rustiger de condities, hoe minder makkelijk grote korrels in suspensie kunnen raken, en hoe kleiner de sedimentdiameter van het suspensietransport wordt gemaakt. Bij sterke stroming is de diameter gelijk aan dat van het bodemtransport. Voor alle berekeningen is daarbij een standaard sedimentdiameter van 200  $\mu\text{m}$  gebruikt.

In de Westerschelde wordt intensief gebaggerd. In de modelberekeningen wordt daarom met baggeren en storten gerekend. De locaties en volumes van het bagger- en stortwerk zijn daarbij gebaseerd op het werkelijk uitgevoerde beheer tussen 2011-2014 en identiek aan Huisman e.a. (2018) geïmplementeerd.

Bij de vorming van diepe putten, spelen meestal complexe hydrodynamische processen een belangrijke rol, die niet worden berekend in een 2D model dat rekent met de ondiep water vergelijking. Hierdoor vullen in de meeste morfodynamische berekeningen de putten op in plaats van dat er erosie optreedt of de put stabiel blijft. Dit gebeurt ook in het NeVla model. Conform de methode gerapporteerd in Huisman e.a. (2018), zijn daarom de putten apart ingespeeld. Hierbij is op basis van een ingespeelde bodem (4 jaar), de ingespeelde bodemhoogte in de diepe delen afgeleid. Overall waar de oorspronkelijke bodemligging dieper ligt dan de ingespeelde bodem en dieper is dan -18 m NAP, is daarbij de ingespeelde bodem overgenomen. Dit zorgt ervoor dat de sedimenttransporten rond de put realistischer zijn. Omdat ook met ingespeelde putten essentiële fysica mist voor het beschrijven van de sedimenttransporten in en rond de put, moeten de resultaten in en rond de put zorgvuldig worden geïnterpreteerd. Daarom vindt in dit hoofdstuk eerst een validatie plaats van de berekende erosie- en sedimentatiepatronen voor de situatie met en zonder storten en ligt de focus op het inzicht krijgen in de richtingen waarin het sediment getransporteerd wordt, als het eenmaal de put verlaten heeft.



Figuur 3.3 Uitsnede van het NeVla model.

### 3.2.2.2 De berekeningen

In dit hoofdstuk worden een drietal berekeningen besproken, namelijk

1. referentieberekening
2. berekening waarbij de Put van Hansweert met  $1\text{Mm}^3$  gevuld is
3. berekening waarbij de Put van Hansweert met  $6\text{Mm}^3$  gevuld is

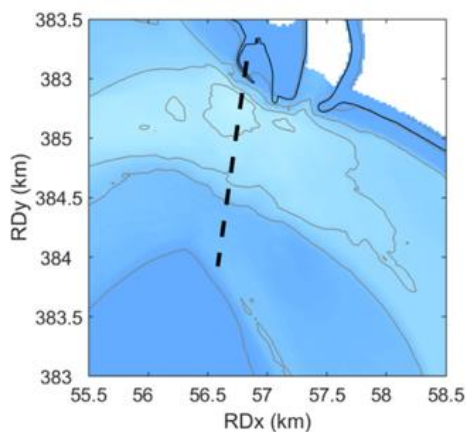
Voor de berekeningen waarbij de Put van Hansweert gevuld is, is de bodem op basis van het stortvolume gelijkmatig opgehoogd, zie illustratie in Figuur 3.1. Omdat bij het aanbrengen van sediment, de afstand tot de harde lagen groter wordt, is deze conform de aanpassingen aan de bodemligging aangepast. Tot slot zijn alle berekeningen uitgevoerd met IOPSUS aan, omdat dit realistischere resultaten gaf voor de morfodynamiek rond de Put van Hansweert. Om het effect van baggeren en storten te kunnen duiden, zijn berekeningen 1 - 3 herhaald zonder baggeren en storten.

## 3.3 Resultaten

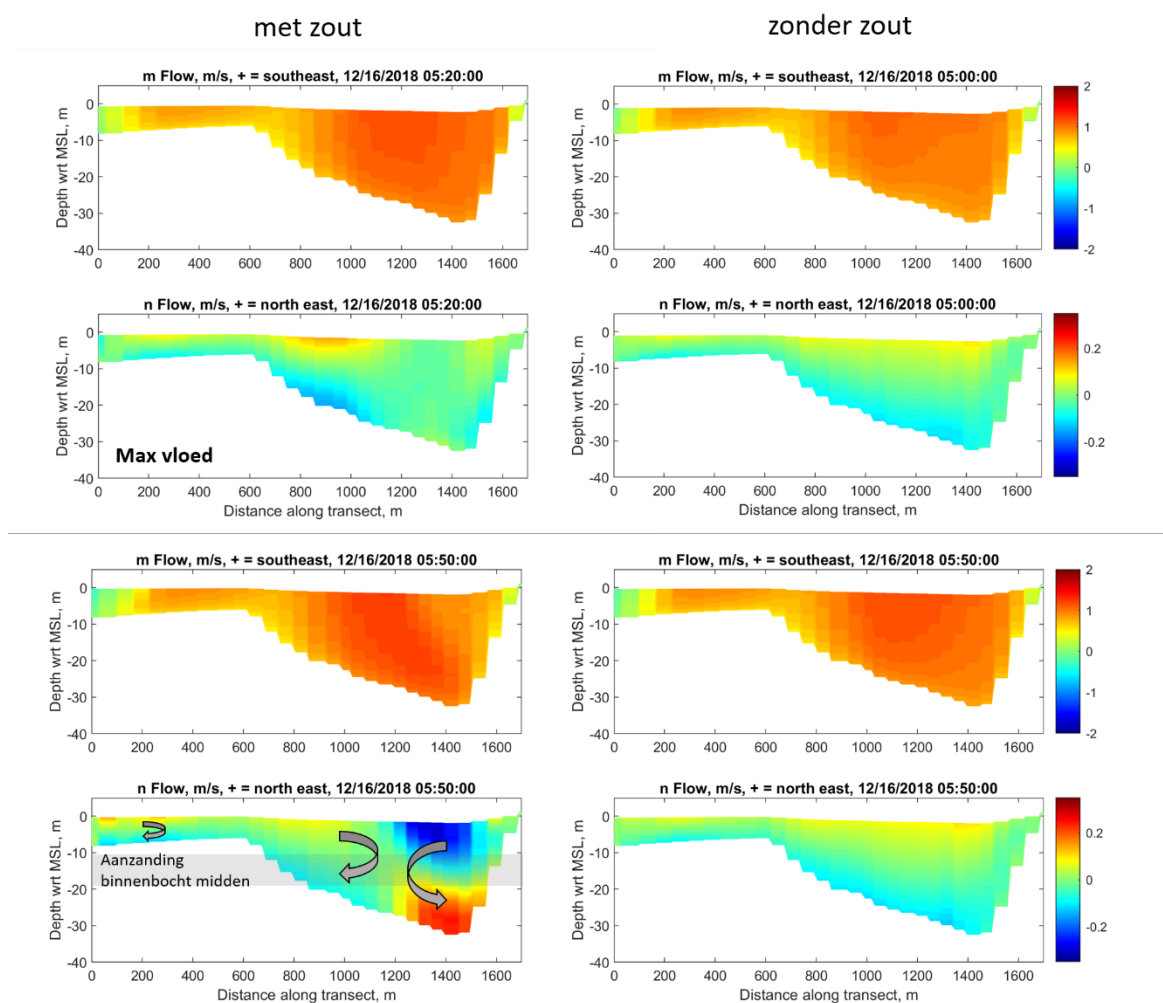
### 3.3.1 Detail hydrodynamica in de Put van Hansweert

Omdat voor het sedimenttransport de stroming zeer bepalend is, wordt in deze paragraaf de stroming nader in kaart gebracht. In van der Wegen e.a. (2019) zijn voor het in Figuur 3.4 getoonde dwarsprofiel de stroming en recirculatiecellen geanalyseerd en gevalideerd aan de hand van metingen. Dit betrof een vloed en eb moment. In deze paragraaf wordt de analyse aangevuld door voor de gehele getijcyclus de stroming te analyseren, voor berekeningen met en zonder zout en voor een bodemligging met en zonder storting.

In Bijlage B is voor een aantal momenten gedurende de volledige getijperiode de berekende stroming in de langs- en dwarsrichting weergegeven. Met langsrichting wordt daarbij de gemiddelde richting van de stroming op een bepaald moment bedoeld, de dwarsrichting is de component loodrecht op de langsrichting. Een selectie van de stroombeelden wordt hieronder getoond in Figuur 3.5 en Figuur 3.6.



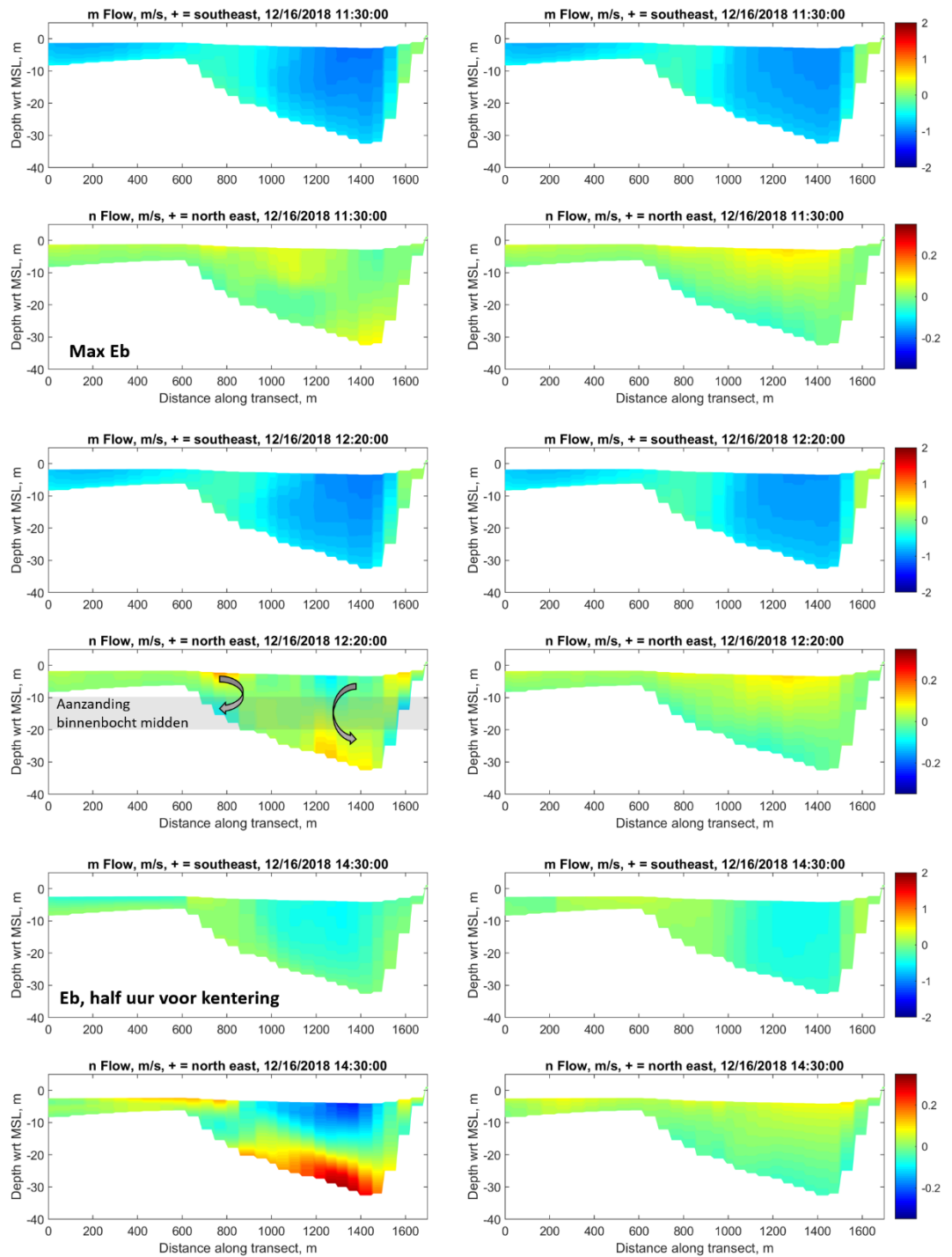
Figuur 3.4 Locatie dwarsprofiel bij de Put van Hansweert. Tijdens de proefstortcampagne zijn over deze raai de snelheden gemeten. Het Delft3D FM model is gevalideerd aan de hand van deze metingen.



Figuur 3.5 De stroming in de langsrichting (m) en dwarsrichting (n), voor twee momenten rond vloed en voor een berekening met (links) en zonder zout (rechts).

met zout

zonder zout

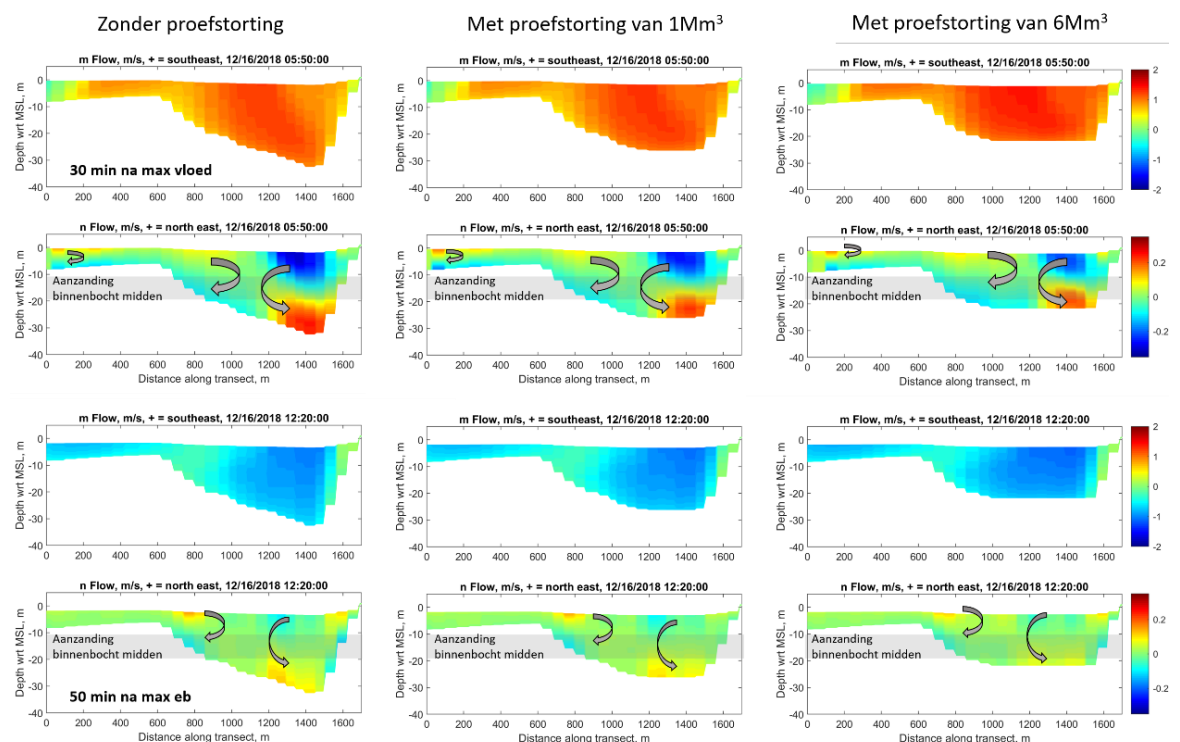


Figuur 3.6 De stroming in de langsrichting (m) en dwarsrichting (n), voor drie momenten van de eb-periode en voor een berekening met (links) en zonder zout (rechts).

Uit de analyse blijkt dat de recirculatiecellen sterk veranderen gedurende het getij. Het aantal cellen kan variëren van nul tot drie en ook de plaats en richting veranderen in de tijd. Met vloed komen er drie recirculatiecellen voor, die kort na vloed intensiveren. De middelste cel is naar de binnenbocht gericht en draagt mogelijk bij aan het sedimenttransport de binnenbocht op. Tijdens eb zijn de recirculatiecellen een stuk zwakker, maar ook dan is één van de cellen naar de binnenbocht gericht. De snelheden in deze recirculatiecellen zijn ongeveer een orde van grootte kleiner dan de snelheid van de hoofdstroming (langsrichting).

Tijdens de validatie van de stromingspatronen is gebleken dat zout bepalend is voor het ontstaan van de recirculatiecellen tijdens eb en vloed (van der Wegen e.a. 2019). Huidige analyse bevestigt dit beeld en laat bovendien zien dat de enige recirculatiecel die ontstaat in de berekening zonder zout, nauwelijks varieert in de tijd. Hieruit mag geconcludeerd worden dat de subtiele dichtheidsverschillen die ontstaan door de aanwezigheid van zout, essentieel zijn voor het ontstaan van meerdere recirculatiecellen.

Ten tweede is gekeken naar het effect van een ondiepere bodemligging ten gevolge van een storting op de stroming, zie figuren in Bijlage B.3 en B.4 voor het volledige overzicht en Figuur 3.7 voor de patronen die optreden kort na eb en kort na vloed. Hieruit blijkt dat de patronen in stand blijven, maar dat de intensiteit verandert. Met storting neemt de stroomsnelheid in de hoofdrichting toe en nemen de snelheden in de recirculatiecellen af.

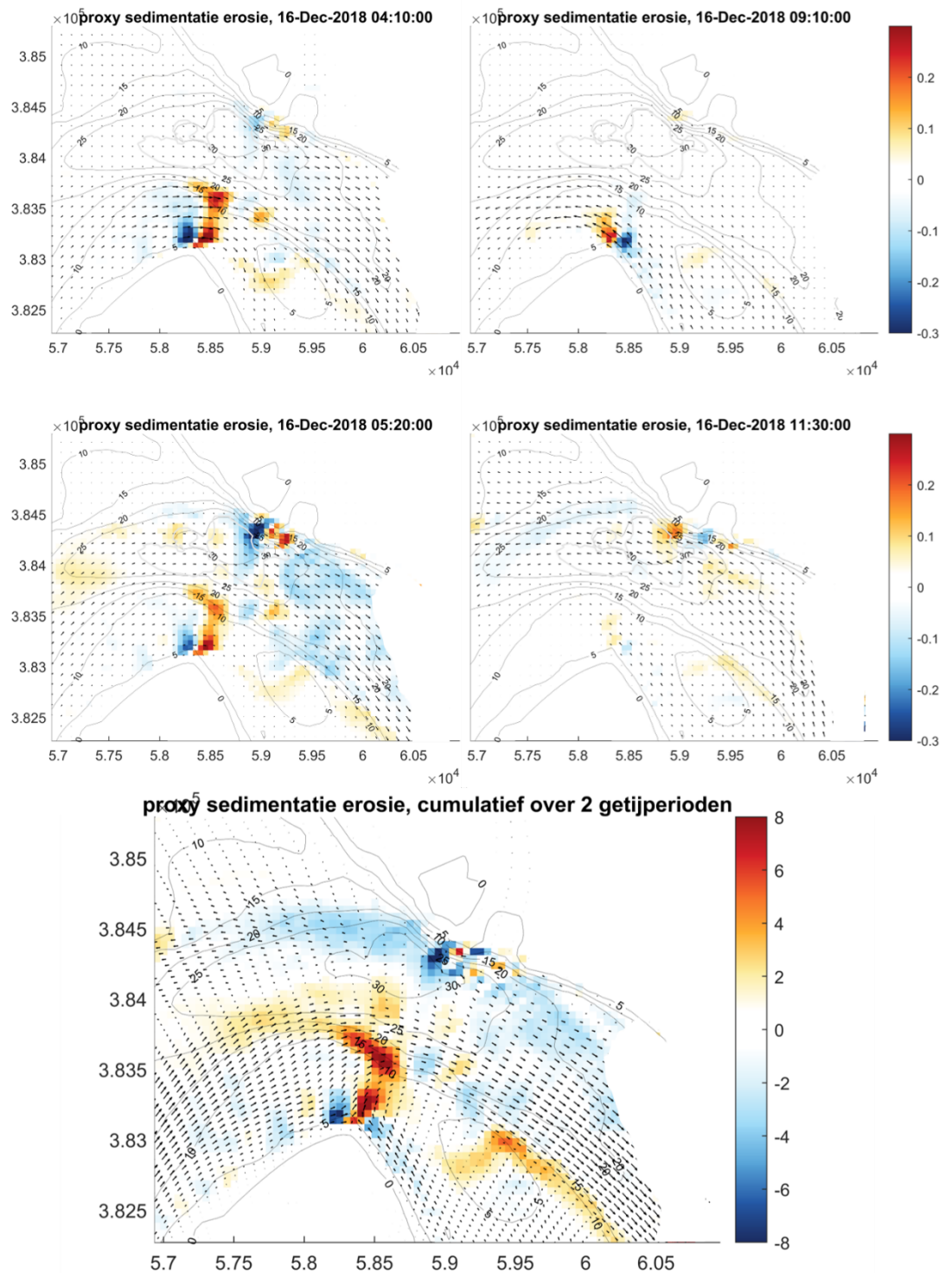


Figuur 3.7 De stroming in de langsrichting (m) en dwarsrichting (n), voor een moment kort na vloed (boven) en kort na eb (onder) en voor een bodem zonder (links) of met storting van 1 Mm<sup>3</sup> (midden) en 6 Mm<sup>3</sup> (rechts).

### 3.3.2 Sedimenttransportcapaciteit

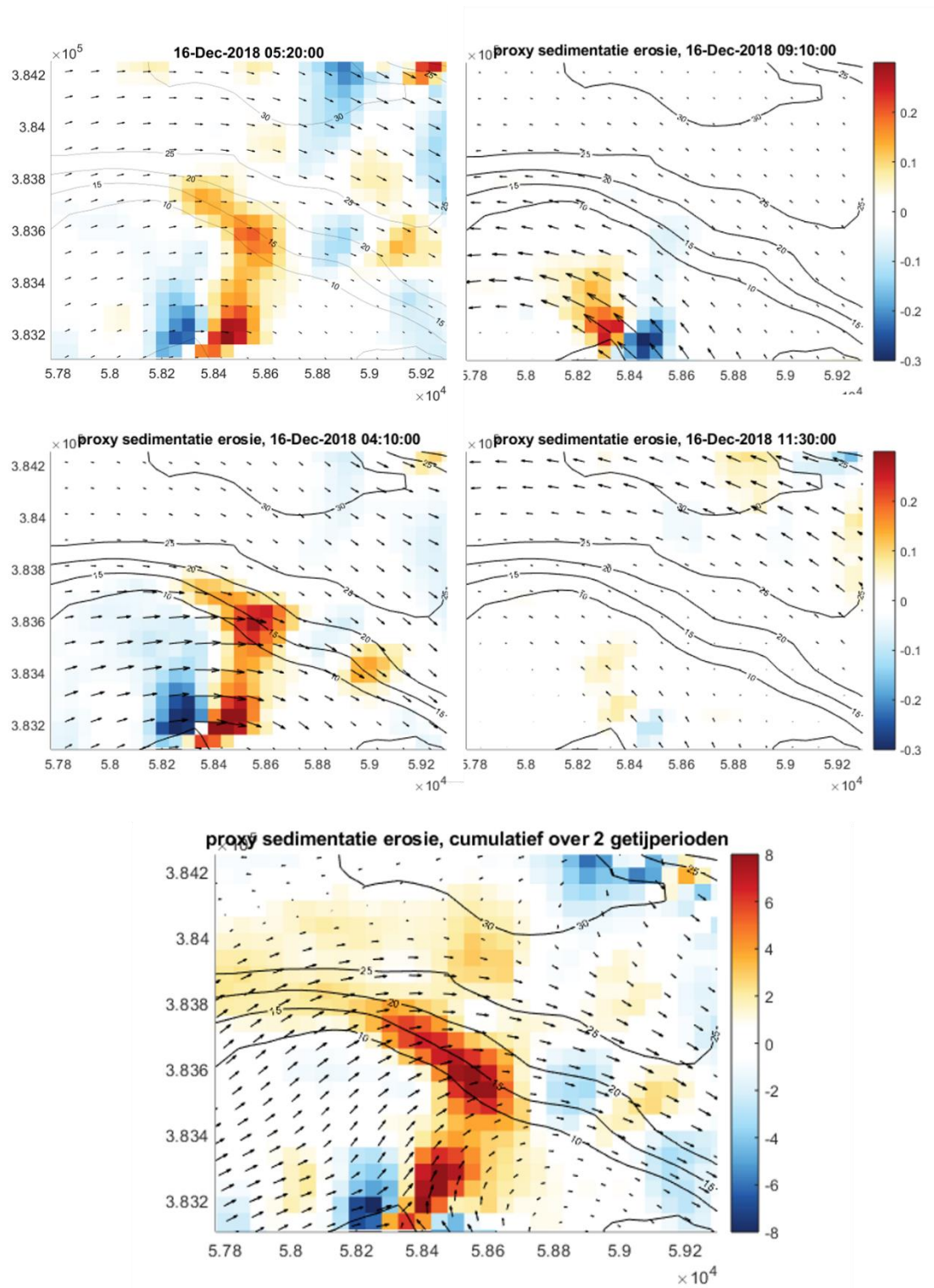
Het effect van de hydrodynamica op het sedimenttransport wordt bepaald via de gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit, zoals toegelicht in §3.2.1.3. In Figuur 3.7 worden voor eb en vloed de sedimenttransportcapaciteit van het bodemtransport getoond voor de momenten gedurende het getij die het meest bijdragen aan het totaaltransport. In kleur is te zien waar de initiële sedimentatie en erosie verwacht mag worden, zoals bepaald aan de hand van de gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit. Hieruit blijkt dat met name het vloedtransport bijdraagt aan de sedimentatie op het middendeel van de binnenbocht. De sedimentatie zuid-oostelijk op binnenbocht wordt vooral veroorzaakt door het ebtransport. Netto vindt westelijk van de put het meeste transport plaats over de binnenbocht en oostelijk van de put het meest door de hoofdgeul. Wanneer wordt

ingezoomd op de binnenbocht (Figuur 3.9), blijkt dat de sedimentatie op de binnenbocht wordt veroorzaakt door een afname van de stroming over de binnenbocht en het sediment dus wordt aangevoerd via de binnenbocht en niet vanuit de put.



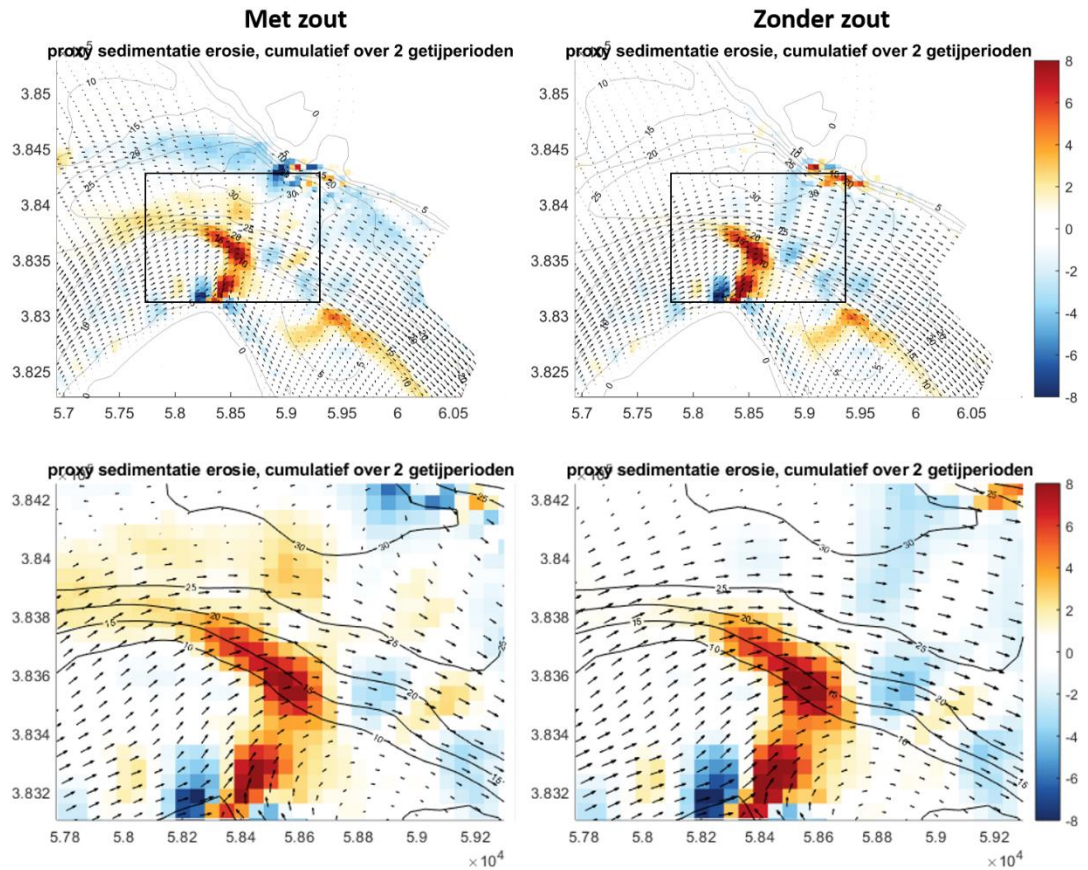
Figuur 3.8 Proxy voor sedimenttransportcapaciteit (pijlen) en proxy voor erosie en sedimentatie (kleur) voor de momenten die het meest bijdragen het totaaltransport (vier bovenste figuren). Het onderste figuur toont de getijgemiddelde proxy voor de transportcapaciteit, samen met de totale sedimentatie en erosie.





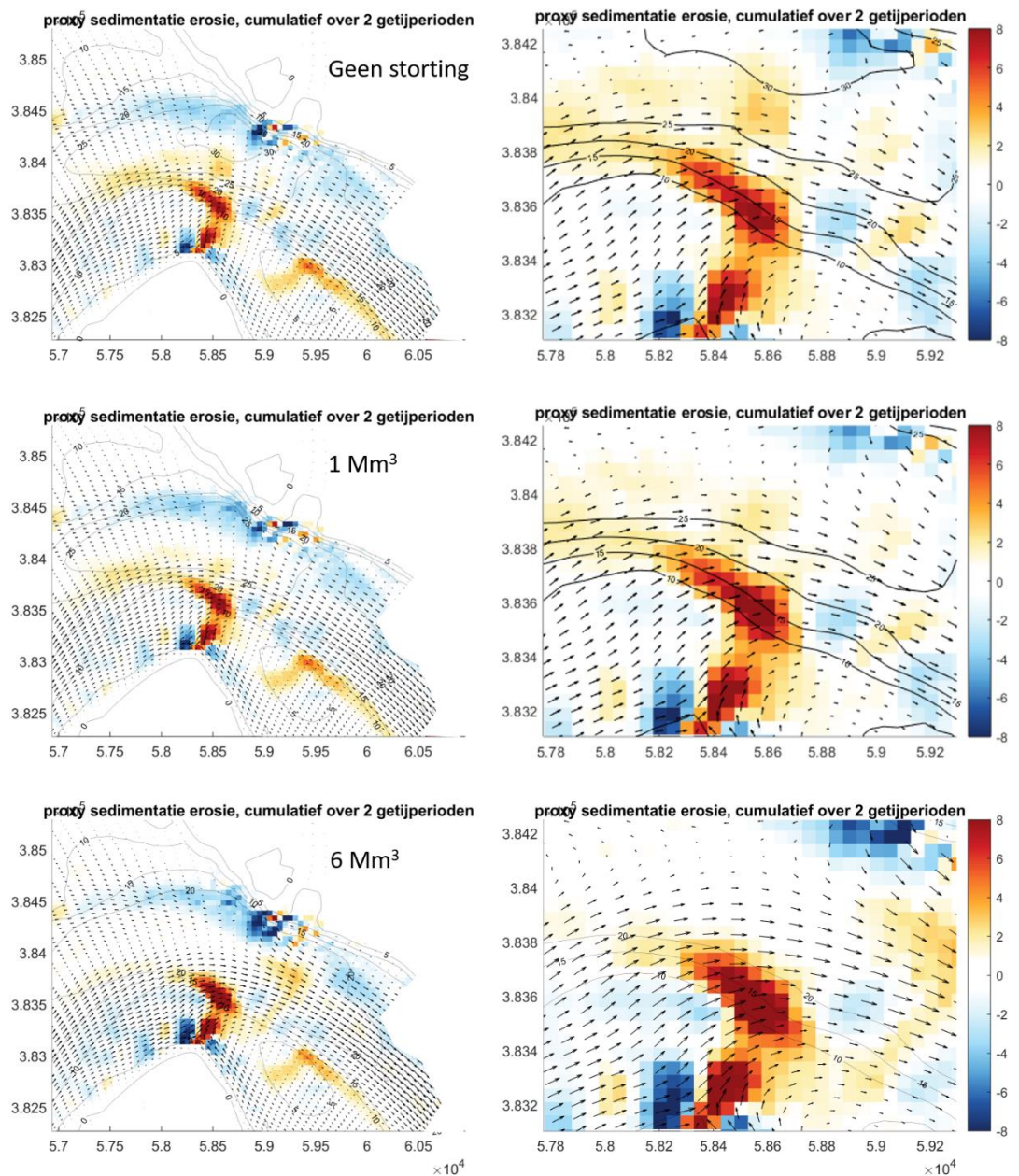
Figuur 3.9 Identiek aan Figuur 3.8, maar dan ingezoomd op het middendeel van de binnenbocht.

Wanneer de berekening wordt uitgevoerd zonder zout, verandert het sedimentatiepatroon op de binnenbocht nauwelijks. Dit suggereert dat de recirculatiecellen niet zorgen voor het bodemtransport de binnenbocht op. Dit heeft te maken met dat de gradiënten in de dwarsrichting ten gevolge van de recirculatiecellen kleiner zijn dan de gradiënten in de richting van de hoofdstroming, waardoor de hoofdstroming bepalender is voor het transport en de recirculatiecellen voor kleine aanpassingen hiervan zorgen. Op andere locaties vinden er wel verschillen plaats, zoals in het diepe deel van de binnenbocht, waarbij in de berekening met zout sedimentatie optreedt, maar in de berekening zonder zout niet. In de buitenbocht voorspelt de berekening met zout juist erosie, terwijl de berekening zonder zout hier geen effect voorspelt.



Figuur 3.10 Proxy voor getijgemiddelde sedimenttransportcapaciteit (pijlen) en proxy voor de erosie en sedimentatie (kleur) voor een berekening met (links) en zonder zout (rechts). Onderste figuren tonen een zoom van het middelste deel van de binnenbocht, waar volgens de metingen en de berekeningen de meeste sedimentatie optreedt.

Tot slot is gekeken hoe de erosie- en sedimentatiepatronen veranderen als gevolg van storten, zie Figuur 3.11. Met een stortvolume van 1 Mm<sup>3</sup> nemen de snelheden in de put iets toe, waardoor de erosie in het noordelijke deel van de put iets toeneemt en de sedimentatie in het zuidelijk deel iets afneemt. Dit heeft echter geen merkbare gevolgen voor het middendeel van de binnenbocht. Er zijn dus geen aanwijzingen dat het sediment uit de put via bodemtransport de binnenbocht opkomt. Met een stortvolume van 6 Mm<sup>3</sup> nemen de stroomsnelheden in de put verder toe, waardoor er geen sedimentatie optreedt en de erosie nog verder wordt versterkt. Meteen ten oosten van de put treedt nu wel sedimentatie op, ook is er sprake van een lichte toename van de sedimentatie op de binnenbocht.



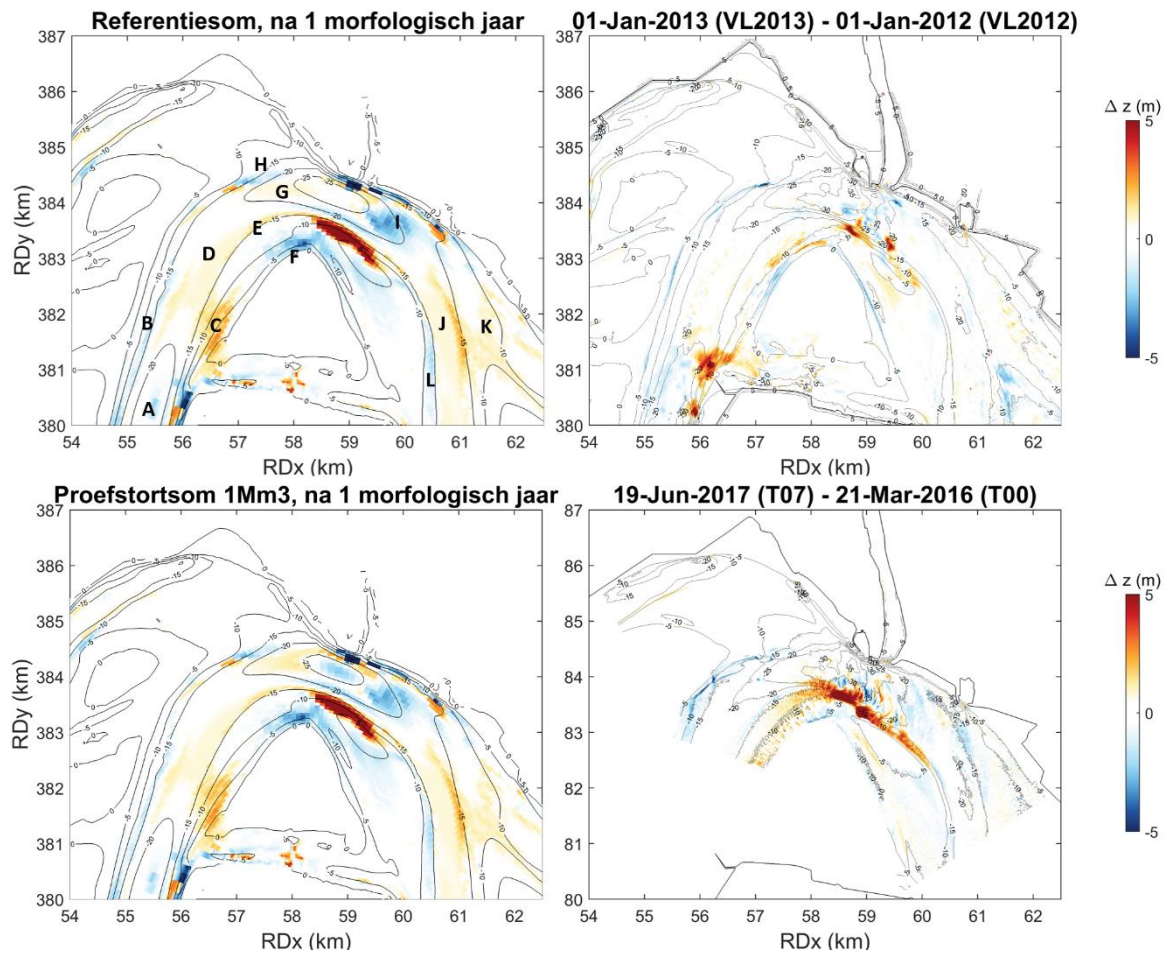
Figuur 3.11 Proxy voor getijgemiddelde sedimenttransportcapaciteit (pijlen) en proxy voor de erosie en sedimentatie (kleur) voor een berekening met (links) en zonder zout (rechts), voor de situatie zonder storting (bovenste figuren) en met 1 Mm<sup>3</sup> en 6 Mm<sup>3</sup> stortvolume in de Put van Hansweert.

Samengevat volgt uit de analyse dat het sedimenttransport vloed dominant is en sedimentatie plaatsvindt op de binnenbocht. Dit komt overeen met de observaties uit de metingen. Op het middendeel wordt deze sedimentatie veroorzaakt door het vloedtransport, op het zuid-oostelijke deel door het ebtransport. De sedimentatie op de binnenbocht wordt niet veroorzaakt door de aanwezigheid van meerdere recirculatiecellen, ook is het via bodemtransport aangevoerde sediment niet afkomstig uit de put. Dit heeft te maken met dat de stroming een optelsom is van de hoofdstroming en de recirculatiecellen. De recirculatiecellen zorgen wel voor een afbuiging van de stroming, maar niet voor een stroming die vanuit de put naar de direct aangrenzende binnenbocht gericht is en zo sediment uit de put transporteert en op de binnenbocht afzet. Opvallend is verder dat westelijk van de Put van Hansweert, de getijgemiddelde transporten op de binnenbocht het

hoogst zijn en dat oostelijk van de Put van Hansweert de getijgemiddelde transporten door de hoofdgeul het sterkst zijn. Dit suggereert dat westelijk van de put het meeste bodemtransport plaatsvindt over de binnenbocht en oostelijk van de put door de hoofdgeul.

### 3.3.3 Sedimentatie en erosieprocessen na stormen

Als eerste stap in deze analyse zijn de met het 2D model berekende morfologische ontwikkelingen gevalideerd aan de hand van metingen, zie Figuur 3.12. In de bovenste figuren zijn de berekende en gemeten bodemveranderingen over 1 jaar tijd weergegeven voor de referentiesituatie zonder proefstorting. Voor de meeste gebieden worden de erosie- en sedimentatiepatronen kwalitatief goed berekend, ook de sedimentdynamica in en rond de put, zie Tabel 3.2. Kwantitatief zijn er duidelijke verschillen. Op de meeste plaatsen is de berekende sedimentatie en erosie te sterk en voor een aantal locaties is de erosie of sedimentatie ruimtelijk verschoven.



Figuur 3.12 Overzicht van de berekende (links) en gemeten (rechts) erosie- en sedimentatiepatronen voor een jaar zonder (boven) en met proefstorting van 1 Mm<sup>3</sup> (onder).

Tabel 3.2 Vergelijking gemeten en berekende trends per gebied, zoals aangeven in Figuur 3.12.

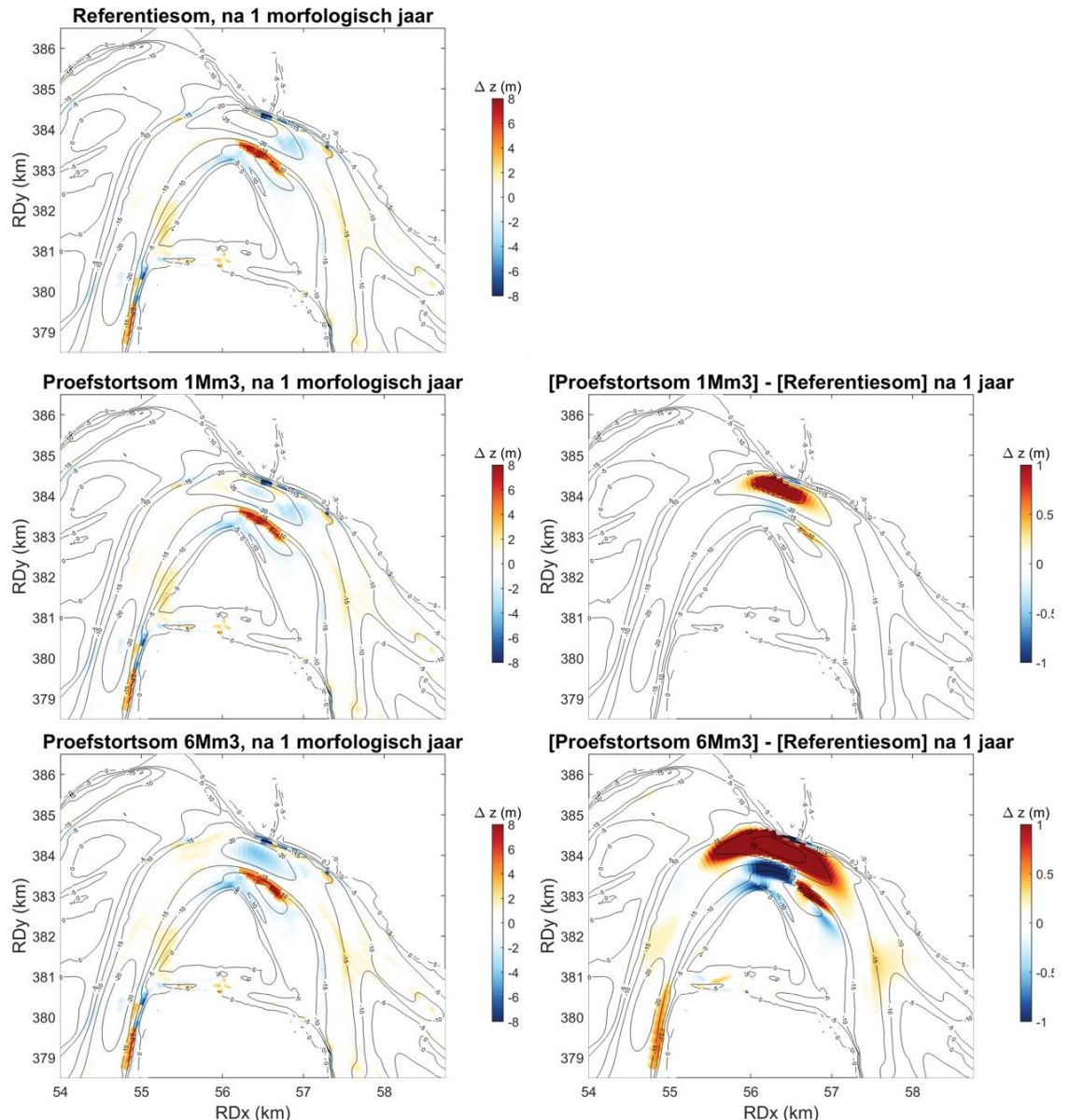
Gebied	Berekening	Meting	Toelichting
A. Put van Ossenissee (Oss.)	Erosie	Erosie	Erosie goed voorspeld dankzij inspelen van de put.
B. Geulwand west	Erosie	Erosie	
C. Binnenbocht nabij Oss.	Sedimentatie	Sedimentatie	Berekende sedimentatie iets verschoven in ruimte.
D. Overloop van Hansweert	Lichte sedimentatie	Stabiel	
E. Geulwand nabij overloop van Hansweert	Sedimentatie	Sedimentatie	Berekend bij de -15 m NAP hoogtelijn, gemeten bij de -10 m NAP hoogtelijn.
F. Noordelijke punt plaatrand	Erosie	Erosie	Berekende erosie te sterk en te diep (0 en -10 m NAP), in de meting tussen 0 en -5 m NAP.
G. Put van Hansweert (PvH) west	Lichte sedimentatie	Lichte sedimentatie	
H. Diepe deel PvH	Stabiel	Stabiel	Stabiliteit wordt goed voorspeld dankzij inspelen van de put.
I. PvH oost	Erosie	Erosie	Berekende erosie te sterk en te veel oostelijk.
J. Zuidergat	Sedimentatie	Stabiel	
K. Oostelijk van Zuidergat	Lichte sedimentatie	Lichte sedimentatie	Berekende sedimentatie te sterk.
L. Geulwand Zuidergat	Lichte erosie	Lichte erosie	

De resultaten van de berekening met proefstorting van 1 Mm<sup>3</sup> in de Put van Hansweert zijn in Figuur 3.12 vergeleken met de metingen. Belangrijkste verschil is dat er volgens de berekening geen toename van de sedimentatie op het middendeel van de binnenbocht wordt voorspeld, terwijl hier volgens de metingen de sterkste toename optreedt. Dit blijkt ook uit de verschilbodem van de berekening met en zonder proefstorting, zie Figuur 3.13. Iets oostelijk van het middendeel van de binnenbocht (binnenbocht oost), treedt er een beetje extra sedimentatie op. Dit is slechts 50 cm over een klein gebied. Op het middendeel zelf, treedt juist verruiming op, ten gevolge van de toename van de bodemhoogte in Put van Hansweert. Ook blijkt dat na 1 jaar een groot deel van het gestorte sediment nog in de Put van Hansweert aanwezig te zijn. Volgens de metingen was al het sediment ruim binnen een jaar uit de put verdwenen. Ook bij een stortvolume van 6 Mm<sup>3</sup> in de put, vindt er erosie plaats op het middendeel van de binnenbocht en alleen iets ten oosten daarvan extra sedimentatie.

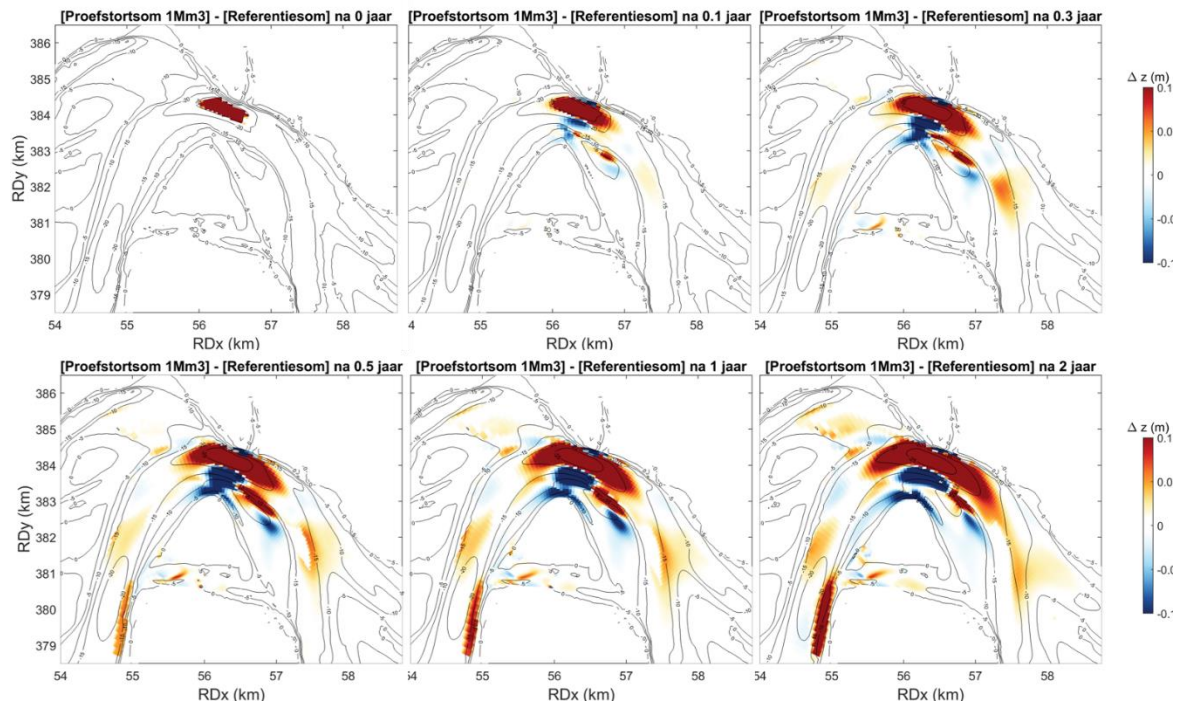
Deze analyse bevestigt de verwachting dat het 2D morfodynamisch model de erosie- en sedimentatieprocessen in en nabij de put niet goed kan voorspellen (zie §3.2.2.1). Dit geeft aan dat de complexe driedimensionale stromingsprocessen in de put, die niet worden berekend met het 2D model, een dominante rol spelen bij het uitruimen van de put. Gezien de grootschalige patronen van erosie en sedimentatie kwalitatief wel goed voorspeld worden, is de verwachting dat het model wel inzicht kan geven in waar het sediment naartoe gaat als het eenmaal de put uit is. Hiervoor is in Figuur 3.14 een overzicht gegeven van hoe de verschilbodem veranderd in de tijd. Om ook de gebieden met lichte sedimentatie in kaart te brengen is de schaal aangepast naar maximaal +/-10 cm bodemhoogteverschil. Hieruit blijkt dat het meeste sediment dat de put verlaat, oostwaarts verplaatst. Een deel hiervan wordt naar het gebied even ten oosten van het middendeel van de binnenbocht getransporteerd (aangeduid met binnenbocht-oost in Hoofdstuk 2). Dit sedimentatiegebied neemt geleidelijk toe in volume, maar breidt niet verder uit naar het oosten. Uit de berekening zonder baggeren en storten blijkt dat dit komt doordat sediment vanaf binnenbocht oost naar de drempel van Hansweert verplaatst en hier weggebaggerd wordt. Dit verklaart ook de

toename van sedimentatie in nabij de Put van Ossenisse, waar het gebaggerde sediment in SH41 wordt gestort.

Een ander deel van het oostelijk transport vanuit de put zorgt voor extra sedimentatie in het Zuidergat, zowel dichtbij de put als enkele kilometers zuidelijk van de put. Tot slot zijn er ook sedimenttoenames in de Overloop van Hansweert en het Middelgat. Omdat het hier om kleine hoeveelheden gaat, worden deze pas naar verloop van tijd zichtbaar. In het Middelgat is het sediment naar verwachting afkomstig uit de put. In de Overloop van Hansweert kan het ook gaan om sediment dat via de storting in SH41 voor sedimentatie zorgt.



Figuur 3.13 Links: overzicht van de berekende erosie- en sedimentatiepatronen voor de referentiesituatie (boven), voor een proefstorting van 1 Mm<sup>3</sup> (midden) en voor een proefstorting van 6 Mm<sup>3</sup> (onder). Rechts: de verschilbodem van de situatie met en zonder storting. NB. De kleurschaal van de erosie en sedimentatiefiguren (links) gaat van -8 m naar +8 m, wat een ruimere schaal is dan de schaal in Figuur 3.12. De kleurschaal van de verschilbodem gaat van -2m naar +2m.



Figuur 3.14 Verschilbodemp tussen de berekening met 1 Mm<sup>3</sup> stortvolume en de referentie, voor 0 jaar, 0.1 jaar, 0.3 jaar, 0.5 jaar, 1 jaar en 2 jaar.

### 3.4 Discussie en synthese

Uit de 3D berekeningen volgt dat er complexe stroming optreedt in de Put van Hansweert, waarbij er recirculatiecellen ontstaan die in de tijd veranderen in aantal, locatie en draairichting. De recirculatiecellen blijken niet verantwoordelijk voor het transport van sediment uit de kuil naar de binnenbocht via bodemtransport. De berekende sedimentatie op de binnenbocht is afkomstig van elders op de binnenbocht en verandert niet significant met een ondiepere bodem (als gevolg van het storten). De 2D morfodynamische berekeningen bevestigen dit beeld. Dit duidt erop dat complexe stroompatronen in combinatie met suspensietransport een belangrijke rol spelen voor het transport van sediment uit de kuil richting de binnenbocht. Dit verklaart mogelijk ook dat veel van de sedimentatie op de binnenbocht al tijdens of kort na het proefstorten plaatsvindt. Met 3D morfodynamische berekeningen kan hier meer inzicht in worden verkregen.

Uit de validatie blijkt dat het 2D morfodynamische model de algemene sedimentatie- en erosiepatronen goed voorspelt, maar dat – conform de verwachtingen – het model niet geschikt is voor het berekenen van de sedimentdynamica in en rond de put. Dit heeft te maken met dat het 3D hydrodynamische karakter van de stroming in de put, erg bepalend is voor de sedimentdynamica. Deze kan met het 2D model niet worden berekend. Wel kan het model gebruikt worden om inzicht te krijgen in waar het sediment naartoe gaat als het eenmaal de put verlaten heeft. Hieruit blijkt dat het merendeel van het sediment richting het oosten wordt getransporteerd. Een deel hiervan komt in de hoofdgeul terecht en een ander deel op de binnenbocht-oost terecht, vanwaar uit het naar de drempel van Hansweert verplaatst, waar het weggebaggerd wordt en gestort wordt in SH41. De lichte sedimenttoename die in de Overloop van Hansweert wordt geobserveerd is mogelijk toe te schrijven aan de toename van het storten in SH41. Tot slot voorspelt het model dat een klein deel van het sediment in het luwe deel van het Middelgat terecht komt.

De modelberekeningen hebben de data-analyse hiermee met de volgende kennis aangevuld:

- Het sedimenttransport vanuit de kuil naar de binnenbocht vindt waarschijnlijk plaats via suspensietransport in combinatie met complexe 3D stromingspatronen. Mogelijk dat het sediment uit de kuil in eerste instantie op een breder gebied van de binnenbocht terechtkomt

(mogelijk ook westelijk van het middendeel tijdens de eb-stroming) en via de binnenbocht weer oostwaarts wordt getransporteerd.

- Het sediment dat het subdomein binnenbocht oost bereikt, komt volgens de berekeningen op de Drempel van Hansweert terecht. Vermoedelijk gebeurt dit in werkelijkheid ook, maar blijkt het niet uit de metingen, omdat dit sediment wordt weggebaggerd.
- Volgens de metingen treedt er in een specifiek gebied van het Middelgat een beetje extra sedimentatie sinds de proefstortingen (in alle andere delen is de sedimentatie juist afgenomen). Deze trend is echter niet significant ten opzichte van de historische veranderingen. Modelberekeningen laten in hetzelfde gebied een beperkte toename zien. Hiermee is het aannemelijk dat een deel van het sediment uit de Put van Hansweert uiteindelijk in het ondiepe deel van het Middelgat terechtkomt. Of het om een betekenisvolle toename gaat, valt op basis van huidige kennis niet met zekerheid vast te stellen, maar de effecten lijken beperkt te blijven.
- Uit de berekeningen is gebleken dat westelijk van de put de hoogste transporten via de binnenbocht plaatsvinden en oostelijke van de put via de hoofdgeul.

Volgens de berekeningen nemen bij het storten van extra sediment in de put de erosie- en sedimentatiepatronen toe in intensiteit, maar blijven de patronen gelijk. Dit suggereert dat bij meer of frequentere stortingen de richtingen van de sedimenttransporten niet wezenlijk zullen veranderen. Wel zullen de intensiteit en snelheid toe nemen.

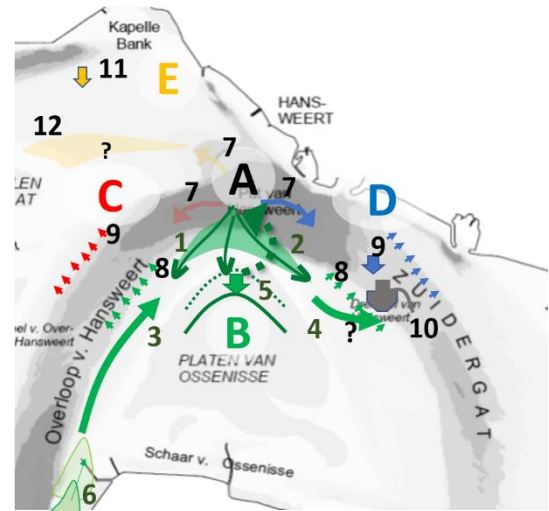


# 4 Synthese: conceptueel model sedimentdynamica na storten in diepe delen

## 4.1 Conceptueel model sedimenttransport rond Put van Hansweert na storting

Op basis van de analyses in de voorgaande hoofdstukken is in kaart gebracht waar het gestorte sediment naartoe beweegt en hoe snel deze processen gaan. Deze kennis is samengebracht in een conceptueel model, zie Figuur 4.1.

- A:** Opvullen diepe put  
Put leegt, sediment gaat via #1 zwevend transport richting binnenbocht (>70% van het volume) en #6 voor een klein deel (~10%) naar omliggende diepe delen.
- B:** Binnenbocht  
#2 via zettingsvloeiingen komt een deel van het sediment weer terug in de put. Een ander deel #4 verplaatst zich oostwaarts en komt mogelijk op de drempel van Hansweert terecht. Door aanzanding op de binnenbocht, wordt waarschijnlijk de erosie van de punt van plaat van Ossensisse versterkt #5.
- C:** Overloop van Hansweert  
#6 Stortingen bij Ossensisse verplaatsen zich #3 via de geulwand naar de binnenbocht. Door #8 uitbreiding binnenbocht treedt er #9 erosie van de buitenbocht op.
- D:** Zuidergat  
#10 Sediment dat via de hoofdgeul of de binnebocht op de Drempel van Hansweert terecht is gekomen wordt weggebaggerd. #8 door uitbreiding van de binnenbocht treedt er #9 erosie op in de geul en de buitenbocht.
- E:** Middelgat  
#11 In het algemeen is er sprake van een afname van de sedimentatie, #12 heel lokaal komt er naar verwachting via suspensietransport iets extra sediment terecht.



Figuur 4.1 Conceptueel model mesoschaal morfodynamiek rond de Put van Hansweert.

Uit het conceptuele model blijkt het volgende:

- Getijgemiddelde sedimenttransport is van west naar oost. De voortplantingssnelheid van de beddingvormen is 1 à 2 m/dag (~300 à 700 m/jaar). Westelijk van de put vinden de hoogste transportcapaciteiten plaats over de binnenbocht, oostelijk van de put in de hoofdgeul;
- Tijdens het storten wordt naar verwachting 10% à 20% van het sediment met de getijstroom meegevoerd en verspreid over een groter gebied. Dat het fijne deel wordt meegevoerd blijkt ook uit het feit dat het sediment op de bodem grover is dan in de beun (Plancke e.a. 2019). Het overige deel van het sediment komt in een straal van rond de 200 m rond de stortvakken terecht. Al binnen enkele dagen verspreidt dit sediment zich via zwevend transport met name naar de binnenbocht.
- Sediment dat in de put terecht komt, wordt (grotendeels) weer uit de put getransporteerd. De snelheid daarvan varieert tussen de 1100 en 3300 m<sup>3</sup>/dag (0.4 en 1.1 Mm<sup>3</sup>/jaar)<sup>1</sup>. Indien bij grotere stortvolumes de uitruimcapaciteit niet toereikend blijkt, kan er aanzanding gaan optreden. Hierdoor zal het doorstroomoppervlak ter hoogte van de put afnemen en naar verwachting de uitruimsnelheden toenemen. Of dit voldoende is om veel meer dan 1 Mm<sup>3</sup>/jaar uit te ruimen is onzeker.

<sup>1</sup> Deze snelheid is afgeleid uit peilingen. Als er tussen twee peilingen door een zettingsvloeiing optreedt, die hersteld voor de volgende peiling, heeft dit uiteraard een vertragend effect op het uitruimen en is de werkelijke snelheid van uitruiming hoger. Hoogst gemeten uitruimsnelheid is 2.4 Mm<sup>3</sup>/jaar.

- Van het sediment dat de put bereikt heeft, komt een aanzienlijk deel op de binnenbocht terecht. Dit proces vindt plaats op een tijdschaal van dagen tot maanden, en loopt door tot de put leeg is. Gezien de stortcampagne enkele weken duurt, treedt een aanzienlijk deel van dit transport op tijdens de campagne, maar niet tijdens het storten zelf. Er zijn diverse aanwijzingen dat het transport naar de binnenbocht hoofdzakelijk zwevend transport betreft (zie §2.5 en §3.4). Deze aanwijzingen zijn 1) dat het transport vanuit de put naar de binnenbocht al binnen enkele dagen optreedt, 2) dat kort na het storten de gemiddelde korrelgrootte in de put grover is geworden, wat erop duidt dat met name fijn sediment uit de put wordt getransporteerd, 3) dat numerieke 2D en 3D modellering geen bodemtransport naar de binnenbocht voorspellen en 4) dat er volgens de 3D modellering recirculatiecellen aanwezig zijn die fijne sedimentfracties in diverse richtingen kunnen transporteren.
- Bij sterke sedimentatie op de binnenbocht kan er een zettingsvloeiing optreden, waarbij het sediment van de binnenbocht afvloeit naar de kuil. Na de zettingsvloeiing herstelt het gat zich binnen afzienbare tijd. Na de zettingsvloeiing van 1.2 Mm<sup>3</sup> heeft de binnenbocht zich binnen een jaar hersteld. Het is aannemelijk dat de zettingsvloeiingen in frequentie en volume toenemen ten gevolge van het storten in de Put van Hansweert en in SH41.
- Sinds 2016 is de eroderende trend van de punt van plaat van Ossenissee versterkt. Het is aannemelijk dat dit gerelateerd is aan de sedimentatie op de binnenbocht, waarbij de resulterende afname van het doorstroomoppervlak onder NAP -5.5 m wordt gecompenseerd door erosie hogerop in het profiel, namelijk de plaatrand.
- Het sediment dat op de binnenbocht belandt verplaatst zich gedeeltelijk oostwaarts, waar het vermoedelijk op de Drempel van Hansweert terecht komt en wordt weggebaggerd.
- Ruim 10% van het gestorte sediment lijkt tijdens of kort na de proefstortingen in de diepe delen van de hoofdgeul en in de aanloop naar het Middeldgat terecht te komen, maar hier meestal ook weer uit te verdwijnen.
- Weinig tot geen sediment uit de Put van Hansweert komt uiteindelijk in de Overloop van Hansweert terecht. Alleen in het diepe deel, grenzend aan de put, komen initieel een kleine hoeveelheid sediment terecht, dat na enige tijd weer verdwijnt.
- Er lijkt weinig sediment in het Middeldgat terecht te komen. In het noordelijk deel van het Middeldgat neemt sinds de proefstortingen de bestaande sedimentatietrend zelfs af. Alleen lokaal in het ondiepere deel van het Middeldgat lijkt een klein deel van het gestorte sediment terecht te komen.
- Door stortingen in SH41, waarvan een deel van het sediment via de geulwand op de binnenbocht naast de Put van Hansweert terecht komt, en de stortingen in de Put van Hansweert, breidt de binnenbocht uit. Om de afname in doorstroomoppervlak te compenseren vindt hierdoor vermoedelijk (extra) erosie plaats in de buitenbocht en gedeeltelijk in de hoofdgeul. Opmerkelijk is dat het doorstroomoppervlak (onder -5 m NAP) in het Zuidergat en in de Overloop van Hansweert (zie Figuur 2.30) sinds de proefstortingen iets is toegenomen (~5%).

Het conceptuele model is een samenvatting van de huidige kennis en geeft inzicht in de mesoschaaldynamiek rond de Put van Hansweert. Op basis van nieuwe inzichten, volgend uit extra metingen of berekeningen, kan het conceptuele model verder worden aangescherpt.

## 4.2 Implicaties voor beheer

In deze paragraaf wordt het conceptuele model toegepast voor het beantwoorden van vraagstukken rond het sedimentbeheer.

#### 4.2.1 **Baggerinspanningen Drempel van Hansweert**

Naar verwachting komt een deel van het sediment uit de Put van Hansweert via de binnenbocht op de Drempel van Hansweert terecht. Verwacht wordt dat de baggerinspanningen hierdoor zullen toenemen. Hoe groot de toenames zullen zijn is op basis van de huidige data-analyse en berekeningen niet goed te schatten. Op het moment blijft een groot deel van het sediment nog achter op de binnenbocht (>70%). Ook is er nog geen (significante) toename te zien van de baggerinspanningen op de Drempel. Echter, de hoeveelheid van sediment dat achterblijft op de binnenbocht neemt af in de tijd. Het is waarschijnlijk dat dit samenhangt met dat door de verkleining van het doorstroomoppervlak de snelheden lokaal toenemen. Verwacht wordt daarom dat bij het storten van meer sediment ook relatief minder achterblijft op de binnenbocht en op den duur ook meer oostwaarts getransporteerd zal worden en op de Drempel terecht zal komen.

Omdat het met huidige kennis niet mogelijk is een betere schatting te maken van het transport naar de Drempel, is het raadzaam om bij verhoging van de stortvolumes het gebied en de baggervolumes goed te blijven monitoren en bij ongewenste effecten de storthoeveelheden aan te passen en meer te storten op een andere locatie.

Belangrijk is om op te merken dat een deel van het sediment dat nu in SH41 wordt gestort via de binnenbocht uiteindelijk ook de Drempel van Hansweert bereikt. Of de baggerinspanningen daadwerkelijk toe gaan nemen hangt daarmee mede af van de hoeveelheden die in de toekomst in SH41 zullen worden gestort.

#### 4.2.2 **Aanzanding Middelgat**

Of de aanzanding van het Middelgat gemiddeld zal af- of toenemen is moeilijk te voorspellen op basis van huidige kennis. Er zijn aanwijzingen dat de sedimentatie lokaal in het ondiepe deel van het Middelgat iets zal toenemen, naar verwachting gaat het hierbij om beperkte hoeveelheden. In de overige delen van het Middelgat lijkt de sedimentatie juist iets af te nemen. Het lijkt daarmee niet aannemelijk dat de aanzanding van het gehele Middelgat zal worden versterkt, mogelijk zal de afname in sedimentatie zelfs doorzetten. Omdat het op basis van huidige data en modelkennis niet mogelijk is de prognose aan te scherpen, wordt geadviseerd het gebied te blijven monitoren en bij eventuele onverwachte en ongewenste versterkte sedimentatie in het Middelgat de storthoeveelheden of stortlocatie aan te passen.

#### 4.2.3 **Effect frequentere of grotere stortingen in de Put van Hansweert**

Naar verwachting zullen frequentere stortingen of grotere stortingen leiden tot een intensivering van de huidige trends, zoals beschreven in het conceptuele model. Door afname van het doorstroomoppervlak zal sediment naar verwachting sneller uit de put richting de omliggende diepe delen en de binnenbocht worden getransporteerd. Indien meer sediment op de binnenbocht terecht komt, kan dit leiden tot een toename van de frequentie en grootte van de zettingsvloeiing. Ook kan hierdoor de hoeveelheid sediment die op de Drempel van Hansweert terecht komt toenemen. De erosie van de buitenbochten en de plastrand, welke waarschijnlijk (mede) veroorzaakt wordt door de stortingen in de put en SH41, zal naar verwachting doorzetten, tenzij dit beperkt wordt door de aanwezigheid van erosiebestendige lagen.

Voor de langere termijn is de verwachting dat de binnenbocht geleidelijk van vorm zal veranderen, waarbij de binnenbocht verder aangroeit en de buitenbocht of de hoofdgeulen eroderen. Of dit ook ten westen van de Put gebeurt zal in belangrijke mate afhangen van de stortingen in SH41. Of de aanzanding van het Middelgat gemiddeld zal af- of toenemen is moeilijk te voorspellen op basis van de huidige kennis. Het is onbekend hoe de stroompatronen in de put zich gaan ontwikkelen en daarmee is het onzeker of het sedimenttransport naar het Middelgat zal af- of toenemen. Dit wordt momenteel nader verkend in een aanvullende studie.

Hoe met de hierboven beschreven onzekerheden omgegaan kan worden ten aanzien van het inrichten van een nieuw bagger- en stortbeleid wordt beschreven in de aanbevelingen (§5.2.1)

#### 4.2.4 Invloed locatie van de stortingen in de kuil

Naar verwachting verlaat een aanzienlijk deel van het sediment de put via suspensietransport. De recirculatiecellen spelen hier waarschijnlijk een belangrijk rol in. Het aantal, de locatie en richting van de cellen varieert in tijd en ruimte. Het is daarmee denkbaar dat als het sediment in een ander deel van de put wordt gestort dit invloed heeft op de verspreidingsrichting.

Om te bepalen of de exacte locatie van het storten uitmaakt voor de richting waarin het sediment zich verspreid is daarom tijdens de laatste stortcampagne eerst 0.3 miljoen m<sup>3</sup> gestort in het noordelijke deel van de put en vervolgens 0.7 miljoen m<sup>3</sup> in het zuidelijke deel van de put, tegen de binnenbocht aan. Tijdens de weken waarin gestort wordt nam in beide gevallen de sedimentatie op de binnenbocht toe, wat suggereert dat in beide gevallen het transport vanuit de put naar de binnenbocht dominant is. Of er ook een verschil is in sedimentatie naar het Middelpgat kon niet worden vastgesteld, omdat dit gebied pas na beide proefstortingen is ingemeten.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Doel van huidige studie was om de morfologische ontwikkelingen ten gevolge van het storten van sediment in de diepe Put van Hansweert te onderzoeken. Middels een combinatie van data-analyse en numerieke modellering is daarom in kaart gebracht hoe snel het sediment de put verlaat en waar het sediment zich in welke hoeveelheden naartoe verplaatst (§5.1.1). Neveneffecten, als erosie ten gevolge van sedimentatie zijn geïdentificeerd. Ook is de invloed van stortingen elders in het gebied op de dynamica rond de Put van Hansweert zo goed mogelijk gekwantificeerd (§5.1.2). Wat er gaat gebeuren wanneer er meer en vaker gestort gaat worden, wordt in kwalitatieve zin besproken, maar blijkt lastig te kwantificeren (§5.1.3). Met het oog hierop volgen in de aanbevelingen onder meer een aantal meetadviezen over hoe om te gaan met deze onzekerheden (§5.2).

#### 5.1.1 Het uitrusten van de put en de verspreiding van sediment naar omliggend gebied

Op basis van data-analyse en modelberekeningen is de sedimentdynamica rond de Put van Hansweert in kaart gebracht. Het resultaat is samengevat in een conceptueel model, zoals gepresenteerd in Figuur 4.1. De belangrijkste conclusies hiervan zijn dat tijdens het storten naar verwachting 10% à 20% van het zand, met name de fijne fractie, wordt meegevoerd met de getijstroom en verspreid over een groter gebied. Op de tijdschaal van dagen tot maanden verspreidt vervolgens een groot deel van het sediment uit de put zich via suspensietransport naar de binnenbocht. De gemiddelde geobserveerde uitrustingsnelheid varieert daarbij tussen de 0.4 en 1.1 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. De maximale uitrustingsnelheid, gemeten over 20 dagen, betrof 6600 m<sup>3</sup>/dag, i.e. 2.4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

Het meeste sediment komt na storting op de binnenbocht terecht. Na de eerste storting was dit naar schatting meer dan 90%, na de derde storting 67 à 75%. Vanuit hier komt het of via een zettingsvloeiing weer in de put terecht of wordt het over de binnenbocht naar het oosten getransporteerd. Via de hoofdgeul of via de binnenbocht wordt naar verwachting een groot deel van dit sediment uiteindelijk naar de Drempel van Hansweert getransporteerd, waar het wordt weggebaggerd. Het gaat vooralsnog niet om grootte hoeveelheden, want er is nog geen (significante) toename in baggervolumes geobserveerd. Verwacht wordt echter dat er bij grotere of frequentere stortingen relatief steeds minder sediment achter zal blijven op de binnenbocht en het percentage dat op de Drempel terecht zal komen toe gaat nemen. Op basis van huidige kennis is het niet mogelijk om hier precieze schattingen van te geven. Met het oog op deze onzekerheid is het aan te raden om bij het storten in de Put van Hansweert de bodemveranderingen en baggerhoeveelheden te blijven monitoren en bij ongewenste effecten de stortstrategie aan te passen.

Omdat het een groot deel van het sediment op de binnenbocht achterblijft, neemt het doorstroomoppervlak onder NAP -5.5 m af. Uit een analyse van satellietbeelden blijkt dat het puntje van de plaat van Ossenissee sinds de proefstortingen versneld erodeert. Het is daarmee aannemelijk dat het verlies in doorstroomoppervlak onder NAP -5.5 m, wordt gecompenseerd met erosie hogerop in het profiel.

Tot slot verplaatst een klein deel van het sediment zich vanuit de put naar de diepe delen van de hoofdgeul westelijk en oostelijk van de put, maar verdwijnt hier ook weer uit, blijkens de tijdelijke toenames in sedimentvolume na elke storting. Waar dit sediment uiteindelijk terechtkomt is moeilijk te achterhalen, omdat het om kleine hoeveelheden sediment gaat, wat zich verspreidt over een groter gebied. De aanzandende trend in het Middelgat lijkt hooguit lokaal versterkt te worden door de storting in de Put van Hansweert. In andere delen van het Middelgat neemt de sedimentatietrend juist af. Er zijn vooralsnog geen duidelijke aanwijzingen dat het Middelgat in zijn geheel versneld zal sedimenteren ten gevolge van de stortingen, de verwachting is eerder dat de huidige sedimentatietrend verder af zal nemen.

### 5.1.2 Invloed van stortingen elders op de sedimentdynamiek rond de Put van Hansweert

Er zijn sterke aanwijzingen dat het sediment van de stortingen in SH41 (een stortvak ten zuidwesten van de Put van Hansweert), via suspensie- en bodemtransport langs de geulwand naar de binnenbocht worden getransporteerd. Samen met het sediment uit de Put van Hansweert zandt hierdoor de binnenbocht aan. De extra erosie die optreedt in de buitenbocht en in de hoofdgeul is vermoedelijk een compensatie van de aanzanding op de binnenbocht.

Westelijk van de Put van Hansweert is deze eroderende trend (tussen NAP -18 m tot bovenin) al voor de proefstortingen in de Put van Hansweert ingezet, ten gevolge van aangroei van de binnenbocht door stortingen in SH41. Oostelijk van de Put van Hansweert is de erosie van de hoofdgeul sinds de proefstortingen versterkt en heeft er op de buitenbocht (< NAP -12 m) een omslag plaatsgevonden van sedimentatie naar erosie. Omdat een deel van het sediment uit SH41 uiteindelijk ook via de binnenbocht op de Drempel van Hansweert terecht komt, hangt het ook van deze stortingen af hoe groot de baggerinspanningen op de Drempel van Hansweert zullen worden. De veranderingen in baggervolumes en erosie- en sedimentatiepatronen rond de Put van Hansweert, zijn daarmee een resultante van veranderingen in de sedimentbeheer in de put zelf én van veranderingen in sedimentbeheer elders in de buurt van de Put van Hansweert.

### 5.1.3 Verwachtingen bij grotere hoeveelheden of frequentere stortingen

Bij grotere storthoeveelheden is het onzeker of de put voldoende uitruimcapaciteit heeft om al het sediment te transporteren, waardoor mogelijk enige aanzanding van de put kan gaan optreden. Indien sediment achterblijft in de put of ter plekke op de binnenbocht en dit niet volledig gecompenseerd wordt door erosie hogerop in het profiel, zullen de stroomsnelheden toenemen en wordt verwacht dat de uitruimcapaciteit ook zal toenemen. Er zal dus meer sediment getransporteerd kunnen worden. Of dit voldoende is om veel meer dan 1 Mm<sup>3</sup>/jaar uit te ruimen is onzeker. Daarnaast wordt verwacht dat er relatief steeds minder sediment op de binnenbocht achter zal blijven en het gestorte sediment daardoor in toenemende mate in oostwaartse richting getransporteerd zal worden, richting de Drempel van Hansweert. De erosie van de buitenbochten en de plaatrand zal naar verwachting doorzetten, tenzij de erosie beperkt of verhinderd wordt door aanwezigheid van moeilijk erodeerbare bodemlagen of bestortingen.

## 5.2 Aanbevelingen

### 5.2.1 Optimalisatie stortbeleid middels storten en monitoren

Op basis van de huidige metingen en berekeningen is het niet mogelijk om te kwantificeren wat er gaat gebeuren indien er frequenter en grotere hoeveelheden sediment in de put gestort gaan worden. Onzekerheden zijn daarbij 1) of er voldoende uitruimcapaciteit is om te put te blijven legen, 2) tot hoeveel extra sedimentatie het zal leiden op de Drempel van Hansweert, 3) of de sedimentatie van het Middelgat verder zal blijven afnemen, of dat er (lokaal) toch een toename van sedimentatie zal optreden en 4) of de erosie van de noordelijke rand van de plaat van Ossensisse zal doorzetten. Met het oog op deze onzekerheden en het feit dat de geometrie van het gebied naar verwachting sterk zal veranderen onder invloed van de stortingen, wordt geadviseerd om bij het storten in de put de omgeving te blijven monitoren. Bij voorkeur wordt enkele dagen voor en na elke storting, en in de maanden opvolgend nog enkele keren, een gebied met een straal van 5 km rond de Put van Hansweert ingemeten. Ook is het aan te raden de ondiepe wateroever van de plaat van Ossensisse tweejaarlijks te monitoren.

Indien zich ongewenste effecten voordoen kan dit op basis van de monitoring worden vastgesteld en de stortstrategie zo nodig aangepast worden. Zo kan middels storten en monitoren het stortbeleid verder worden geoptimaliseerd.

### 5.2.2 Meetadvies voor het bepalen van de invloed van de stortlocatie op sedimentverspreiding

Om te bepalen of de exacte locatie van het storten uitmaakt voor de richting waarin het sediment zich verspreid is tijdens de laatste stortcampagne eerst 0.3 miljoen m<sup>3</sup> gestort in het noordelijke deel

van de put en vervolgens 0.7 miljoen m<sup>3</sup> in het zuidelijke deel van de put, tegen de binnenbocht aan. Tijdens de weken waarin gestort wordt neemt in beide gevallen de sedimentatie op de binnenbocht toe, wat suggereert dat in beide gevallen het transport vanuit de put naar de binnenbocht dominant is. Het kon echter niet worden vastgesteld of het verschil in stortlocatie invloed heeft op de verspreidingsrichting, bijvoorbeeld of bij het storten aan de noordkant meer sediment in het Middelgat terecht komt en bij het storten nabij de binnenbocht meer sediment oostelijk van de put terecht komt. Pas na afloop van beide stortingen werd namelijk weer een groter gebied is ingemeten. Er kon dus geen onderscheid gemaakt worden tussen de relatieve bijdrage van beide stortingen aan volumeveranderingen verder buiten de put. Daarnaast ging het om relatief kleine hoeveelheden (0.3 en 0.7 miljoen m<sup>3</sup>), welke te klein zijn om tot waarneembare verschillen te leiden bij verspreiding over een grotere gebied. Om te kunnen vaststellen of de locatie in de put van invloed is op richting van verspreiding van sediment, is het advies om enkele keren 1 miljoen m<sup>3</sup> in een bepaalde locatie te storten en voorafgaand en na afloop van deze stortingen het hele gebied rond de kuil (dekking 3) in te meten met multi-beam. Vervolgens kan deze procedure herhaald worden voor een andere locatie.

### **5.2.3 Invloed aangroei binnenbocht op ontwikkeling plaatrand**

Op basis van satellietbeelden blijkt dat de punt van de plaat van Ossensisse sinds de proefstortingen versneld erodeert. Omdat met satellietbeelden alleen een indicatie verkregen kan worden van de verplaatsing van de waterlijn, en niet van de bodemveranderingen net onder de waterspiegel, wordt geadviseerd deze trend nader te onderzoeken op basis van LIDAR data.

### **5.2.4 Scheiden invloed van andere werkzaamheden op de ontwikkelingen rond de stortlocatie**

De ontwikkelingen rond de Put van Hansweert kunnen niet los worden gezien van andere werkzaamheden in de buurt van de put, zoals blijkt uit de invloed van het storten in het stortvak ten zuidwesten van de put (SH41) op de aangroei van de binnenbocht. Advies is om bij vervolganalyses ten aanzien van de invloed van het storten in de put ook de andere werkzaamheden en veranderingen daarin te beschouwen. Hiermee kunnen geobserveerde trends beter geduid worden en de relatieve bijdrage van de stortingen in de Put van Hansweert aan sedimentatie of erosietrends aangescherpt worden.

### **5.2.5 Inzet numerieke modellering**

De modelberekeningen met bodemtransport verklaren niet de sedimentatie- en erosiepatronen die we zien. Daarnaast blijkt uit de data-analyse dat een aanzienlijk deel van het sediment zich al snel richting de binnenbocht verplaatst. Dit duidt erop dat suspensietransport en de complexe stromingsprocessen een belangrijke rol spelen voor het transporteren van sediment uit de put. Omdat deze met een 2D model maar ten dele worden berekend, wordt geadviseerd om te onderzoeken of met 3D morfologische modellering meer inzicht verkregen kan worden in de lokale sedimentdynamiek, zodat de getallen ten aanzien van sedimentatie op de drempel en verspreiding van sediment in andere richtingen aangescherpt kunnen worden.

Ten tweede blijkt uit de data-analyse dat de geometrie van het systeem verandert; de binnenbocht zandt aan, de buitenbocht erodeert en de vorm van het dwarsprofiel verandert. Dit zal gevolgen hebben voor het stroombeeld en kan daarmee ook tot verschuivingen leiden in de hoeveelheden sediment die in de diverse richting getransporteerd worden. Met behulp van numerieke modellering kan inzicht verkregen worden van de invloed van zo'n systeemverandering op de sedimentdynamiek.

### **5.2.6 Inschatting effect van storten in andere diepe delen**

Voor de nieuwe stortstrategie worden meerdere diepe putten als stortlocatie voorzien. Voor het bepalen van de morfologische effecten van het storten in andere diepe delen, kunnen de inzichten uit huidig rapport als basis dienen. Een aantal inzichten gelden daarbij naar verwachting voor elke locatie, zoals het initiële verlies van sediment tijdens het storten, het grote belang van suspensief transport en het legen van de put bij voldoende uitruimcapaciteit. Gecombineerd met de

systeemkennis van elke locatie kan daarmee een eerste inschatting worden gemaakt van de morfologische respons. Echter, hoe sterker de lokale condities verschillen (bochtstraal, eb- of vloeddominantie, het wel of niet samenkomen van eb en -vloedgeulen), hoe onzekerder de doorvertaling. Om een breder beeld te krijgen van de respons op storten, wordt daarom geadviseerd om een vergelijkbare analyse uit te voeren voor zoveel mogelijk locaties waar proefstortingen hebben plaatsgevonden, zoals voor de Inloop van Ossensisse.

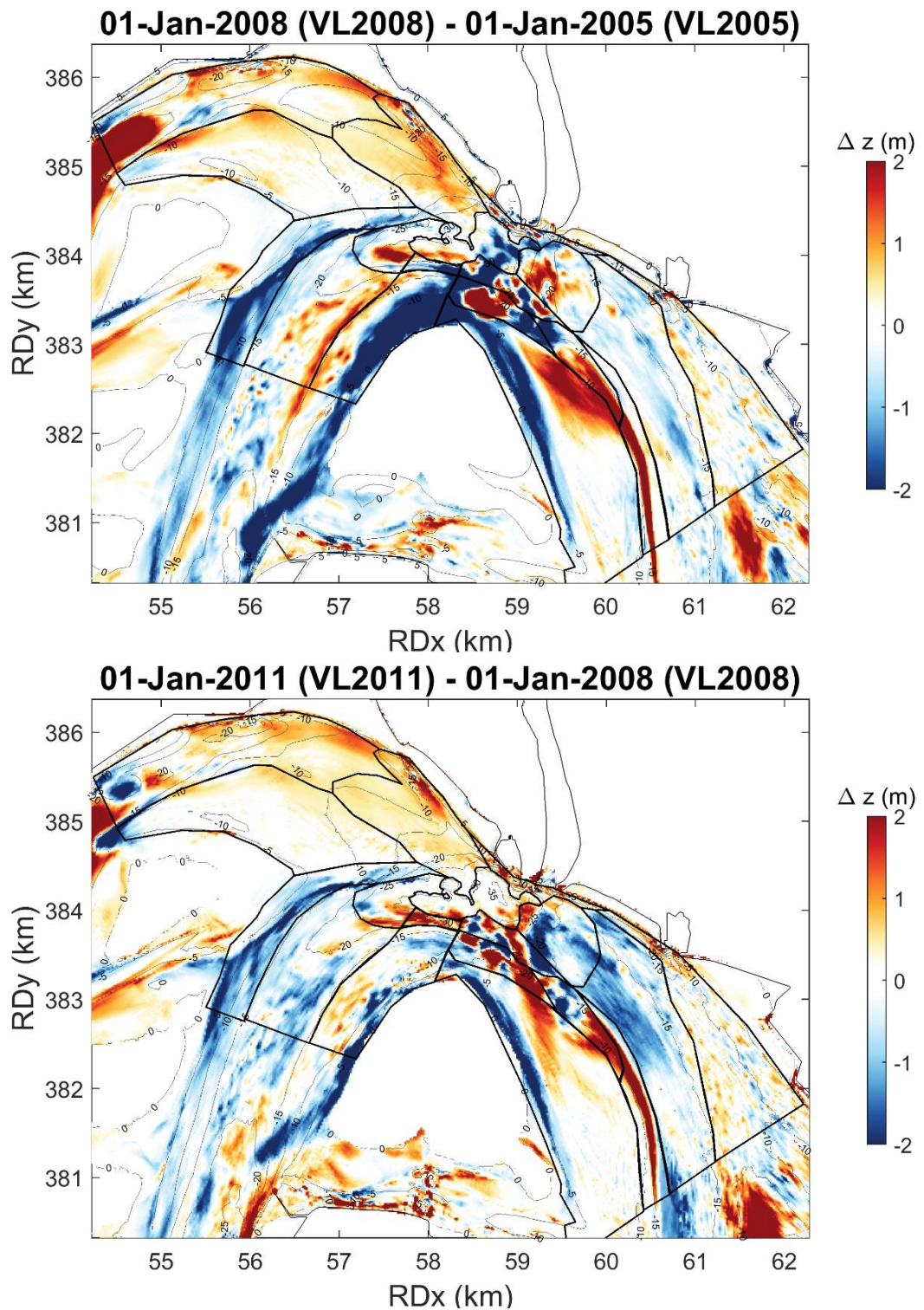


# Referenties

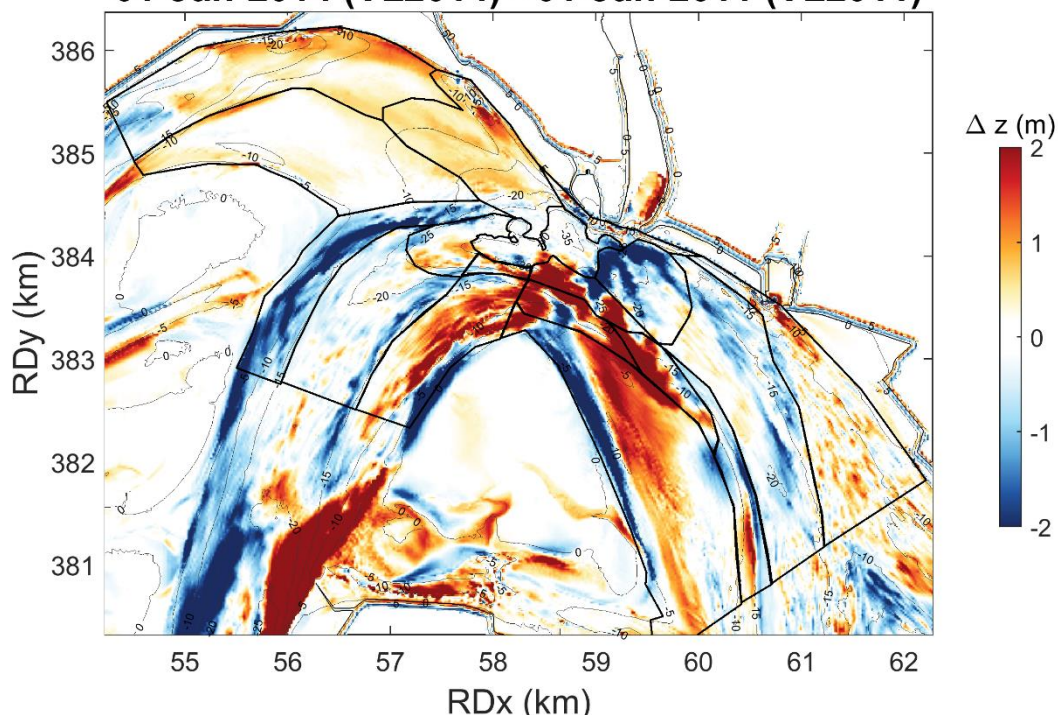
- Decrop, Boudewijn. 2019. "CFD Modelling van de Verdeling Zand Na Het Kleppen Boven Een Diepe Put." presented at the VNSC bijeenkomst, IMDC, October.
- Huisman, Bas, Reinier Schrijvershof, Thijs Lanckriet, and Jebbe Van der Werf. 2018. "Baggerdepositie in Diepe Geulen. Strategie Voor Het Plaatsen van Sediment in de Diepere Getijdegeulen van de Westerschelde." 1210301-000-ZKS-0027. Delft: Deltares.
- Pandelaers, Cleo, and Eleftheria Kragiopoulou. 2019. "Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 6: Flexibel Storten 2018-2019 - Maandrapport April-Mei 2019." I/RA/11498/19.071/CPA/. IMDC.
- Schrijvershof, Reinier, and Julia Vroom. 2015. "Overzicht van Menselijke Ingrepen in de Westerschelde En Haar Mondingsgebied in de Periode 1985-2014." Memo 1210301-001-ZKS-0005. Delft: Deltares.
- Van der Vegt, Helena, Dick Mastbergen, and Jebbe Werf. 2019. "Moeilijk-Erodeerbare Lagen in de Westerschelde - Onzekerheden En Gevolgen Voor Morfodynamiek." 210301-015-ZKS-0008. Delft: Deltares.
- Vroom, Julia, Lodewijk De Vet, and Jebbe Van der Werf. 2015. "Validatie Waterbeweging Delft3D-NeVia Model Westerscheldemonding." 1210301-001-ZKS-0001. Delft: Deltares.
- Wegen, Mick van der, Reinier Schrijvershof, Ana Colina Alonso, Yorick Broekema, Wouter Kranenburg, and Bas Huisman. 2019. "Hydrodynamics in the Pits of Borssele and Hansweert - Data-Analysis and Delft3D-FM Modeling." 1210301-015. Delft, the Netherlands: Deltares.

# A Bodem en volumeveranderingen

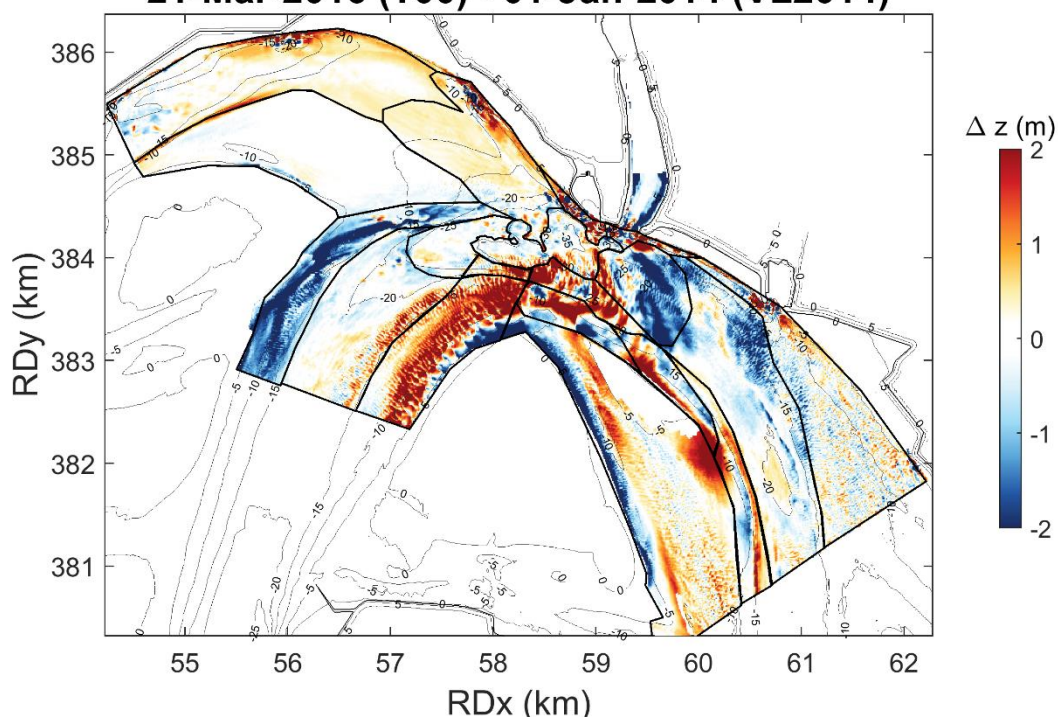
## A.1 Bodemverandering per 3 jaar



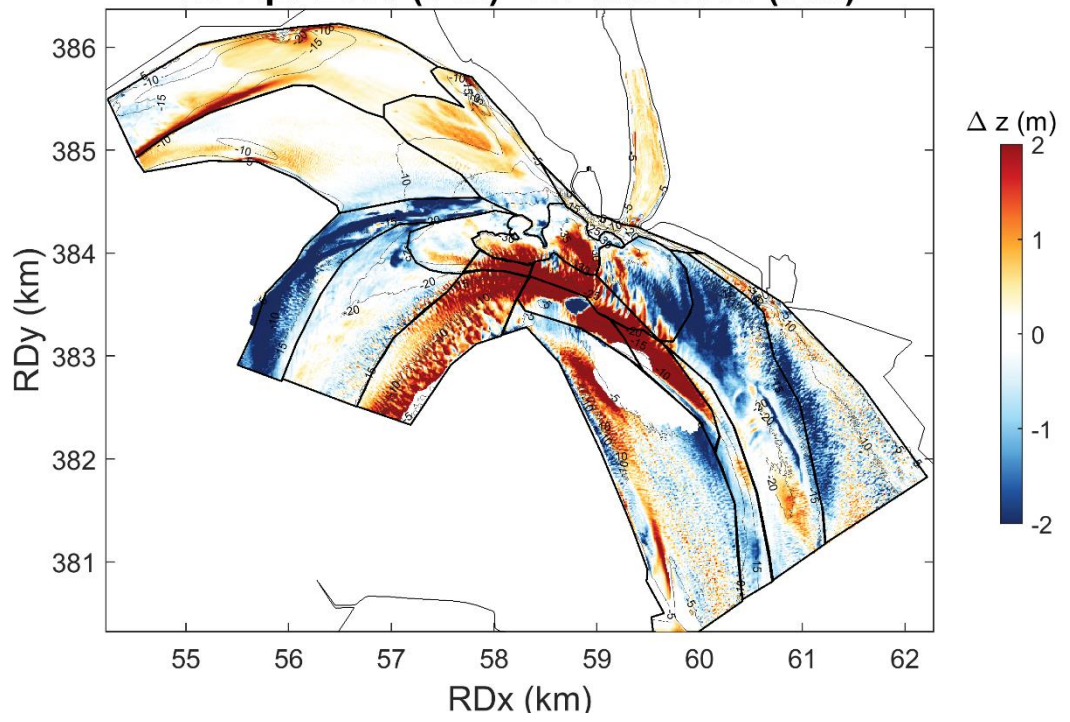
**01-Jan-2014 (VL2014) - 01-Jan-2011 (VL2011)**



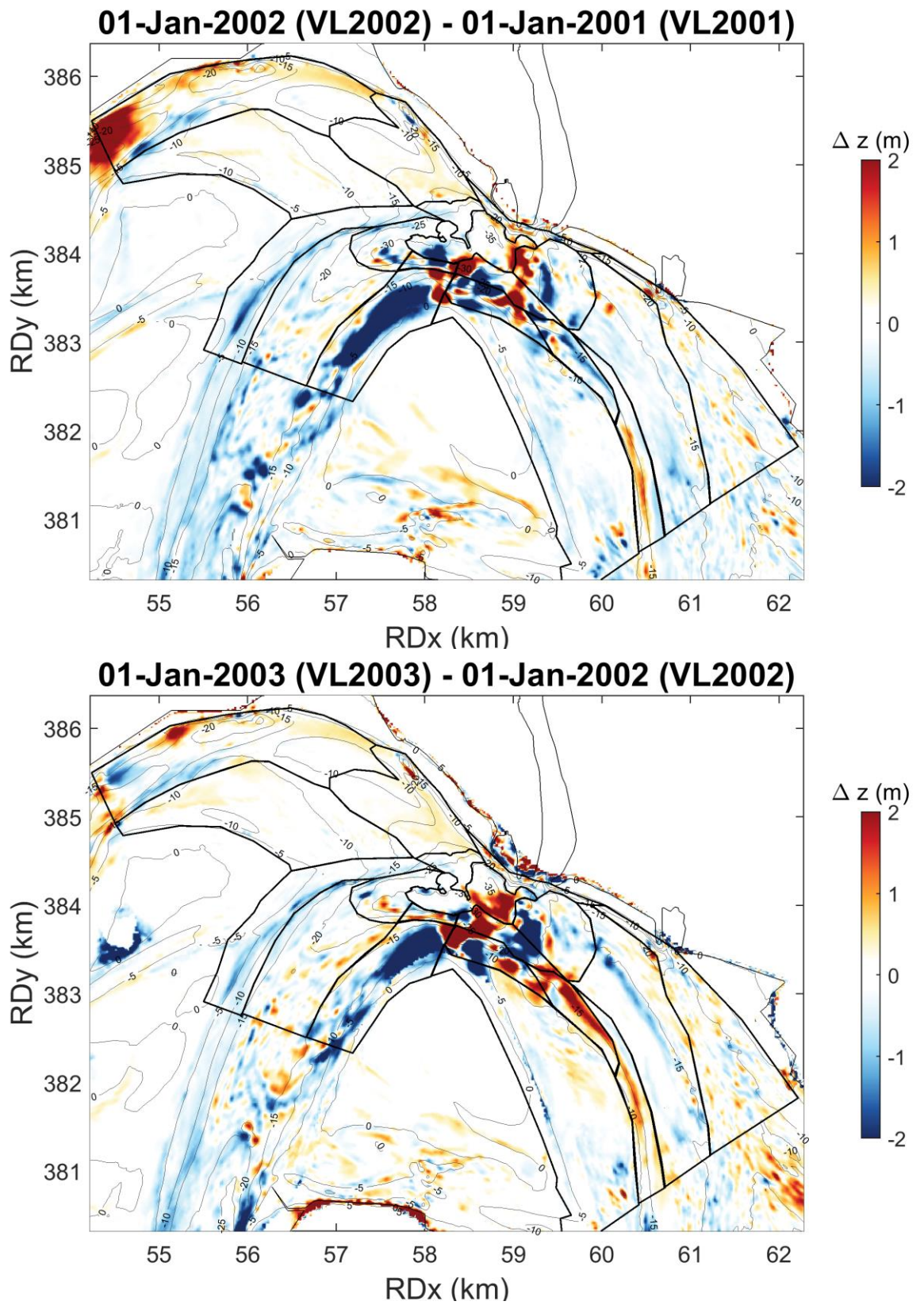
**21-Mar-2016 (T00) - 01-Jan-2014 (VL2014)**



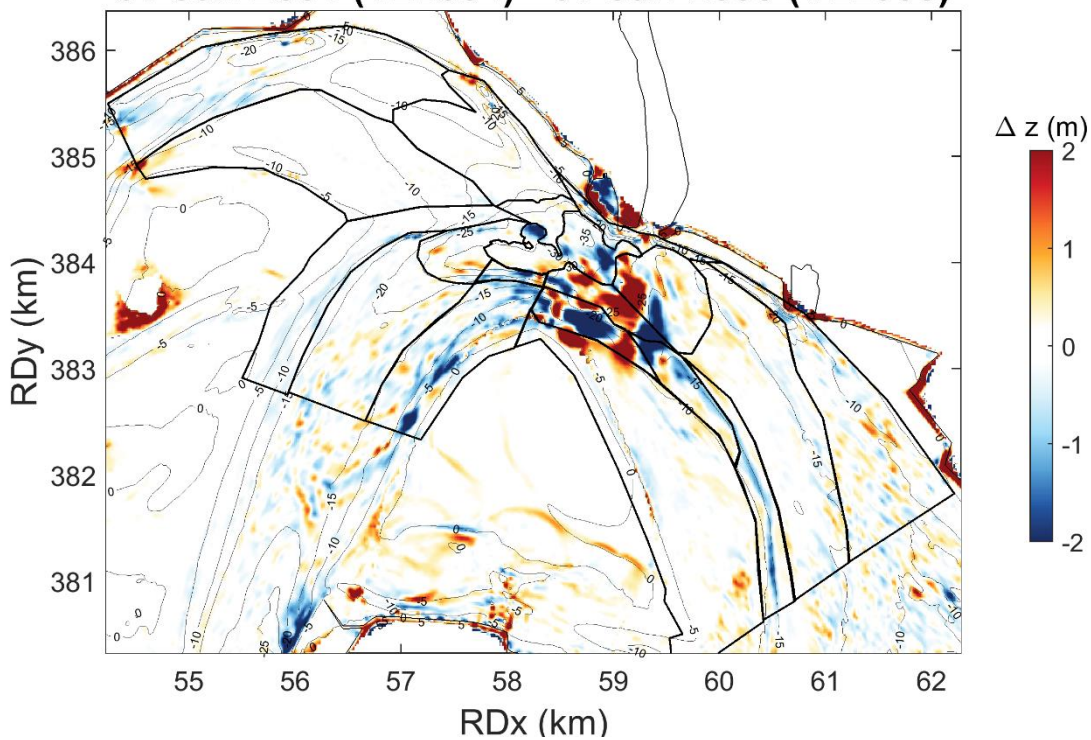
### 28-Apr-2019 (T19) - 21-Mar-2016 (T00)



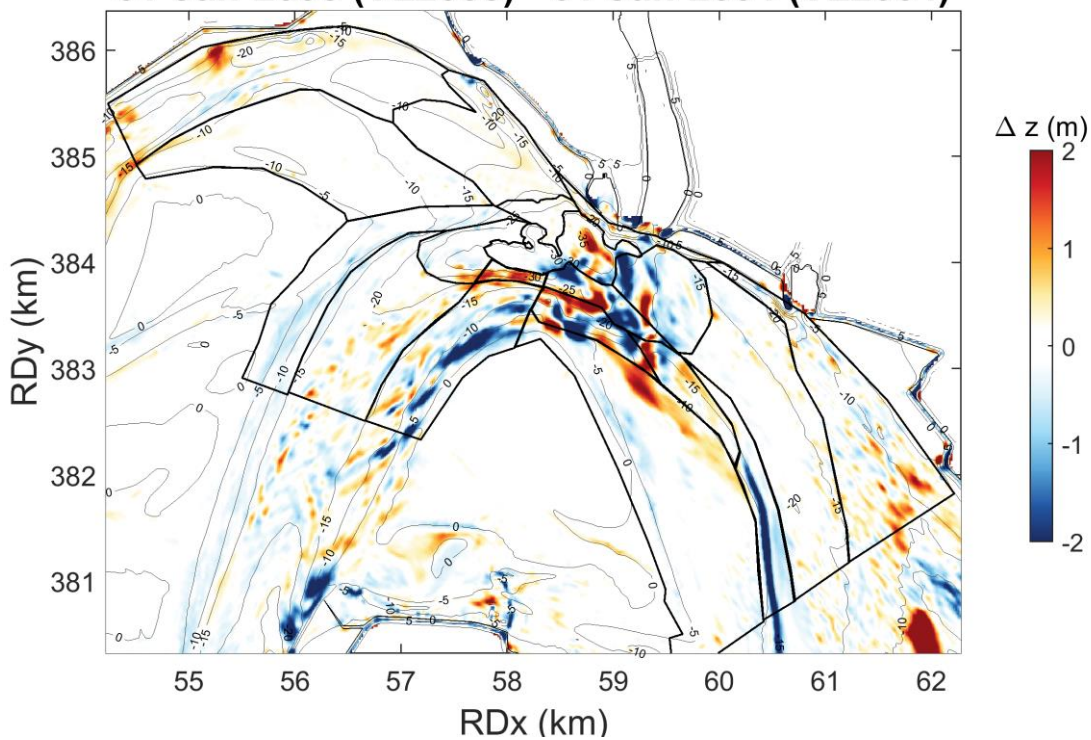
A.2 Bodemveranderingen per meting, alle opnames



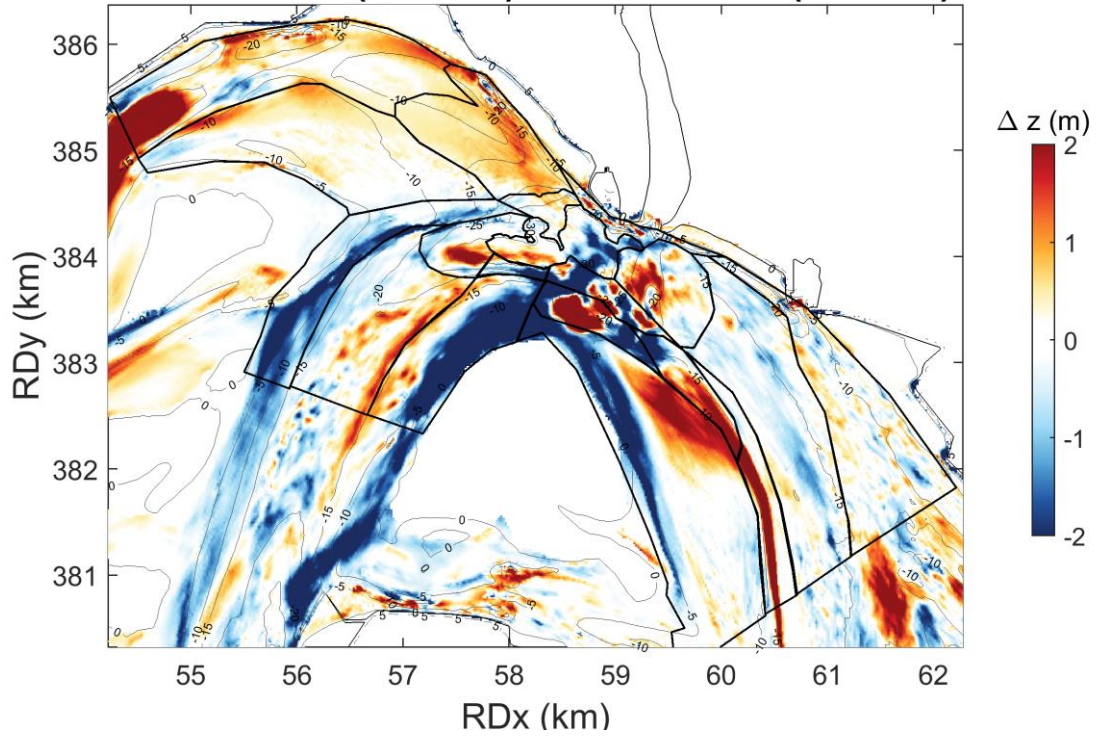
### 01-Jan-2004 (VL2004) - 01-Jan-2003 (VL2003)



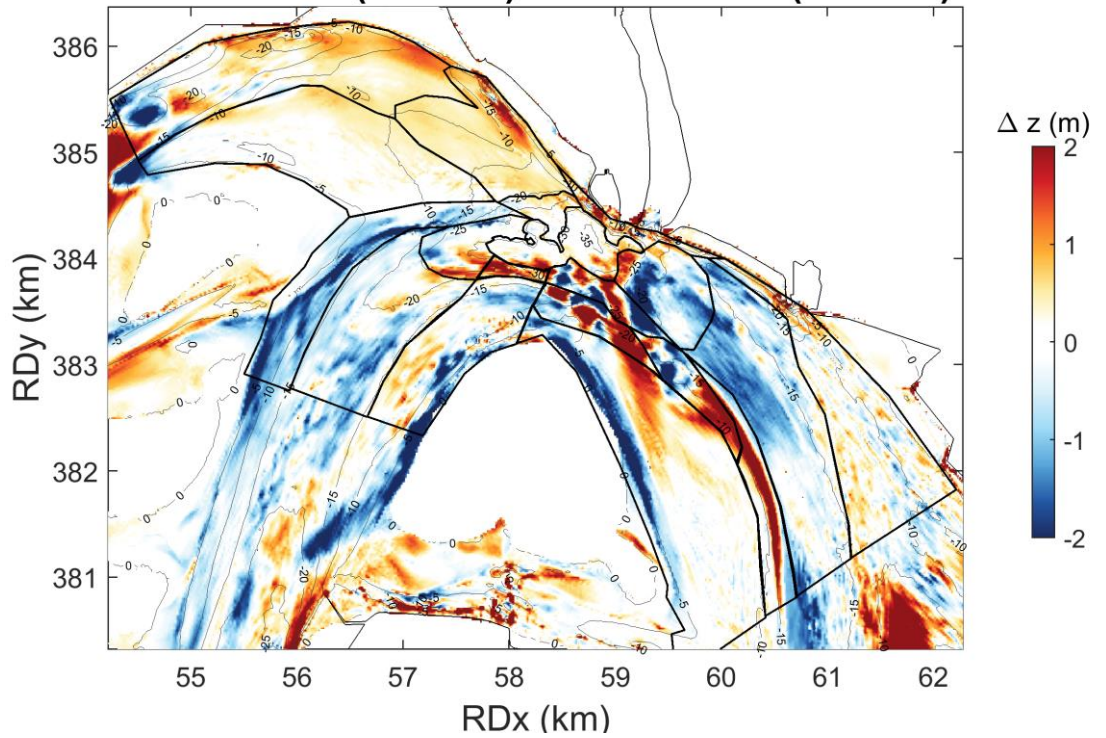
### 01-Jan-2005 (VL2005) - 01-Jan-2004 (VL2004)



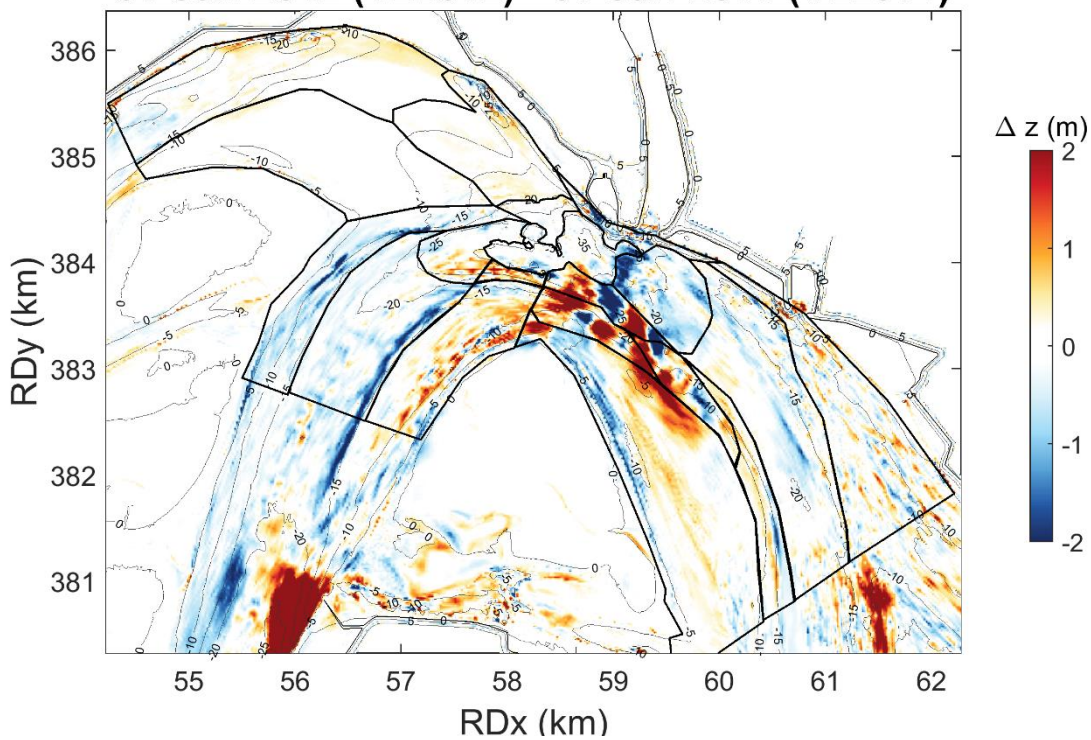
### 01-Jan-2008 (VL2008) - 01-Jan-2005 (VL2005)



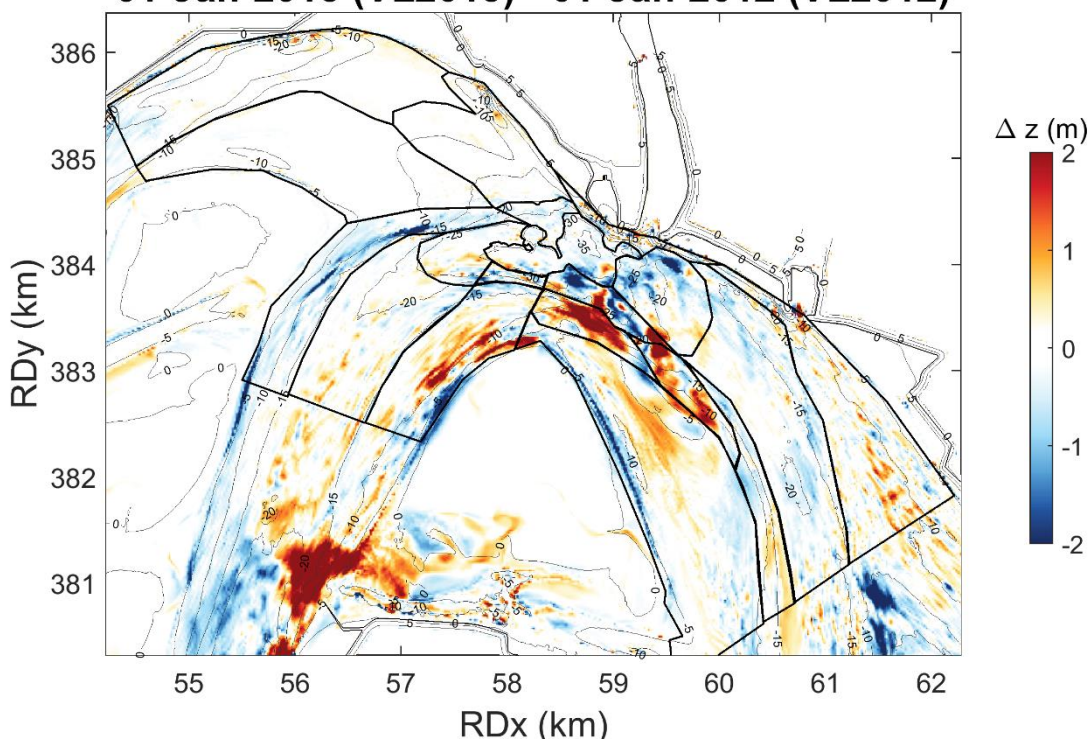
### 01-Jan-2011 (VL2011) - 01-Jan-2008 (VL2008)



### 01-Jan-2012 (VL2012) - 01-Jan-2011 (VL2011)

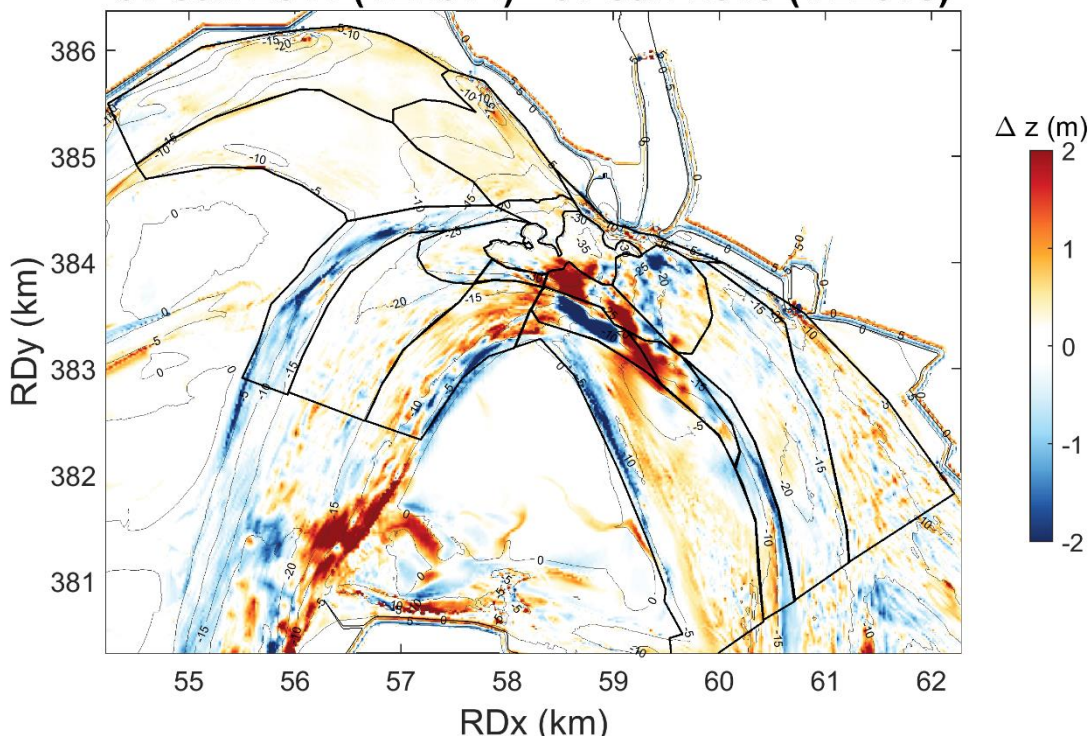


### 01-Jan-2013 (VL2013) - 01-Jan-2012 (VL2012)

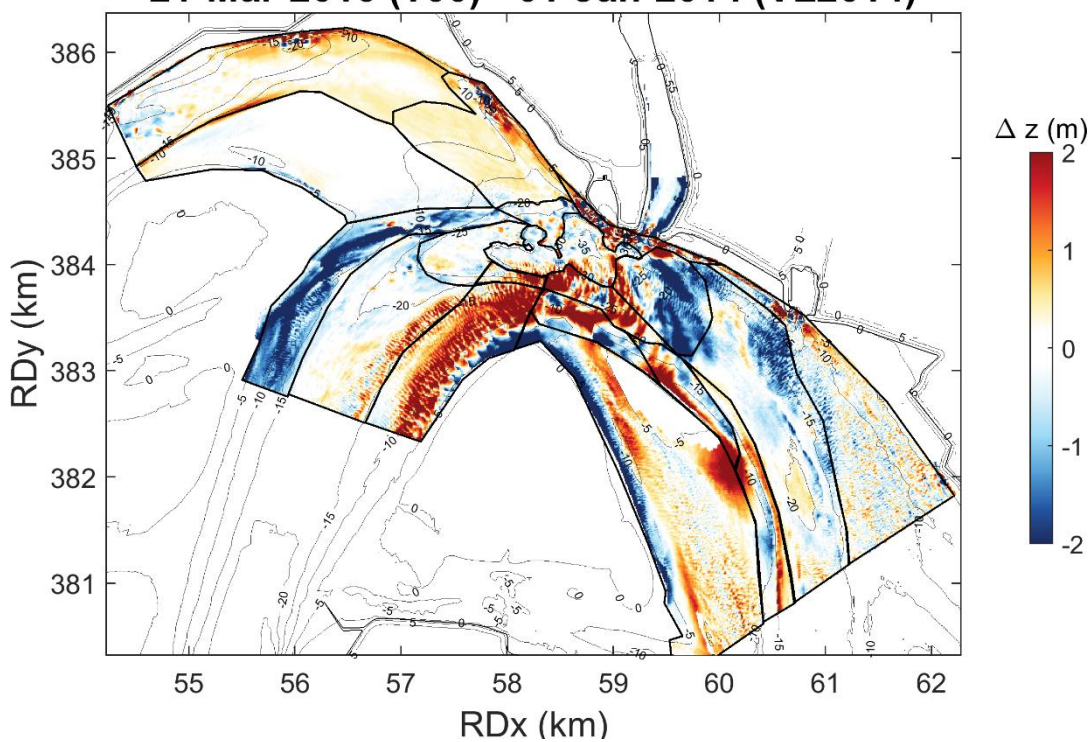




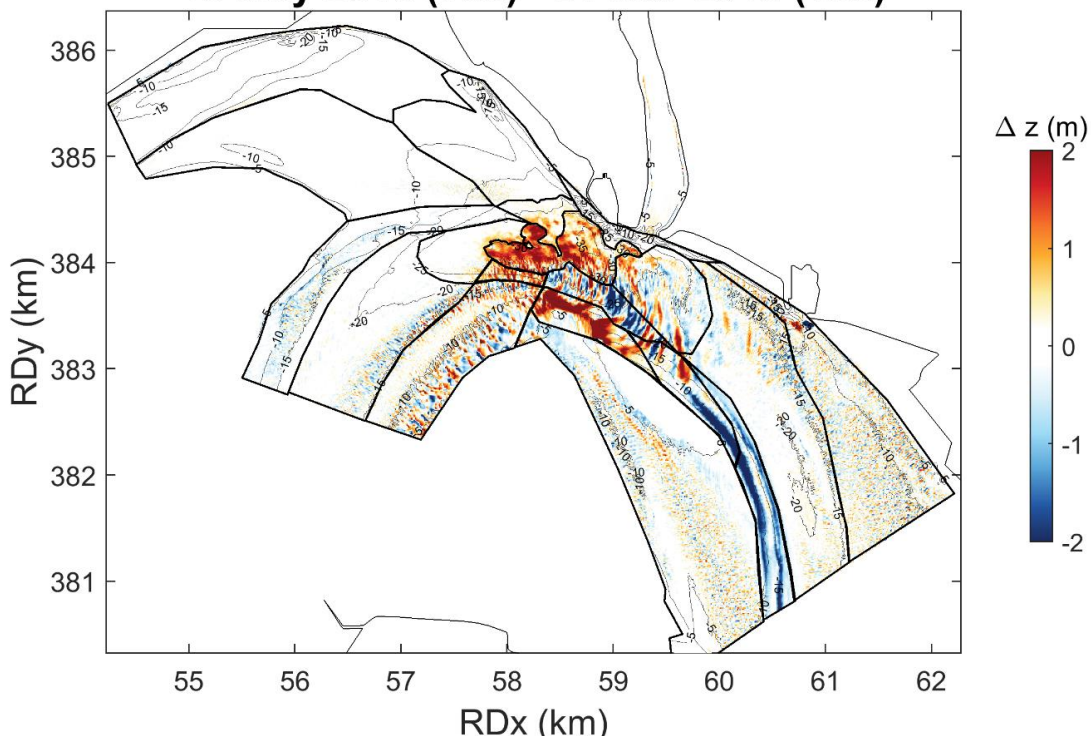
### 01-Jan-2014 (VL2014) - 01-Jan-2013 (VL2013)



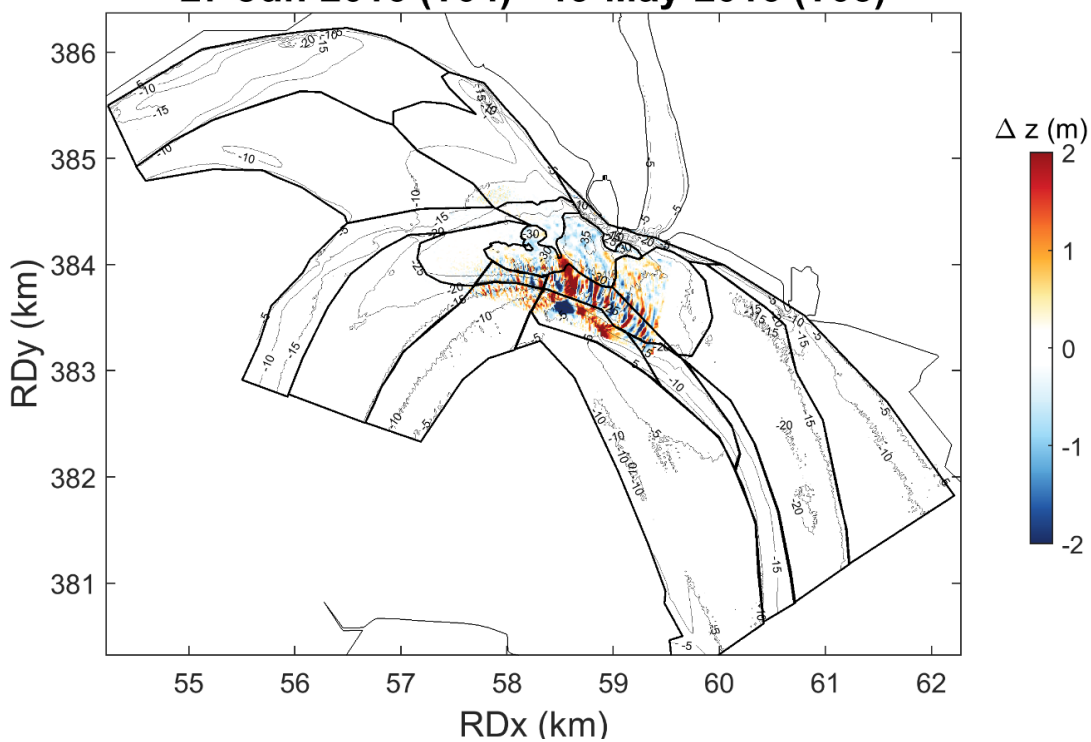
### 21-Mar-2016 (T00) - 01-Jan-2014 (VL2014)



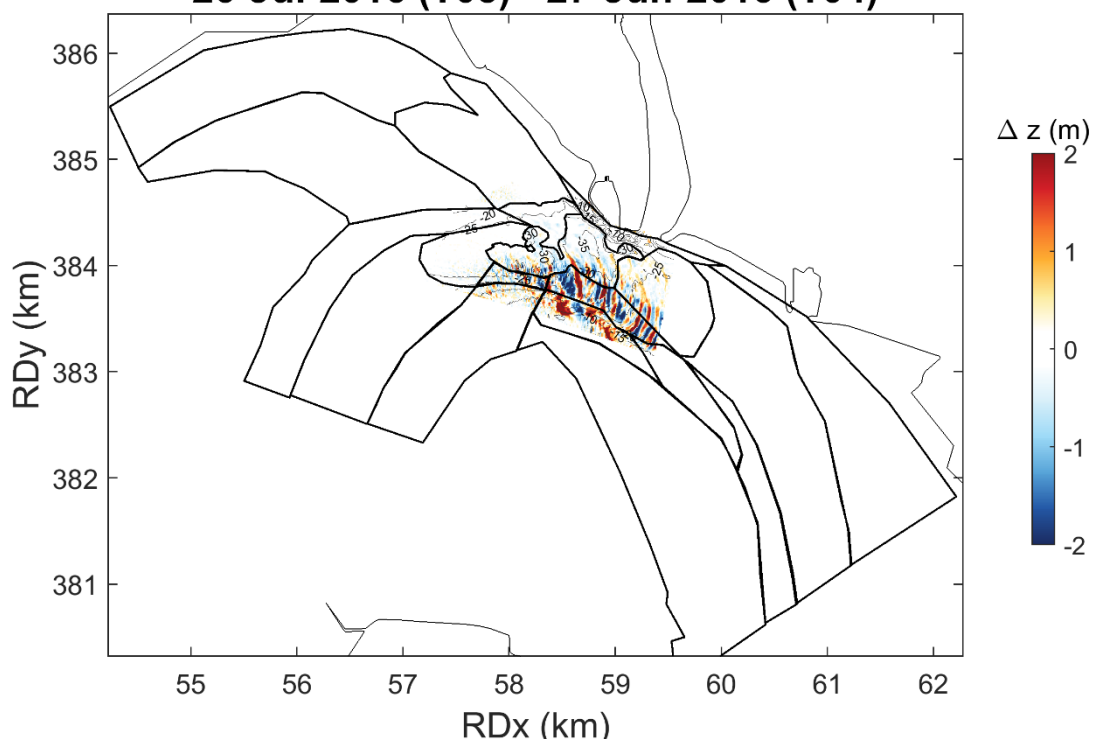
### 19-May-2016 (T03) - 21-Mar-2016 (T00)



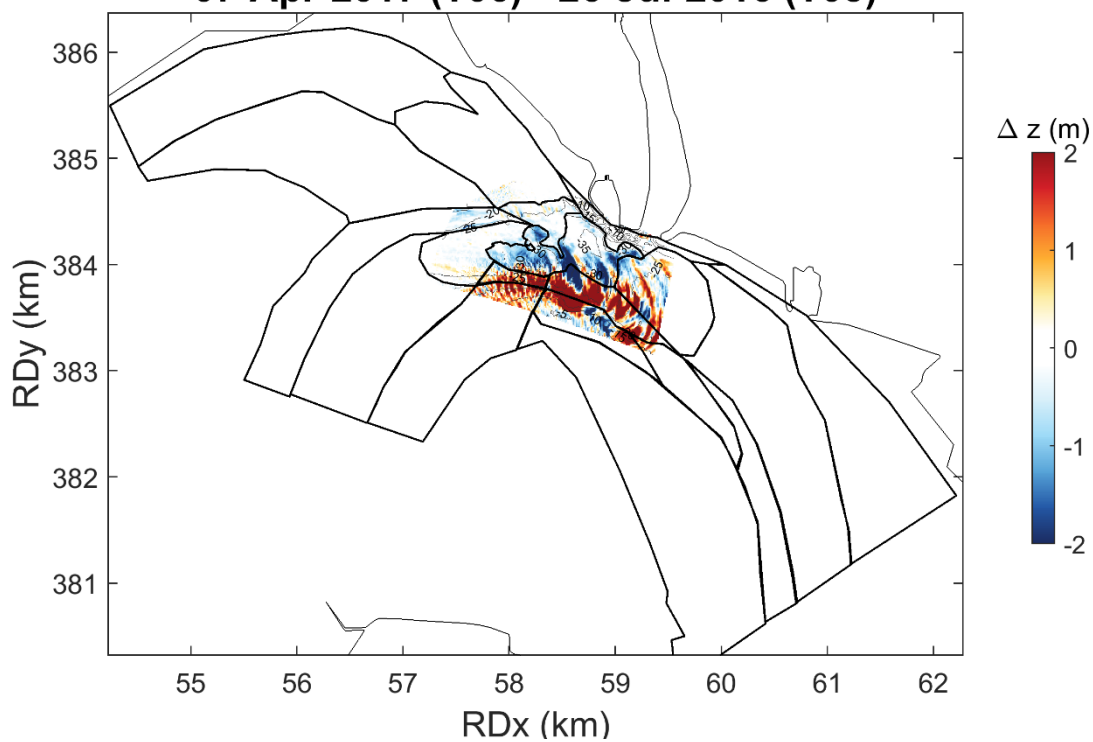
### 27-Jun-2016 (T04) - 19-May-2016 (T03)



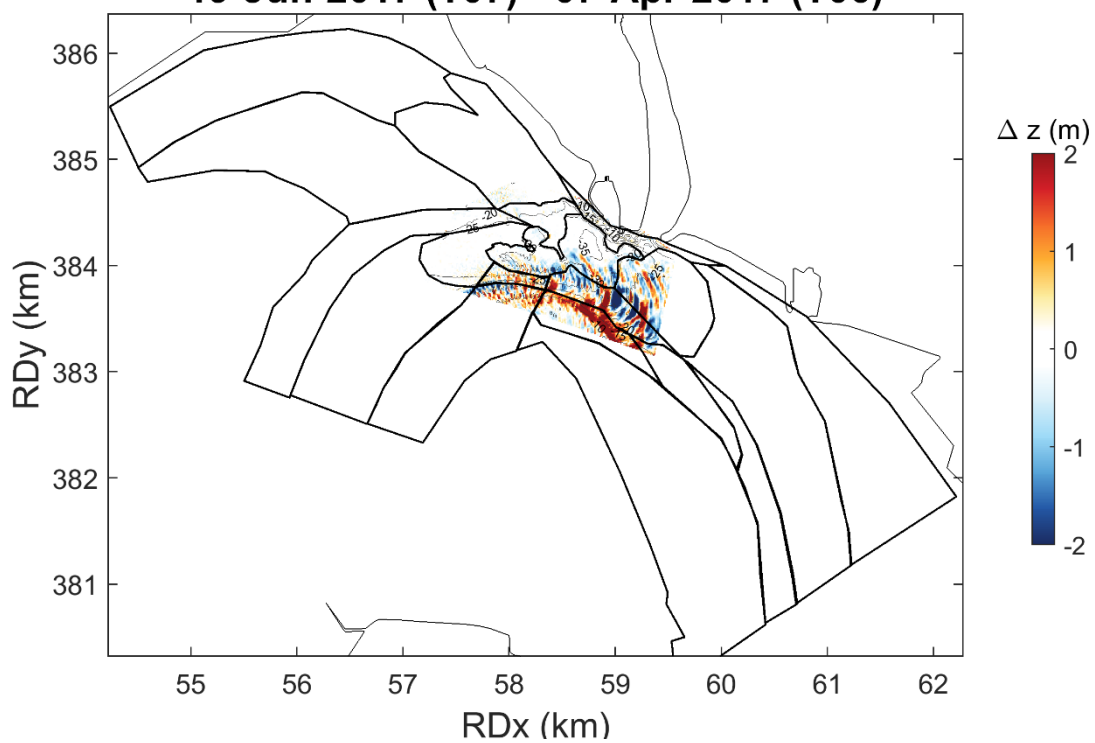
**26-Jul-2016 (T05) - 27-Jun-2016 (T04)**



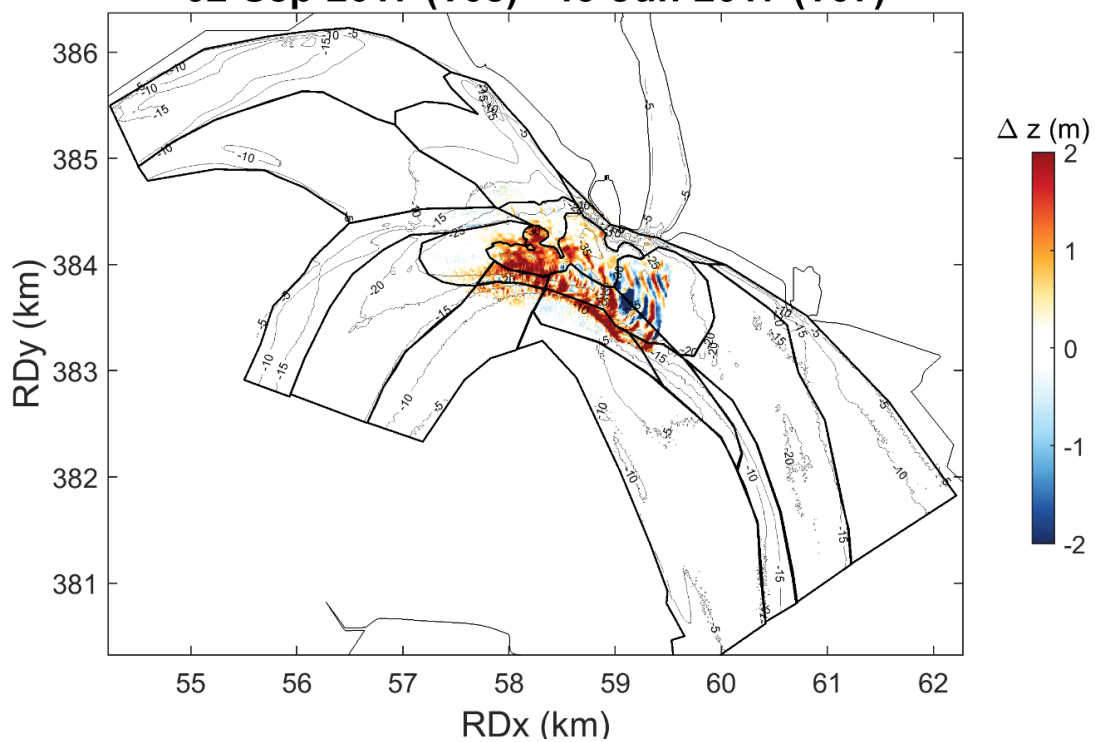
**07-Apr-2017 (T06) - 26-Jul-2016 (T05)**



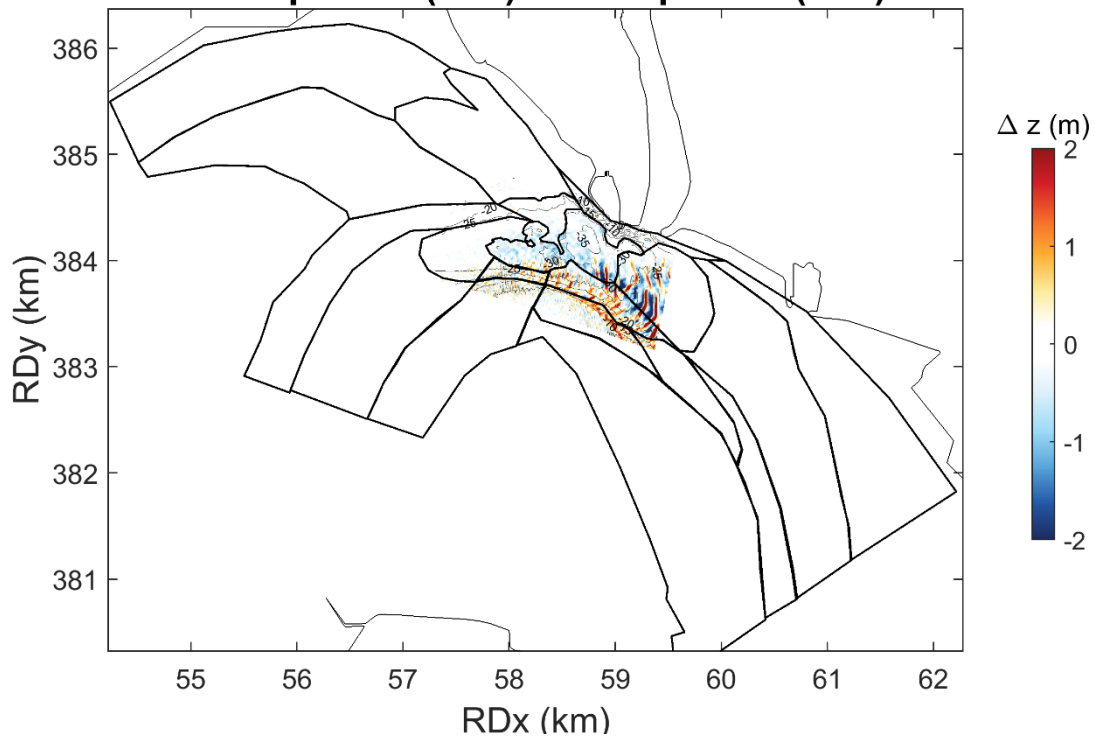
**19-Jun-2017 (T07) - 07-Apr-2017 (T06)**



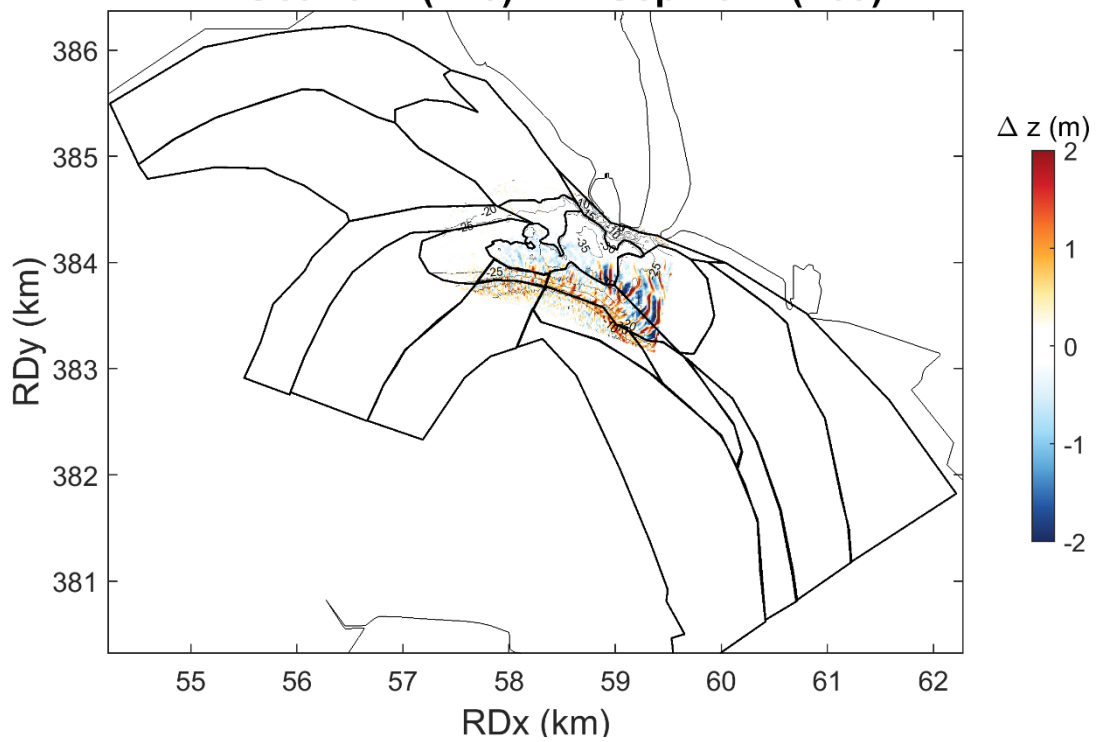
**02-Sep-2017 (T08) - 19-Jun-2017 (T07)**



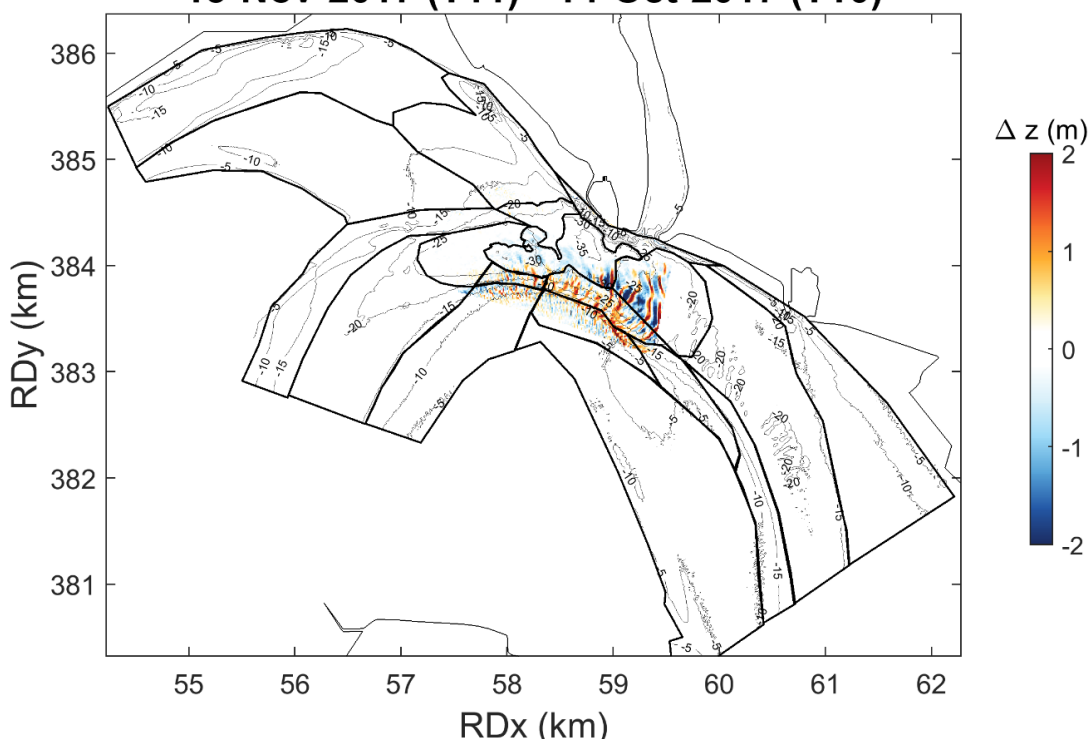
**22-Sep-2017 (T09) - 02-Sep-2017 (T08)**



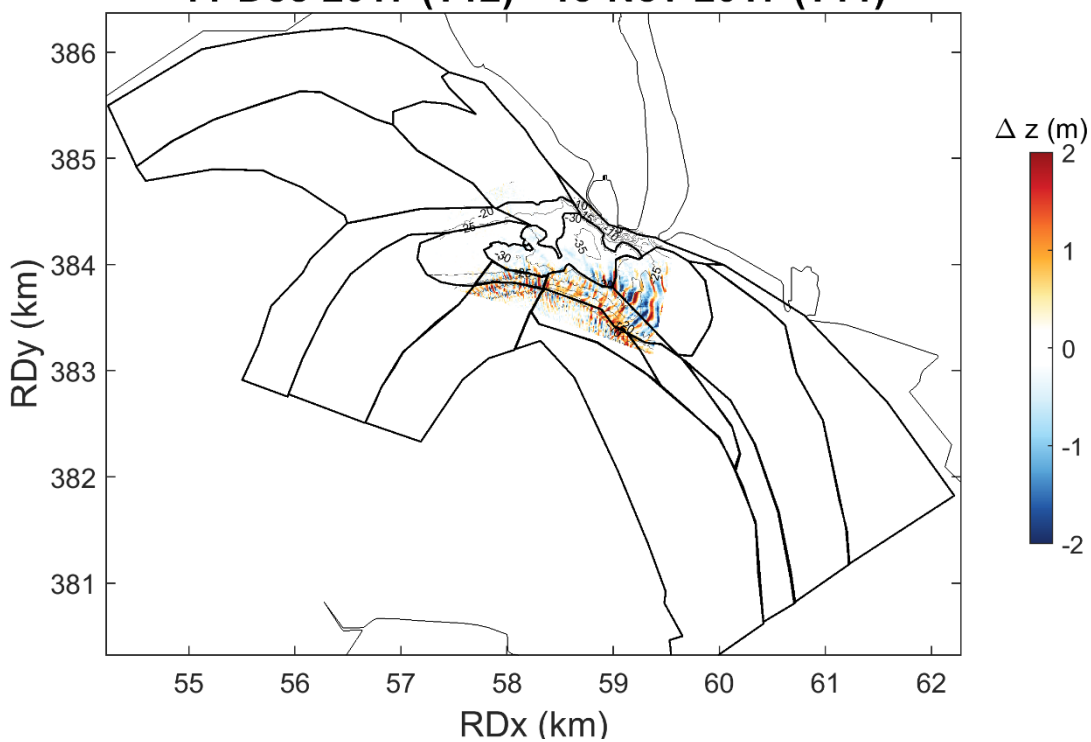
**14-Oct-2017 (T10) - 22-Sep-2017 (T09)**



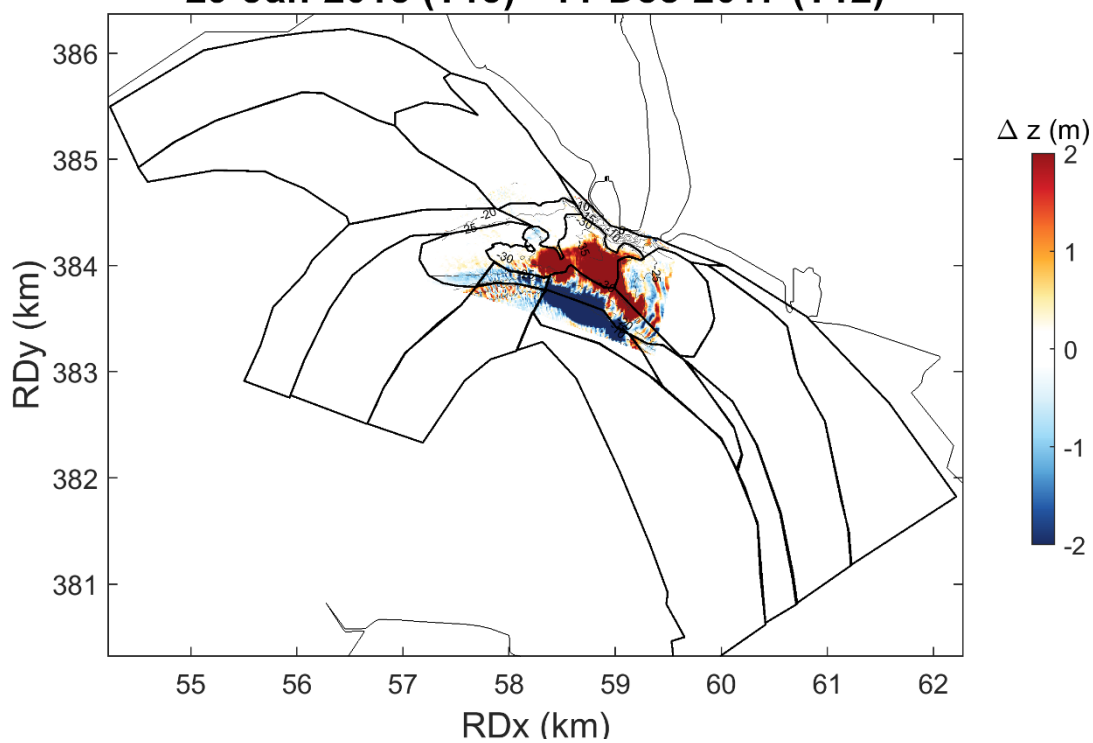
### 13-Nov-2017 (T11) - 14-Oct-2017 (T10)



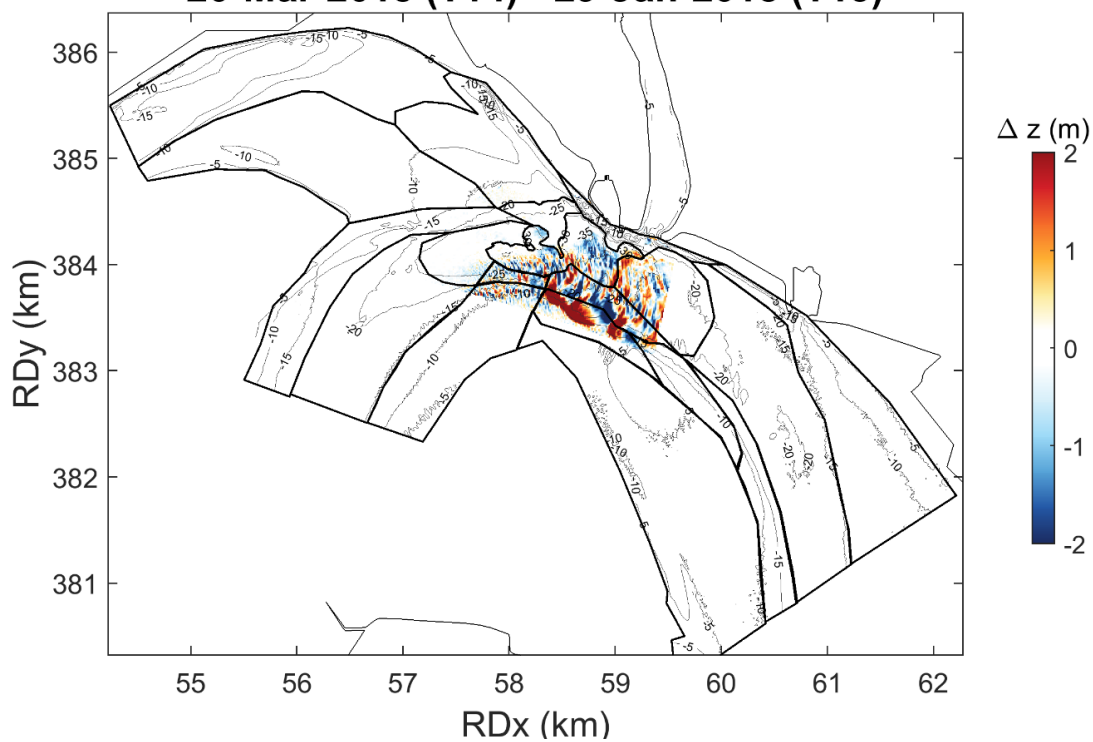
### 11-Dec-2017 (T12) - 13-Nov-2017 (T11)



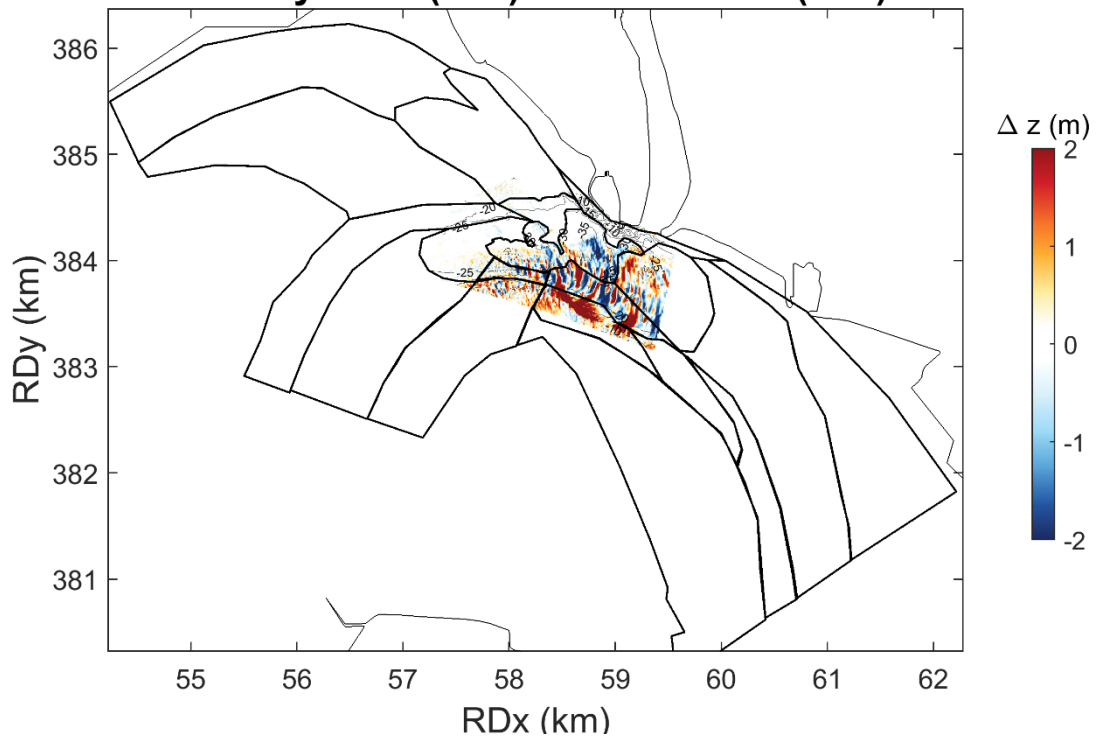
**29-Jan-2018 (T13) - 11-Dec-2017 (T12)**



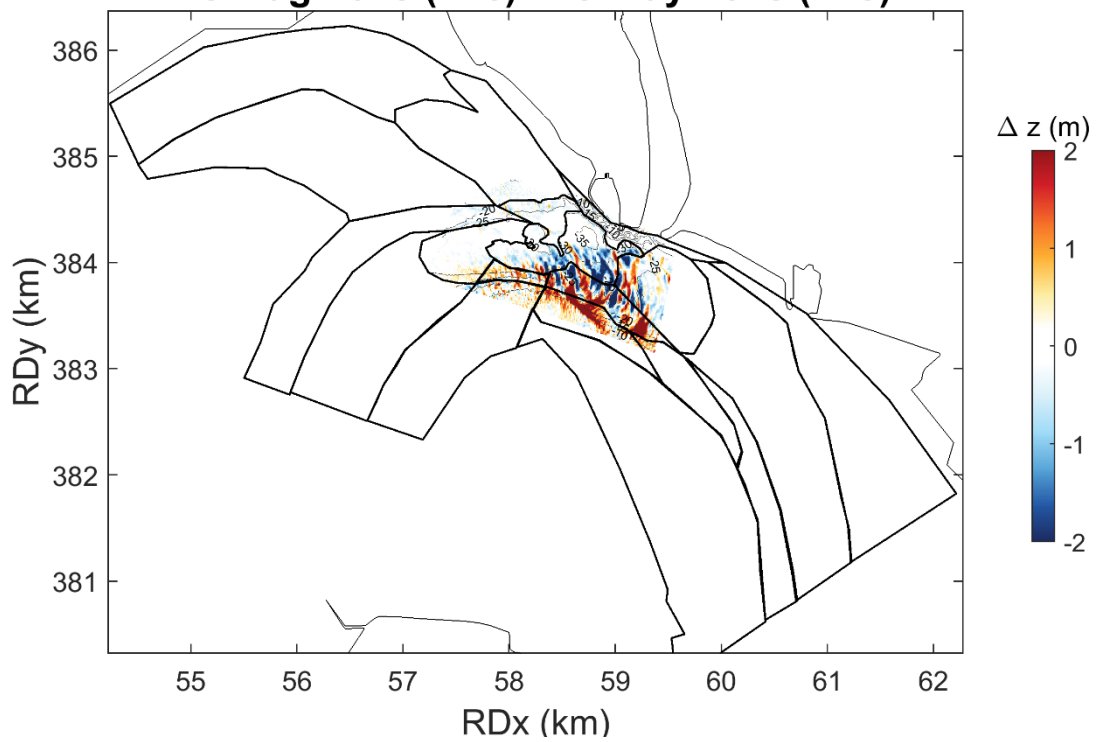
**20-Mar-2018 (T14) - 29-Jan-2018 (T13)**



**29-May-2018 (T15) - 20-Mar-2018 (T14)**

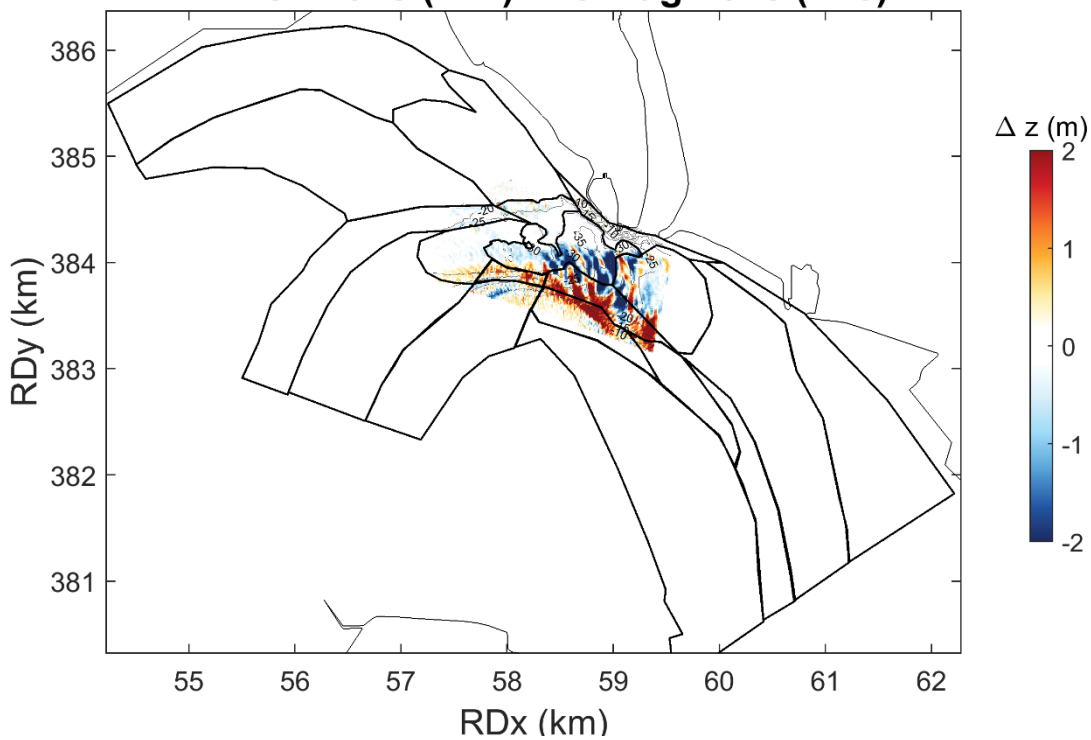


**23-Aug-2018 (T16) - 29-May-2018 (T15)**

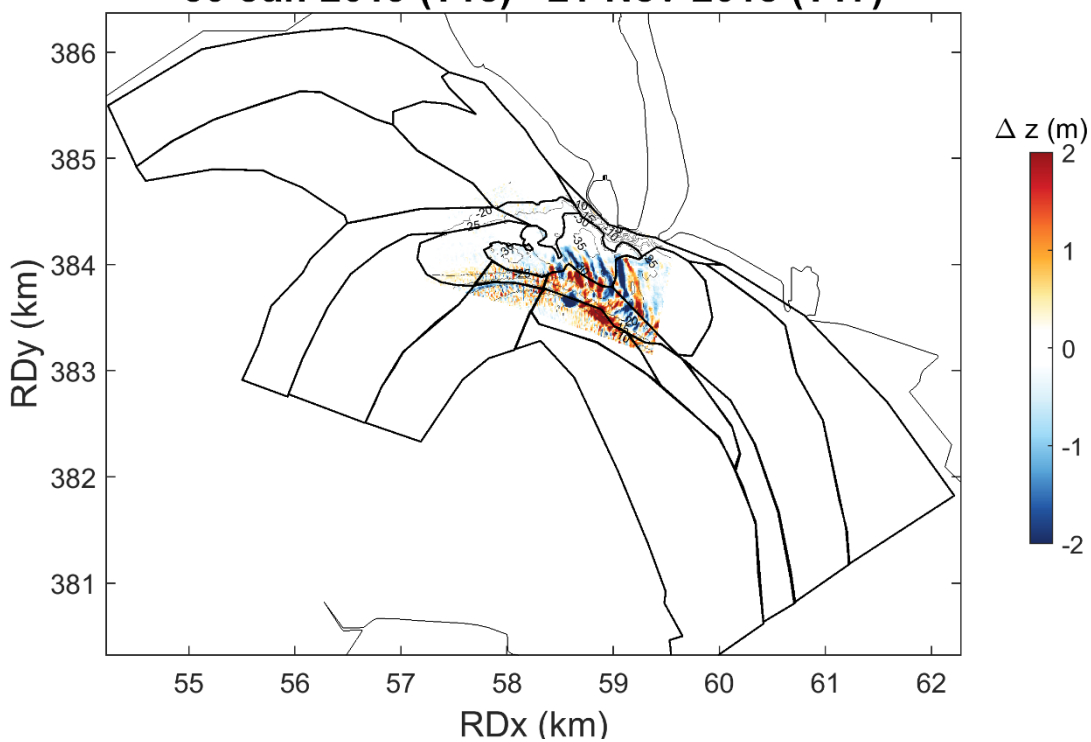




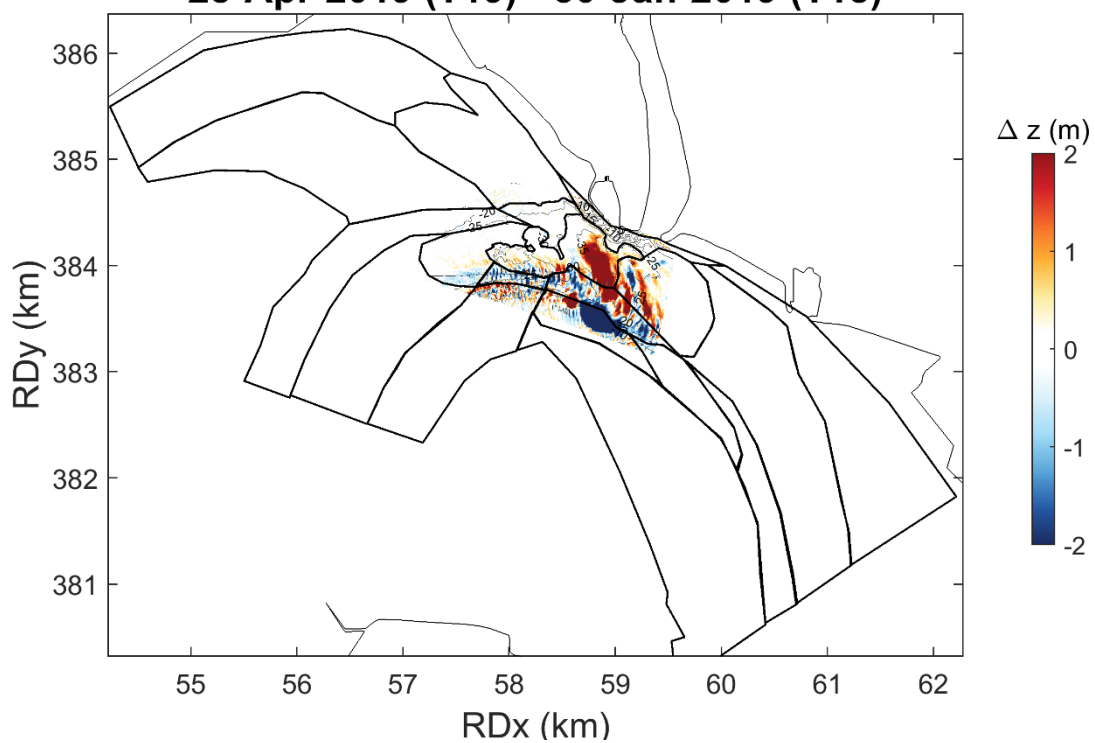
**21-Nov-2018 (T17) - 23-Aug-2018 (T16)**



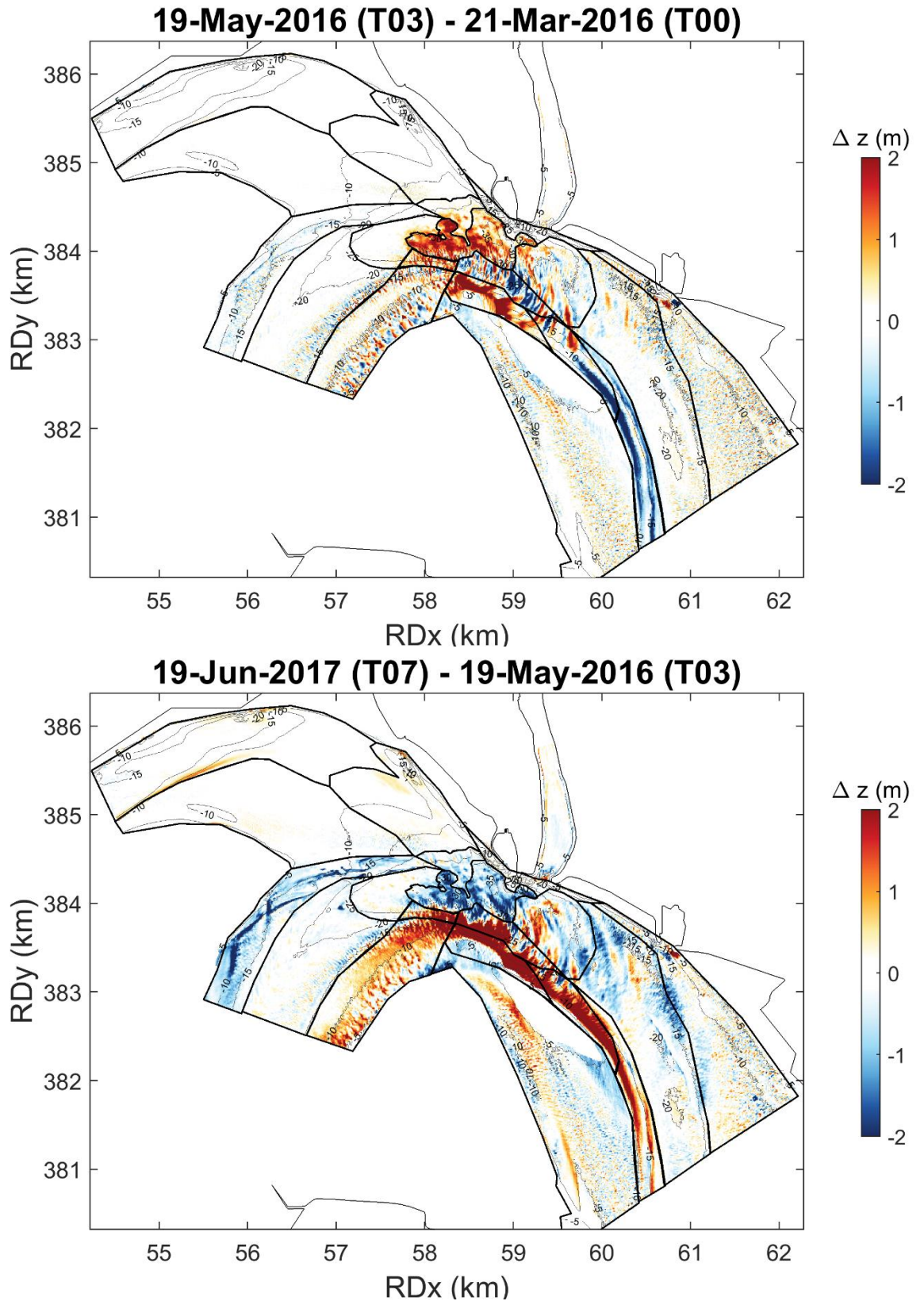
**30-Jan-2019 (T18) - 21-Nov-2018 (T17)**



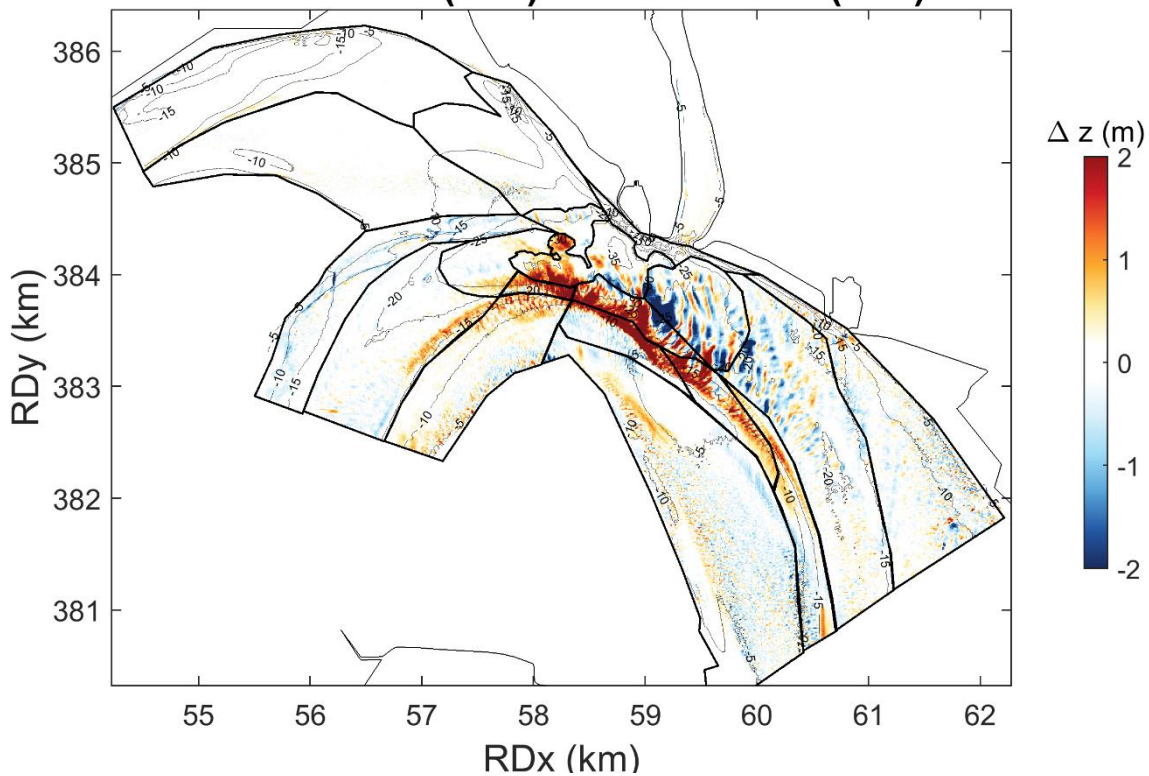
### 28-Apr-2019 (T19) - 30-Jan-2019 (T18)



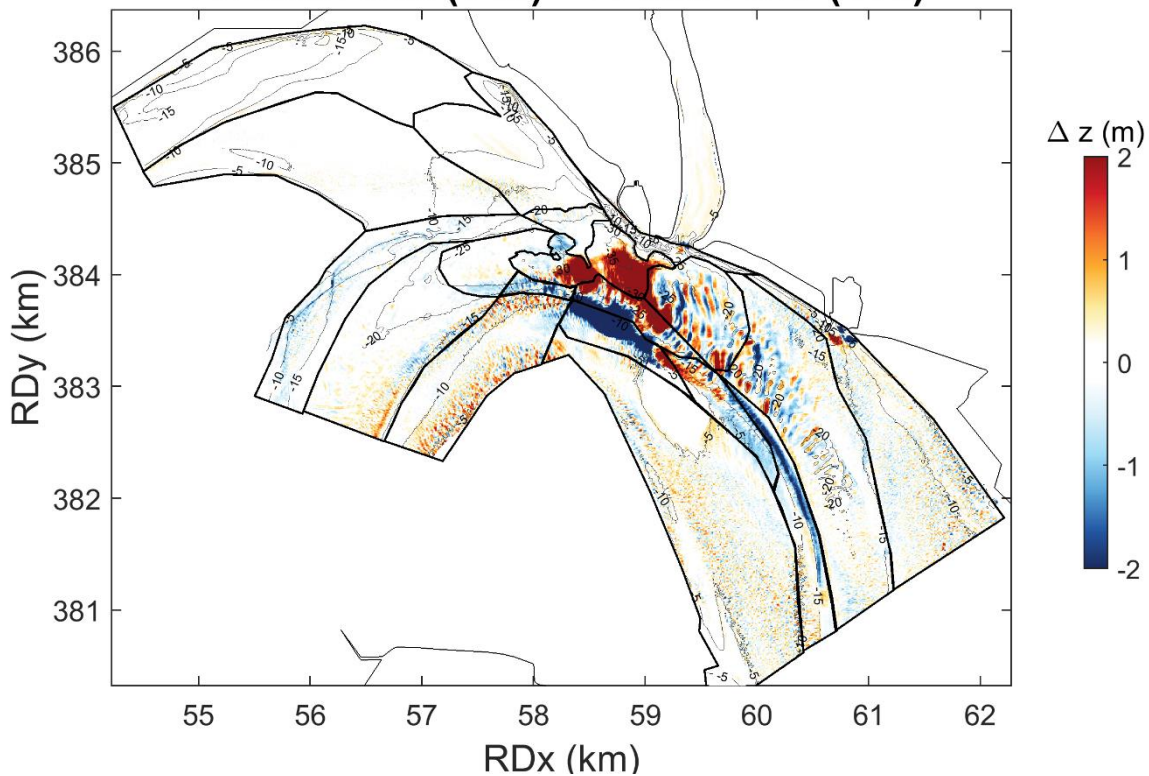
A.3 Bodemveranderingen per meting van T00, alleen de grote opnames



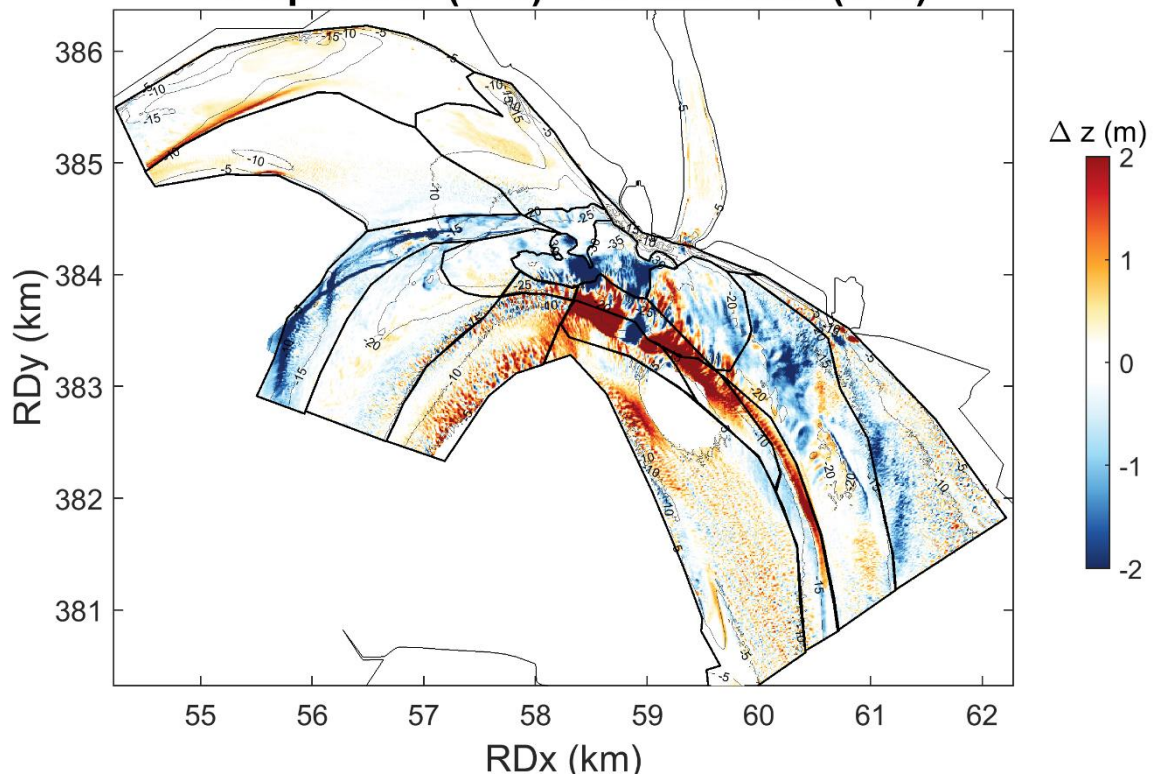
### 14-Oct-2017 (T10) - 19-Jun-2017 (T07)



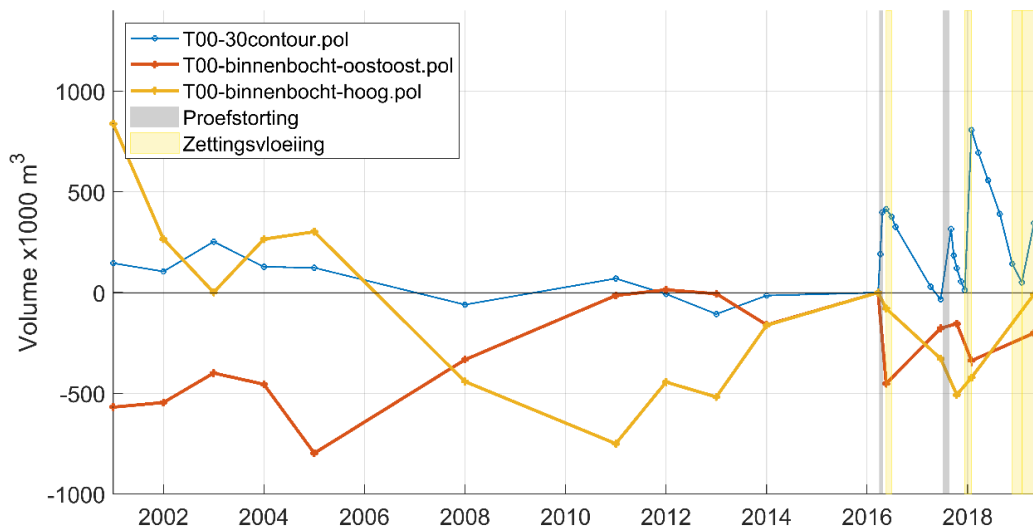
### 29-Jan-2018 (T13) - 14-Oct-2017 (T10)



### 28-Apr-2019 (T19) - 29-Jan-2018 (T13)

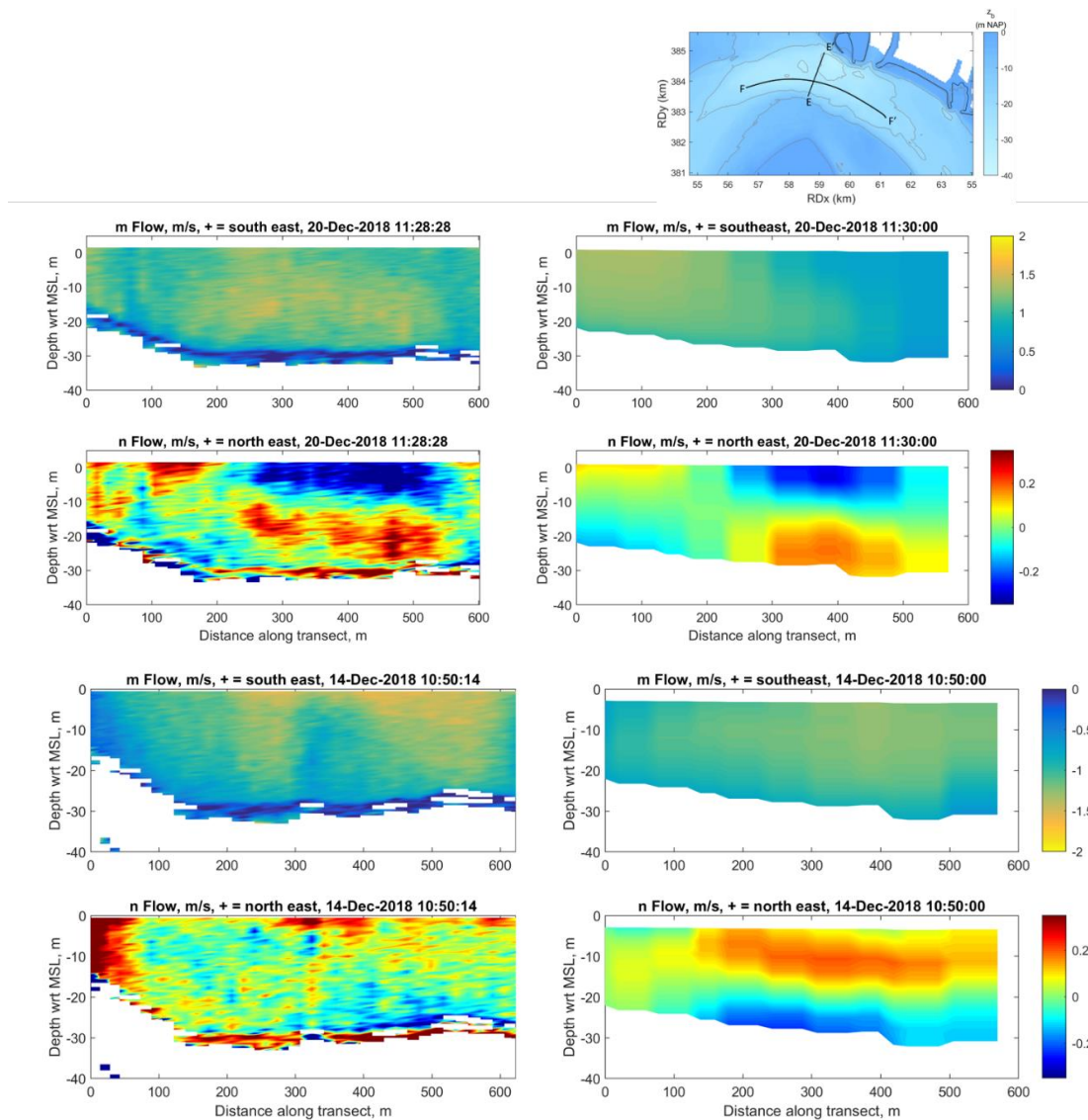


#### A.4 Volumeveranderingen op de binnenbocht, subdomeinen “oost-oost” en “hoog”



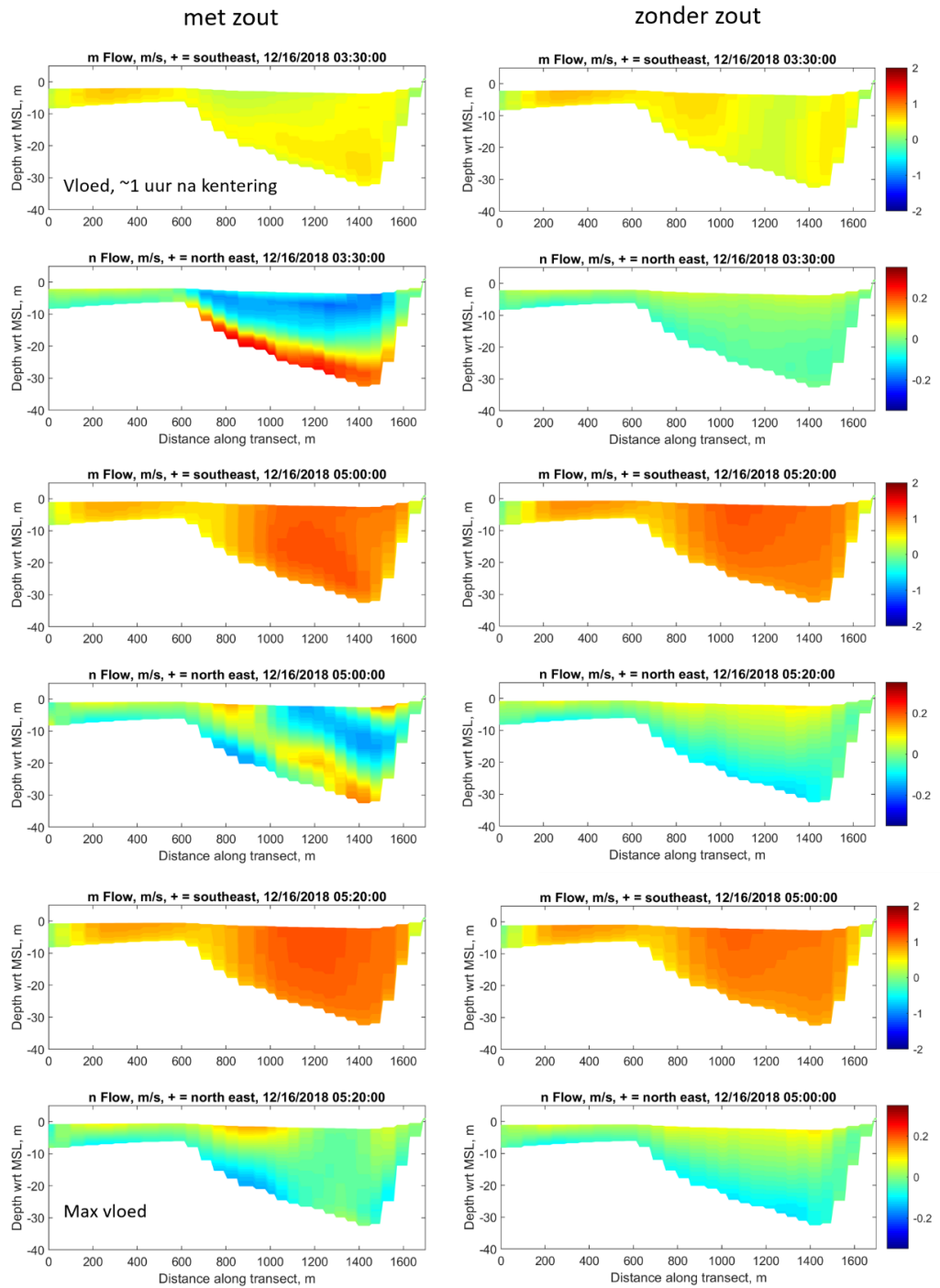
# B Delft3D-FM 3D modelresultaten

## B.1 Validatie



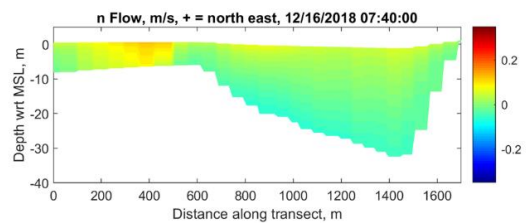
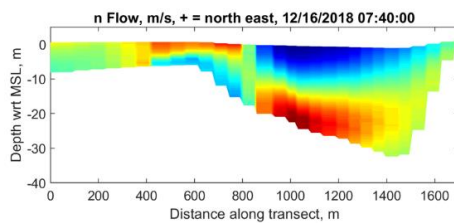
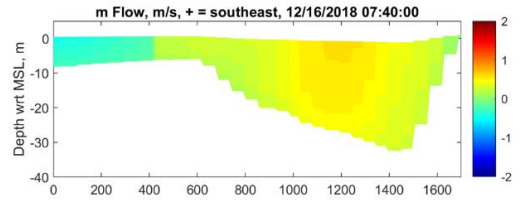
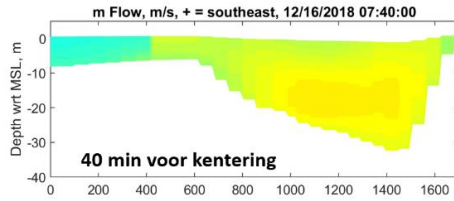
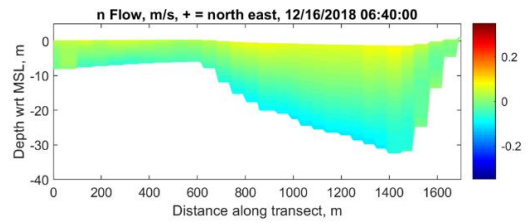
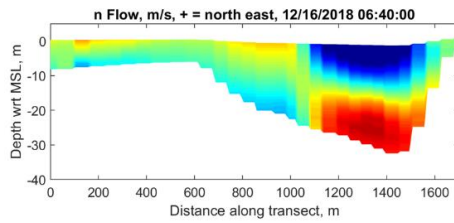
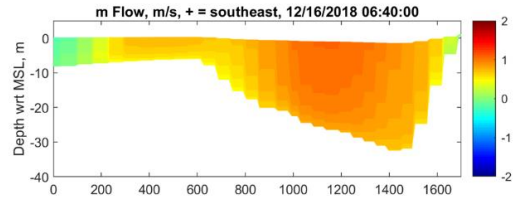
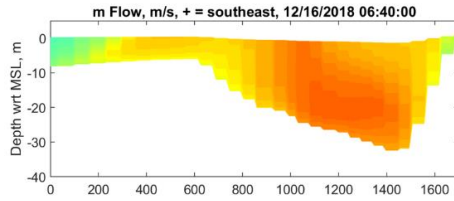
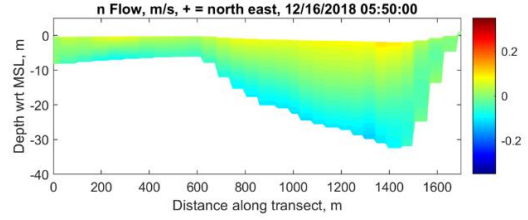
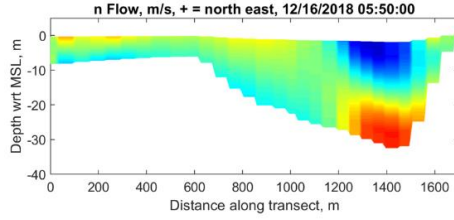
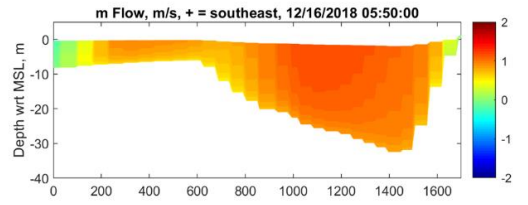
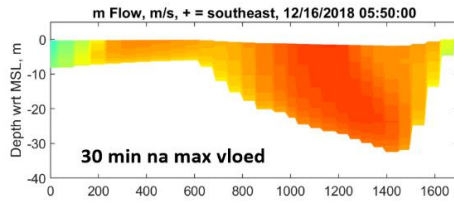
Figuur B.1.1 Transect E-E' gedurende eb, data (links) and model resultaten (rechts). Figuur overgenomen uit van der Wegen e.a. (2019)

## B.2 Stromingspatronen gedurende 1 getijcyclus voor berekening met en zonder zout



met zout

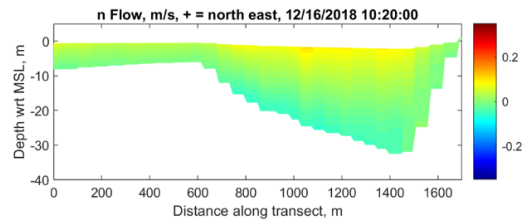
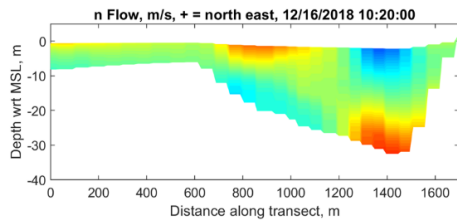
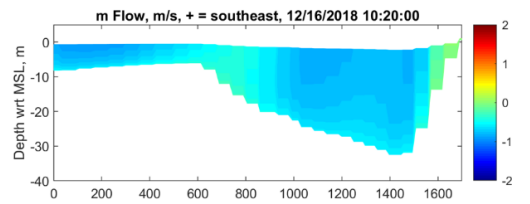
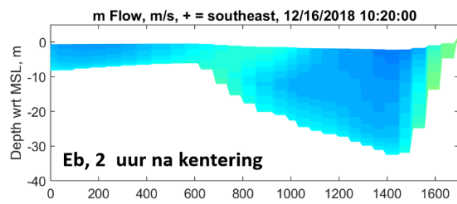
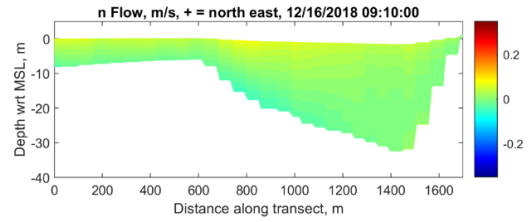
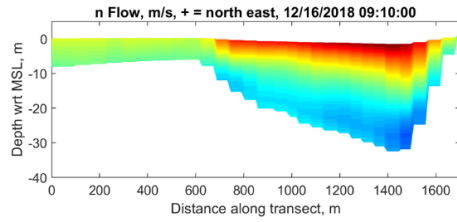
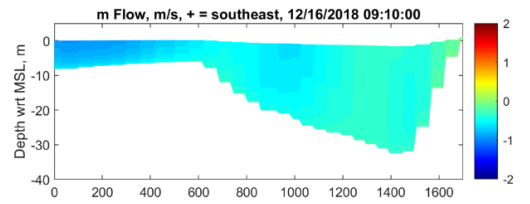
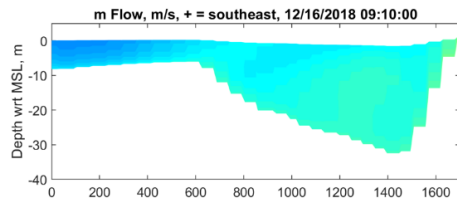
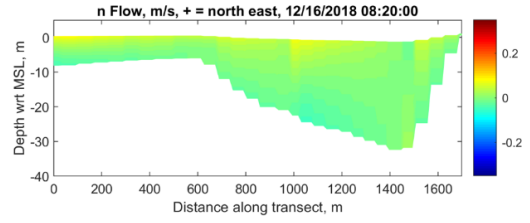
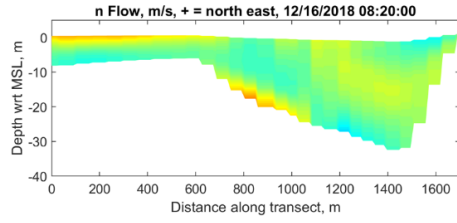
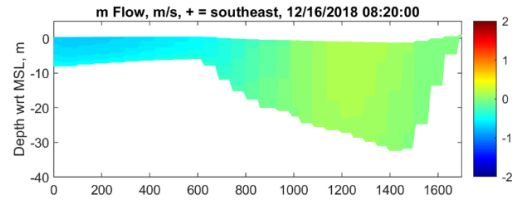
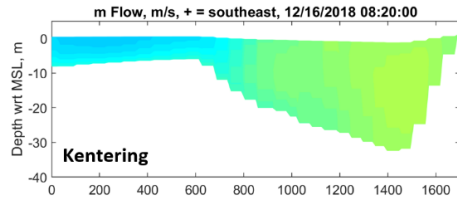
zonder zout





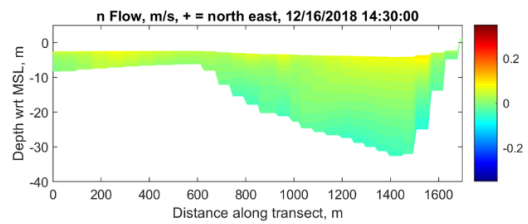
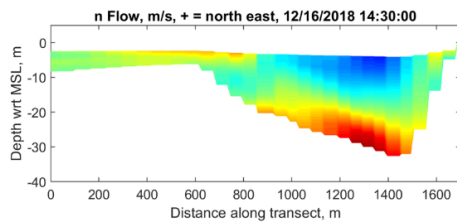
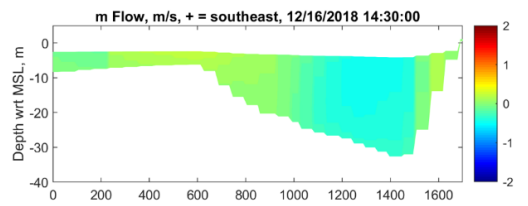
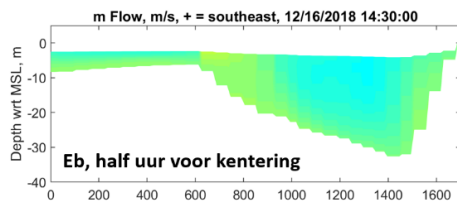
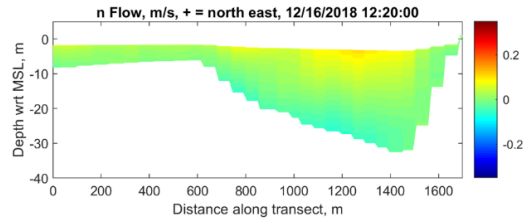
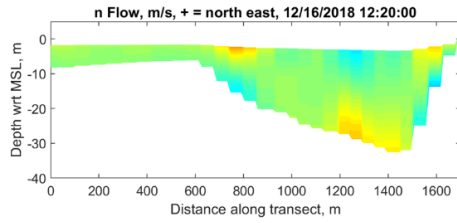
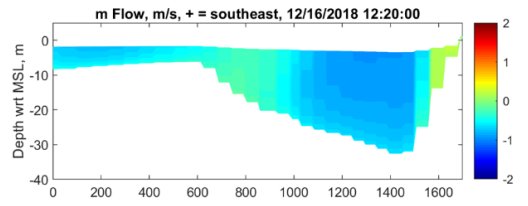
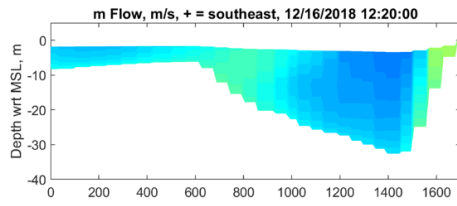
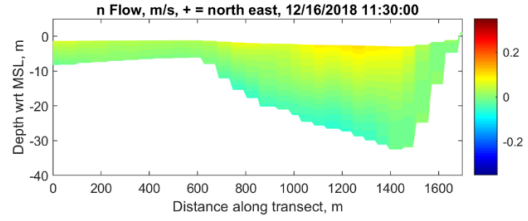
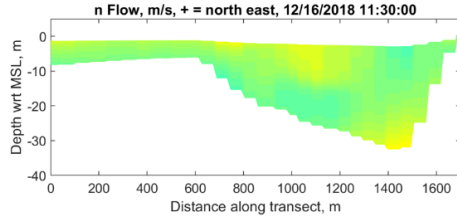
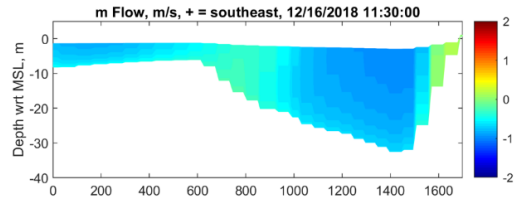
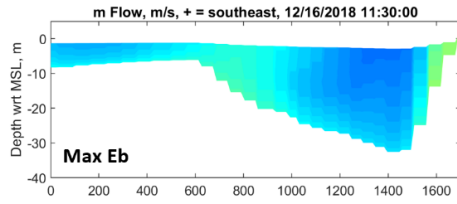
met zout

zonder zout

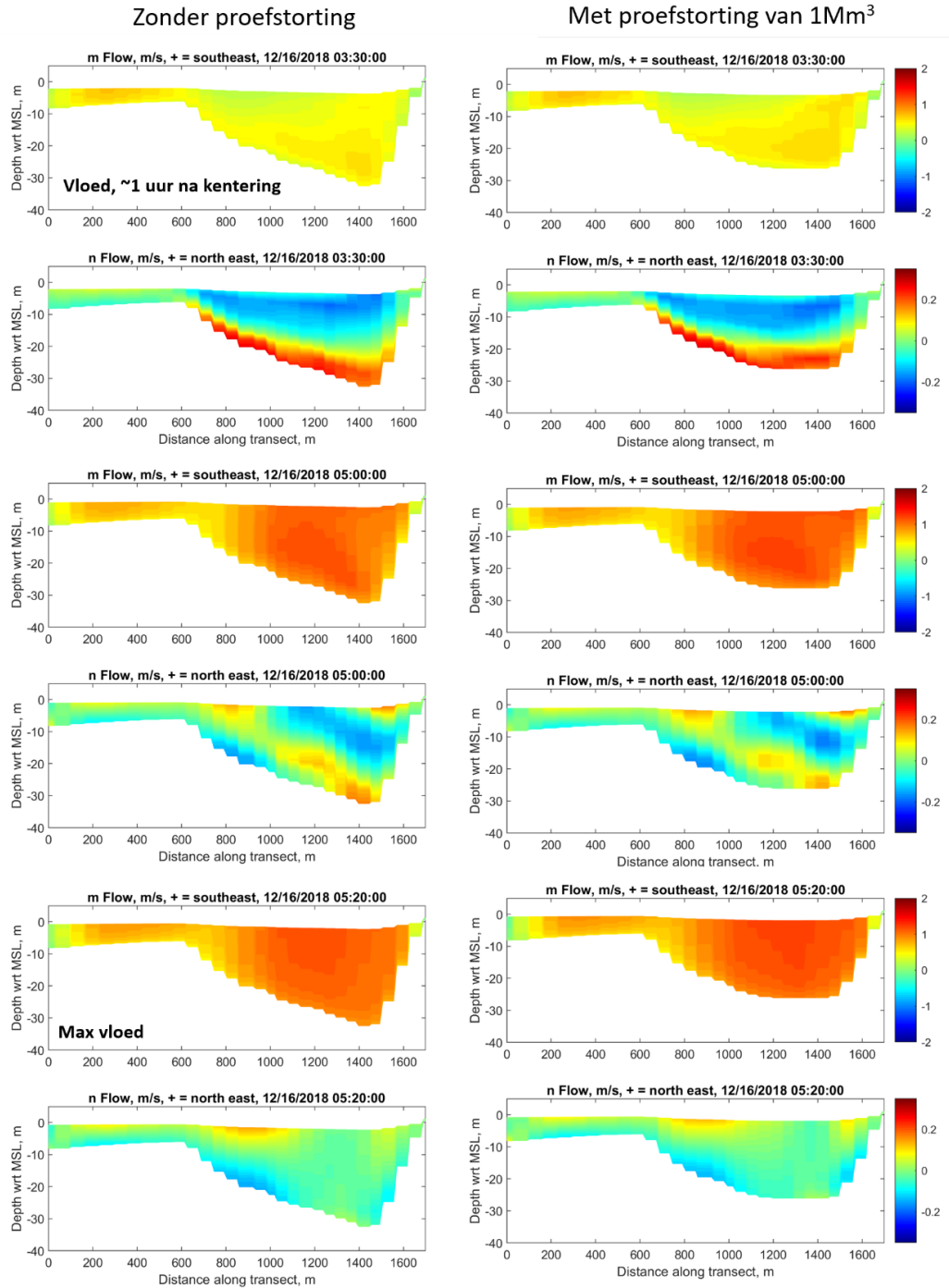


met zout

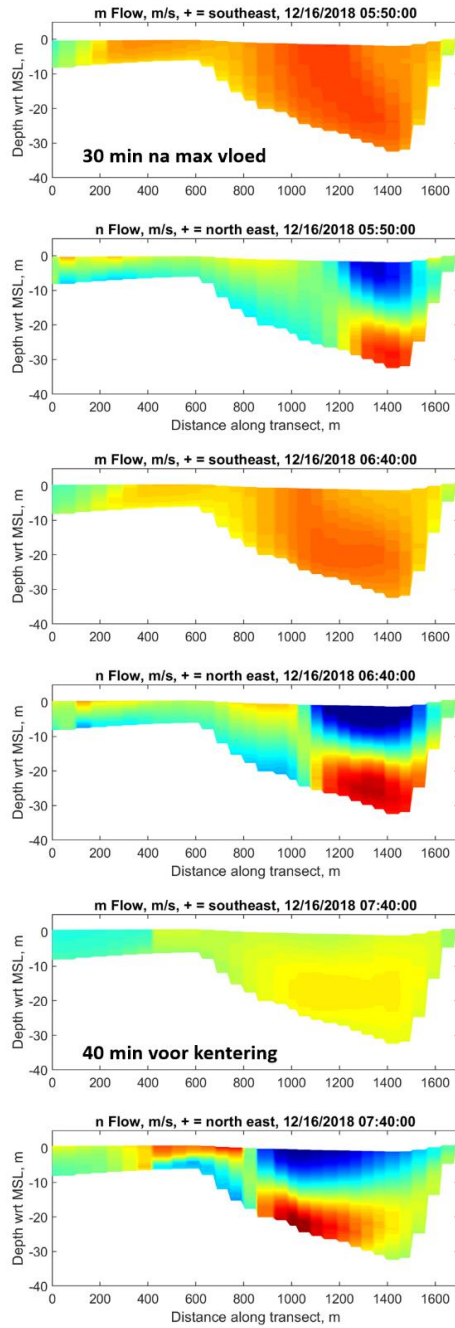
zonder zout



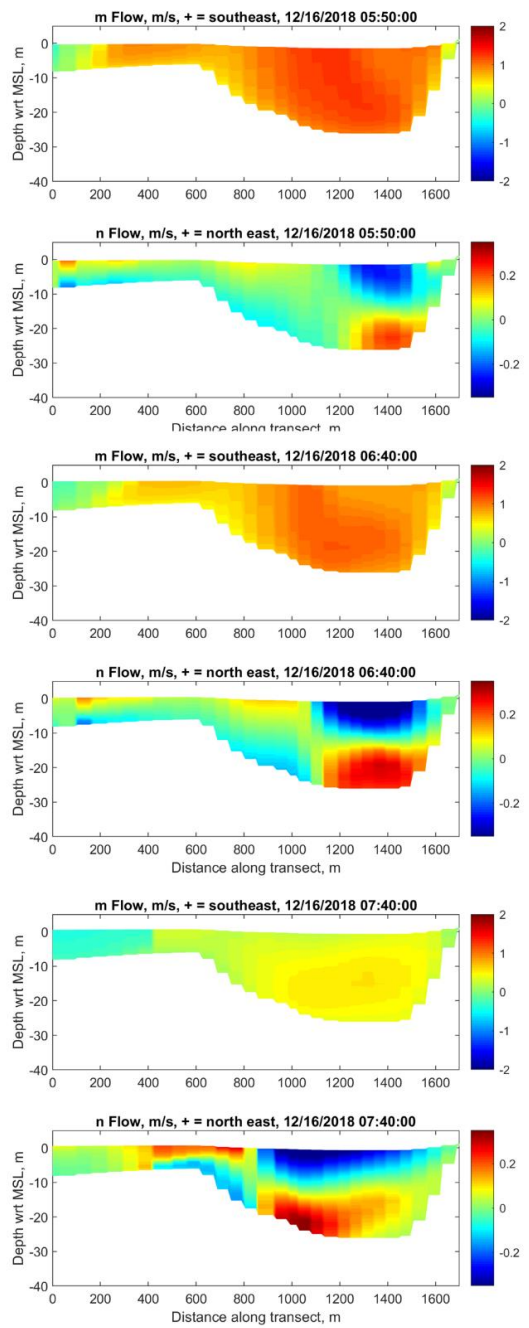
### B.3 Stromingspatronen gedurende 1 getijcyclus voor berekening met en zonder storting van 1 Mm<sup>3</sup> in de put van Hansweert



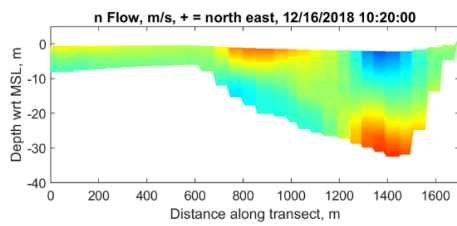
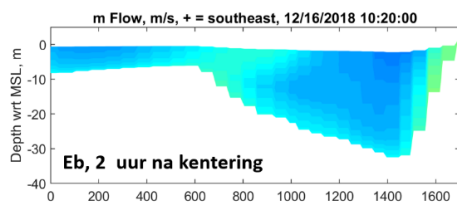
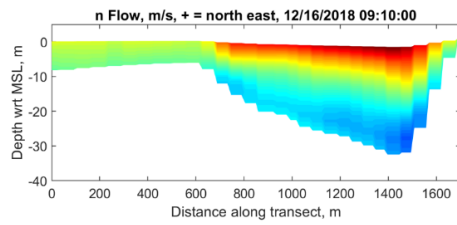
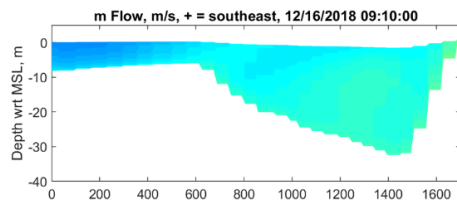
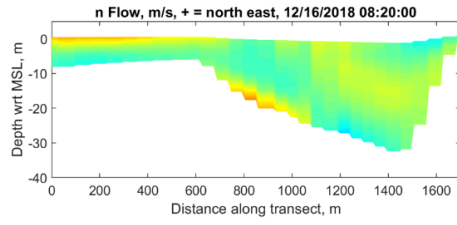
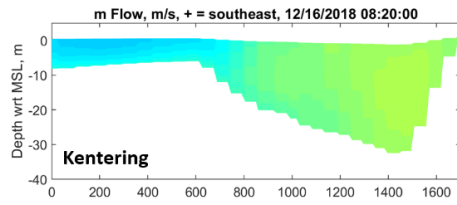
### Zonder proefstorting



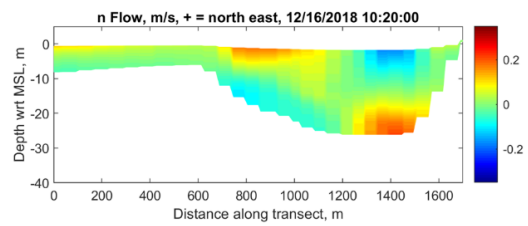
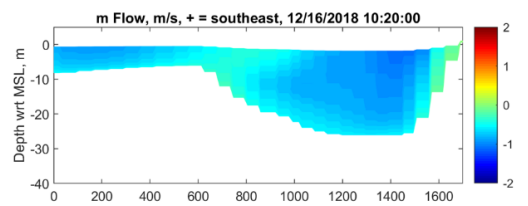
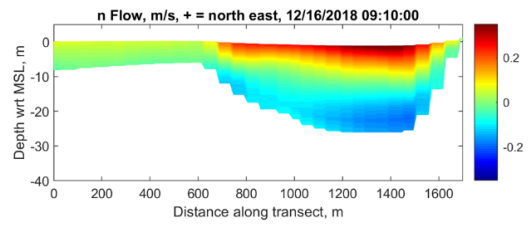
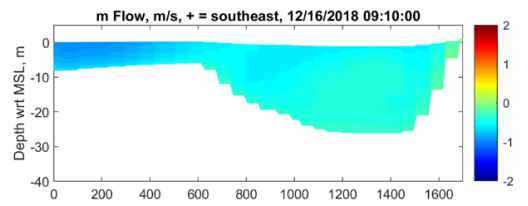
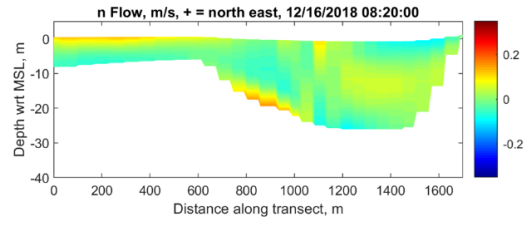
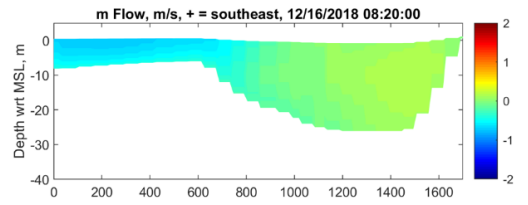
### Met proefstorting van 1Mm<sup>3</sup>



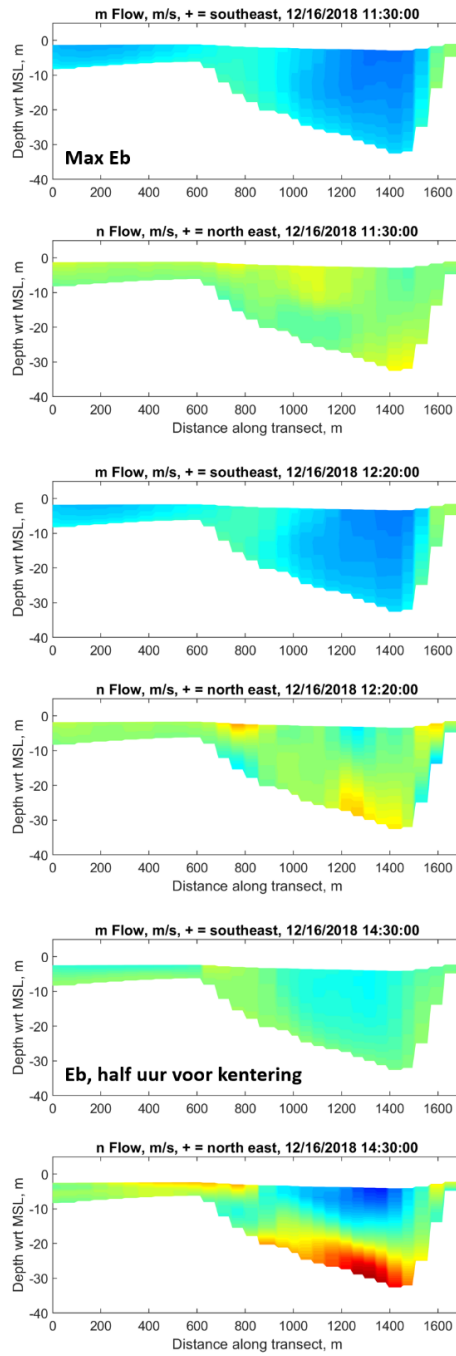
### Zonder proefstorting



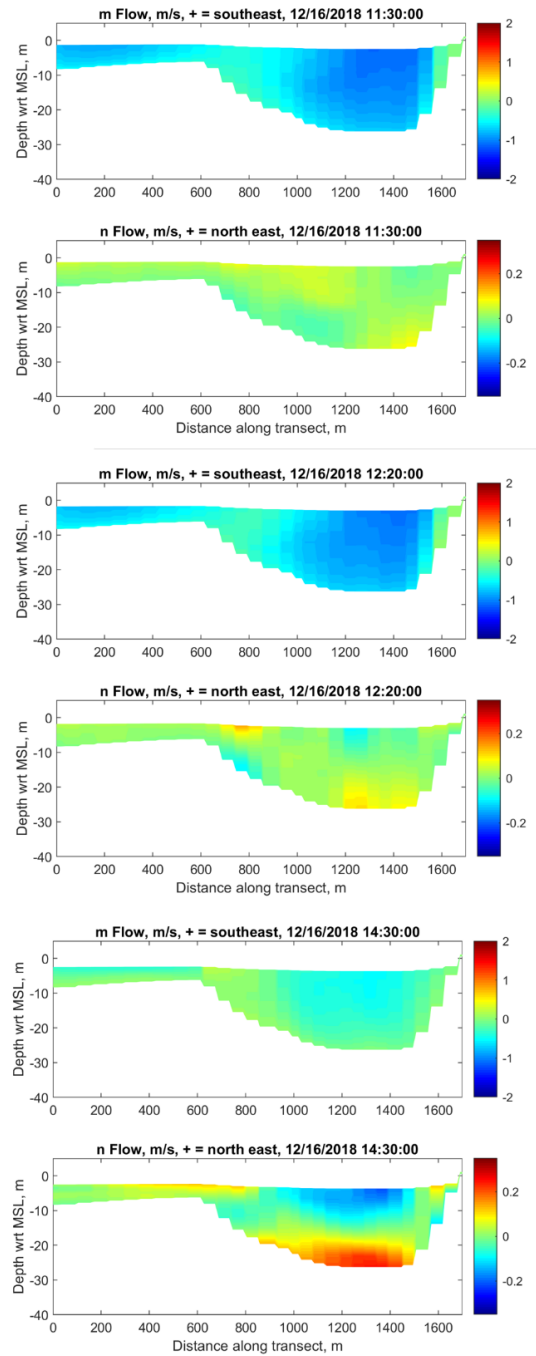
### Met proefstorting van 1Mm<sup>3</sup>



### Zonder proefstorting



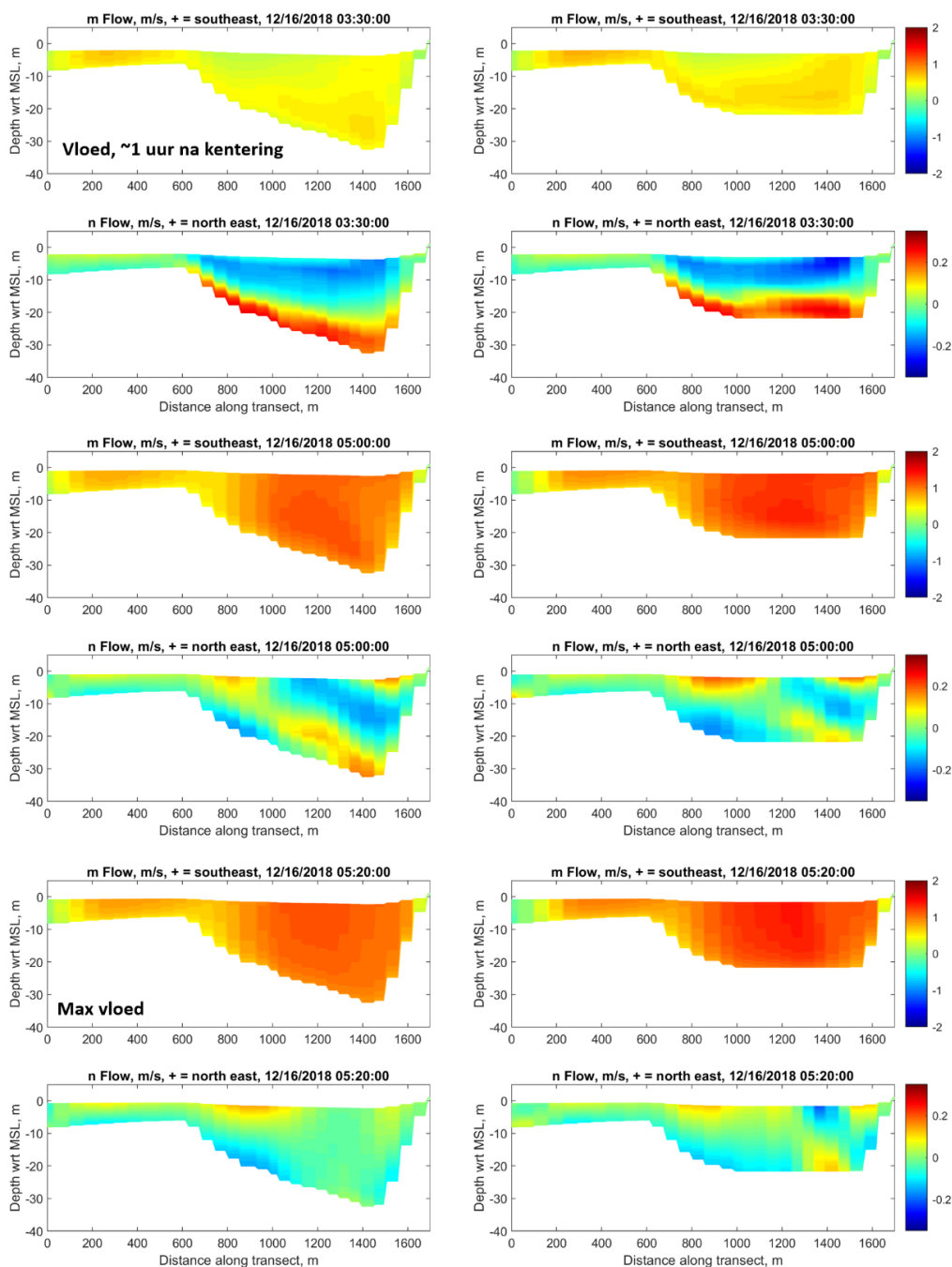
### Met proefstorting van 1Mm<sup>3</sup>



## B.4 Stromingspatronen gedurende 1 getijcyclus voor berekening met en zonder storting van 6 Mm<sup>3</sup> in de put van Hansweert

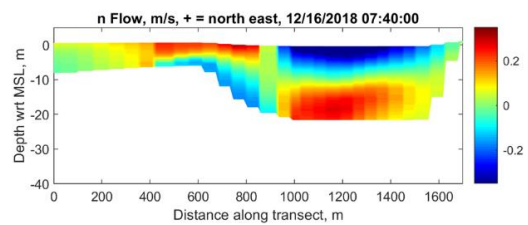
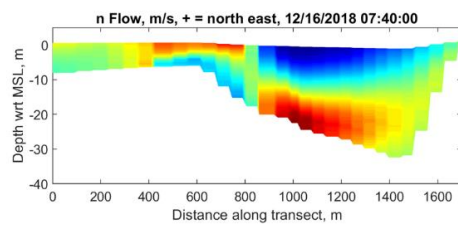
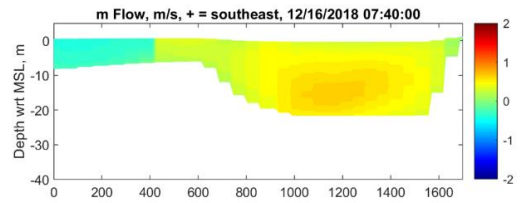
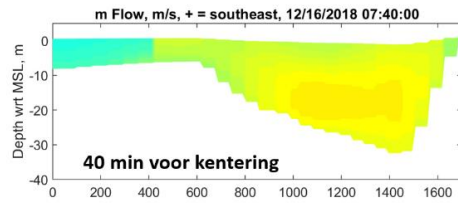
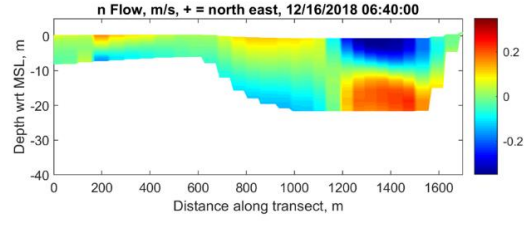
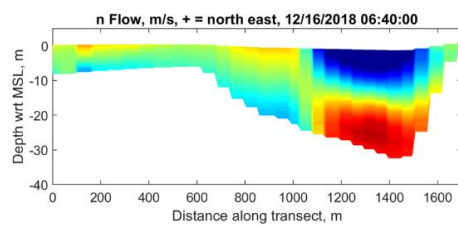
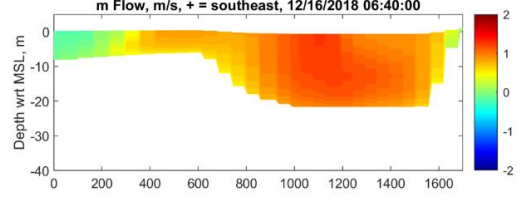
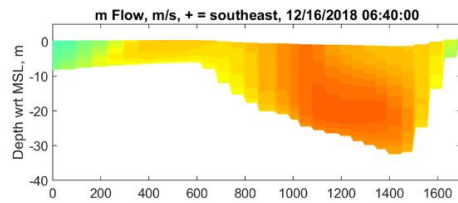
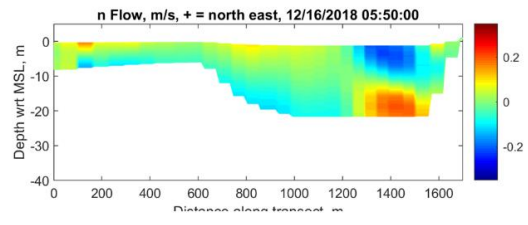
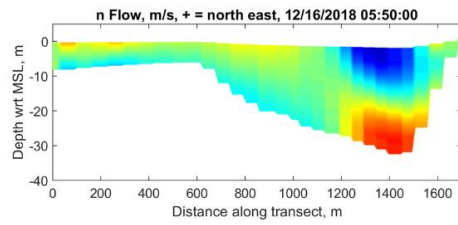
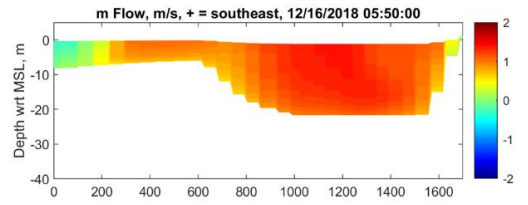
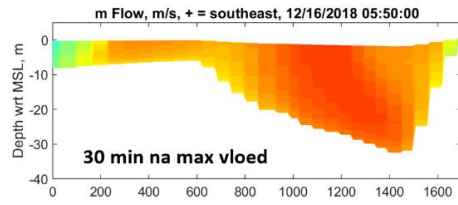
Zonder proefstorting

Met proefstorting van 6Mm<sup>3</sup>



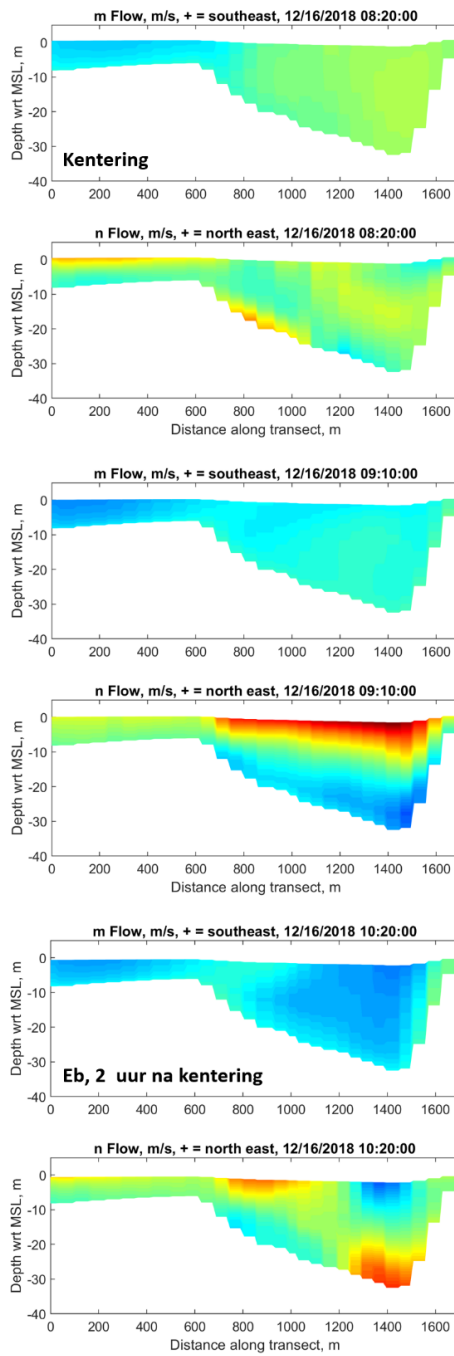
### Zonder proefstorting

### Met proefstorting van 6Mm<sup>3</sup>

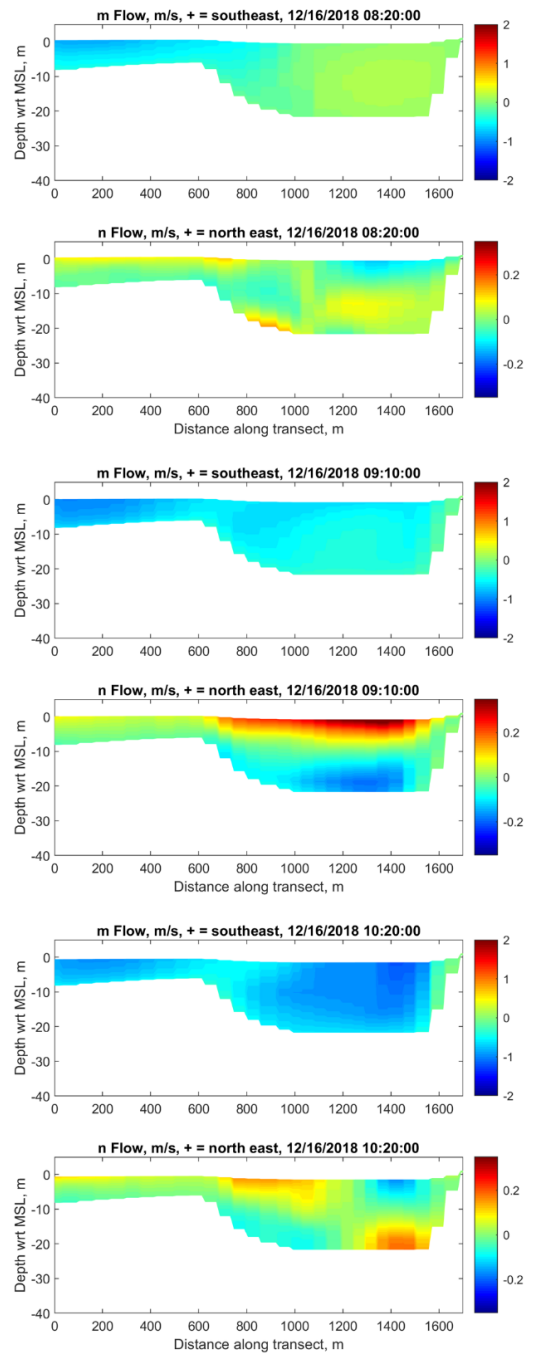




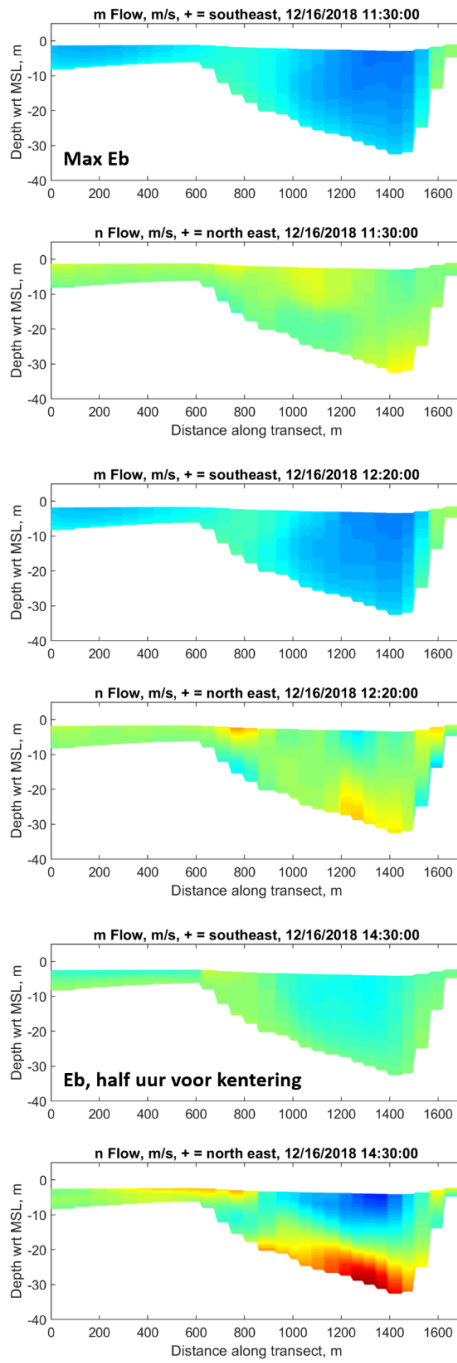
### Zonder proefstorting



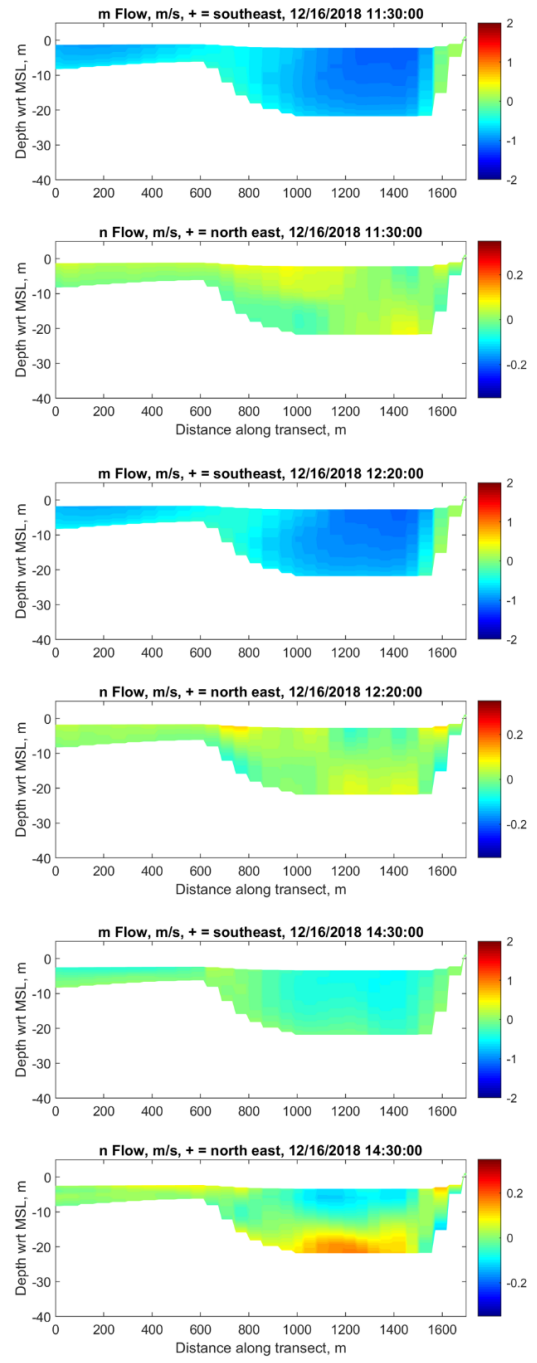
### Met proefstorting van 6Mm<sup>3</sup>



## Zonder proefstorting



## Met proefstorting van 6Mm<sup>3</sup>



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

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)