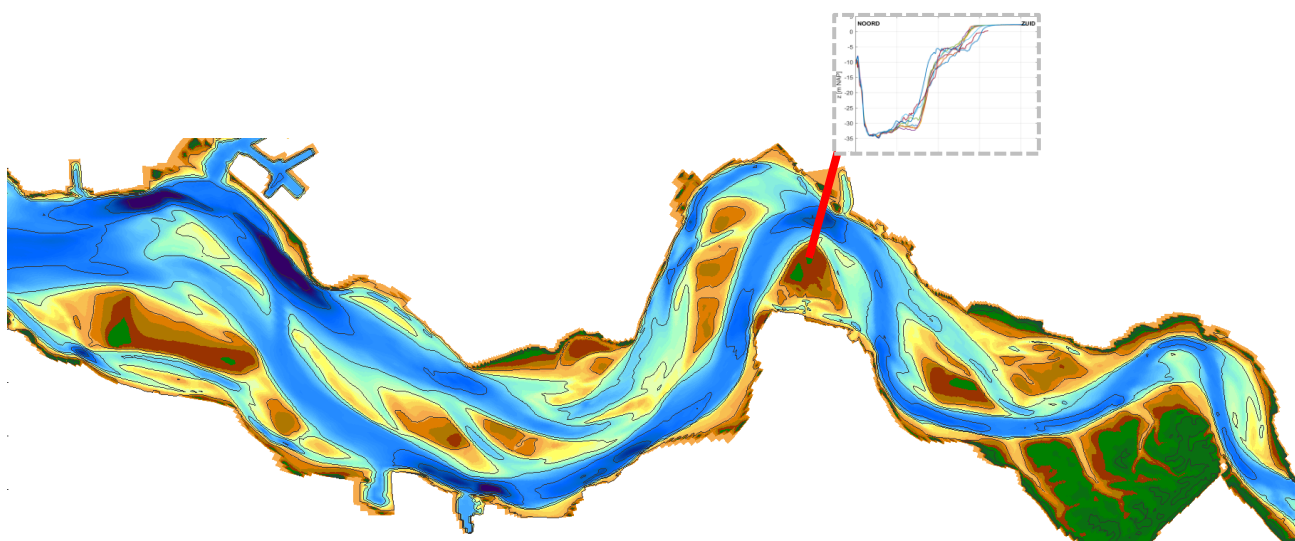


## Baggerdepositie in diepe geulen

Strategie voor het plaatsen van gebaggerd materiaal in de diepere getijdegeulen van de Westerschelde



VLAAMS-NEDERLANDSE **Schelde** COMMISSIE

**IMDC**  
International Marine & Dredging Consultants

1210301-000

**Deltares**

Enabling Delta Life





## Titel

Baggerdepositie in diepe geulen

Project	Kenmerk	Pagina's
1210301-000	1210301-000-ZKS-0027	97

## Trefwoorden

Westerschelde, Stortstrategie, Diepe putten, Vaargeulonderhoud, Morfologie

## Samenvatting

Deze studie richt zich op de verspreiding van zandige baggerspecie die is gestort in de diepe geulen van de Westerschelde. Deze analyses zijn uitgevoerd om te toetsen of een aangepaste beheerstrategie voor het storten van gebaggerd materiaal mogelijk is. De beheerstrategie wordt door RWS Zee & Delta (Gert-Jan Liek en Marco Schrijver) en aMT (Frederik Roose, Youri Meersschant) voorbereid en door de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie (VNSC) vastgesteld, als basis voor de nieuwe vergunningen voor storten van baggerspecie in de Westerschelde. De studie omvat onderzoek naar:

- 1) **De lokale verliezen tijdens het storten van sediment in diepe putten én lokale morfologische verandering (i.e. erosiesnelheid en verblijftijd van gestort sediment) op basis van velddata van proefstortingen in de Put van Hansweert.** Uit de analyses blijkt dat een aanzienlijk deel (orde 30% tot 50%) van het gestorte materiaal al bij het storten (of direct daarna) uit het stortgebied verdwijnt. Een groot deel van het sediment lijkt naar de binnenbocht te verplaatsen.
- 2) **De invloed van vier stortstrategieën (in diepe putten en als referentie de strategie uit de periode 2011-2014) op de grootschalige hydrodynamica en morfologie van de Westerschelde alsmede het vaargeulonderhoud.** Hiervoor is een variant toegepast van het gekalibreerde Delft3D NeVla model voor de Westerschelde. Uit analyses blijkt dat het storten in diepe putten de getijslag in het oostelijke deel van de Westerschelde enigszins reduceert. Lokaal kunnen stroomsnelheden echter toenemen met maximaal 0.25 m/s tijdens de vloedfase. Het invloedgebied van de verspreiding van zand vanuit de stortlocaties in de diepe putten bedraagt enkele kilometers (over 5 jaar). Verwacht wordt dat storten in de diepe put van Hansweert een impact heeft op de mesoschaal morfologie, omdat gestort sediment in de Put van Hansweert hoofdzakelijk in de binnenbocht afgezet wordt. Uit de modelanalyses blijkt verder dat stortstrategieën die sediment storten in diepe putten 10% tot 20% meer vaargeulonderhoud hebben (i.e. circa +1 à +2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar), waarbij met name de recirculatie bij de Put van Hansweert van belang is. Opgemerkt moet echter worden dat hierbij alleen het transport wordt beschouwd van gestort zand dat stabiel op de bodem ligt, en dus niet de initiële verliezen tijdens en net na het storten.
- 3) **Een gevoeligheidsanalyse van de transport gradiënten in het numerieke model in relatie tot diepte van een gemeten of ingespeelde (opgevulde) bodem.** Hierin komt naar voren dat een morfologisch model met ingespeelde bodem een realistischer transport geeft in de Put van Hansweert voor een situatie met een proefstorting dan het model met een werkelijk gemeten bodem, welke de transportcapaciteit lokaal in de geul onderschat. Dit verschil kon slechts ten dele verklaard worden op basis van 3D hydrodynamica ten opzichte van de 2DH hydrodynamica welke aanwezig is in het model. Belangrijk voor het uitrusten van een storting in een diepe put is de transportgradiënt die aanwezig is in de put en onbenut blijft als hier een harde laag ligt. Tevens is de aanwezigheid van harde lagen (i.e. klei of veen) sturend voor de geometrische ontwikkeling van de morfologie van diepe putten in de Westerschelde.

**Titel**  
Baggerdepositie in diepe geulen

**Project** 1210301-000      **Kenmerk** 1210301-000-ZKS-0027      **Pagina's** 97

Op basis van de bevindingen wordt verwacht dat het storten in diepe putten lokaal kan leiden tot grote initiële volumeafnames van gestort sediment. Voor de Put van Hansweert wordt dit initieel verloren sediment hoofdzakelijk afgezet op de geulwand van de binnenbocht, wat ook verwacht wordt voor de andere locaties in bochten van de Westerschelde. Het relatief grote initiële verlies betekent niet automatisch dat er een grote impact is op vaargeulonderhoud bij de drempels. Dit vaargeulonderhoud wordt namelijk voor een groot deel bepaald door de transportcapaciteit ter plaatse van de drempels. Sediment dat initieel naar de binnenbocht is vervoerd zou echter kunnen zorgen voor een verhoging van het vaargeulonderhoud, aangezien de stroomsnelheden op andere plaatsen (in de diepe put) hoger kunnen worden door de vernauwing van de bocht, waardoor netto meer sediment transport plaats vindt.

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeuring</b>	<b>Paraaf</b>
	sep 2018	Bas Huisman Reinier Schrijvershof Thijs Lanckriet Jebbe van der Werf		Zheng Wang		D.J.R. Walstra	

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond en aanleiding voor het onderzoek	1
1.2	Doel en onderzoeksvragen	1
1.3	Methodiek	1
1.4	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>Systeembeschrijving</b>	<b>3</b>
2.1	Introductie	3
2.2	Historie baggerwerkzaamheden	3
2.3	Hydrodynamica	4
2.4	Morfologie van de Westerschelde	5
2.5	Bodemsamenstelling	11
<b>3</b>	<b>Lokale morfologie op stortlocatie</b>	<b>15</b>
3.1	Inleiding	15
3.2	Specificaties proefstortingen	15
3.3	Metingen van de stroming en sedimentconcentraties tijdens het storten	16
3.4	Dichtheid van het sediment in beun en op de bodem	18
3.5	Morfologische ontwikkeling na de proefstortingen	19
3.5.1	Inleiding	19
3.5.2	Peil- en verschilkaarten	20
3.5.3	Dwarsraaien	26
3.5.4	Volumeberekeningen	29
3.6	Synthese	33
3.6.1	Morfologische ontwikkeling	33
3.6.2	Oorzaken sterke initiële morfologische ontwikkeling	34
3.6.3	Aanbevelingen	35
<b>4</b>	<b>Modellering stortstrategieën</b>	<b>37</b>
4.1	Introductie	37
4.2	Stortstrategieën	37
4.3	Basis-simulatie en gevoeligheidsonderzoek	39
4.4	Model opzet	40
4.4.1	Model grid en bathymetrie	40
4.4.2	Randvoorwaarden	42
4.4.3	Sedimenttransport	43
4.4.4	Bochtstroming	44
4.4.5	Ingrepen	45
4.5	Hydrodynamica	45
4.5.1	Reproduceren van waterstanden	46
4.5.2	Effect stortstrategieën op hydrodynamica	48
4.6	Morfologische impact	51
4.6.1	Autonome ontwikkeling mesoschaal morfologie	52
4.6.2	Invloed van stortstrategieën op de mesoschaal morfologie	55
4.6.3	Macroschaal morfologie	60
4.7	Impact stortstrategie op baggervolumes	62
4.8	Levensduur van diepe putten	66

<b>5</b>	<b>Detailmodellering diepe putten</b>	<b>69</b>
5.1	Introductie	69
5.2	Reproductie morfodynamisch gedrag van diepe putten	70
5.2.1	Model opzet	70
5.2.2	Evaluatie hydrodynamica, bodemschuifspanningen en morfologie	71
5.2.3	Modellering proefstorting	74
5.3	Geologische opbouw ondergrond	79
5.4	Conclusies en aanbevelingen	82
<b>6</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>85</b>
6.1	Conclusies	85
6.2	Aanbevelingen	86
	<b>Bijlage(n)</b>	
	<b>Referenties</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>Overzicht naamgeving geulen en platen</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Stortstrategieën Westerschelde</b>	<b>B-1</b>

# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond en aanleiding voor het onderzoek

De toegankelijkheid van de haven van Antwerpen is afhankelijk van de diepte van de vaargeulen in de Westerschelde. Ten behoeve hiervan wordt het hele jaar door gebaggerd. Dit materiaal wordt in de Westerschelde teruggestort. Ten behoeve van een verbeterde stortstrategie heeft de 'Vlaams Nederlandse Schelde Commissie' (VNSC) middels de projectgroep 'Storten en meergeulenstelsel' Deltares verzocht een studie uit te voeren naar stortstrategieën voor de plaatsing van gebaggerd materiaal in de diepe delen van de hoofdgeul van de Westerschelde.

De beheerstrategie wordt door RWS Zee & Delta (Gert-Jan Liek en Marco Schrijver) en aMT (Frederik Roose, Youri Meersschaut) voorbereid en door de VNSC vastgesteld, als basis voor de nieuwe vergunningen voor storten van baggerspecie in de Westerschelde.

De studie is gericht op de effectiviteit van plaatsing van gebaggerd zand in de diepe geulen van de Westerschelde. Gekeken zal worden wat de impact is van het storten van gebaggerd zand in de diepe delen van de Westerschelde (i.e. erosiesnelheid en verblijftijd). En tevens hoe de verspreiding van het zand over de Westerschelde plaats zal vinden op de lange termijn (i.e. 10 jaar). Tevens is de impact op toekomstig baggerbezwaar en getijslag geëvalueerd.

In verschillende studies is de morfologie van de Westerschelde gemodelleerd (o.a. Dam, 2013a en 2013b; Vroom et al., 2015; Schrijvershof & Vroom 2016; Plancke, 2017). Hierin is gebruik gemaakt van ofwel het FINEL2D/3D model (Dam, 2013e) of van het gekalibreerde Delft3D model (Vroom et al., 2015). In deze studie wordt gebruik gemaakt van het Delft3D model (i.e. NeVla model).

## 1.2 Doel en onderzoeksvragen

Dit onderzoek draagt bij aan een verbeterde stortstrategie in de Westerschelde. De volgende beheer- en kennisvragen krijgen aandacht in deze studie:

### *Beheervragen*

- 1) Hoe snel en waarheen verspreidt het sediment?
- 2) Wat zijn de resulterende bodems?
- 3) Wat zijn eventuele effecten op getijslag?

### *Kennisvragen*

- 1) Wat bepaalt de ligging van de diepe delen?
- 2) Wat zijn de dominante processen?
- 3) Hoe goed kunnen we deze modelleren?

## 1.3 Methodiek

De evaluatie van de stortstrategieën in de diepe putten van de Westerschelde bestaat uit drie onderdelen welke gezamenlijk een compleet beeld geven van de impact die het storten in

diepe putten van de Westerschelde heeft op de hydrodynamica, morfologie en het onderhoudsbaggerwerk van de vaargeul. Dit betreft:

1) **Lokale impact van storten in diepe putten (Hoofdstuk 3)**

De verspreiding van het zand op de stortlocatie wordt onderzocht middels data analyse van proefstortingen in de Put van Hansweert en de Inloop van Ossensisse (IMDC, 2018a). Hierbij wordt het volgende beschouwd : 1) de verliezen tijdens het storten en 2) de levensduur van het gestorte sediment bij de proefstorting.

2) **Meso- en macroschaal morfologische impact en baggerbezwaar (Hoofdstuk 4)**

Dit betreft een evaluatie van de effecten van stortstrategieën in diepgelegen putten op 1) de hydrodynamica van de Westerschelde, 2) meso- en macroschaal morfologie (i.e. 10 tot 50 km invloedgebied) en 3) vaargeulonderhoud (i.e. baggervolumes op drempels). Deze studie maakt gebruik van het gekalibreerde Delft3D-NeVla model voor de Westerschelde (Grasmeijer, 2013). Er worden vier stortstrategieën beschouwd welke respectievelijk focussen op 1) een voortzetting van bestaand beleid met stortingen op plaatranden en geulwanden, 2) het storten in de dichtstbijzijnde stortlocatie (ten opzichte van de baggerlocatie), 3) het meer westelijk storten van het gebaggerde materiaal of 4) een combinatie van deze maatregelen.

3) **Detailmodellering ten behoeve van kennisontwikkeling (Hoofdstuk 0)**

In deze analyse worden detailmodellen gebruikt om de invloed van complexe processen op de hydrodynamica en morfologie van de Put van Hansweert te onderzoeken, waarbij meetdata als referentie wordt gebruikt. Doel is om inzicht te verwerven in de weergave van de fysica van de diepe putten in de numerieke modellen én in gevoeligheid voor fysische parameters.

## 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het systeem van de Westerschelde en relevante informatie over voorgaande studies, hydrodynamische condities, historie van het baggerwerk en baggervolumes. De lokale impact van storten in de diepe putten wordt in Hoofdstuk 3 beschreven op basis van data van proefstortingen. In dit hoofdstuk worden tevens de geëvalueerde scenario's beschreven die met het morfologische model zijn doorgerekend. De verspreiding van het gestorte baggermateriaal en de potentiële impact op de hydrodynamica (i.e. mogelijke invloed op getijslag) worden in Hoofdstuk 4 beschreven. In hoofdstuk 0 wordt vervolgens een analyse gedaan van de relevantie van fysische processen voor stortingen in de diepe put van Hansweert op basis van modelberekeningen voor een proefstorting. Gerichte conclusies en aanbevelingen worden dan gegeven voor de beheers- en kennisvragen (Hoofdstuk 6).

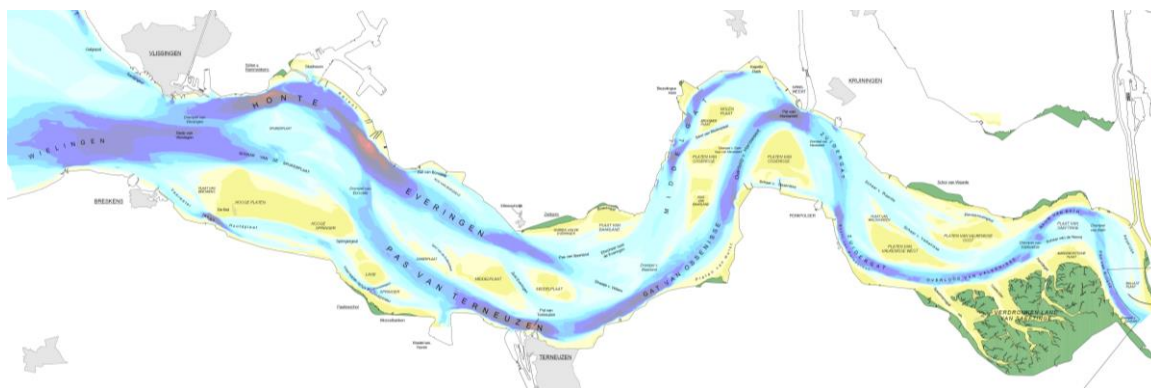


## 2 Systeembeschrijving

### 2.1 Introductie

De Westerschelde is een getijde gedomineerd estuarium met sterk meanderende geulen. De intergetijdegebieden zijn ecologisch waardevol, onder meer voor vogels. De hoofdgeul wordt gebruikt als vaarweg naar de haven van Antwerpen, en daarvoor op diepte gehouden.

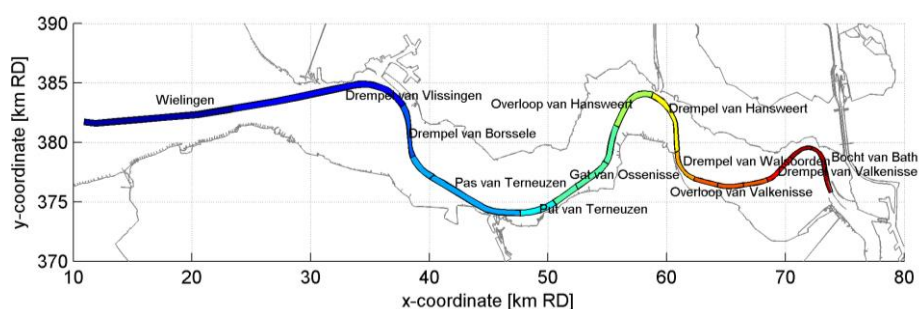
Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van de Westerschelde. In Paragraaf 2.2 wordt de historie van de baggerwerkzaamheden beschreven. De hydrodynamica van de Westerschelde wordt dan toegelicht in Paragraaf 2.3 en de morfologische veranderingen in Paragraaf 2.4. Afsluitend wordt de bodemsamenstelling van de Westerschelde beschreven (Paragraaf 2.5).



Figuur 2.1 Overzicht van naamgeving platen en geulen van de Westerschelde (zie ook Bijlage A)

### 2.2 Historie baggerwerkzaamheden

In 1895 is gestart met de eerste baggerwerkzaamheden in de Belgische deel van de Schelde. Op Nederlandse bodem is in 1923 gestart met het verdiepen van de vaarweg ter hoogte van Bath (i.e. op de Drempel van Bath). Later worden ook de meer westelijke drempels van de Westerschelde verdiept. (i.e. Drempel van Hansweert en Drempel van Borssele). In de jaren 70 heeft een eerste verruiming van de vaargeul plaats gevonden waardoor meer breedte van de vaargeul werd gerealiseerd. Eind vorige eeuw vond de tweede verruiming van de vaargeul plaats. Gebaggerd materiaal werd op locaties in de buurt gestort (bijv. in nevengeulen).



Figuur 2.2 Overzicht van relevante locaties langs de vaargeul van de Westerschelde

Tot 2015 vond ook zandwinning plaats, waardoor het volume zand in de Westerschelde is afgenomen. Baggeronderhoud wordt ook verricht in de havens langs de Westerschelde. Dit is overwegend fijn sediment (slib).

In 2010 heeft een derde verruiming van de vaarweg plaats gevonden. Momenteel wordt de vaarweg onderhouden op een diepte van LAT -14,5 meter, met een overdiepte van maximaal 70 centimeter. De baggervolumes bedragen ongeveer 8 a 9 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. In de periode tijdens en na deze verruiming is gebaggerd materiaal ook geplaatst op plaatranden (Hooge Platen West en Noord, Rug van Baarland en Plaat van Walsoorden). Tevens is sediment gestort in enkele nevengeulen (o.a. Schaar van de Spijkerplaat en oostelijke put van de Everingen), in diepe delen van de hoofdgeul (o.a. Zuidergat) en op geulwanden (met name op de noord-oostelijke geulwand van het Gat van Ossenissee en in de buitenbocht bij Bath).

## 2.3 Hydrodynamica

De getijslag in de Westerschelde varieert van ongeveer 3,80 m bij Vlissingen tot bijna 5 m ter hoogte van Bath (Kuijper & Lescinski, 2013). Tot aan Tielrode in de Zeeschelde neemt de getijslag verder toe (tot bijna 5,50 m). De verdiepingen van de Westerschelde en Zeeschelde alsmede de inpoldering van getijdegebieden zorgden zeer waarschijnlijk voor een toename in de getijslag gedurende de laatste halve eeuw. De verruimde geulen verlaagden de weerstand voor de getijgolf, terwijl er minder bergend oppervlak was door het inpolderen van intergetijdegebieden.

De dieptegemiddelde getijstrooming tijdens vloed of eb bedraagt ongeveer 0.7 t/m 1 m/s in de geulen van het mondingsgebied van het estuarium, en is ongeveer 1 t/m 1.5 m/s in de hoofdgeulen van het estuarium. De piekstromingsnelheid tijdens eb is over het algemeen groter dan de piek-snelheid tijdens vloed (Vroom et al., 2015). Lokaal zijn de stroomsnelheden hoger als gevolg van contractie van de stroming én 3D processen (i.e. met name op de plaatranden, in nevengeulen en op de geulwand van diepe putten). Tevens kunnen scheepsgolven (i.e. met name de primaire golf) invloed hebben op de stroomsnelheden op de platen (Schroevens et al., 2011). Het estuarium heeft een relatief kleine rivierafvoer (circa 100 m<sup>3</sup>/s) ten opzichte van de debieten door het getij.

De golfhoogte in het Westerschelde estuarium is over het algemeen beperkt door de strijklengte van de golven en zal daardoor binnen het estuarium ten hoogste enkele decimeters zijn. In het gebied aan de zeezijde van het estuarium zijn de golven aanzienlijk hoger en bepaald door de golven die opgewekt worden op de Noordzee. De typische significante golfhoogte op de Nederlandse Noordzeekust is ongeveer 1 m (Wijnberg, 2002) met dominante golfrichting uit het noordwesten of zuidwesten. Typische winterstormen hebben een maximum significante golfhoogte van 4 tot 5 m en piekperiodes van 10 tot 15 s.

Binnen de Westerschelde zijn er verschillende plaatsen waar de vaargeul een sterke bocht maakt. De bochtstralen van de vaargeul zijn het kleinst aan de oostzijde van het estuarium en worden groter in zeewaartse richting. Ter plaatse van het Nauw van Bath is de vaargeul zeer sterk gekromd met bochtstraal van ongeveer 1200 m, terwijl de krommingen bij de Put van Hansweert en Zuidergat ook zeer groot zijn (i.e. bochtstralen van circa 2000 m). Aan de zeezijde heeft de vaargeul de grootste kromming ter plaatse van de Honte (ongeveer 3000 m bochtstraal). Aangenomen mag worden dat deze locaties gekenmerkt worden door complexe 3D bochtstroming welke een effect zal hebben op sediment transport én lokale morfologie.

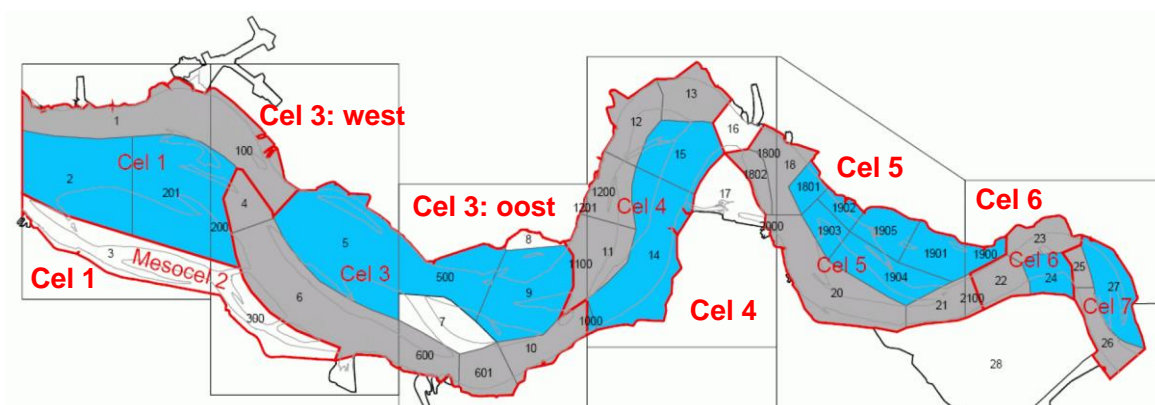
De toename van het stromingsaandeel in de Overloop van Hansweert ten opzichte van het Middelgat (Cleveringa, 2013) wordt verondersteld een directe impact te hebben op de spiraalstromingen in de diepe put van Hansweert. Wanneer er meer debiet door de Overloop van Hansweert gaat (ten opzichte van het Middelgat) wordt de bocht effectief scherper. Dit zorgt voor sterkere spiraalstromingen en mogelijk ook een sterkere uitschuring van de bodem.

## 2.4 Morfologie van de Westerschelde

Het Westerschelde estuarium wordt gekenmerkt door een hoofd- en nevengeul. De ebstroming is dominant in de hoofdgeul. De vloedstroming is belangrijker in de nevengeulen. De hoofdgeul loopt vanaf de Wielingen via de Honte en Put van Borssele naar de Pas van Terneuzen en Gat van Ossensisse, naar de Put van Hansweert, Zuidergat, Overloop van Valkenisse en Nauw van Bath. Ter plaatse van de bochten is de hoofdgeul dieper, veelal omdat er door bedijkingen of andere harde ophangpunten geen ruimte was voor de geul om in de breedte uit te breiden.

De nevengeulen hebben een minder grote doorsnede dan de hoofdgeul. Van west naar oost hebben ze de namen 'Schaar van de Spijkerplaat', Everingen, Middelgat, Schaar van Waarde, Schaar van Valkenisse, Schaar van de Noord en Appelzak. De laatste ligt achter een geleidedam en is geen echte nevengeul meer. Tussen hoofd- en nevengeulen kunnen kortsluitgeulen liggen, die plaatgebieden doorsnijden.

De Westerschelde wordt veelal beschreven via de zes aanwezige macrocellen, een samenhangend deel van hoofd- en nevengeul en tussen- en naastliggende intergetijdgebieden. De overgang tussen twee macrocellen wordt meestal gelegd waar hoofd- en nevengeulen elkaar 'kruisen'. Die plaatsen worden als drempelgebieden aangeduid en dit waren altijd de morfologisch meest actieve gebieden. Net bovenstrooms daarvan bevinden zich meestal de locaties die het meest gebaggerd dienen te worden om de diepte van de vaargeul te handhaven.

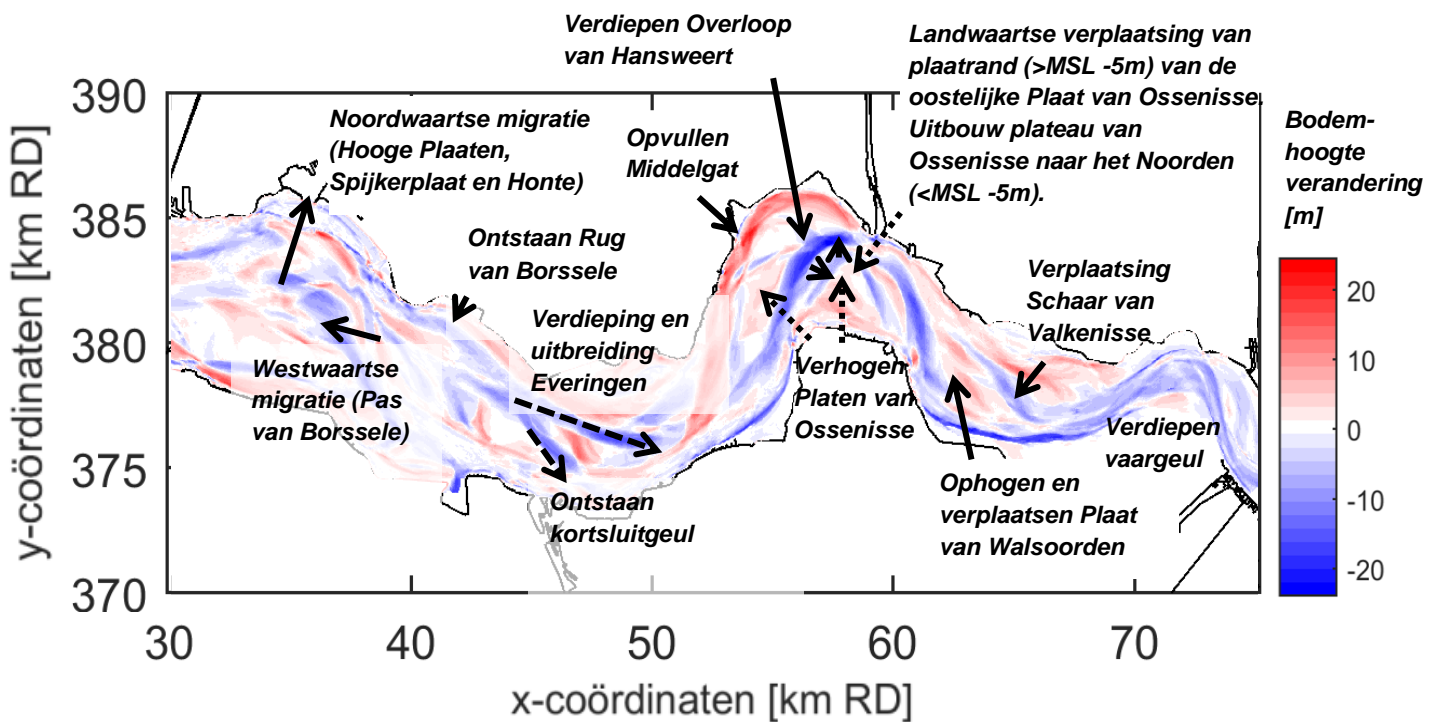


Figuur 2.3 Overzichtskarta van macro- en mesocellen (bron : Cleveringa, 2013)

De intergetijdengebieden tussen de geulen van de Westerschelde (i.e. hoger dan LAT) welke niet verbonden zijn met het vaste land worden aangeduid als platen. Ze kennen zowel hoog- als laagdynamische delen (Cleveringa, 2013). De laagdynamische delen hebben lagere stroomsnelheden en daardoor meer slib en meer bodemleven. De grote stroomsnelheden op

hoogdynamische platen zorgen voor een grote opwoeling van de bodem met ribbels als gevolg van de stroming. Hier is weinig bodemleven mogelijk. Hoogdynamische delen van de platen bevinden zich dicht bij de geulen. De hogere onbegroeide intergetijdengebieden aan de randen van de Westerschelde worden Slikken genoemd en de begroeide delen Schorren.

De Westerschelde is morfologisch zeer dynamisch, wat zich uit in de verschuivingen in de ligging van de (hoofd)geul en het ophogen van sommige platen in de Westerschelde (De Vet et al., 2016). Een overzicht van de lange-termijn morfologische ontwikkeling wordt gegeven door Cleveringa (2013). Op basis van een verschilplot van de bodems voor de jaren 2010 en 1955 wordt dit voor het middendeel van de Westerschelde weergegeven in Figuur 2.4. Getoond wordt in dit geval het middendeel van de Westerschelde omdat hier veel grote veranderingen plaats gevonden hebben.



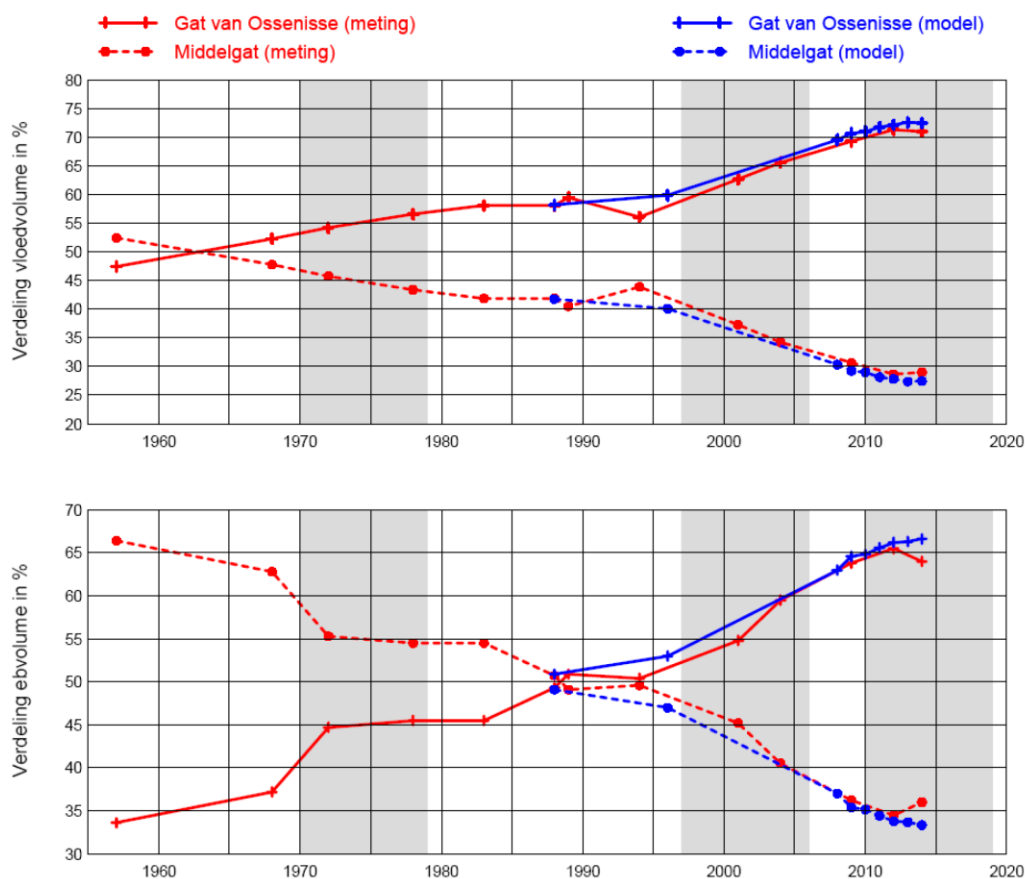
Figuur 2.4 Verschilplot bodemhoogte in de periode 1964 tot 2011 met karakteristieke ontwikkelingen.

Voor Macrocel 1 bestaat de grootschalige ontwikkeling met name uit het opschuiven van de Spijkerplaat en Hooge Platen naar het noorden én erosie van de geulwand aan de noordzijde van de Honte (Cleveringa, 2013). De Hooge Platen en Spijkerplaat zijn gemiddeld tevens hoger geworden. In de Pas van Borssele is juist een zuidwaartse verplaatsing van de geul waargenomen. Het totale sedimentvolume in Macrocel 1 is met 20 miljoen m<sup>3</sup> afgenomen sinds 1955 (en 5 miljoen m<sup>3</sup> sinds 1990). Sinds de jaren negentig is het volume verlies kleiner omdat er baggerspecie uit andere Macrocellen wordt geïmporteerd.

De belangrijkste ontwikkelingen in Macrocel 3 (volgens Cleveringa, 2013) bestaan uit 1) Westwaartse verplaatsing van de Pas van Borssele; 2) Zuidwaartse verplaatsing Everingen en ontstaan Rug van Borssele; 3) Zuidwaarts uitbochten Pas van Terneuzen; 4) Oostwaartse uitbreiding Everingen en verplaatsing van het drempelgebied. In de periode 1955 t/m 2000 is

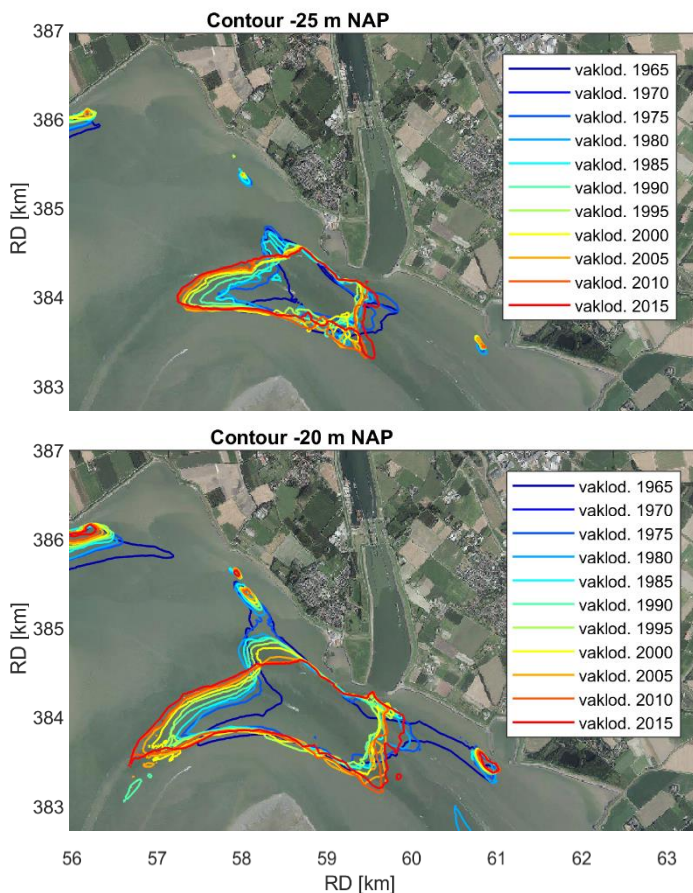
het zandvolume in Macrocel 3 afgenomen met circa 40 miljoen m<sup>3</sup> (Cleveringa, 2013) waarvan een deel veroorzaakt is door zandwinning (circa 27 miljoen m<sup>3</sup>).

De belangrijkste ontwikkeling binnen Macrocel 4 bestaat uit het verdiepen van de Overloop van Hansweert en het opvullen van het Middelgat (Cleveringa, 2013). Er vond een natuurlijke functiewisseling plaats van de hoofd- en nevengeul (i.e. van het Middelgat naar het Gat van Ossensisse en Overloop van Hansweert). De omschakeling zelf vond plaats tussen 1950 en 1980, maar werkt nog steeds door tot vandaag: gemiddeld vertoont het Middelgat nog steeds sedimentatie en ruimt het Gat van Ossensisse uit. Daardoor nam het getijvolume (zowel eb- als vloedvolume) toe in het Gat van Ossensisse, ten opzichte van het Middelgat (Figuur 2.5).



Figuur 2.5 Wisseling getijvolumeverdeling Middelgat en Gat van Ossensisse (Raai 6 in macrocel 4). Bron: Schrijver (2015).

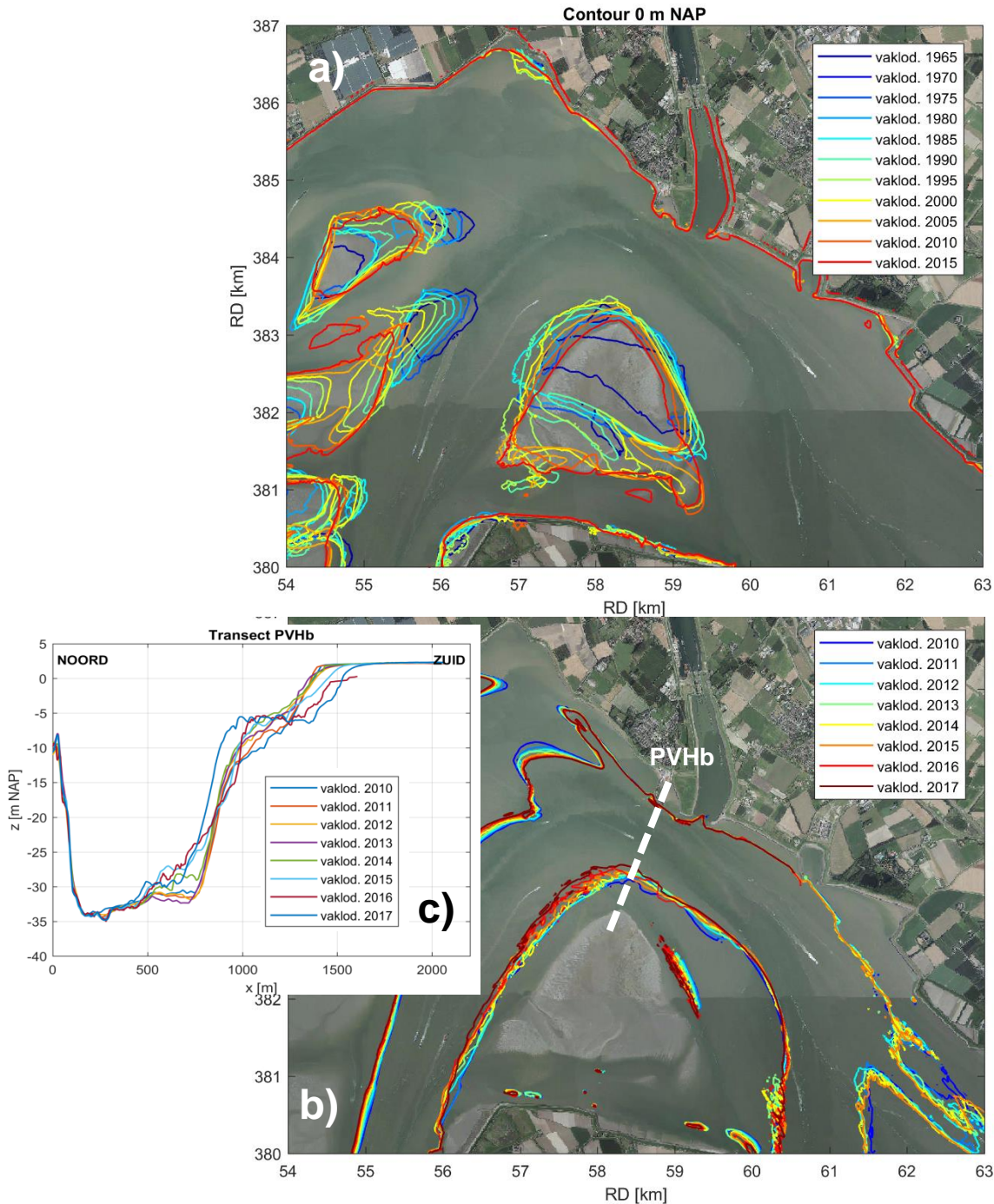
Door de omschakeling van de getijdestroom naar de Overloop van Hansweert is ook de morfologie van de Put van Hansweert veranderd (Figuur 2.6). De uitloper van de put naar het middelgat toe is door de tijd heen steeds kleiner geworden, terwijl de uitloper naar de Overloop van Hansweert steeds dieper wordt (met name sinds 1990). De put is ook stelselmatig langwerpiger geworden, en heeft zich vooral in westwaartse richting uitgebreid (zie dieptecontouren op NAP -25 m en NAP -20 m). Aan de oostzijde is de put in de jaren 1975 tot 2000 relatief stabiel. Tussen 2010 en 2017 is er een beperkte oostwaartse uitbreiding van de Put van Hansweert waar te nemen.



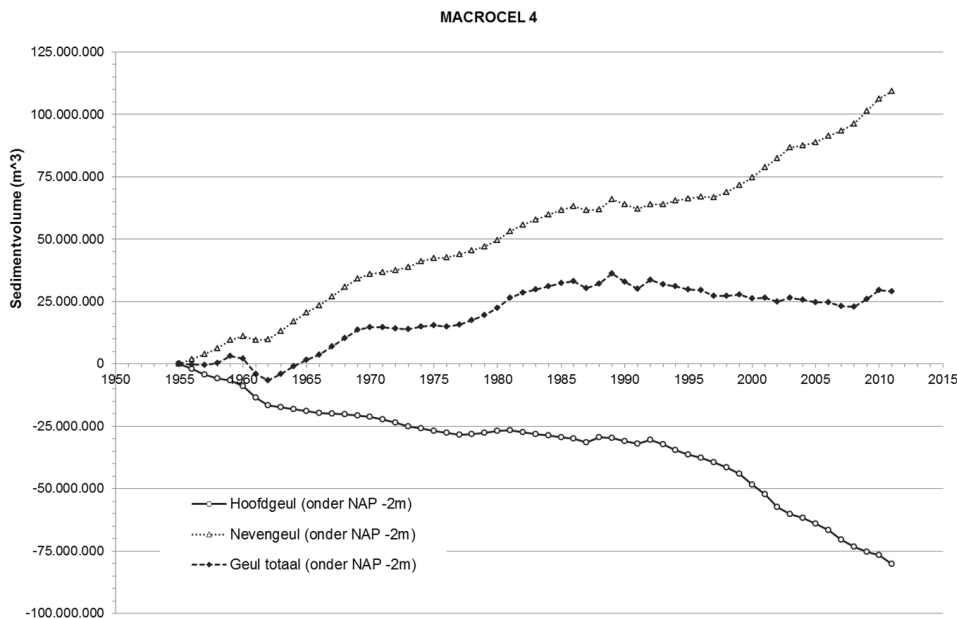
Figuur 2.6 Geometrische ontwikkeling van de Put van Hansweert over de periode 1965 – 2015 voor diepte contouren op NAP -25m en NAP -20m op basis van vaklodingen.

De westelijke (ook Rug van Baarland en Molenplaat genoemd) en oostelijke Platen van Ossensisse zijn in de periode 1955-2000 hoger geworden en in areaal uitgebreid (Figuur 2.7). De gemiddelde hoogte van de plaat boven -2 m NAP nam met 1,5 m toe van ca. -0.75 m NAP tot + 0.75 m NAP. Voor de evolutie van de Put van Hansweert moeten vooral de ontwikkelingen van de oostelijke plaat van Ossensisse nader bekeken worden. Door de tijd is deze verschoven naar het zuiden. Langs de noordrand (incl. de noordoostelijke en noordwestelijke delen) zijn de platen van Ossensisse-Oost sinds het jaar 2000 geërodeerd, waardoor ook het totale oppervlak enigszins is afgenomen.

Op basis van de dieptecontouren op NAP -10 m valt te zien dat de onderwateroever van de platen van Ossensisse-oost zich juist wel naar het noorden heeft uitgebouwd, in de periode tussen 2010 en 2017 (i.e. in andere richting dan de waterlijn van de plaat; zie Figuur 2.7b). Daarnaast heeft zich in recente jaren ook een plateau ontwikkeld op NAP -5 m. Op een dwarsraai door de put van Hansweert (PVHb in Figuur 2.7) valt de ontwikkeling van het plateau en verschuiving van de geulwand goed te zien. De overgang van het plateau naar de diepe put is door de jaren heen steiler geworden, en is ook noordwaarts (in de richting van de put) opgeschoven. De plaatrand boven -2 m NAP is echter relatief stabiel gebleven in de periode 2010-2015, en slechts licht achteruitgeschreden in de vaklodingen van 2016 – 2017.



Figuur 2.7 Geometrische ontwikkeling van de Put van Hansweert over de periode 1965 – 2015 voor diepte contouren op NAP en NAP -10m op basis van vaklodingen. Tevens is de morfologische ontwikkeling op een transect dwars op de Put van Hansweert geplott.



Figuur 2.8 Volumeverandering van Macrocel 4 voor de periode 1955 tot 2010 (bron : Cleveringa, 2013).

Het totale sedimentvolume van de geulen in Macrocel 4 is toegenomen met 25 miljoen m<sup>3</sup> over de periode 1955 t/m 1990. Na 1990 is de volumeverandering door de verdieping van het Gat van Ossenis van vergelijkbare orde als de opulling van het Middelgat.

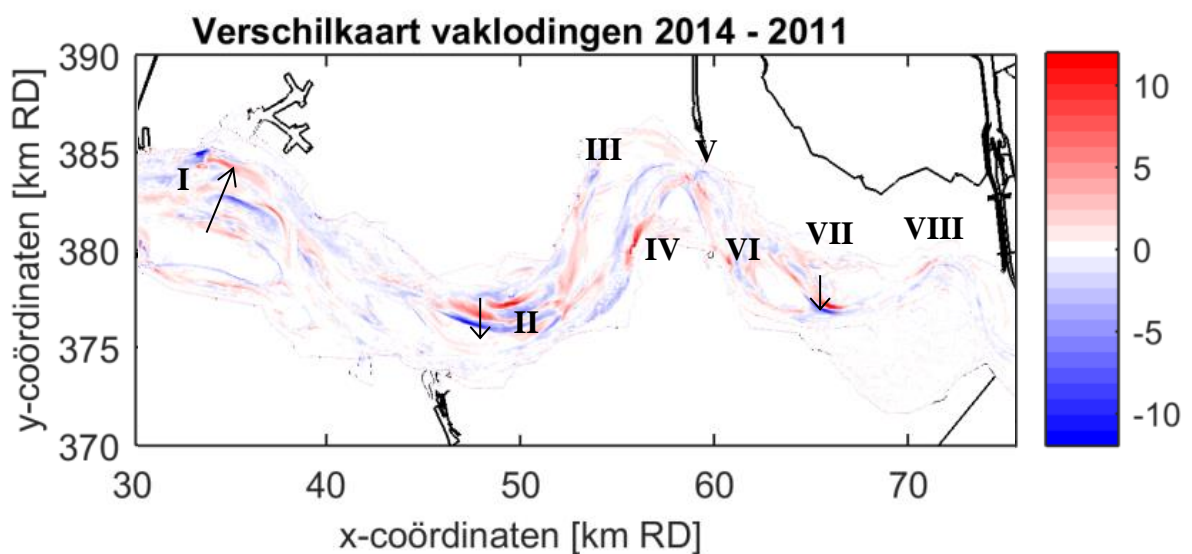
De lange-termijn ontwikkeling in Macrocel 5 wordt gekenmerkt door een verdieping van de vaargeul en verhoging van de platen (o.a. Plaat van Walsoorden en Land van Saeftinghe). Er is ook sprake van verlegging van de geulen waardoor de Plaat van Walsoorden naar het oosten schuift en uitbocht plaats vindt van de hoofdgeul ter plaatse van de Overloop van Valkenisse. Macrocel 6 kenmerkt zich met name door het uitbochten van de hoofdgeul in het Nauw van Bath. Bij Ossendrecht zijn Schorren ingepolderd en er is een stroomgeleidingsdam aangelegd ter hoogte van de grens.



Figuur 2.9 Veranderingen in morfologie in de Macrocellen 5 en 6 voor de periode 1818 tot 2010 met karakteristieke ontwikkelingen (bron : Cleveringa, 2013).



Als referentie voor het morfologische model worden in Hoofdstuk 4 de recente morfologische ontwikkelingen gebruikt over de periode 2011 t/m 2014 (Figuur 2.10). De ontwikkelingen in deze periode bestonden uit een grote natuurlijk dynamiek rond de Spijkerplaat in Macrocel 1 (zie I in Figuur 2.10). Binnen Macrocel 3 is met name een verplaatsing van de oostelijke geul van de Everingen naar het Zuiden waarneembaar (II). De opvulling van het Middelgat en verdieping van de Overloop van Hansweert zijn ook in de recente data van Macrocel 4 te zien (III). In het Gat van Ossenisse is een grote accumulatie te zien als gevolg van de stortstrategie (IV). Dit is deels gerelateerd aan stortingen in SH41 sinds 2011 (circa 20 miljoen m<sup>3</sup>) en deels aan geulwandstortingen sinds 2014 (circa 7 miljoen m<sup>3</sup>). Tevens vindt accumulatie plaats van zand aan de oostelijke zijde van de Platen van Ossenisse (V).



Figuur 2.10 Veranderingen in recente morfologie van de Westerschelde voor de periode 2011 tot en met 2014.

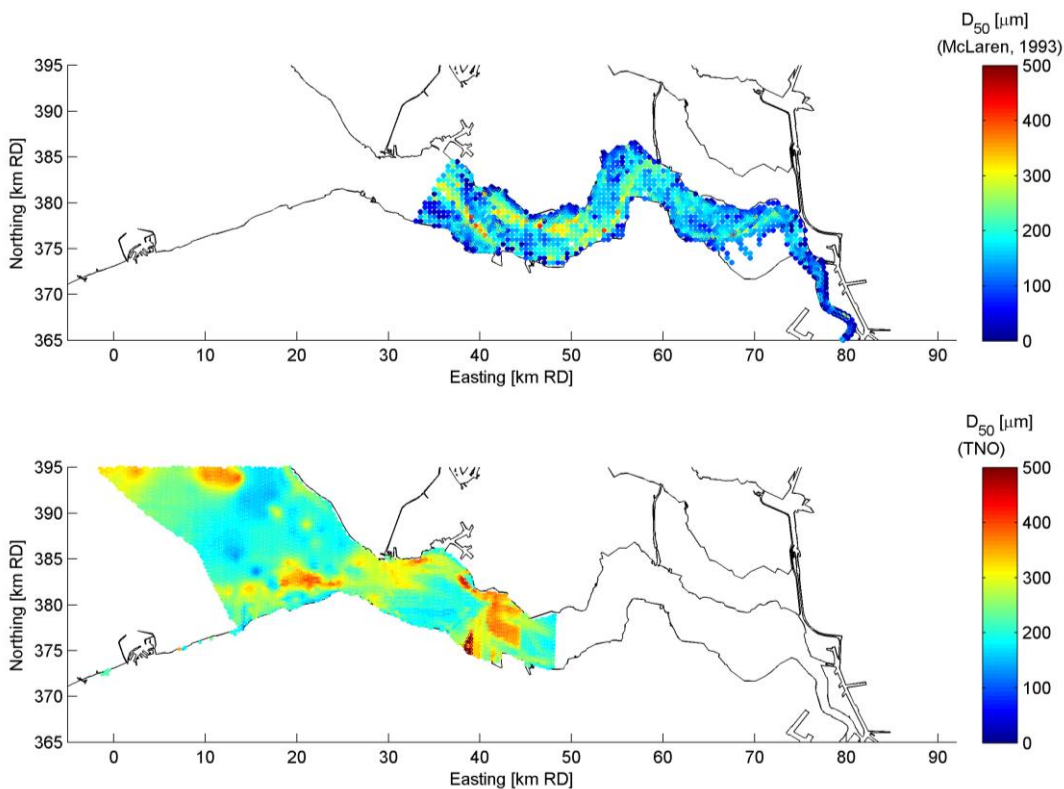
Binnen Macrocel 5 is sprake van aanzanding ter plaatse van de Plaat van Walsoorden (VI) alsmede een verlegging van de bovenstroomse zijde van de Schaar van Valkenisse en Schaar van Waarde, welke deels gerelateerd zouden kunnen zijn aan de stortstrategie (op de plaatranden) in deze periode. De Schaar van Valkenisse migreert aan de oostzijde naar het zuiden (VII). Binnen macrocel 6 zijn de veranderingen relatief beperkt (VIII). Wat opvalt is met name de aanzanding op de geulwand aan de noordwest zijde van het Nauw van Bath, welke deels veroorzaakt wordt door het storten van sediment. Tevens is lichte erosie aanwezig in de binnenbocht.

## 2.5 Bodemsamenstelling

Het sediment in de Westerschelde bestaat uit zand, slib en veen. Over het algemeen bestaat het sediment in de geulen uit zand, terwijl meer slibrijk sediment op de platen van de Westerschelde ligt. Gebieden met een lagere dynamiek van de bodem en hydrodynamica worden gekenmerkt door slibrijk sediment met een verhoogde weerstand tegen erosie ten opzichte van zandige bodems. Tevens zijn er gebieden met een bodem bestaande uit relatief erosiebestendig veen of klei. Oudere klei- en veenlagen zijn op sommige plaatsen in de geulen aanwezig. Door de aanwezigheid van deze meer cohesieve lagen wordt erosie in een

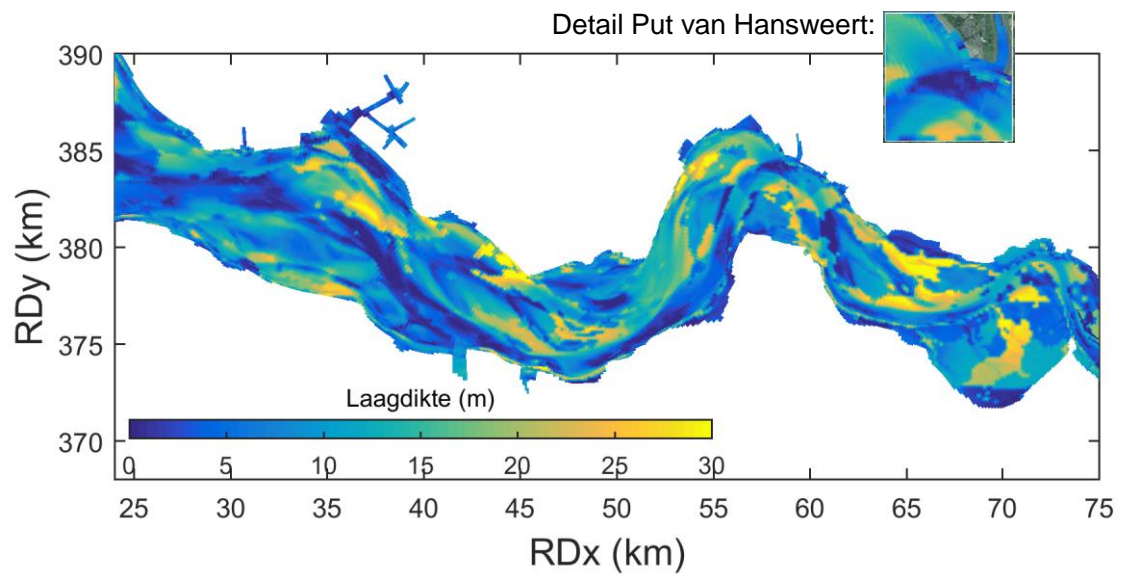
bepaalde richting vertraagd, waardoor bijvoorbeeld de diepte van een put niet toeneemt, maar een horizontale vergroting van de put plaats vindt.

Veldmetingen van de bodemsamenstelling zijn uitgevoerd door McLaren (1993) voor het binnengebied van de Westerschelde (Figuur 2.11). Voor de monding werden metingen uitgevoerd door TNO. In de meetdata van TNO is de invloed van het geulenstelsel op de bodem echter veel minder prominent aanwezig dan in de bodemmonsters van McLaren.



Figuur 2.11 Mediane korreldiameter ( $D_{50}$ ) zoals gemeten door McLaren (1993, 1994) en TNO.

In sommige deelgebieden van de Westerschelde bevinden zich harde lagen welke lokale erosie verhinderen. De dikte van de zandige lagen in de Westerschelde is afhankelijk van het bodemniveau waarop erosieresistente lagen voorkomen (bijv. klei, keileem of potklei). Deze zandige sedimentlaagdikte is gekarteerd door TNO (TNO, 2003) en vervolgens aangepast aan de hand van het historische bodemniveau voor alle beschikbare data tot 2011 (Dam, 2013). De schematisatie van de dikte van het erodeerbare zandpakket is weergegeven in Figuur 2.12. Opgemerkt wordt dat er in het betreffende model geen sediment beschikbaar is op de bodem van verschillende diepe putten in de Westerschelde (zie bijvoorbeeld de zoom-in van de Put van Hansweert). De putten kunnen op deze locaties dus niet verdiepen.



Figuur 2.12 Dikte van het erodeerbare zandpakket, met een zoom-in van de Put van Hansweert.



### 3 Lokale morfologie op stortlocatie

#### 3.1 Inleiding

In 2016 en 2017 zijn twee proefstortcampagnes uitgevoerd in de diepe put van Hansweert. Tijdens en na het storten is de bodem van het stort- en omliggende gebied gemeten met multibeam, en tijdens de tweede proefstorting is er een meetcampagne uitgevoerd waarbij o.a. stroomsnelheden en sedimentconcentraties zijn gemeten. Deze data worden in dit hoofdstuk gebruikt voor het beschrijven en verklaren van de morfologische ontwikkeling na de proefstortingen. Doel van deze analyses is om:

1. Inzicht te krijgen in de initiële verliezen die kunnen optreden tijdens het storten in diepe putten.
2. De morfologische evolutie van de proefstorting binnen een diepe put (i.e. de Put van Hansweert).

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Paragraaf 3.2 geeft de specificaties van de twee proefstortingen. De belangrijkste resultaten van de stroming- en concentratiemetingen tijdens het storten worden gepresenteerd in Paragraaf 3.3. Paragraaf 3.4 bespreekt het verschil tussen de dichtheid van het sediment in het beun en in het schip, wat van belang is voor het omrekenen van in-beun naar in-situ stortvolumes. De morfologische ontwikkeling na de 2016 en 2017 proefstortingen wordt gepresenteerd in Paragraaf 3.5, en bediscussieerd in Paragraaf 3.6.

#### 3.2 Specificaties proefstortingen

De eerste stortcampagne werd uitgevoerd van 30 maart tot 25 april 2016, voor een totaal in-situ volume van 1,0 miljoen m<sup>3</sup> (410 stortingen met een in situ-volume van 2.400 m<sup>3</sup>). 62% van het gestorte sediment was afkomstig van de Drempel van Hansweert, 20% van de Overloop van Valkenisse en 18% van de Overloop van Hansweert.

De tweede campagne werd uitgevoerd van 6 juli tot 23 augustus 2017, met eveneens een totaal in-situ volume van 1,0 miljoen m<sup>3</sup> (456 stortingen met een gemiddeld in situ-volume van 2.200 m<sup>3</sup>). In deze campagne was 42% van het gestorte sediment afkomstig van de Drempel van Hansweert, 29% van de Overloop van Valkenisse, 24% van de Drempel van Valkenisse, en 5% van de baggerzone Walsoorden. De stortingen werden quasi-doorlopend uitgevoerd (gemiddeld ca. 10 stortingen per dag), ongeacht de fase van het getij.

Sedimentmonsters genomen in het beun van de baggerschepen tijdens de tweede proefstorting gaven een D50 van 0,18-0,19 mm, en er bleek geen slib (korrelgrootte kleiner dan 0,063 mm) aanwezig te zijn (Plancke et al., 2017a). Dit past bij het lage slibpercentage van het sediment bij de Drempel van Hansweert. De monsters werden genomen bovenaan het beun van de baggerschepen. Het is mogelijk dat de fijne sedimentfractie bovenaan het beun was uitgewassen, maar dat er lager in het beun wel nog fijner sediment aanwezig was.

### 3.3 Metingen van de stroming en sedimentconcentraties tijdens het storten

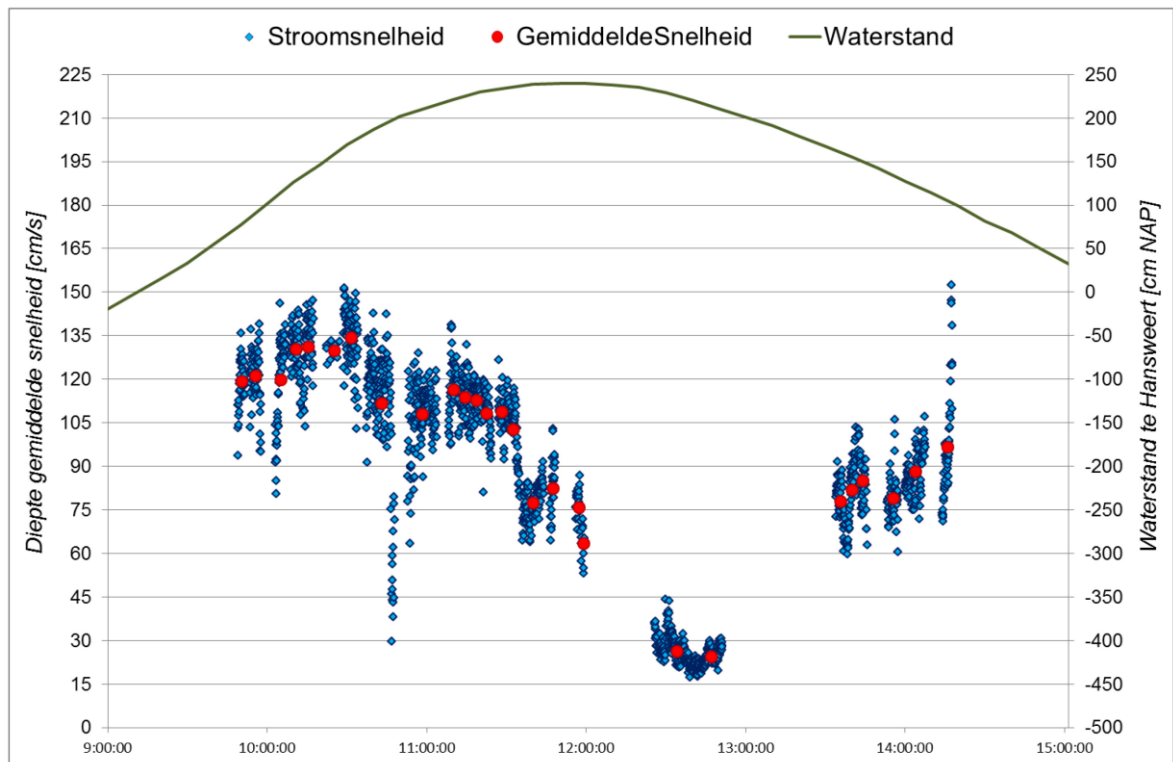
Tijdens de twee stortcampagne zijn er op 20 juli 2017 door Plancke et al. (2017a) metingen gedaan. De gestorte specie tijdens de meetdag was afkomstig van de naastgelegen Drempel van Hansweert. Gedurende de uitgevoerde metingen werd er driemaal gestort door een sleephopperzuiger, 2.400-2.500 m<sup>3</sup> specie per keer. De stortingen namen ca. 5 min in beslag.

Plancke et al. (2017b) hebben ca. 250 m stroomafwaarts van het baggerschip metingen van de stroming (ADCP), sedimentconcentraties (ADCP, watermonsters) en korrelgrootte (watermonsters, Malvern) uitgevoerd. Ook zijn er sedimentmonsters genomen uit de beun van het baggerschip genomen. Daarnaast is er langs dwarsraaien tussen de ingang van de Geul door Zuid-Beveland en de kop van de Plaat van Ossensisse gemeten.

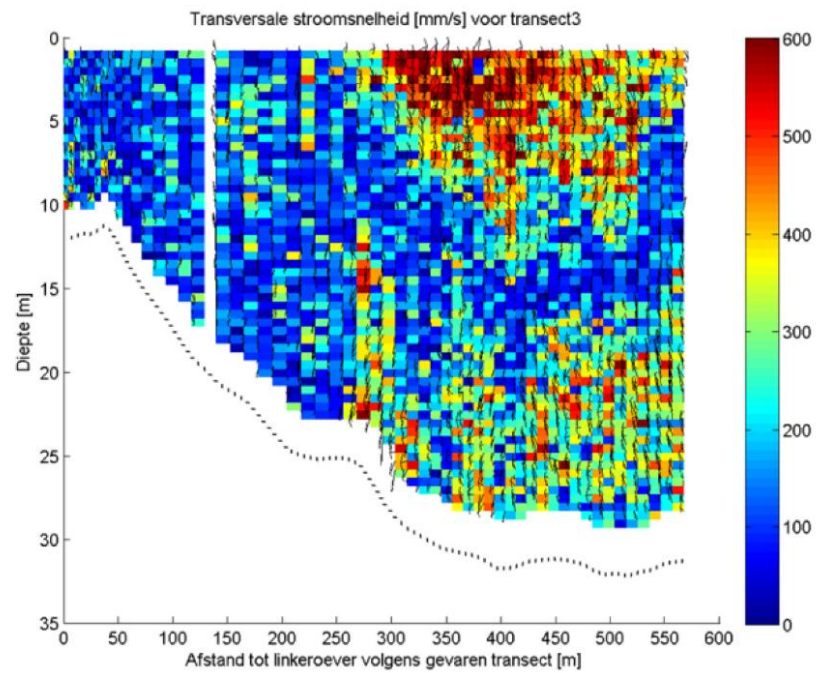
Figuur 3.1 geeft het verloop weer van de dieptegemiddelde stroomsnelheid en de waterstand te Hansweert gedurende de meetcampagne. De piek vloedsnelheid was 1,3-1,4 m/s en trad op om ongeveer 10.30 uur (ca. 1,5 uur voor hoogwater); de vloedkentering was ca. 0,5 uur na hoogwater. De ADCP-metingen geven aan de stroming in de Put van Hansweert een aanzienlijk dwarse stromingscomponent heeft als gevolg van het doorlopen van de bocht, met name tijdens vloed (Figuur 3.2). De dwarse stromingscomponent is ~0,5-0,6 nabij het wateroppervlakte (naar buiten gericht, richting Hansweert) en ~0,3-0,4 m/s nabij de bodem (naar binnen gericht, richting de Plaat van Ossensisse).

Het sediment in het midden van de waterkolom (~15 m diepte) had een  $D_{50}$  van 0,01-0,02 mm en een slib percentage van 75-95%. De eerste monsters zijn 2-16 minuten na de aanvang van het storten genomen. Dit betekent dat in het midden van de waterkolom op ca. 250 m afstand stroomafwaarts van het baggerschip er na een paar minuten nauwelijks sprake is van een beïnvloeding door de storting die overwegend zandige specie betrof.

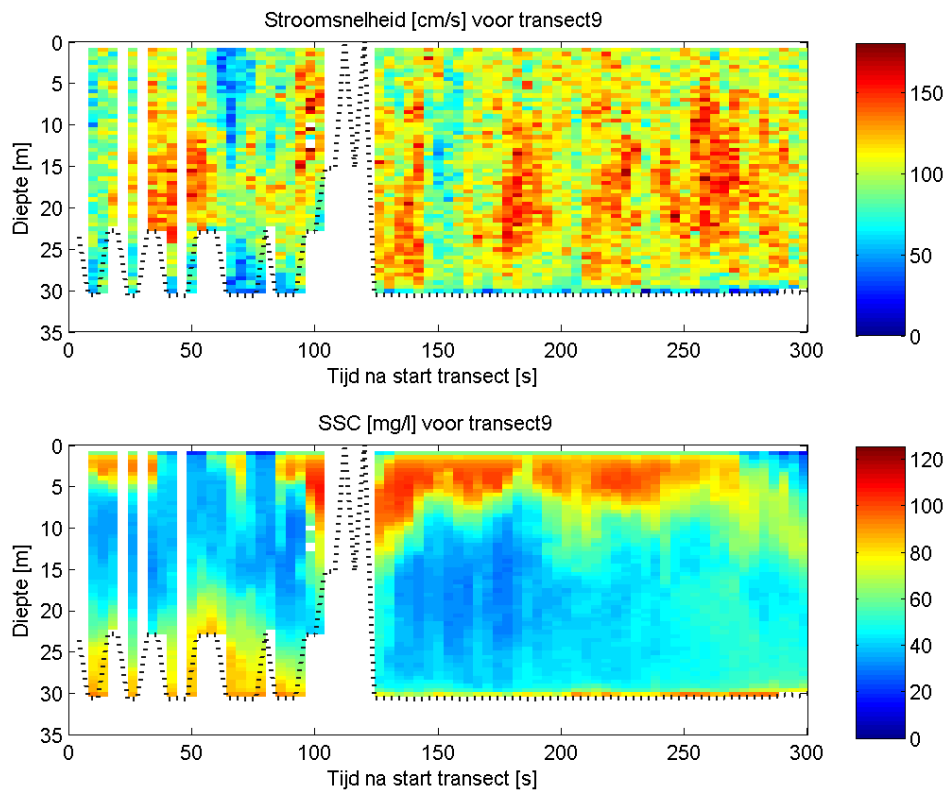
Dit blijkt ook uit de concentratiemetingen, afgeleid uit de ADCP backscatter. Deze meettechniek staat het niet toe om de concentraties in de onderste 1,5 m van de waterkolom te bepalen. De diepte-gemiddelde sedimentconcentratie neemt naar schatting toe van 30 naar 80 mg/l. Dit zijn waarschijnlijk voornamelijk zeer fijne zand- en slibdeeltjes. De metingen tijdens de relatief sterke vloedstroming (~1,1 m/s) laten wel een verhoging in de onderste 5 m van de waterkolom zien (mogelijk het gestorte sediment, i.e. voornamelijk zand), tot ca. 10 min na het begin van de storting (Figuur 3.3). Waarschijnlijk als gevolg van de hoge sedimentconcentraties viel het akoestische signaal hier regelmatig weg. De gemeten concentratieverhoging aan het oppervlak is waarschijnlijk gerelateerd aan het naspoeien van de beun.



Figuur 3.1 Verloop diepte-gemiddelde stroomsnelheid en waterstand gedurende de meetcampagne, afkomstig uit Placke et al. (2017).



Figuur 3.2 Magnitude transversale stromingscomponent tijdens vloed (raai 3) op basis van ADCP-metingen. Bron: Plancke et al. (2017b).



Figuur 3.3 Gemeten stroomsnelheden (magnitude) en sedimentconcentraties langs meetraai 9 ca. 250 m stroomafwaarts van het baggerschip. De storting vond ca. 2,5 tot 8 min plaats voor aanvang van meetraai 9. De vloodsnelheid bedroeg ca. 1,1 m/s. Figuur afkomstig uit Placke et al. (2017).

### 3.4 Dichtheid van het sediment in beun en op de bodem

Om de morfologische respons van de stortingen in detail op te volgen, is het belangrijk om de relatie tussen het beunvolume (dat wordt geregistreerd als deel van de onderhoudsbaggerwerken) en het in-situ volume (volume van het sediment op de bodem) nauwkeurig in te schatten. In het MER-rapport van de derde verruiming werd de verhouding  $V_{\text{beun}}/V_{\text{bodem}} = 1,12$  aangenomen (Consortium Arcadis-Technum, 2007). Deze verhouding werd ook aangenomen in het datarapport Diepe Delen 2017 (IMDC, 2018a). Voor de stortingen in de Put van Hansweert kan deze aanname worden geverifieerd aan de hand van metingen.

Tijdens de proefstortcampagnes werd de dichtheid van het beunsediment op twee manieren bepaald: aan de hand van de metingen van beunmassa en -volume (over het volledige beun) en aan de hand van monsternames. De sedimentmassa in het beun werd bepaald aan de hand van de inzinking van het schip, en het sedimentvolume werd bepaald aan de hand van sensoren in het beun en met handmetingen in het beun. Uit de sedimentmassa en -volume kan worden berekend dat de (natte) beundichtheid gemiddeld  $1,90 \text{ ton/m}^3$  bedroeg voor alle stortingen in de diepe put van Hansweert. De dichtheid is vrij constant over alle trips (standaardafwijking  $0,02 \text{ ton/m}^3$ ).

Daarnaast werd in 2012 de natte dichtheid bepaald van een aantal monsters genomen uit het beun; resultaten zijn weergegeven in Tabel 1 (Plancke, 2018). Elk monster werd twee keer bemeten om de compactering van het sediment na te gaan, waarbij de 2<sup>e</sup> meting van



hetzelfde monster 2 dagen later plaats vond dan de 1<sup>ste</sup> meting. Het verschil tussen beide metingen was steeds miniem.

Tabel 1 Natte dichtheid sediment in beun op basis van monsters. Bron: Plancke (2018).

Herkomst	Natte dichtheid dag 1 (ton/m <sup>3</sup> )	Natte dichtheid dag 2 (ton/m <sup>3</sup> )
Drempel van Hansweert	1,90	1,89
Overloop van Valkenisse, B58-B64	1,94	1,95
Overloop van Valkenisse, B58-B64, B48-B54	1,84	1,86

De dichtheidsmetingen op basis van monsternames en op basis van het volledige beun zijn in goede overeenstemming met elkaar, en geven een dichtheid in beun aan van ca. 1,90 ton/m<sup>3</sup>. Uitgaande van een droge dichtheid van het sedimentmateriaal van 2,65 ton/m<sup>3</sup> en een dichtheid van het Scheldewater van 1,025 ton/m<sup>3</sup> leidt dit tot een beunporositeit van:

$$p_{beun} = \frac{\rho_{beun} - \rho_s}{\rho_w - \rho_s} = 0,46 \quad (0.1)$$

De in-situ dichtheid van het gestorte sediment is niet gemeten. Er kan worden aangenomen dat het sediment in-situ een porositeit heeft die tussen 0,4 en 0,45 ligt, wat correspondeert met een in-situ dichtheid van 1,9-2,0 ton/m<sup>3</sup>. Dit leidt tot:

$$\frac{V_{beun}}{V_{bodem}} = \frac{1 - p_{bodem}}{1 - p_{beun}} = 1,02 - 1,11 \quad (0.2)$$

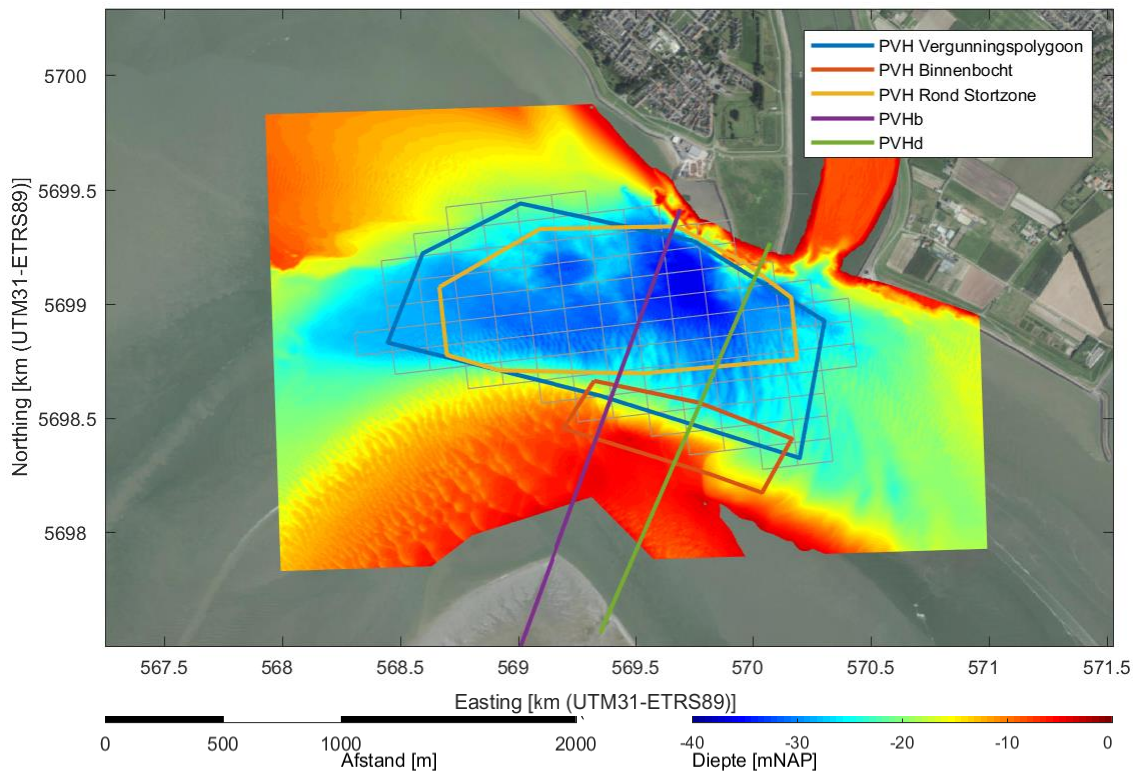
Deze verhouding is iets lager dan de waarde van 1,12 die in het MER van de derde verruiming werd aangenomen. In wat volgt wordt de standaard MER waarde van 1,12 gebruikt bij de berekening van in-situvolumes. Het feit dat de verhouding op basis van metingen mogelijk iets lager ligt, houdt in dat de werkelijke in-situ volumes mogelijk iets hoger zijn dan de berekende waarden.

### 3.5 Morfologische ontwikkeling na de proefstortingen

#### 3.5.1 Inleiding

De morfologische ontwikkeling is nagegaan op basis van bodem(verschil)kaarten, raaien en volumeberekeningen. In deze paragraaf wordt een aantal geselecteerde bodemkaarten weergegeven om bepaalde evoluties te duiden; een volledig overzicht van alle peilingen wordt gegeven in het Datarapport Diepe Delen (IMDC2018a).

De ligging van de geanalyseerde raaien en rekenpolygoon is weergegeven in Figuur 3.4. In totaal zijn voor 3 polygoon volumeberekeningen uitgevoerd: de vergunningspolygoon (blauw), een kleinere polygoon rond effectief gebruikte stortvakken (oranje), en een polygoon rond de binnenbocht (rood). Daarnaast zijn twee dwarsraaien beschouwd: een westelijke (PVHb, paars) en een oostelijke (PVHd, groen).



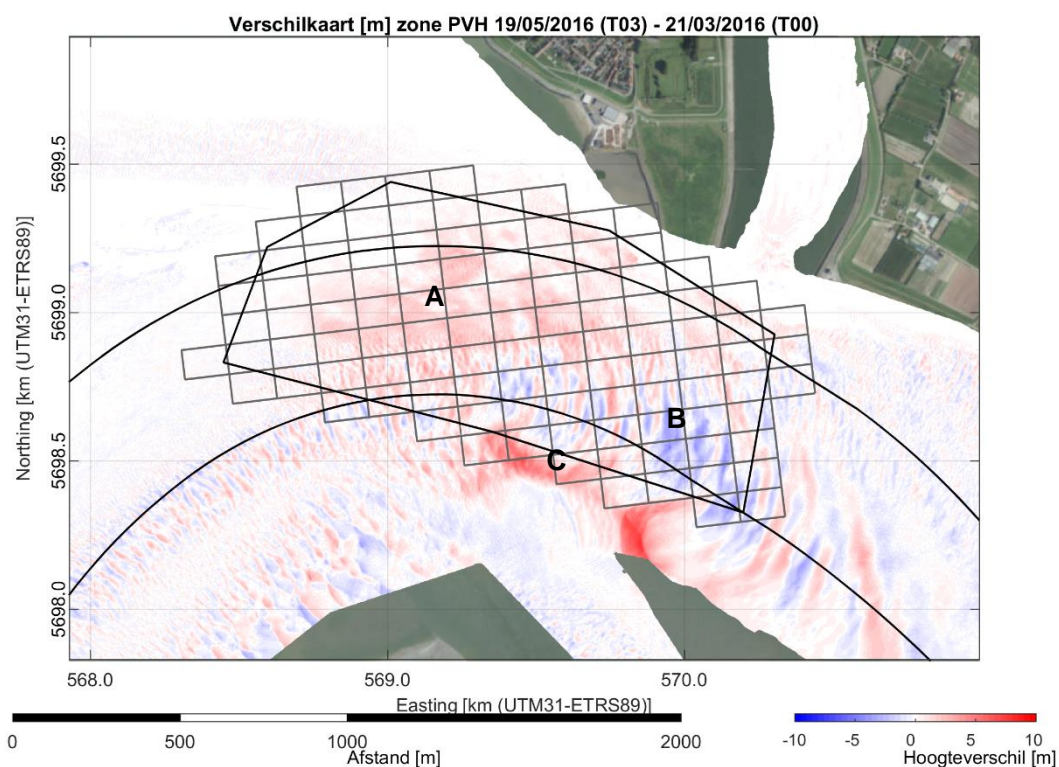
Figuur 3.4 Locatie rekenpolygonen en dwarsraaien ten opzichte van de dieptekaart voor de Put van Hansweert voor 21 maart 2016 (T0).

### 3.5.2 Peil- en verschilkaarten

De morfologische evolutie van de Put van Hansweert sinds de start van proefstortcampagne wordt nagegaan een aantal periodes: de eerste proefstortcampagne (april 2016), de periode tussen de twee stortcampagnes (mei 2016 – juni 2017), de tweede proefstortcampagne (juli-augustus 2017), en een grote zettingsvloeiing (december 2017 - januari 2018).

#### Eerste proefstortcampagne (april 2016)

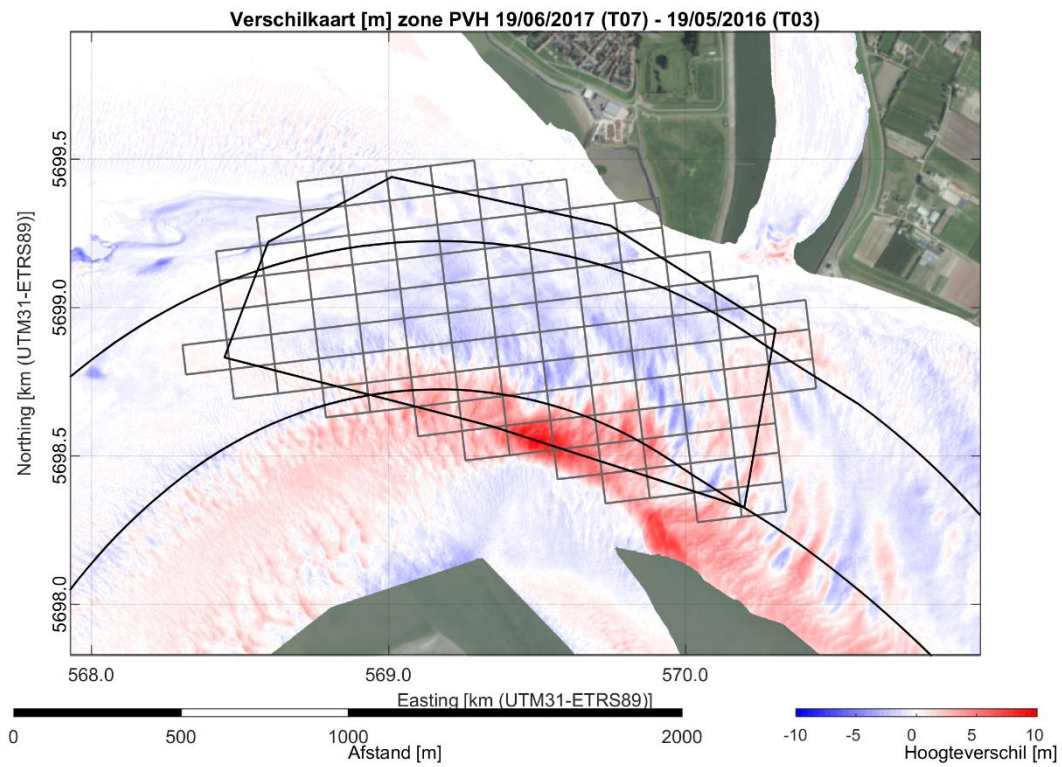
Figuur 3.5 geeft de bathymetrische verschilkaart weer tussen peiling T0, genomen op 21/03/2016 voor de eerste proefstorting, en peiling T03, genomen op 19/05/2016, ca. 1 maand na het beëindigen van de eerste stortcampagne. In de zone waar de stortingen waren uitgevoerd is er een stijging van het bodempeil zichtbaar (A). In het zuidoosten van de diepe put is lokaal verdieping zichtbaar (B). In het zuiden van de diepe put, ter hoogte van het plateau van de platen van Ossensisse, is ook sterke sedimentatie zichtbaar, net buiten de vergunningspolygoon (C).



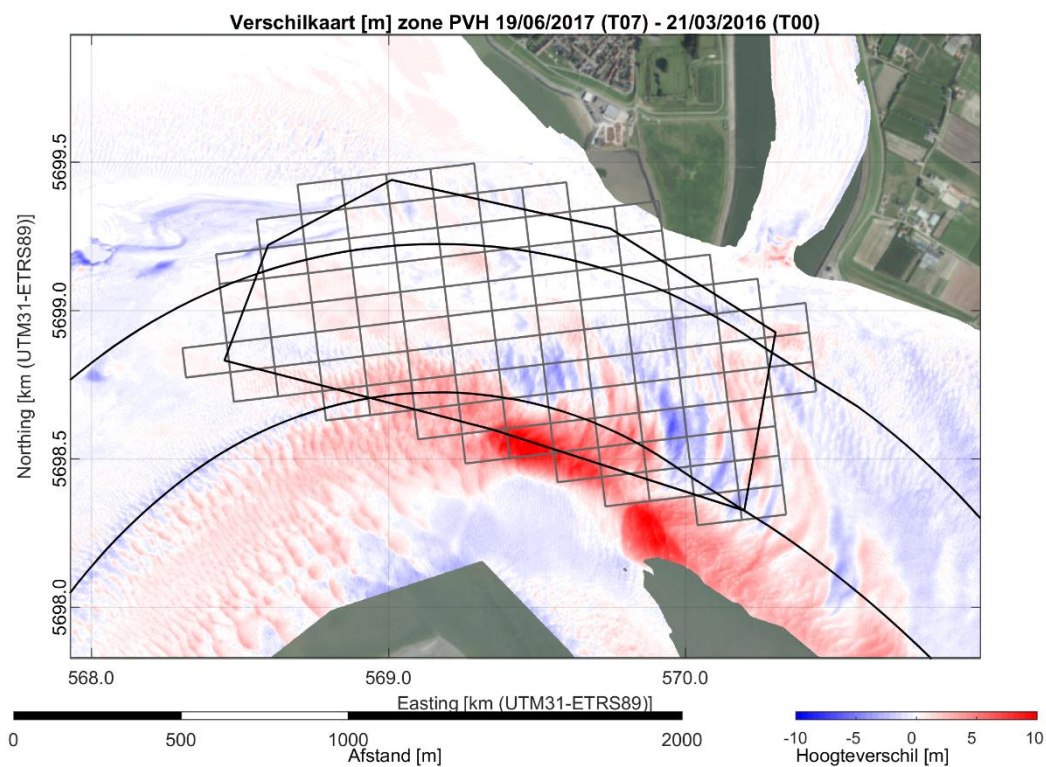
*Figuur 3.5 Bathymetrische verschilkaart T03-T00.*

### **Periode tussen de stortcampagnes (mei 2016 – juni 2017)**

Figuur 3.6 geeft de bathymetrische verschilkaart weer over de periode tussen de twee stortcampagnes, van T03 (uitgevoerd op 19/05/2016) tot T07 (uitgevoerd op 19/06/2017). Hier is verdieping zichtbaar in de centrale zone van de put (waar de stortingen zijn uitgevoerd), en verondieping aan de zuidzijde van de stortingen. Op de verschilkaart tussen T07 (19/06/2017, ca. 14 maanden na het einde van de eerste stortcampagne) en T00 ligt het bodempeil in de eigenlijke stortzone min of meer terug op het peil van voor de stortcampagne (Figuur 3.7).

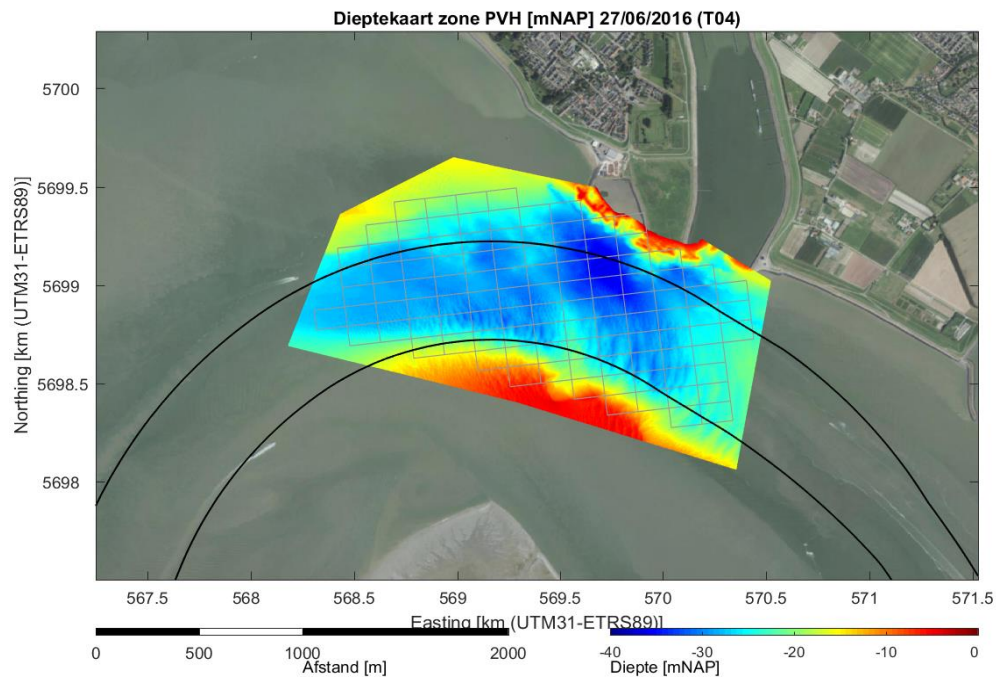


Figuur 3.6 Bathymetrische verschilkaart T07-T03.

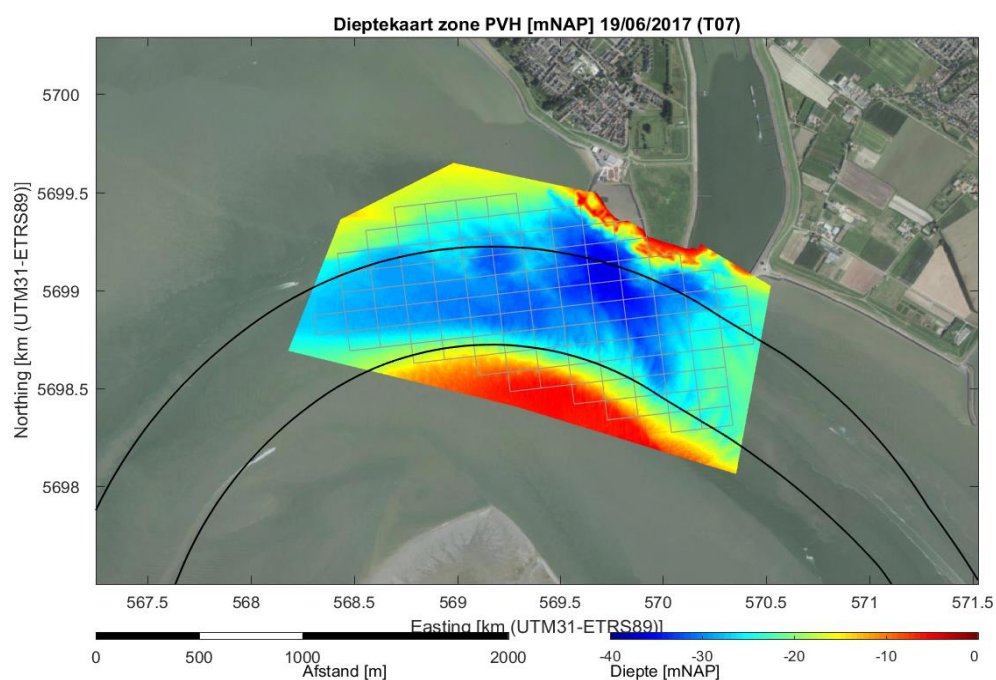


Figuur 3.7 Bathymetrische verschilkaart T07-T00.

In peiling T04, uitgevoerd tussen de twee stortcampagnes, is zichtbaar dat een deel van de geulwand van het plateau van de Plaat van Ossenis-Oost in de put is geschoven. Een grote hoeveelheid sediment van de rand van het plateau is afgevoerd en in de vaargeul terechtgekomen (Figuur 3.8). Op peiling T07 (Figuur 3.9) heeft de rand van het plateau zich hersteld en is het afgezette sediment uit de vaargeul uitgeruimd; het effect van de plaatval is dus beperkt in de vergelijking T07-T03 (Figuur 3.6).



*Figuur 3.8 Bathymetrische kaart van de Put van Hansweert voor peiling T04.*

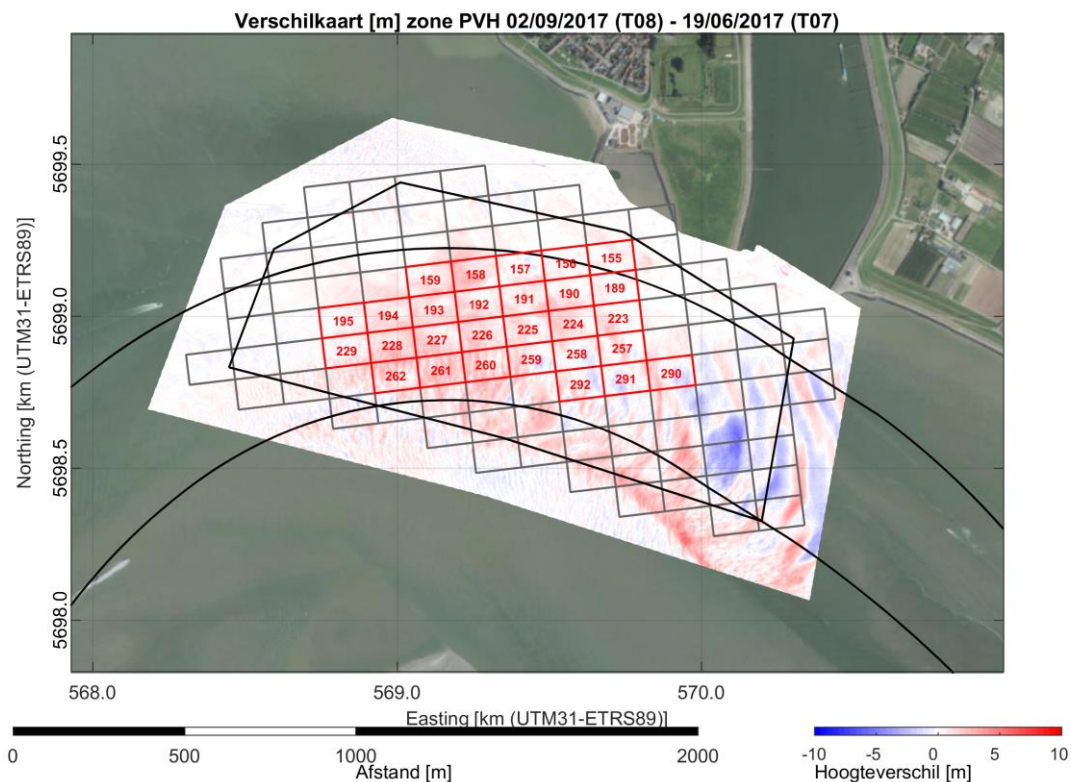


*Figuur 3.9 Bathymetrische kaart van de Put van Hansweert voor peiling T07.*

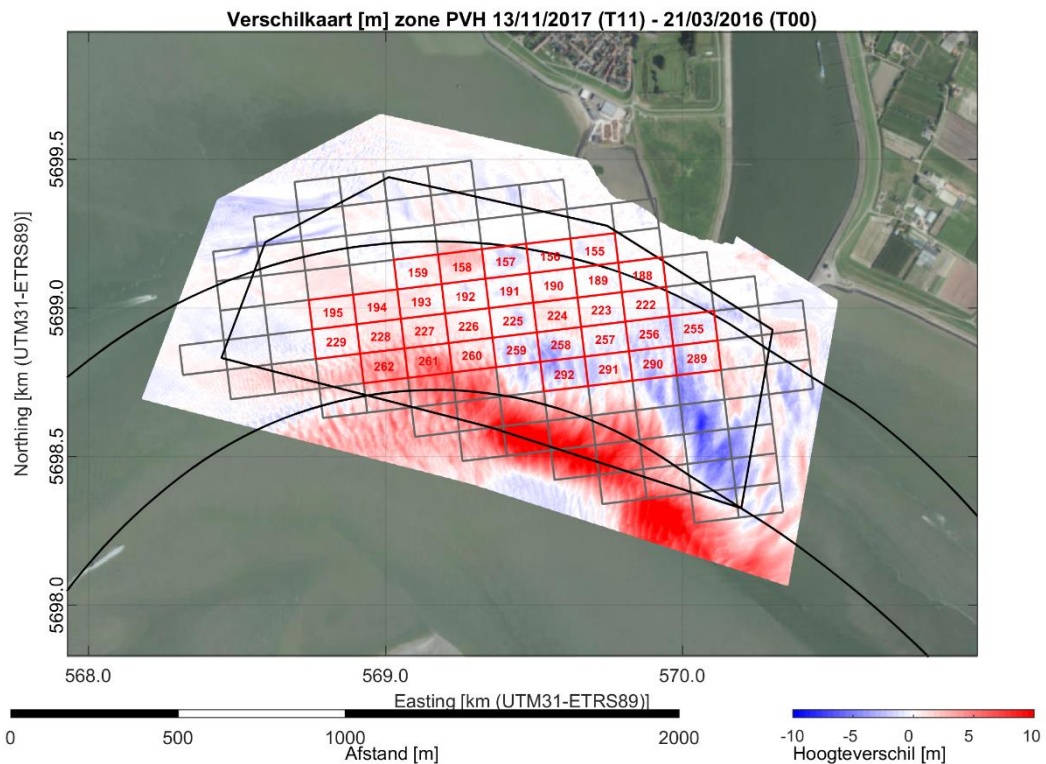
## Tweede proefstortcampagne (juli-augustus 2017)

Figuur 3.10 geeft de bathymetrische verschilkaart weer tussen T07 en T08, voor en na de tweede proefstortcampagne. Hier is zichtbaar dat de tweede campagne opnieuw heeft gezorgd voor een lichte stijging van het bodempeil in de stortzone. Er is ook opnieuw sedimentatie zichtbaar in de binnenbocht.

Figuur 3.11 tenslotte geeft de verschilkaart weer tussen de meest recente peiling (T11) en de T00-peiling, voor het begin van de proefstortingen. Hier is zichtbaar dat de sedimentatie in de binnenbocht zich heeft voortgezet na de tweede stortcampagne.



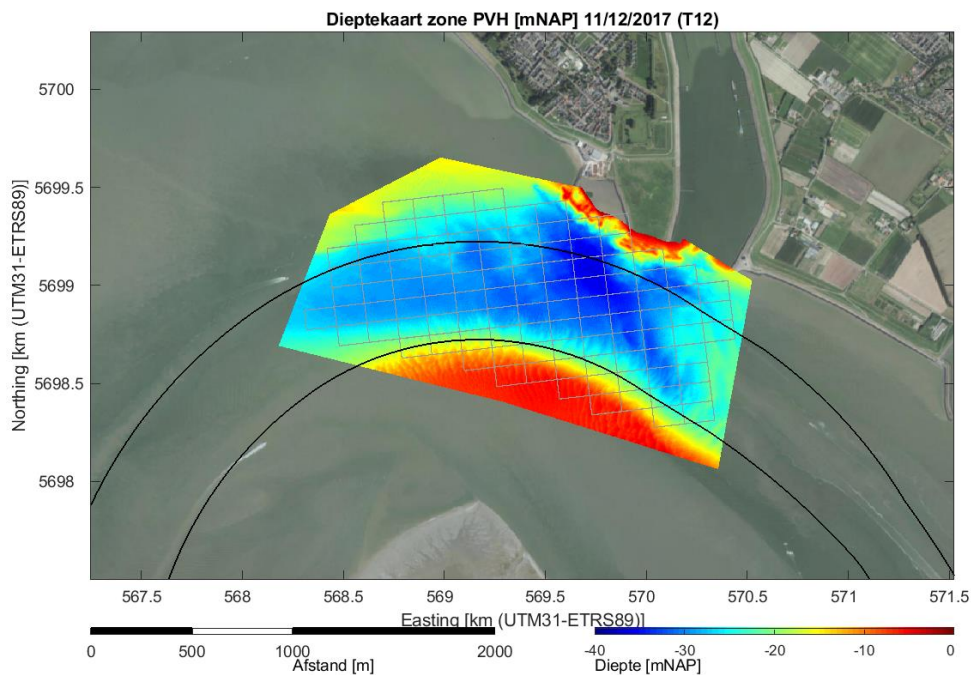
Figuur 3.10 Bathymetrische verschilkaart T08 – T07 (inclusief vaknummers).



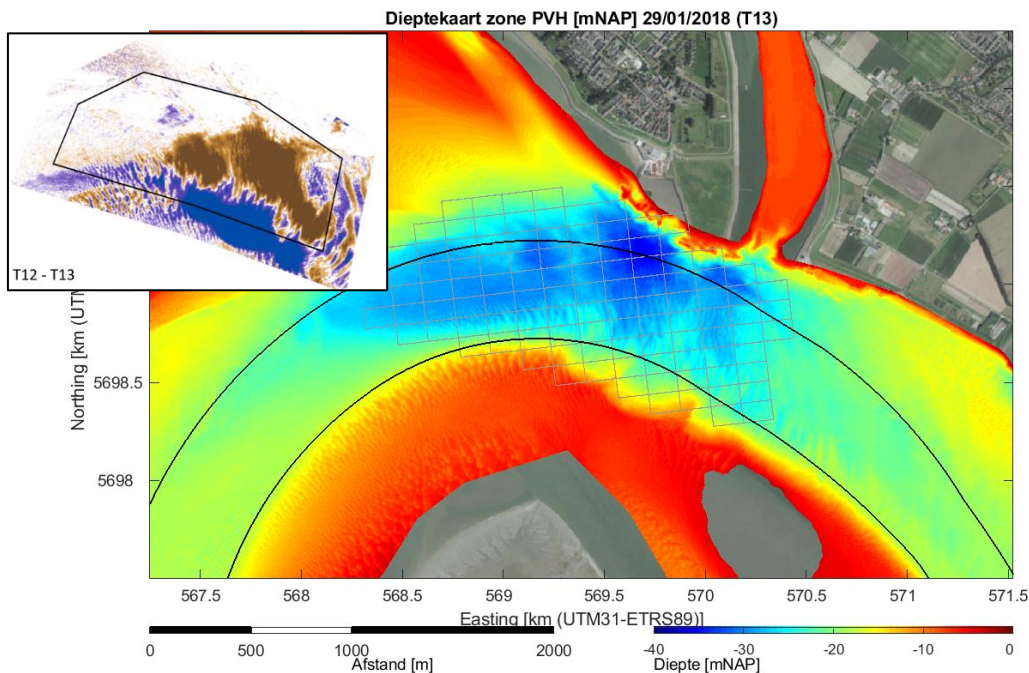
Figuur 3.11 Bathymetrische verschilkaart T11 – T00 (inclusief vaknummers).

### Zettingsvloeiing binnenbocht (december 2017 – januari 2018)

In de periode tussen peiling T12 (11/12/2017, Figuur 3.12) en T13 (29/01/2018, Figuur 3.13) is het sediment dat zich had opgebouwd in de binnenbocht, afgeleden naar de bodem van de put van Hansweert, waarbij ca. 1,1 Mm<sup>3</sup> zich heeft verplaatst (IMDC, 2018b). De sedimentatie langsheen de binnenbocht die optrad sinds (of zelfs voor) de eerste proefstorting is hiermee voor een aanzienlijk deel tenietgedaan.



Figuur 3.12 Bathymetrische kaart van de Put van Hansweert voor peiling T12.



Figuur 3.13 Bathymetrische kaart van de Put van Hansweert voor peiling T13. Inset: verschilkaart T12-T13.

### 3.5.3 Dwarsraaien

Figuur 3.14 geeft de morfologische ontwikkeling van dwarsraai PVHb weer (ligging: zie Figuur 3.4). Dit is dezelfde raai als in Figuur 2.7c, maar in Figuur 3.14 worden enkel peilingen sinds de proefstoringen weergegeven. De hierboven vermelde sedimentatie in de binnenbocht zorgt hoofdzakelijk voor een noordwaarts migreren van de rand van het plateau. Na de

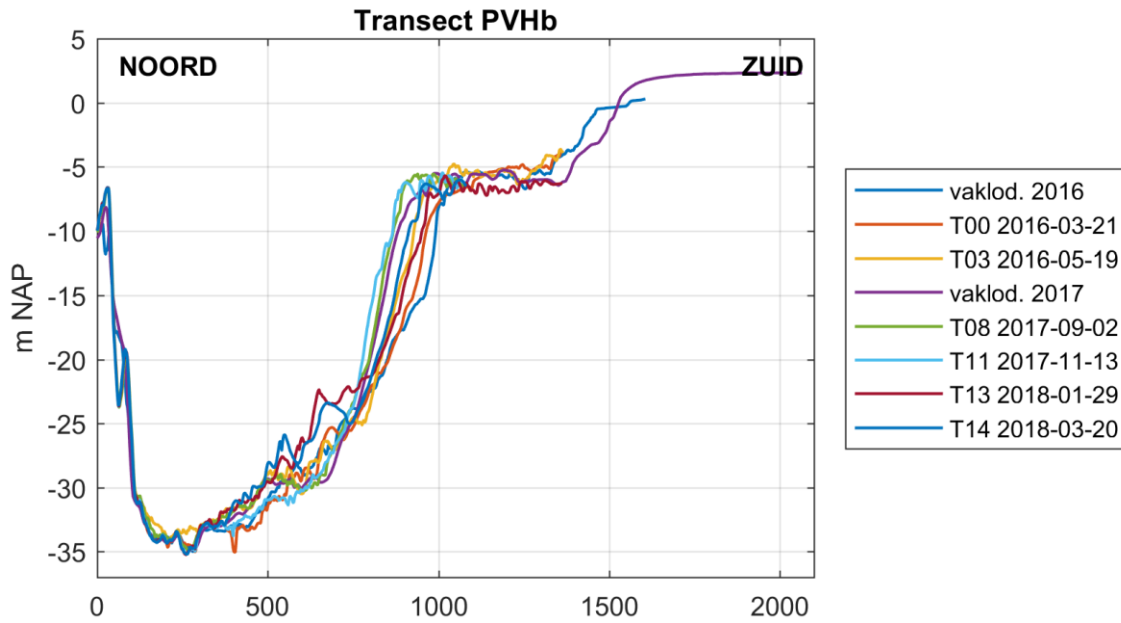


zettingsvloeiing van eind 2017 is er opnieuw een zuidwaartse verplaatsing van de plateaurand. Het peil van het plateau blijft constant op ca. -5 m NAP, maar het plateau wordt wel breder.

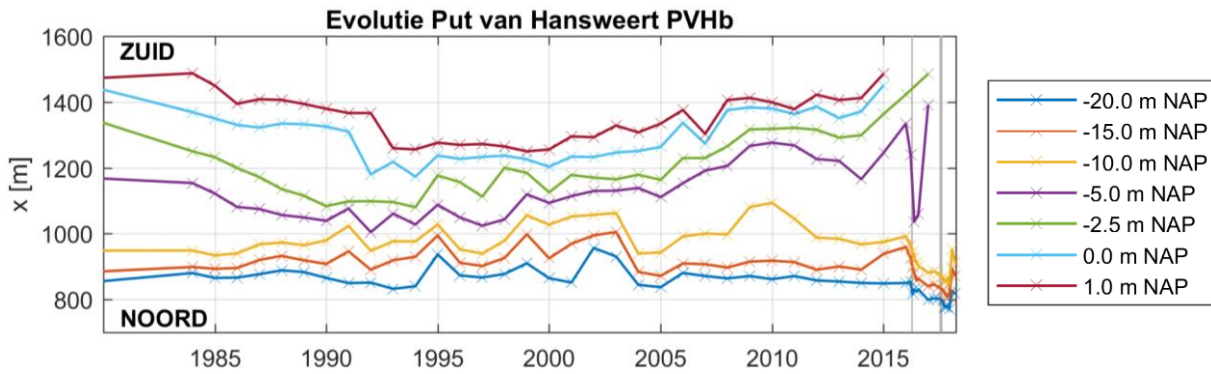
Figuur 3.15 toont de evolutie in de tijd van de locatie waar dwarsraai PVHb een bepaald peil doorsnijdt, op basis van een combinatie van de vaklodingen en de metingen rondom de proefstortingen. Het exacte tijdstip waarop de vaklodingen zijn uitgevoerd is niet bekend (vaklodingen zijn een combinatie van meerdere peilingen); deze werden daarom telkens op 1 januari gedateerd. Deze figuur laat het volgende zien:

- De 0 m NAP en 1 m NAP-contouren evolueerden noordwaarts tussen 1975 en ca. 2000 (vooruitschrijden van de platen van Ossensisse-Oost), en terug zuidwaarts tussen 2000 en 2015 (achteruitschrijden van de plaatrand van de platen van Ossensisse-Oost). Deze evolutie komt overeen met Figuur 2.7b (toename van het plaatareaal tussen 1975 en ca. 1995, afname van het plaatareaal sinds ca. 2000). Voor 2016 en 2017 werden deze contouren niet volledig bemeaten.
- De -2.5 m NAP-contour migreert sinds ca. 1990 zuidwaarts; sinds ca. 2014 is deze evolutie wel versneld.
- De -5 m NAP-contour verschoof noordwaarts tussen 1975 en ca. 1992, en verschoof later opnieuw noordwaarts. In de meest recente peilingen (na 2015) kent de ligging van het -5 m NAP-punt sterke wijzigingen; dit komt door het plateau op -5 m NAP (Figuur 3.14), waarbij het -5 m NAP-punt afwisselend net boven of onder het plateau ligt.
- De -10 m NAP, -15 m NAP en -20 m NAP-contouren waren relatief stabiel tussen 2010 en 2016, en zijn sinds de start van de proefstortingen in noordwaartse richting opgeschoven. Na de zettingsvloeiing van eind 2017 is opnieuw een zuidwaartse migratie zichtbaar.

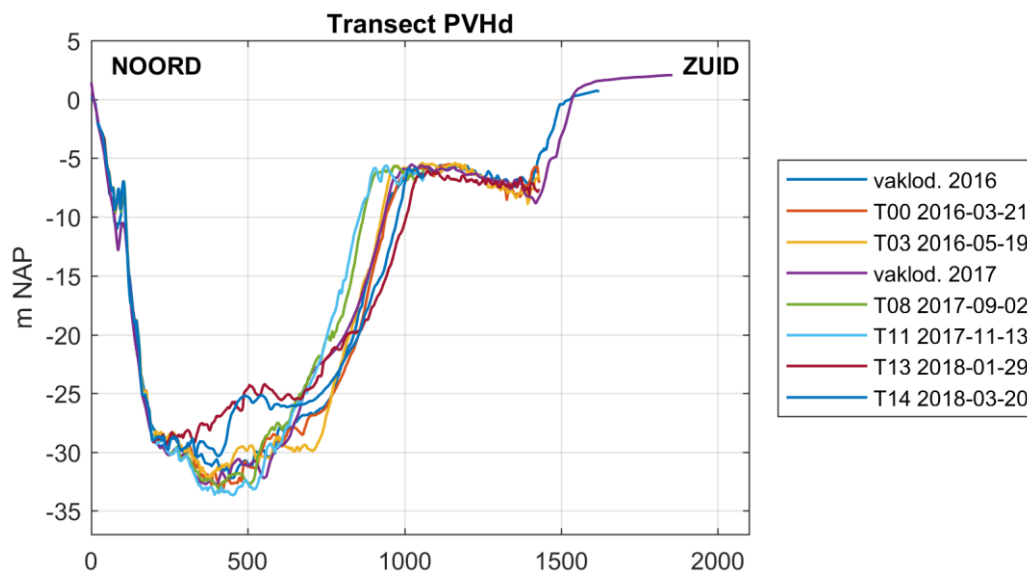
Figuur 3.16 en Figuur 3.17 geven resultaten weer voor het tweede, oostelijke dwarsraai PVHd. Het gedrag is gelijkaardig aan de westelijke raai PVHb, op een aantal kleine verschillen na. Zo vertoont het plateau op -5 m NAP een lichte zuidwaartse dip. Ook kenden de -20 m NAP, -15 m NAP en -10 m NAP-contouren reeds een lichte noordwaartse migratie tussen ca. 2010 en 2015, maar de noordwaartse migratie is duidelijk versneld tussen 2015 en 2017.



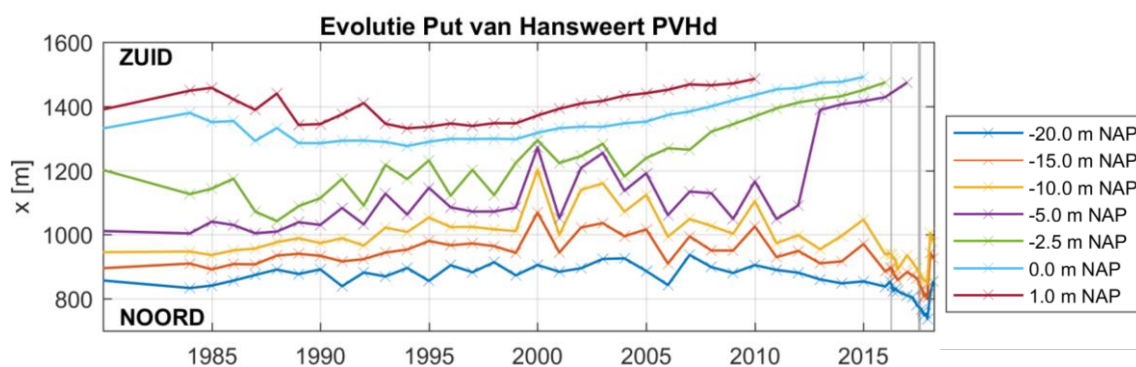
Figuur 3.14 Raai PVHb; dwars op de diepe put van Hansweert.



Figuur 3.15 Evolutie zuidrand put van Hansweert, ter hoogte van dwarsraai PVHb. De grijze verticale lijnen geven de periodes van de twee proefstortcampagnes weer.



Figuur 3.16 Raai PVHd; dwars op de diepe put van Hansweert.



Figuur 3.17 Evolutie zuidrand put van Hansweert, ter hoogte van dwarsraai PVHd. De grijze verticale lijnen geven de periodes van de twee proefstortcampagnes weer.

### 3.5.4 Volumeberekeningen

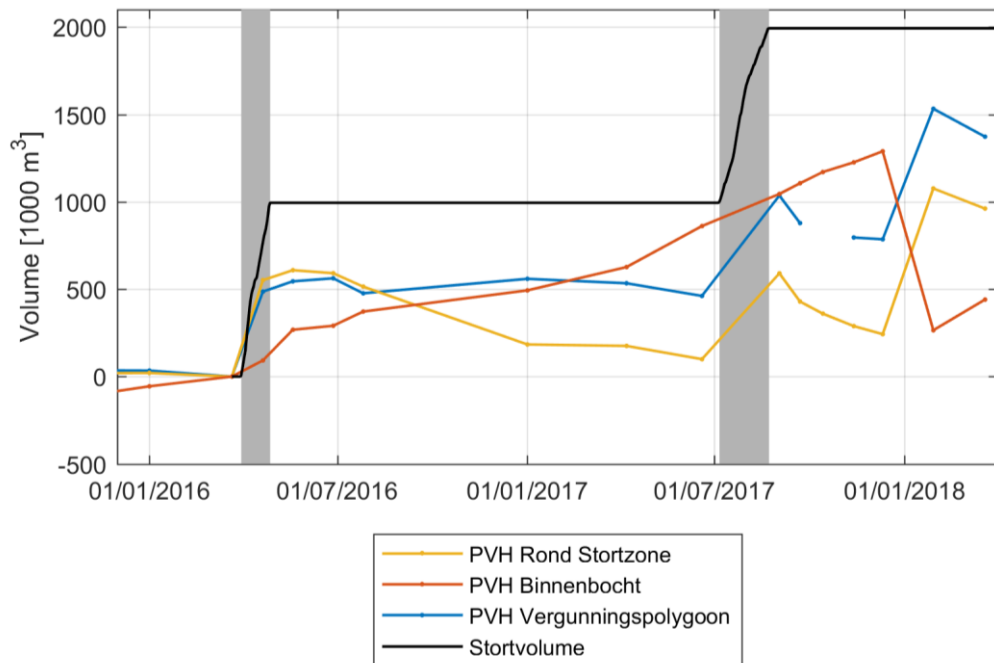
Eerst wordt de grootschalige morfologische respons op de stortingen nagegaan aan de hand van volumeberekeningen, weergegeven in Figuur 3.18. In de polygonen die de stortzones omvatten (gele en blauwe curve), neemt het sedimentvolume toe met slechts ongeveer de helft van het gestorte volume (zwarte curve). De fractie aan sediment dat aanwezig is binnen de polygoon vlak na de stortingen kan worden becijferd met het Dremo-model (Lanckriet et al., 2017); de resultaten van het Dremo-model zijn weergegeven in Figuur 3.20 (vergunningpolygoon), Figuur 3.21 (kleinere polygoon), en in Tabel 2. Opgemerkt wordt dat de evolutie van de stortzone niet loopt volgens de aannames van het Dremo-model, aangezien er geen exponentiële (en zelfs geen lineaire) afname is van het volume na de storting. Als gevolg kan de modelfit onrealistische waarden geven voor  $k_1$  en  $k_2$ , welke

daarom niet worden beschouwd. De waarden van  $k_3$  worden echter wel betrouwbaar geacht omdat deze los staan van de evolutie van het gestorte volume na de stortingen.

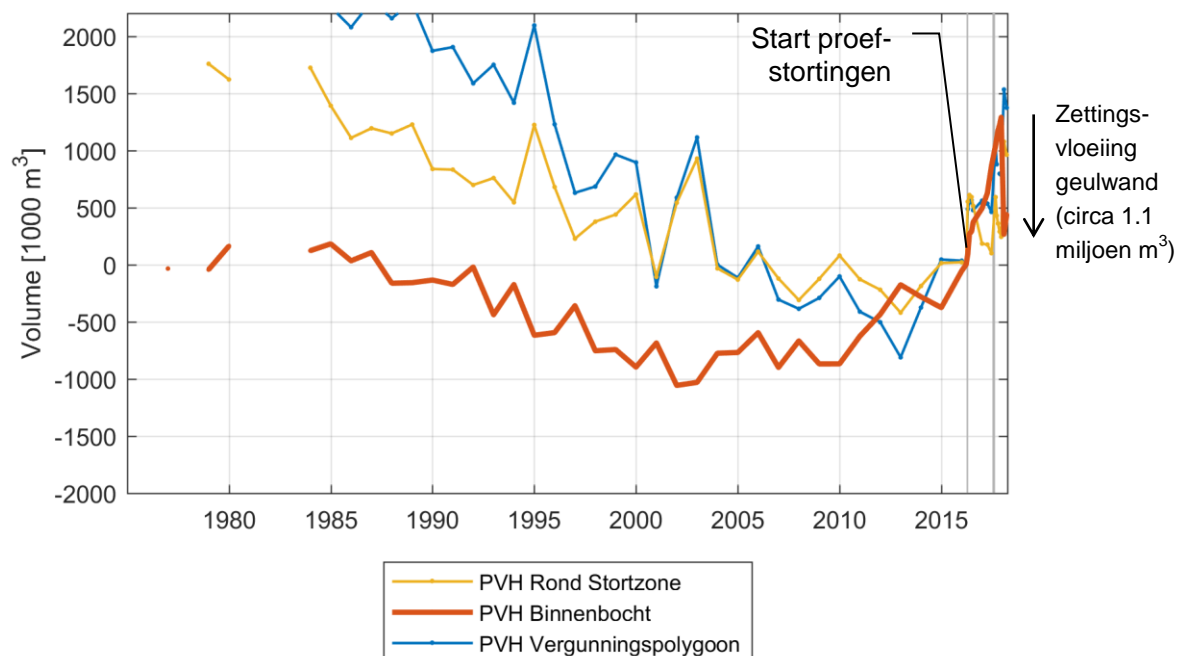
Het Dremo-model geeft aan dat ca. 46% van het gestorte sediment initieel niet wordt waargenomen in de vergunningspolygoon ( $k_3 = 0.46$ , zie Tabel 2). In de kleinere polygoon rond de gebruikte stortvakken wordt 34% van het gestorte sediment niet waargenomen in de polygoon ( $k_3 = 0.34$ ). In de periode tussen de twee stortcampagnes (mei 2016 – juni 2017) neemt het sedimentvolume af in de kleinere (gele) polygoon, en blijft het relatief constant in de vergunningspolygoon. Dit wijst erop dat er tijdens deze periode erosie plaatsvond in de zone waar effectief werd gestort, en dat er herverdeling van sediment plaatsvond binnen de vergunningspolygoon. Het feit dat slechts 54% tot 66% van het gestorte sedimentvolume initieel wordt waargenomen in de peilingen is opvallend; hierop wordt verder ingegaan Paragraaf 3.6.

Het sedimentvolume in de rekenpolygoon in de binnenbocht vertoont een toename na de start van de proefstortcampagnes (rode lijn in Figuur 3.18). Op lange termijn was er in de binnenbochtpolygoon een afname van het sedimentvolume tussen ca. 1985 en 2000, en bleef het volume stabiel tussen 2000 en 2010 (Figuur 3.19). Vanaf 2010 nam het sedimentvolume in de binnenbocht toe, maar deze toename versnelde sinds het begin van de proefstortingen in de put van Hansweert. In Paragraaf 3.6 wordt nader ingegaan op de sedimentatie in de binnenbocht.

In de eerste peiling na de zettingsvloeiing (T13, 29/01/2018) is sprake van een sterke afname van het sedimentvolume in de binnenbocht (zie rode lijn in Figuur 3.19), terwijl het sediment volume in de geul sterk toeneemt (gele en blauwe lijn in Figuur 3.19). Dit wordt veroorzaakt door een grote hoeveelheid sediment welke van de binnenbocht naar de geul is verplaatst. In de meest recente peiling T14 (20/03/2018, ca. 2-3 maanden na de zettingsvloeiing) is er opnieuw een afname van het sedimentvolume in de geul waar te nemen alsmede een toename in de binnenbocht: het sediment dat door de zettingsvloeiing in de geul terechtkwam wordt uitgeruimd door de stroming, en de sedimentatie in de binnenbocht hervat.



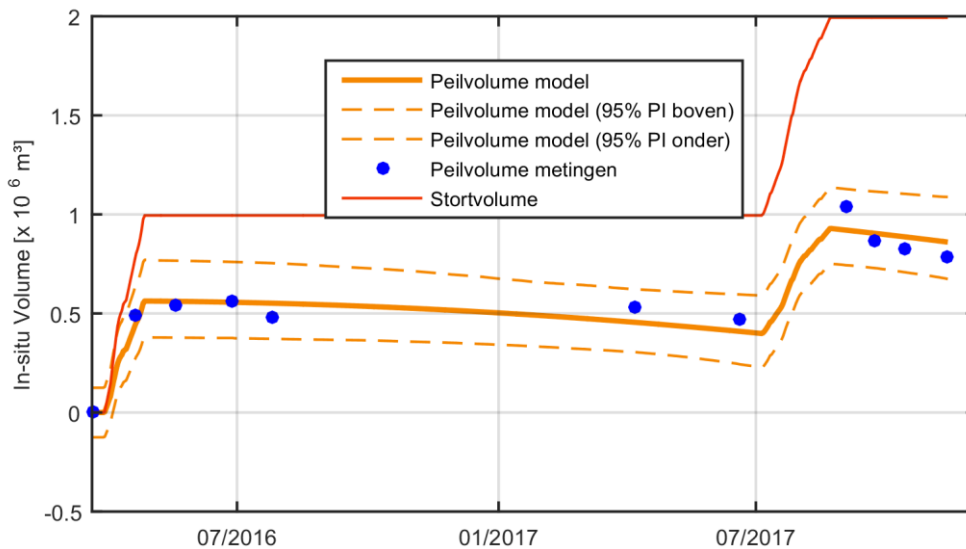
Figuur 3.18 Volumetrische evolutie rekenpolygonen put van Hansweert, 2016-2018.



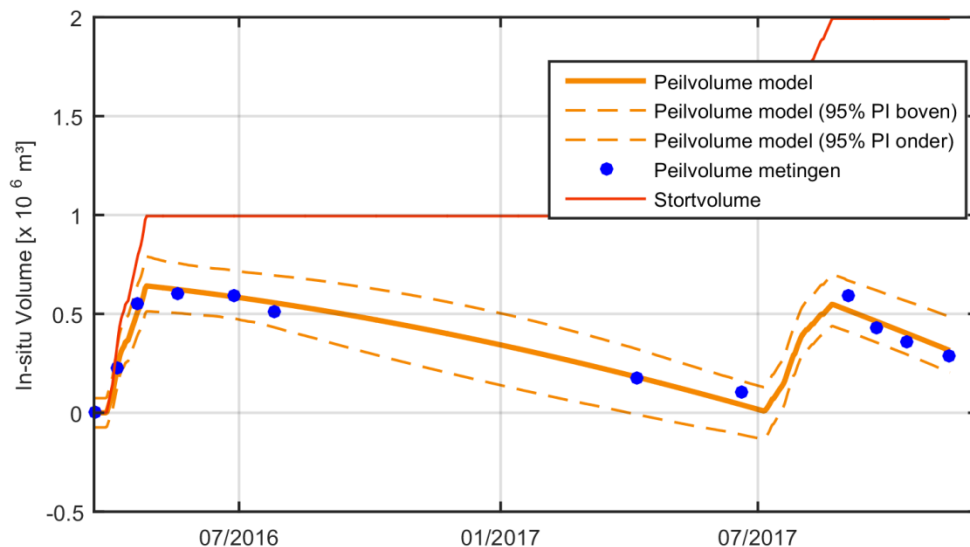
Figuur 3.19 Volumetrische evolutie rekenpolygonen put van Hansweert, 1975-2018.

Tabel 2 Resultaten berekening responsmodel stortzones SH51, Put van Hanseert.  $k_1$  = parameter die weergeeft hoe snel het evenwichtsvolume wordt bereikt,  $k_2$  = autonome trend volumeontwikkeling,  $k_3$  = initieel verlies gestort sediment,  $T_{1/2}$  = periode waarna de helft van het gestorte sediment verdwenen is. De parameters  $k_1$  en  $k_2$  worden in grijs weergegeven omdat deze moeilijk te bepalen zijn voor deze situatie.

Parameter	Verwachtings- waarde	Ondergrens 95 %- betrouwbaarheids- interval	Bovengrens 95 %- betrouwbaarheids- interval
<b>Vergunningspolygoon (blauwe polygoon in Figuur 3.4)</b>			
$k_1$ (1/dag)	2.08e-07	7.10e-08	3.05e-07
$k_2$ (m <sup>3</sup> /dag)	-7133000	-11150000	-5286000
$k_3$ (-)	0.46	0.35	0.49
$T_{1/2}$ (dagen)	3327000	2269000	9768500
<b>Kleinere polygoon rond de gebruikte stortvakken (gele polygoon in Figuur 3.4)</b>			
$k_1$ (1/dag)	9.97e-04	2.07e-06	3.32e-03
$k_2$ (m <sup>3</sup> /dag)	-4300	-2720000	-912
$k_3$ (-)	0.34	0.24	0.40
$T_{1/2}$ (dagen)	695	209	335000



Figuur 3.20 Responsmodel voor vergunningspolygoon (blauwe polygoon in Figuur 3.4). Opgemerkt wordt dat de bodemopnames met de zettingsvloeiing van de geulwand niet zijn meegenomen.



Figuur 3.21 Responsmodel voor kleinere polygoon rond de gebruikte stortvakken (gele polygoon in Figuur 3.4). Opgemerkt wordt dat de bodemopnames met de zettingsvloeiing van de geulwand niet zijn meegenomen.

## 3.6 Synthese

### 3.6.1 Morfologische ontwikkeling

Uit de analyse van de morfologische respons op de proefstortingen in de put van Hansweert bleek dat circa 34 tot 46% (afhankelijk van de gekozen rekenpolygoon) van het gestorte sedimentvolume niet wordt waargenomen in de zone waar de stortingen effectief heeft plaats gevonden. Eenzelfde conclusie werd reeds getrokken voor andere diepe stortzones (Lanckriet et al., 2017; IMDC, 2018a), met 'verliesfactoren' van tussen 27% en 52%.

In de periode na de eerste proefstorting erodeerde het sediment geleidelijk weg uit de stortzone in de Put van Hansweert. Als gevolg is het sedimentvolume in de stortzone na circa een jaar terug op het niveau van voor de stortingen.

In dezelfde periode na de eerste proefstorting treedt er sedimentatie op in de binnenbocht aan de zuidrand van de put (noordrand van de platen van Ossensisse-oost), ca. 750 m ten zuid-zuidoosten van de stortlocatie. De stortingen hebben gezorgd voor een wijziging in het gedrag van de zone langsheen de binnenbocht. De delen onder -10 m NAP waren voor de proefstortingen relatief stabiel of migreerden licht noodwaarts, en migreren na de stortingen versneld noordwaarts. De plaatrand van de platen van Ossensisse-Oost (delen boven het plateau op -5 m NAP) migreert zuidwaarts; het plaatareaal boven de laagwaterlijn neemt dus af in deze zone.

De sterke, turbulente stroming in de Put van Hansweert is mogelijk in staat om een aanzienlijk netto sedimenttransport in zuidoostelijke richting te veroorzaken door de vloedstroming, gecombineerd met een naar binnen gerichte bochtstroming bij de bodem. Dat dit voor de proefstortingen niet leidde tot grote bodemveranderingen heeft waarschijnlijk te maken met de aanwezigheid van een moeilijk-erodeerbare laag.

Als gevolg van de tweede proefstorting was er in Augustus 2017 een toename van het sedimentvolume in de stortzone. In September 2017 was circa 60% van het werkelijk gestorte volume terug te vinden in de beschouwde polygoon. In de eerste maanden volgend op de tweede proefstortcampagne (september – november 2017) vond vervolgens een afname plaats van het sedimentvolume in de stortzone, en verdere sedimentatie op de binnenbocht (gelijkaardig gedrag als na de eerste proefstorting). In december 2017 of januari 2018 trad daarna een zettingsvloeiing op waarbij ca.  $1,1 \text{ Mm}^3$  sediment (een groter volume dan de twee proefstortingen, die elk  $1,0 \text{ Mm}^3$  bedroegen) van de binnenbocht in de vaargeul terecht kwam. Na de zettingsvloeiing is erosie te zien van dit door de zettingsvloeiing in de diepe put afgezette sediment. Tevens is de geulwand zich aan het herstellen door sedimentatie.

Op basis van deze recente ontwikkelingen kan gesteld worden dat de Put van Hansweert en direct aanliggende geulwand van de binnenbocht niet als onafhankelijke morfologische entiteiten gezien kunnen worden. Een sediment toe- of afname in de diepe put leidt op relatief korte tijdschalen (i.e. weken tot maanden) tot een verandering van het volume in de binnenbocht. Verwacht wordt dat er met enige regelmaat (kleinere en/of grotere) plaatvallen optreden in de binnenbocht van de Put van Hansweert als gevolg van een continue netto aanvoer van sediment naar de binnenbocht. In feite buffert de binnenbocht een deel van het volume zand dat in de diepe put wordt gestort. De processen die leiden tot de zettingsvloeiing zijn echter niet in detail bekend, waardoor het minder duidelijk is hoe representatief het waargenomen gedrag is voor de toekomstige morfologische ontwikkeling van het beschouwde gebied.

### 3.6.2 Oorzaken sterke initiële morfologische ontwikkeling

Het systematische karakter van het niet terugvinden van sediment in het stortvak sluit uit dat de nauwkeurigheid van de metingen van grote invloed is op (het bepalen van) dit initiële verlies. Ook de omzetting van beun- naar in-situ volume speelt geen grote rol van betekenis bij de put van Hansweert, zoals beschreven in Paragraaf 3.4. Het verhoogde, initiële sedimentverlies wordt (waarschijnlijk) veroorzaakt door versnelde erosie na het storten en/of doordat sediment wordt meegevoerd tijdens het storten.

#### **Versnelde erosie kort na het storten**

De versnelde erosie zou kunnen komen door de verhoging van de stroomsnelheid door een verkleining van de waterdiepte, wat initieel het sterkste is. Mogelijk is ook het sediment kort na het storten minder geconsolideerd en meer oneffen verspreid op de bodem, en daardoor meer vatbaar voor erosie. Verder kunnen de fijne fracties snel na het storten worden getransporteerd, waarna de transporten zullen afnemen.

#### **Sediment wordt meegevoerd tijdens het storten**

Een gedeelte van het gestorte sediment kan al worden getransporteerd door de getijstrooming waardoor dit niet de bodem bereikt. Dit effect is sterker voor slib en fijn zand. Deze sedimentfracties hebben een relatief lage valsnelheid en dus meer tijd nodig om de bodem te bereiken, waardoor ze langer worden blootgesteld aan de getijstrooming.

De hoeveelheid slib in het gestorte sediment is over het algemeen beperkt en een typische  $D_{50}$  van het gestort sediment bij PvH is 0,19 mm (zie Paragraaf 3.2). Volgens de formule van Van Rijn (1993) correspondeert dit met een valsnelheid van 0,022 m/s. Dit betekent dat een zanddeeltje er bijna 20 minuten over doet om de bodem te bereiken bij een waterdiepte van 25 m;  $T_a = h/w_s$ . Bij een werkelijke storting zal dit voor de bulk van het sediment waarschijnlijk



sneller gaan vanwege de impuls die het sediment meekrijgt bij het klappen en de neerwaartse dichtheidsstroming die zal ontstaan. Na deze periode zullen de concentraties weer hun waarden hebben van voor de storting. Dit duurde bij PvH ongeveer 10 min (zie Paragraaf 3.3), i.e. korter dan de bovenstaande schatting wat mogelijk te maken heeft met de verhoogde valsnelheid tijdens het klappen.

Een deel van de dichtheidsstroom zal zich losmaken via zogenaamde stripping (Figuur 3.22). Dit gedeelte van het sediment heeft niet voldoende dichtheid meer om zich in bulk verticaal te bewegen met een snelheid groter dan de valsnelheid van individuele deeltjes. Initieel bevindt het gestrippte sediment zich in de staart van de wolk. Bij grote waterdiepte heeft de wolk tijd nodig om naar de bodem te zakken en vormt zich een paar van wervels, die door de bijkomende rotatie aanleiding kunnen geven tot meer stripping. De fractie aan sediment die via stripping aan de hoofdwolk wordt onttrokken is afhankelijk van o.a. de valsnelheid, de afmetingen van het gestorte sedimentvolume, de stroming, en het turbulentieniveau.



Figuur 3.22 Valgedrag van een sedimentpluim, met de moederwolk en de staart (Gensheimer, 2010)

Dit (fijnere) sediment in suspensie kan tijdens het storten door advectie een afstand van ongeveer  $L_a = T_a * u = h/w_s * u$  afleggen waarbij  $u$  een karakteristieke stroomsnelheid is. Bij valtijden van 10-20 minuten en  $u = 1$  m/s geeft dit  $L_a = 600-1200$  m. In de praktijk kan het sediment door turbulentie worden opgewoeld, waardoor de afstand groter wordt. Deze simpele uitdrukking voor de verplaatsingsafstand laat zien dat deze toeneemt met waterdiepte en stroomsnelheid en afneemt met valsnelheid / korrelgrootte. Zand dat onttrokken wordt aan de sedimentpluim zal makkelijk uit het stortgebied getransporteerd worden. Gezien de samenstelling van het sediment (weinig silt en slib) wordt echter verwacht dat slechts een klein deel van het gestorte sediment onttrokken wordt door stripping.

### 3.6.3 Aanbevelingen

De snelle initiële respons van het gestorte sediment in de Put van Hansweert komt waarschijnlijk omdat sediment ofwel tijdens het storten in suspensie gaat en niet de bodem in het stortvak bereikt (tijdsschaal van minuten tot uren), en/of dat er kort na het storten versnelde erosie van het sediment op de bodem optreedt (tijdsschaal van dagen tot weken). Op basis van de beschikbare kennis en meetgegevens kan niet worden vastgesteld welke

van deze twee processen in welke mate bijdraagt. Om hier een beter beeld van de krijgen stellen we de volgende aanbevelingen voor:

1. Met de ADCP techniek van Plancke et al. (2017b) lukte het niet goed om hoge sedimentconcentraties te meten, in het bijzonder bij de bodem. Dit kwam doordat het vanaf boven uitgezonden akoestische signaal verstoord werd door o.a. sediment en luchtbellen in de waterkolom, en omdat de onderste ca. 1,5 m van de waterkolom geen signaal leverde (de zogeheten “blinde zone”). Aanbevolen wordt de verticale verdeling van de sedimentconcentraties te meten, bijvoorbeeld met de Silt Profiler, welke bestaat uit optische turbiditeitsensoren die in de waterkolom vallen en worden opgehaald.
2. De ADCP metingen laten zien dat de stroming bij de Put van Hansweert een 3D karakter heeft met sterke bochtstromingseffecten. Het wordt aanbevolen om deze stroming vollediger in kaart te brengen door een 13-uurs meting waarbij dwars- en langsraaien gevaren worden, in lijn met de metingen die in 2011 in de Put van Borssele gedaan zijn (zie bijlage in Plancke et al., 2017b). Deze data kan vervolgens gebruikt worden voor de validatie van de numerieke modellen (zie verder aanbeveling #5).
3. De eerste volledige peiling na de eerste stortcampagne (T03) werd uitgevoerd 24 dagen na het einde van de campagne. Na de tweede stortcampagne werd de eerstvolgende peiling (T08) uitgevoerd 10 dagen na het einde van de campagne. Bij beide stortcampagnes bleek al bij deze eerste peilingen een significant sedimentvolume te zijn verplaatst. Voor toekomstige proefstortcampagnes wordt aanbevolen om gebiedsdekkende peilingen (incl. de zuidelijke geulwand) uit te voeren direct na de storting, en daarna dagelijks, met een afbouwende frequentie.
4. Aanbevolen wordt het zogeheten *near-field* modellering uit te voeren. Hiermee kan de ruimtelijke verdeling van het sediment na kleppen in beeld worden gebracht. Dit kan met behulp van relatief eenvoudige modellen (b.v. Cormix, Jet3D of TASS) waarbij het verliespercentage moet worden opgelegd door de gebruiker. Er bestaan ook meer geavanceerdere *Computational Fluid Dynamics* (CFD) modellen die beschrijven hoe het sediment zich uit het beun beweegt, hoe de wolk zich vormt en het sediment neerwaarts beweegt. Het strippen van sediment tijdens dat proces kan expliciet meegenomen worden in een meerfasen CFD-model waarin het dichtheidseffect wordt meegenomen in de advectietermen. Tevens wordt de snelheid van water en sediment losgekoppeld waardoor processen zoals verticaal bulk transport, turbulente menging en *hindered settling* expliciet worden uitgerekend.
5. Aanbevolen wordt de morfologische ontwikkeling op de tijdschaal van uren tot dagen na het storten zouden te onderzoeken met een *far-field* model, zoals b.v. Delft3D. Het model moet goed in staat zijn de gemeten stroomsnelheden te reproduceren. De stroming in de Put van Hansweert heeft een 3D karakter, wat een model vraagt met voldoende (~10-20) verticale rekenlagen. De storting kan op een vereenvoudigde manier in het model worden gebracht, b.v. als bron op de bodem of in de waterkolom (op basis van de *near-field* modellering).

## 4 Modelling stortstrategieën

### 4.1 Introductie

Dit hoofdstuk beschrijft de modelopzet én evaluatie van de impact van stortstrategieën in de diepe putten van de Westerschelde. Opgemerkt wordt dat dit hoofdstuk zich richt op de effecten van gestort sediment dat al stabiel op de bodem aanwezig is na het storten. Dat is dus het resterende volume na eventuele initiële lokale verliezen (zie hiervoor Hoofdstuk 3). De modellering van de stortstrategieën dient de volgende doelen:

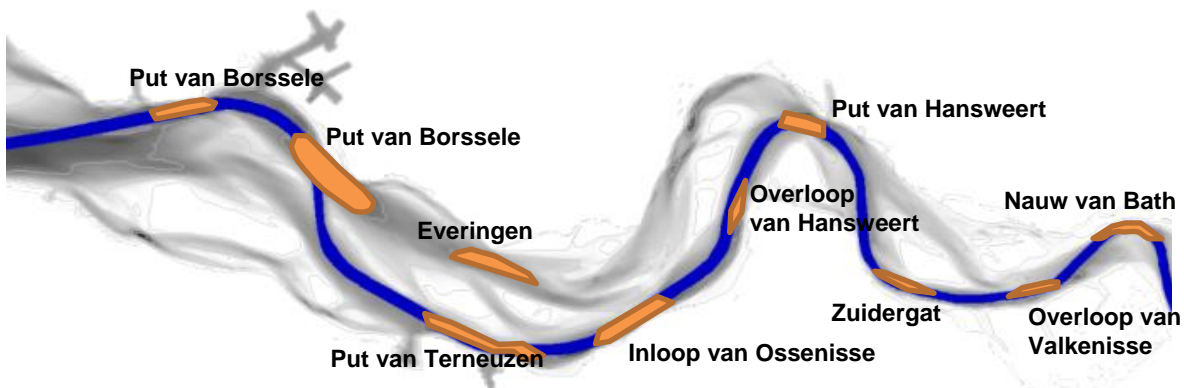
1. Definitie van onderscheidende stortstrategieën (waaronder storten in de diepe putten)
2. Onderzoeken wat de invloed is van de stortstrategieën op :
  - a. hydrodynamica van de Westerschelde
  - b. meso- en macroschaal morfologische ontwikkeling
  - c. vaargeulonderhoud (i.e. volume baggerwerk)

Ten behoeve van de analyse van de stortstrategieën wordt het gekalibreerde Delft3D-NeVla model (Grasmeijer, 2013) gebruikt. In dit hoofdstuk wordt tevens gekeken naar de betrouwbaarheid van de modelvoorspellingen van morfologische veranderingen middels gevoeligheidsanalyses. In Hoofdstuk 0 worden aanvullende analyses gedaan van fysische processen welke de verspreiding van sediment kunnen beïnvloeden.

De stortstrategieën worden in Paragraaf 4.2 beschreven. Waarna de modelleringsaanpak, gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 4.3) en modelopzet van het toegepaste Delft3D model (Paragraaf 4.4) worden uitgewerkt. De impact van stortstrategieën op de grootschalige hydrodynamica (Paragraaf 4.5), Morfologische impact (Paragraaf 4.6) en invloed op onderhoudsbaggerwerk van de vaargeul (Paragraaf 4.7) worden daarna uitgewerkt op basis van modelresultaten.

### 4.2 Stortstrategieën

Het gekalibreerde Delft3D-NeVla model (Grasmeijer, 2013) is gebruikt om de meso- en macroschaal morfologische ontwikkeling van de Westerschelde door te rekenen als gevolg van 4 stortstrategieën in de diepe putten van de Westerschelde. Deze stortstrategieën zijn zo gedefinieerd dat er inzicht wordt verkregen in het effect van storten in diepe putten op 1) de mesoschaal morfologische ontwikkeling 2) het vaargeul onderhoudsvolume en 3) hydrodynamica van de Westerschelde. Een overzicht van de potentiële locaties wordt gegeven in Figuur 4.1.



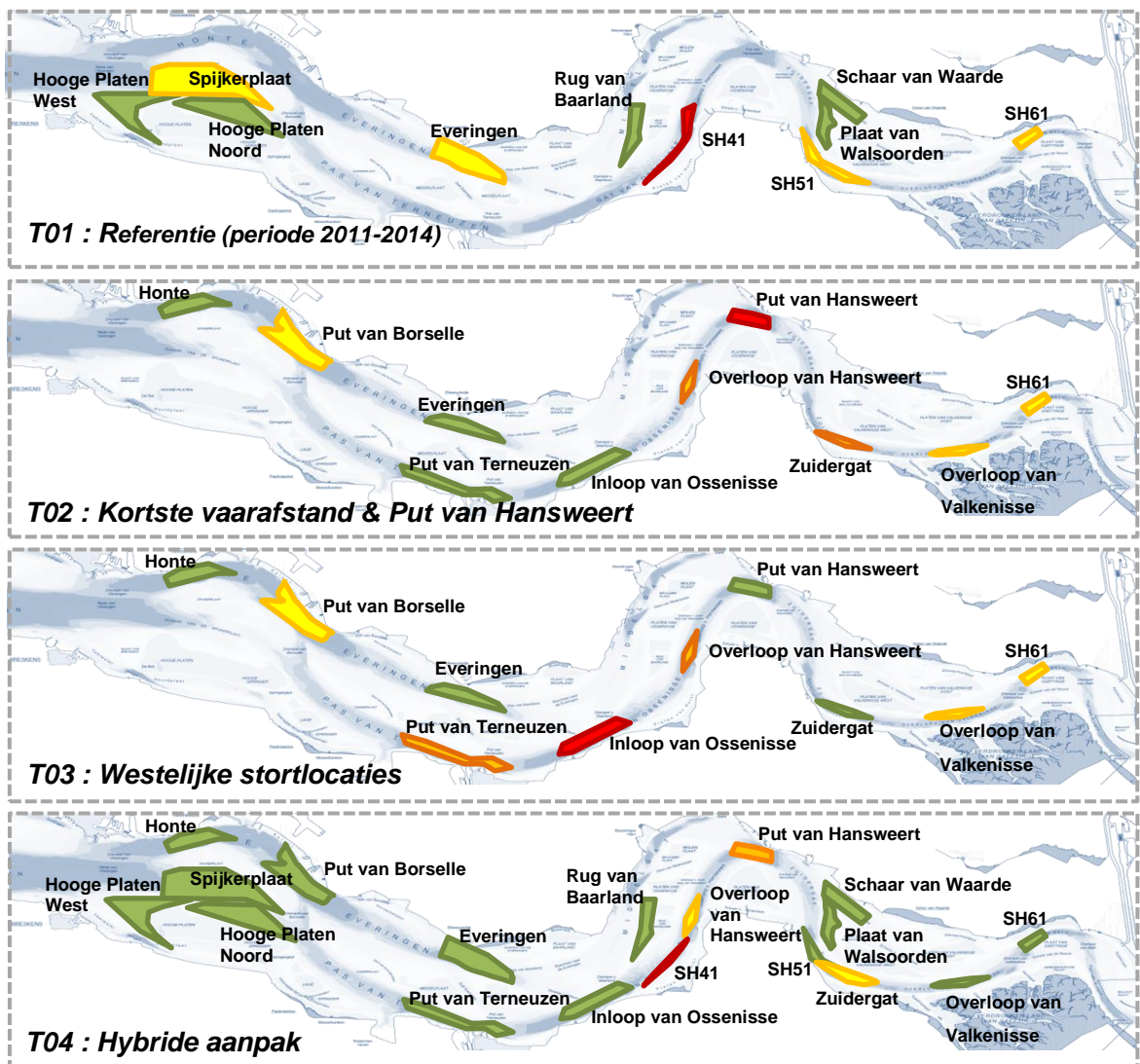
Figuur 4.1 Mogelijke locaties voor het storten zand in de diepe deelgebieden van de geulen in de Westerschelde.

Er zijn 4 scenario's gedefinieerd die onderling verschillen wat betreft de ruimtelijke plaatsing van het zand (Tabel 4.1). Het referentiealternatief verspreidt zand op een vergelijkbare wijze als uitgevoerd is in de periode 2011 t/m 2014 (T01). De tweede strategie stort het gebaggerde sediment op de dichtstbijzijnde stortlocatie (T02), waarbij de vaarafstand wordt geminimaliseerd. In deze strategie wordt een groot deel van het gebaggerde sediment in enkele putten wordt gestort (met name in de Put van Hansweert) waardoor deze sneller zullen vullen. Er is daarom tevens een strategie meegenomen waarbij het gebaggerde materiaal voor een groter deel in de meer westelijke putten wordt gestort (T03), waarbij dus minder wordt gestort in de Put van Hansweert en Zuidergat en meer wordt gestort in de Inloop van Ossenissee en Put van Terneuzen. Tenslotte is er een alternatief doorgerekend dat een combinatie van stortingen in diepe en ondiepe gebieden is (T04), waarbij voor 50% de huidige strategie is gehandhaafd. De verhouding van verspreid zand per deelgebied wordt volgens een verdeelsleutel bepaald die verschilt per scenario.

Tabel 4.1 Overzicht van geëvalueerde stortstrategieën

Code	Strategie	Verdeling zand
T01	Huidig (referentie)	Plaatrand en geulwand stortingen Historische verdeling 2011-2014 (nul-plus alternatief)
T02	Dichtstbijzijnde put	Diepe putten kortste vaarafstanden Enigszins ontlasten van Macrocel 5
T03	Westelijke stortlocaties	Westelijke putten (i.e. op grotere afstand van drempel van Hansweert)
T04	Hybride	Verdelen over de huidige stortlocaties en dichtstbijzijnde diepe putten (i.e. 50% van T01 en T02)

Additioneel is een referentie situatie zonder baggeren of storten doorgerekend, welke wordt aangeduid met T00. Opgemerkt wordt dat de vaargeul voor deze situatie langzaam verondiept en de toegankelijkheid afneemt. Deze strategie dient enkel om inzicht te krijgen in de ordegrrootte van autonome bodemveranderingen en transporten in de Westerschelde.



Figuur 4.2 Overzicht van stortlocaties voor de strategieën T01 t/m T04. De kleuren van de stortzones zijn indicatief voor de verhouding van gestort sediment (groen : kleine volumes  $< 0.5$  miljoen  $m^3$ /jaar; geel : middelgrote volumes  $< 1$  miljoen  $m^3$ /jaar; oranje : grote volumes  $> 1$  miljoen  $m^3$ /jaar; rood : zeer grote volumes  $> 2$  miljoen  $m^3$ /jaar)

### 4.3 Basis-simulatie en gevoeligheidsonderzoek

Naast een 'basis simulatie', welke de gemeten bathymetrie en huidige status van de Westerschelde gebruikt voor de evaluatie van de stortstrategieën met het numerieke model (T01 t/m T04), zijn tevens gevoeligheidsanalyses gedaan om zodoende de robuustheid van de uitkomsten te verkennen. Ten behoeve hiervan zijn modelsimulaties gemaakt waarin de volgende variaties op de 'basis modelopzet' (zie Paragraaf 4.4) zijn toegepast:

- 1) Aangepaste bathymetrie van de putten (i.e. deels opgevuld).  
Verwacht wordt dat de hydraulische forcering van het sediment in de putten van de Westerschelde enigszins wordt onderschat als uitgegaan wordt van de gemeten bodem en dieptegemiddelde stroomsnelheden. Om toch een bovengrens te kunnen geven van het transport-potentieel in de diepe putten van de Westerschelde, wordt de bodem van

elk van de putten met (deels) opgevuld. Verwacht wordt dat de transporten binnen de put én naar de drempels in de vaargeul hierdoor zullen toenemen.

2) Gegradeerd sediment (met 5 sediment fracties).

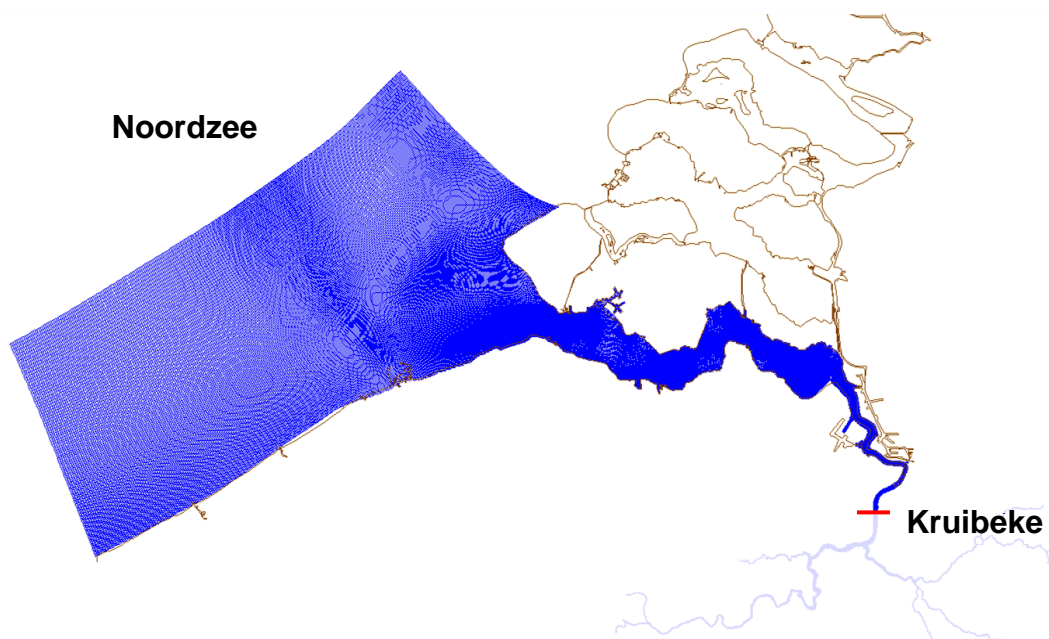
Het is mogelijk dat de verspreiding van grove en fijne sediment fracties verschillend is. Verwacht wordt dat de fijnere fracties (in werkelijkheid) sneller getransporteerd zullen worden, terwijl de grovere sedimentfracties minder mobiel zijn. Mogelijk worden ook de transportpatronen beïnvloed door de andere eigenschappen van het gegradeerde sediment. Bij een simulatie met meerdere sediment fracties kan ook rekening gehouden worden met de ruimtelijke verschillen in sediment eigenschappen over het estuarium (bijv. vaargeul ten opzichte van geulwand of plaat). Deze simulaties geven inzicht in de invloed van ruimtelijke variatie in sediment-samenstelling op de morfologische ontwikkeling en mobiliteit van het sediment.

#### 4.4 Model opzet

De modelopzet wordt achtereenvolgens beschreven voor het modelgrid en bathymetrie (Paragraaf 4.4.1), randvoorwaarden (Paragraaf 4.4.2) en sedimenttransport (Paragraaf 4.4.3). Bochtstroming wordt in Paragraaf 4.4.4 besproken. De wijze van implementatie van de toegepaste stortstrategieën wordt daarna beschreven op basis van de verdeling van het baggerbezwaar over de stortlocaties (Paragraaf 4.4.5).

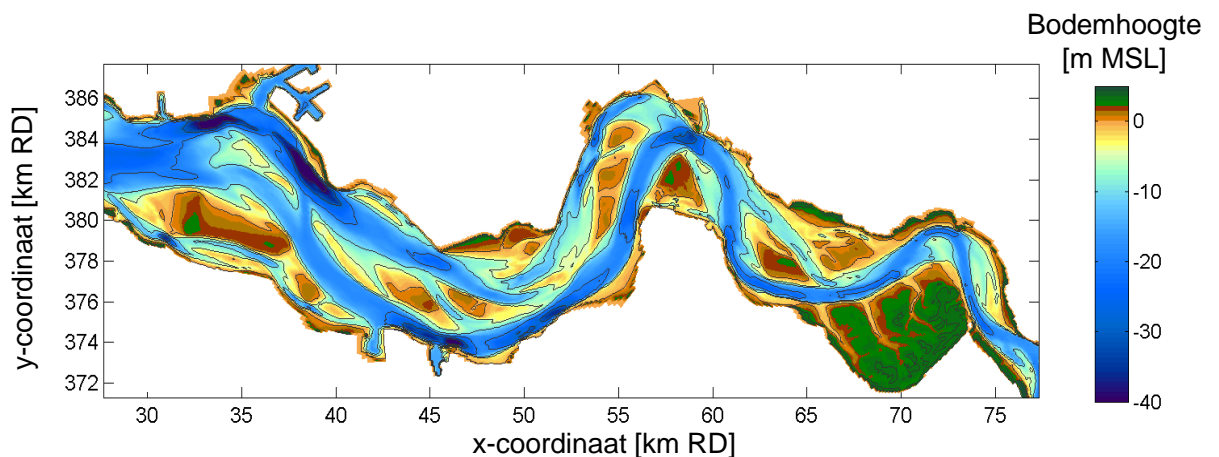
##### 4.4.1 Model grid en bathymetrie

Er is een uitsnede gebruikt van het NeVla model (Vroom et al., 2015; Schrijvershof & Vroom, 2016) waarbij het gebied vanaf de Noordzee tot aan Kruibeke meegenomen wordt. Het grid heeft een afmeting van 150 x 76 km (379x1062 grid cellen). De resolutie varieert van circa 50 x 150 m binnen de Westerschelde (met een kortste afstand dwars op de geul) tot afmetingen van circa 200 x 500 m op de Noordzee.



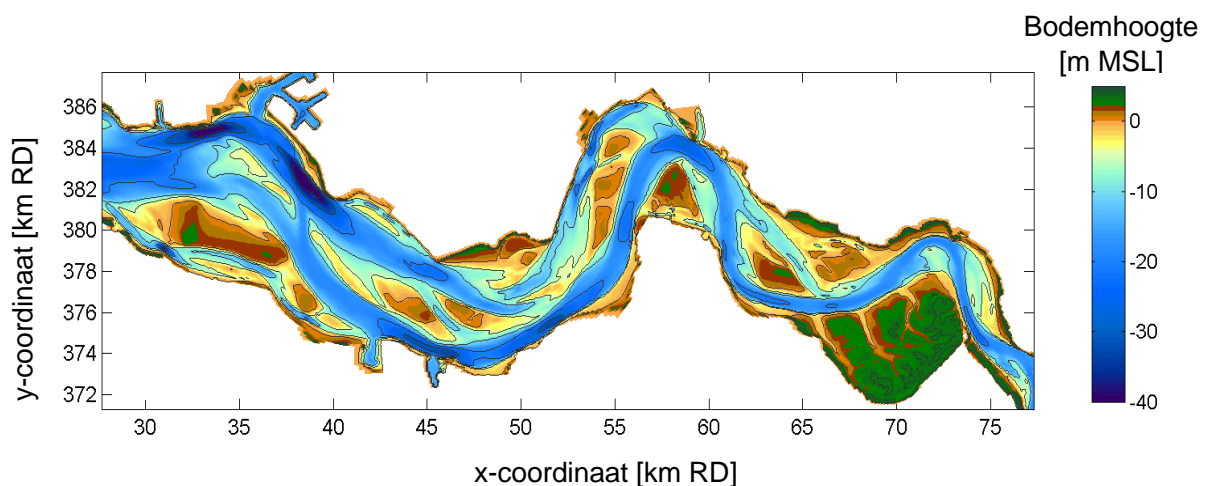
Figuur 4.3 Overzicht van model grid van uitsnede NeVla model

De bodem is geschematiseerd door Schrijvershof & Vroom (2016) aan de hand van bathymetrische metingen die opgenomen zijn in de jaren 2011 (Noordzee, Vlaamse kust en monding Westerschelde), 2013 (Westerschelde) en 2006 (bovenstreams van Bath). Daarnaast is de bodem binnen de baggerpolygoon op streefdiepte gebracht. Dit is nodig om te voorkomen dat het model tijdens de eerste tijdstap een grote hoeveelheid sediment baggert (en stort) waarbij de morfologie van de stortlocatie mogelijk sterk beïnvloed wordt door dit initiële stortvolume. De schematisatie van de bodem in de Westerschelde is weergegeven in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Initiële historische bathymetrie van het Westerschelde model

Aanvullend op de simulaties met deze op basis van data herleide bodem (Figuur 4.4), zijn ook gevoeligheid simulaties gemaakt met een morfologisch ingespeelde bodem (Figuur 4.5). Deze ingespeelde bodem maakt gebruik van modelmatig opgevulde putten. Hiervoor is gekozen omdat voor een proefstorting in de diepe put van Hansweert is gebleken dat deze in werkelijkheid sneller uitruimt dan in het morfologisch model met gemeten bodem wordt berekend (zie Hoofdstuk 0). Dit is deels gerelateerd aan 3D stromingen in de diepe putten die alleen geparameteriseerd meegenomen kunnen worden in het toegepaste 2DH model. Hoofdstuk 0 licht toe dat de morfologische ontwikkeling van een proefstorting in de Put van Hansweert meer conform de werkelijkheid is als een ingespeelde bodem met opgevulde putten wordt gebruikt.



Figuur 4.5 Initiële ingespeelde bathymetrie van het Westerschelde model

Een modelsimulatie met het NeVla model over een periode van 10 jaar (i.e. periode 2004 t/m 2014) is gebruikt om de ingespeelde bathymetrie van de diepe putten in de vaargeul af te leiden. Hierbij is de waterdiepte in de putten met maximaal 5 meter verkleind voor de oostelijke putten (i.e. Zuidergat t/m Nauw van Bath) en tot 10 meter verkleind voor de andere putten (Put van Borssele t/m Put van Hansweert). Opgemerkt wordt dat lengte van sommige diepe putten (i.e. in de lengterichting van de hoofgeul) in de ingespeelde bodem groter is dan de lengte in de gemeten bathymetrie (bijvoorbeeld voor de Put van Hansweert). Voor het gebied buiten de putten (dus rest van de geulen en platen) wordt dus de gemeten bathymetrie gebruikt, wat betekent dat de bodem met opgevulde putten een groter volume zand bevat in de diepe putten.

#### 4.4.2 Randvoorwaarden

De hydrodynamica wordt geforceerd op basis van getij-waterstanden op de Noordzee, debieten van de bovenstroomse rivieren en wind. Een validatie van de hydrodynamica is uitgevoerd door Vroom et al. (2015) voor het jaar 2014. Golven zijn niet meegenomen in de simulaties, omdat verwacht is dat het effect daarvan klein zal zijn ter hoogte van de interessegebieden in het estuarium (i.e. met name bij Hansweert).

Het model simuleert een morfologische periode van 10 jaar, waarvoor gebruik gemaakt wordt van een tijdstap van 0.25 minuut. De toegepaste morfologische factor (MorFac) is 24.5. Effectief is dus een hydraulische simulatie periode van 5 maanden doorgerekend. Het model gebruikt één springtij-doodtij cyclus welke regelmatig herhaald wordt. Zodoende wordt de invloed van seizoensgebonden variatie verkleind. Als representatieve springtij-doodtij cyclus is gekozen voor de periode van 26 mei 2014 03:10:00 tot en met 10 juni 2014 02:40:00 (zie Schrijvershof & Vroom, 2016). Deze periode komt het best overeen met de voor het jaar 2014 gemiddelde amplitude van het getij.

Opgemerkt wordt dat de verwerking van resultaten uit het model (o.a. baggervolumes en morfologische verandering) plaats vindt na de eerste 5 jaar van de simulatie. Op deze wijze worden eventuele inspeleffecten uitgesloten. Dit sluit aan bij de methodiek welke in eerdere studies is gekozen (Schrijvershof & Vroom, 2016), waarbij tevens een inspeelperiode werd geïdentificeerd. Er is namelijk altijd een opstartperiode nodig om de morfologie en hydrodynamica in lijn te brengen met de fysica in het model. De reden is dat 1) initiële condities niet volledig bekend zijn en 2) de fysische processen in het numerieke model een benadering zijn van de werkelijkheid. De ontwikkelingen na de inspeelperiode zijn meer constant in de tijd.

Bovenstrooms wordt een jaargemiddeld debiet opgelegd op de takken van de Schelde. De Schelde heeft een gemiddelde afvoer van circa 113 m<sup>3</sup>/s, waarvan 35 m<sup>3</sup>/s bij Bath in de Schelde stroomt en 87 m<sup>3</sup>/s van bovenstrooms komt. Deze afvoer is in het volledige NeVla model als 'discharge' (DIS-file) op de bovenstroomse takken van de Schelde geplaatst. Voor het afgeknipte model is de afvoer van de Schelde verdisconteerd in de bovenstroomse randvoorwaarde bij Kruikeke. Deze waterstandsrandvoorwaarde is herleidt door een volledige modelperiode door te rekenen met het NeVla model en de resulterende randvoorwaarde op te leggen op het verkleinde model.

De wind is toegevoegd als een ruimtelijk uniform maar tijdsvariabel windveld, afkomstig van het meetpunt bij Vlissingen van het jaar 2014. De forcering betreft een daadwerkelijk opgetreden tijdserie in de genoemde periode (zie Schrijvershof & Vroom, 2016). De saliniteit



wordt in het model eveneens meegenomen, dit wordt aan de zeewaartse randen opgelegd als jaargemiddelde waarde van de tijdseries afkomstig van het MWTL meetnet, eveneens van het jaar 2014. De initiële zoutconcentraties over het gehele modeldomein zijn afkomstig uit Vroom et al. (2015).

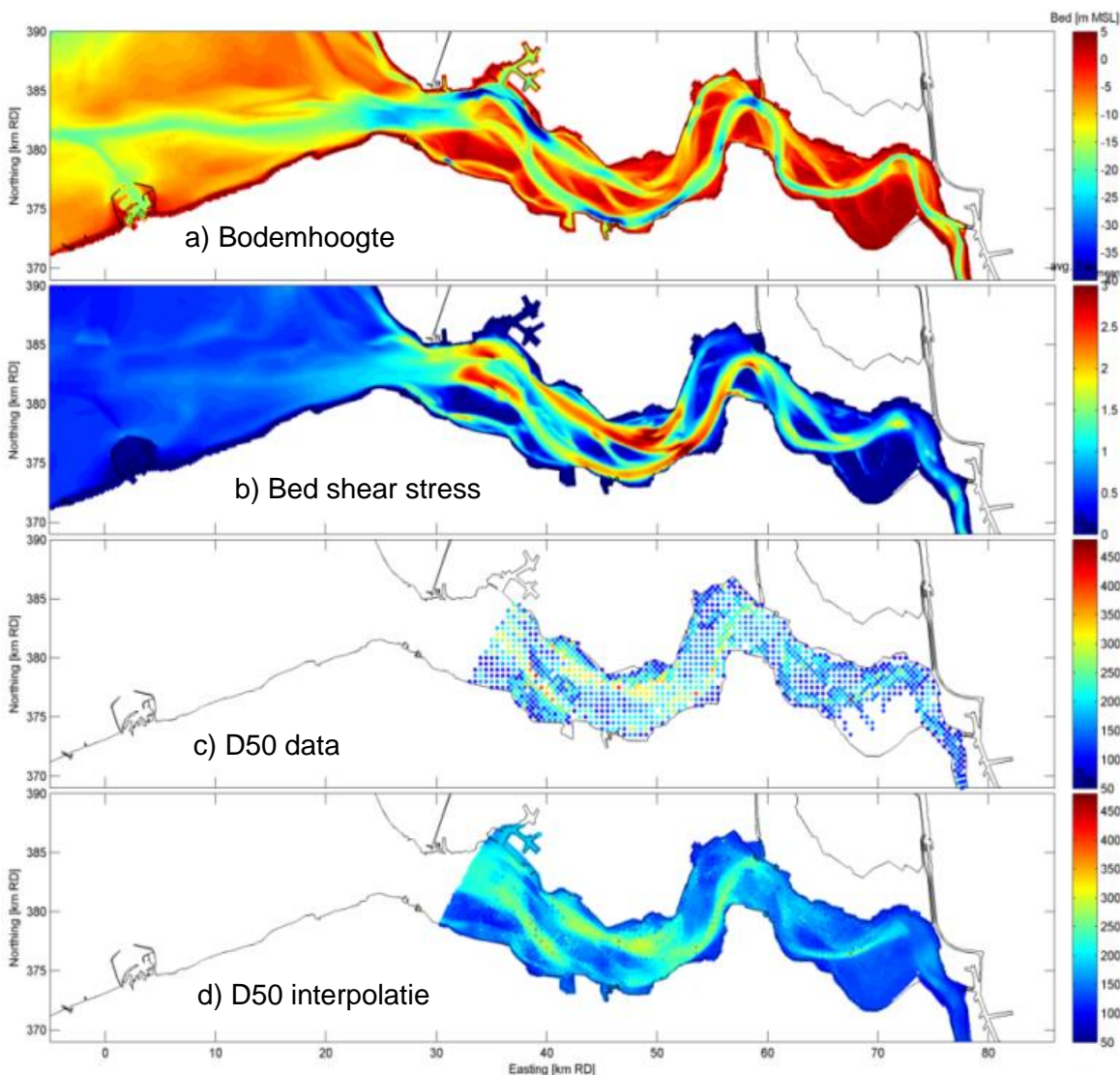
#### 4.4.3 Sedimenttransport

Het sedimenttransport wordt berekend met de TRANSPOR2004 (Van Rijn, 2007a/b) sedimenttransportformule. De bodemveranderingen worden berekend aan de hand van de sedimenttransportfluxen en worden opgeschaald door middel van de morfologische versnellingsfactor (MorFac). Alle berekeningen gebruiken een kalibratiefactor van 0.5 voor het bodem- en suspensief transport, welke ook in eerdere studies is toegepast (Vroom et al., 2015; Schrijvershof & Vroom, 2016). Binnen het model worden harde lagen toegepast ter plaatse van sommige putten en geulwanden (TNO, 2003) welke ook in andere studies zijn meegenomen. In Delft3D wordt dit bodemniveau opgegeven als initiële conditie door de sedimentlaagdikte van het erodeerbare pakket op te geven. Het ruweheidsveld is ruimtelijk variabel per deelgebied van de monding, Westerschelde en de riviertakken (zie Vroom et al., 2015).

De basisberekeningen maken gebruik van een enkele sedimentfractie met een mediane korrelgrootte ( $D_{50}$ ) van 200  $\mu\text{m}$ . Om de gevoeligheid van het model te testen voor gegradeerd sediment zijn ook simulaties gemaakt met vijf sediment fracties (Tabel 4.2; zie ook Paragraaf 4.3) en ruimtelijk variërende sediment compositie (i.e. in combinatie met de 'ingespeelde bathymetrie'). Voor deze gevoeligheidssommen rekt het Delft3D separaat een transport uit voor elk van de vijf fracties wat daarna geschaald wordt op basis van beschikbaarheid van het sediment in de bodem. Deze beschikbaarheid van het sediment wordt per fractie geadmistreerd middels een meerlagensysteem. In elke gridcel wordt voor verticale lagen met een dikte van 0.5 m de relatieve bijdrage van elke sedimentfractie bijgehouden. Voor de bovenste laag (i.e. transportlaag) wordt een dikte van 10 cm gebruikt, aangezien dit verondersteld wordt de mixing depth van het sediment te zijn (zie ook Huisman et al., 2018 voor informatie over modellering met meerdere sedimentfracties en bodemlagen).

Tabel 4.2 Eigenschappen sediment fracties

	Ondergrens [ $\mu\text{m}$ ]	Mediane diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Bovengrens [ $\mu\text{m}$ ]
Fractie 1	63	97	150
Fractie 2	150	178	212
Fractie 3	212	252	300
Fractie 4	300	357	425
Fractie 5	425	708	1180



Figuur 4.6 Interpolatie van sediment data voor het binnengebied van de Westerschelde

De initiële bodemsamenstelling is bepaald op basis van sediment data voor de Westerschelde (McLaren, 1994). Bij de interpolatie hiervan over het domein is gebruik gemaakt van lineaire regressie van de sedimentsamenstelling met de waterdiepte en lokale bodemschuifspanning welke bepaald is voor de 50 samples die het dichtst bij desbetreffend grid punt liggen. De invloed van de afstand is verdisconteerd met een weegfactor. Op deze wijze volgt de interpolatie van het sediment tevens de bathymetrie van de geulen en wordt de invloed van de lokale bodemschuifspanning meegenomen. In Figuur 4.6 wordt de gebruikte bathymetrie, bodemschuifspanning en  $D_{50}$  data voor de interpolatie weergegeven, alsmede het gevonden resultaat.

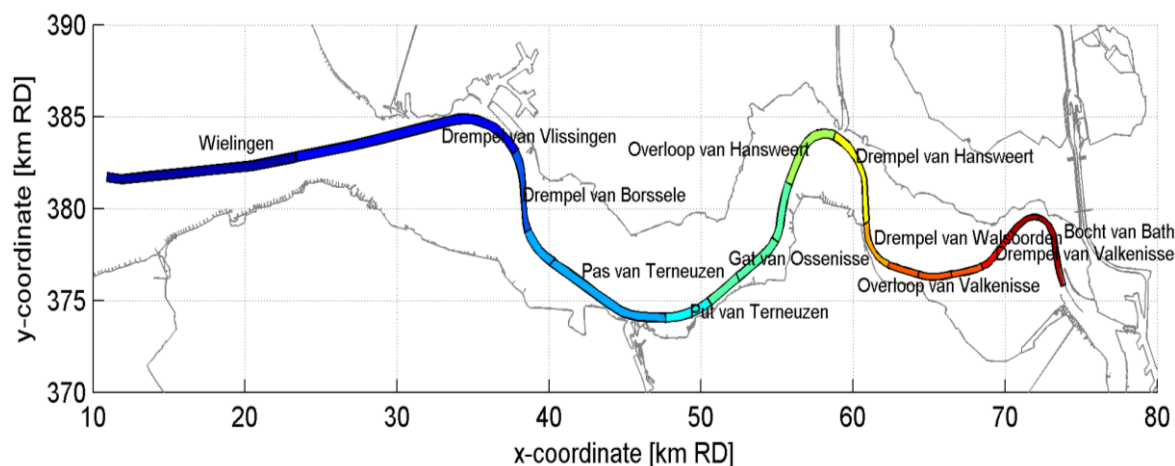
#### 4.4.4 Bochtstroming

Binnen het Delft3D model kan bij diepte-gemiddelde simulaties (2DH) rekening gehouden worden met het effect van bochtstroming. Daartoe wordt een advectie-diffusie vergelijking opgelost om de intensiteit  $I$  van de bochtstroming te bepalen op basis waarvan een

additionele bodemschuifcomponent wordt uitgerekend (zie ook Paragraaf 5.2.3). Deze term wordt meegenomen in de impulsvergelijking en geschaald met de invoerparameter  $\beta_c = [0,1]$ . De berekende zandtransporten worden hierdoor beïnvloed. In de simulaties is de default waarde  $\beta_c = 0.5$  aangehouden.

#### 4.4.5 Ingrepen

Menselijke ingrepen worden in het model meegenomen door middel van de bagger- en stortfunctionaliteit. Binnen het model zijn polygonen gedefinieerd waar de bodem op streefdiepte gehouden wordt. Deze polygonen omsluiten de vaargeul in de Westerschelde en de monding. In de Westerschelde wordt de bodem op een minimale diepte van NAP -17.2 m gehouden. Het gebaggerde sediment wordt vervolgens gestort in stortpolygonen. Dit gebeurt voor de referentiesimulatie (T01) volgens een verdeling zoals deze in de periode 2011 - 2014 in de Westerschelde en haar monding heeft plaatsgevonden. De baggerpolygonen voor de Westerschelde zijn weergegeven in Figuur 2.2. Het baggeronderhoud van de havens in de Westerschelde is niet meegenomen in de modellering omdat deze baggerwerkzaamheden voornamelijk het baggeren van fijn sediment (slib) betreffen. Zandwinning wordt niet meegenomen omdat dit is afgebouwd.



Figuur 4.7 Baggerpolygonen in de Westerschelde

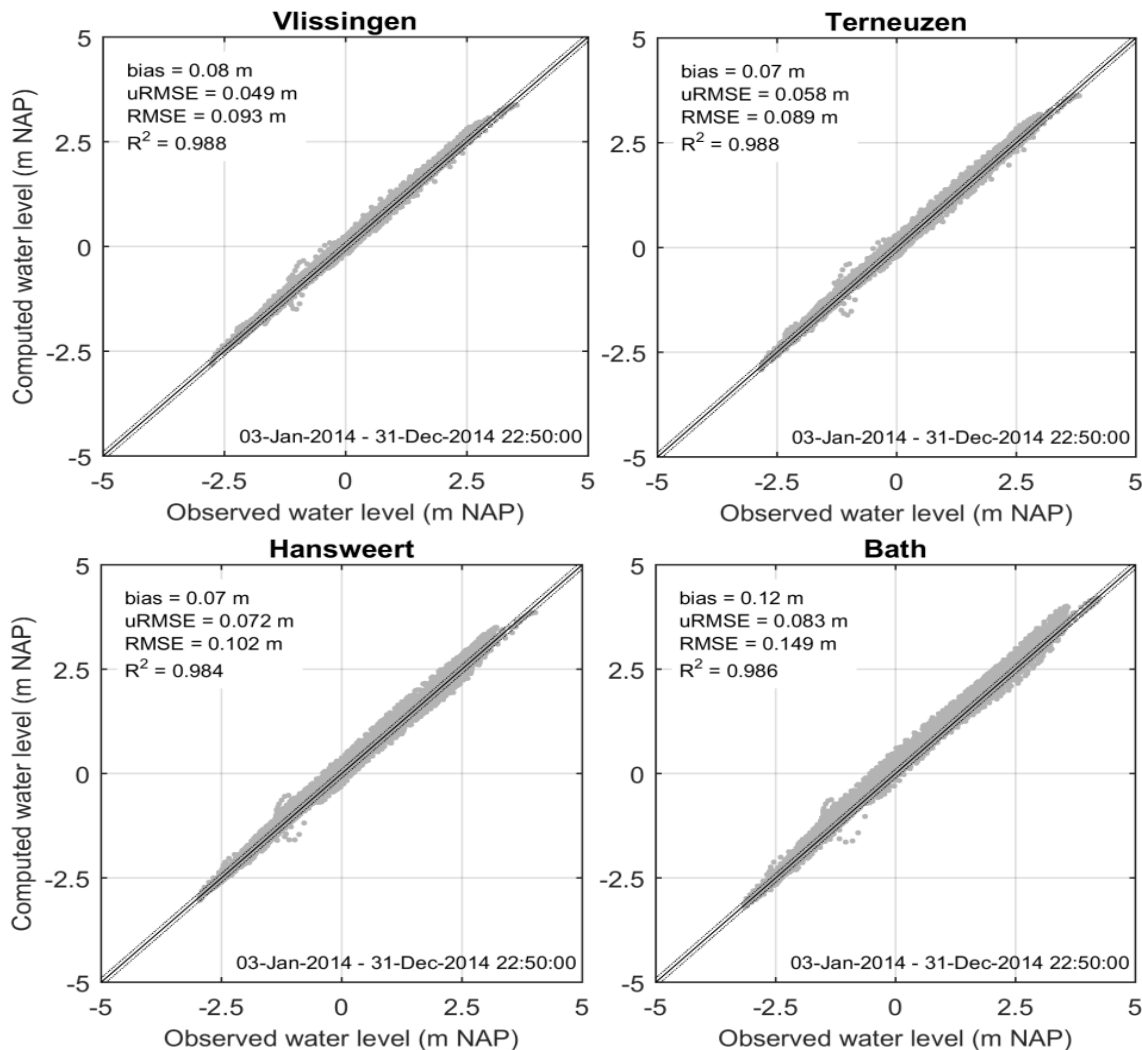
## 4.5 Hydrodynamica

De hydrodynamica van het in deze studie toegepaste 'afgeknipte' NeVla model is gevalideerd aan de hand van gemeten data van waterstanden én vergeleken met het gevalideerde 'volledige' NeVla model (Vroom et al., 2015). Deze beoordeling van de prestaties van het afgeknipte NeVla model met de gemeten bodem vindt plaats in Paragraaf 4.5.1.

Het effect van de nieuwe stortstrategieën (T02 t/m T04) op de hydrodynamica wordt vervolgens in Paragraaf 4.5.2 geëvalueerd. De invloed op het verticale (waterstanden) en het horizontale getij (debieten en verandering van lokale stroomsnelheid) wordt beschouwd.

## 4.5.1 Reproducieren van waterstanden

Ten behoeve van de validatie is de hydrodynamica van een volledig jaar (1 januari 2014 t/m 1 januari 2015) opgelegd als waterstandsrandvoorwaarde op het afgeknipte NeVla model. De berekende hydrodynamische parameters zijn op specifieke locaties binnen het estuarium uitgevoerd en daarna vergeleken met lokale waterstandsmetingen.

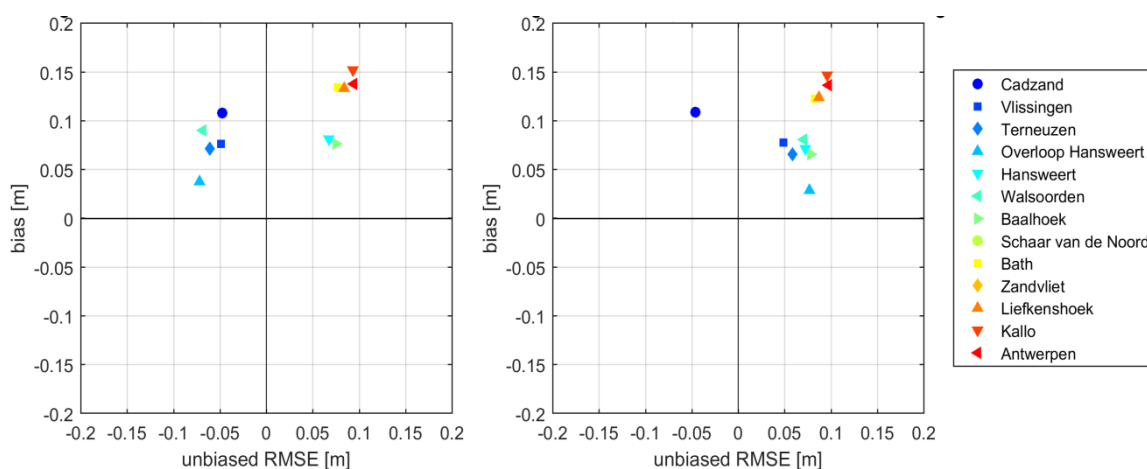


Figuur 4.8 Validatie van waterstanden in het Toegepaste afgeknipte NeVla model voor de Nederlandse kust.

De representatie van de waterstanden in het model is weergegeven voor vier locaties in de Westerschelde (Figuur 4.8), welke verspreid liggen over het gebied vanaf de monding tot aan het bovenstroomse gedeelte van de Westerschelde. De waterstanden in de Westerschelde variëren globaal tussen de -3 m en +4 m, afhankelijk van de afstand tot de monding. Voor elke locatie is de correlatie ( $R^2$ ), structurele ('bias') en willekeurige afwijking ('unbiased RMSE') tussen de voorspelde en gemeten waterstand berekend (zie Figuur 4.8). Voor elk van de locaties is de weergave van de waterstandsmetingen goed ( $R^2 > 0.98$  en  $RMSE < 0.15m$ ).

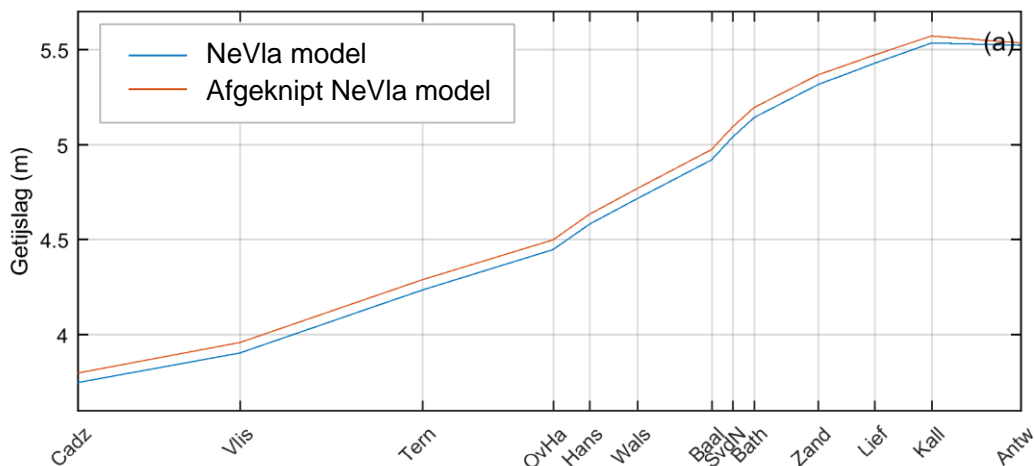
In Figuur 4.9 wordt de kwaliteit van de voorspelling van de waterstanden voor alle meetpunten samengevat. Zowel de resultaten van het 'originele' NeVla model (linker paneel)

als het 'ingekorte modeldomein' worden weergegeven (rechter paneel). De bias geeft weer of de gemiddelde waterstand goed wordt weergegeven, de RMSE geeft een indicatie of de uitwijking van het getij overeenkomt met de metingen. Uit Figuur 4.9 komt naar voren dat het originele NeVla model een overschatting geeft van het gemiddelde waterstands niveau in het estuarium (bias = +10 cm), het afgeknipte model geeft logischerwijs deze zelfde overschatting. In vergelijking met het originele model presteert het afgeknipte NeVla model vergelijkbaar (voor waterstanden). In beide modellen is de afwijking met de metingen klein (i.e. bias kleiner dan 0.15 m; en absolute RMSE kleiner dan 0.1 m).



Figuur 4.9 Validatie van waterstanden van het originele NeVla model (linker plot) en het verkleinde NeVla model (rechter plot). De absolute afwijking wordt op de verticale as weergegeven, terwijl de relatieve fout (RMSE) op de horizontale as wordt gepresenteerd.

Figuur 4.10 toont de getijslag (i.e. verschil tussen GHW en GLW voor beschouwde hindcast periode) langs het gehele estuarium voor het afgeknipte model (rood) en het originele NeVla model (blauw). De getijslag in het ingekorte model is vrijwel gelijk aan het originele NeVla model, wel is er een kleine positieve bias (ongeveer +4.7 cm) langs het gehele estuarium in de voorspelling van het afgeknipte model. Overigens betekent dit niet dat het ingekorte NeVla model slechter presteert, omdat de vergelijking met de meetdata van de waterstanden een vergelijkbare performance laat zien (zie Figuur 4.9). De hydrodynamica die door beide modellen voorspeld wordt is dus consistent/vergelijkbaar. De afwijking door het inkorten van het model is klein ten opzichte van de onzekerheid in andere processen (o.a. door sediment transport of 3D stromingen).



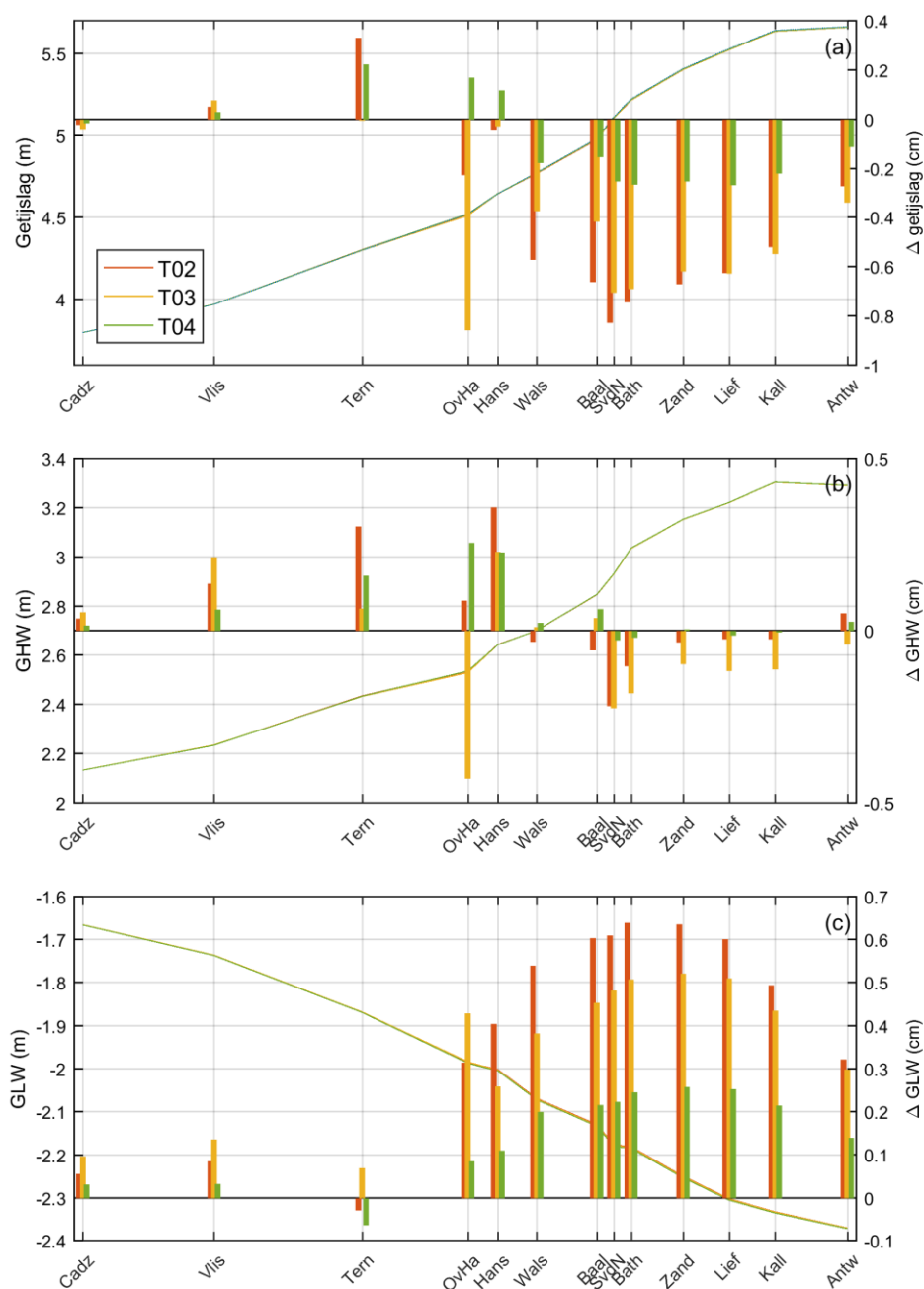
Figuur 4.10 Vergelijking van getijslag in het originele NeVla model (blauwe lijn) en het verkleinde NeVla model (rode lijn) voor een historische hindcast van een jaar.

#### 4.5.2 Effect stortstrategieën op hydrodynamica

De invloed van stortstrategieën op de hydrodynamica in het estuarium is geëvalueerd door een volledig hydrodynamisch jaar te simuleren met het afgeknipte NeVla model, waarbij voor elke simulatie een bathymetrie is toegepast welke verkregen is door een morfologische simulatie te gebruiken nadat een stortstrategie 5 jaar is toegepast. Verondersteld wordt dat na deze periode van 5 jaar een aanzienlijke aanpassing van de bodem heeft plaats gevonden. Als referentie is gekozen voor de huidige bagger- en stortstrategie (T01).

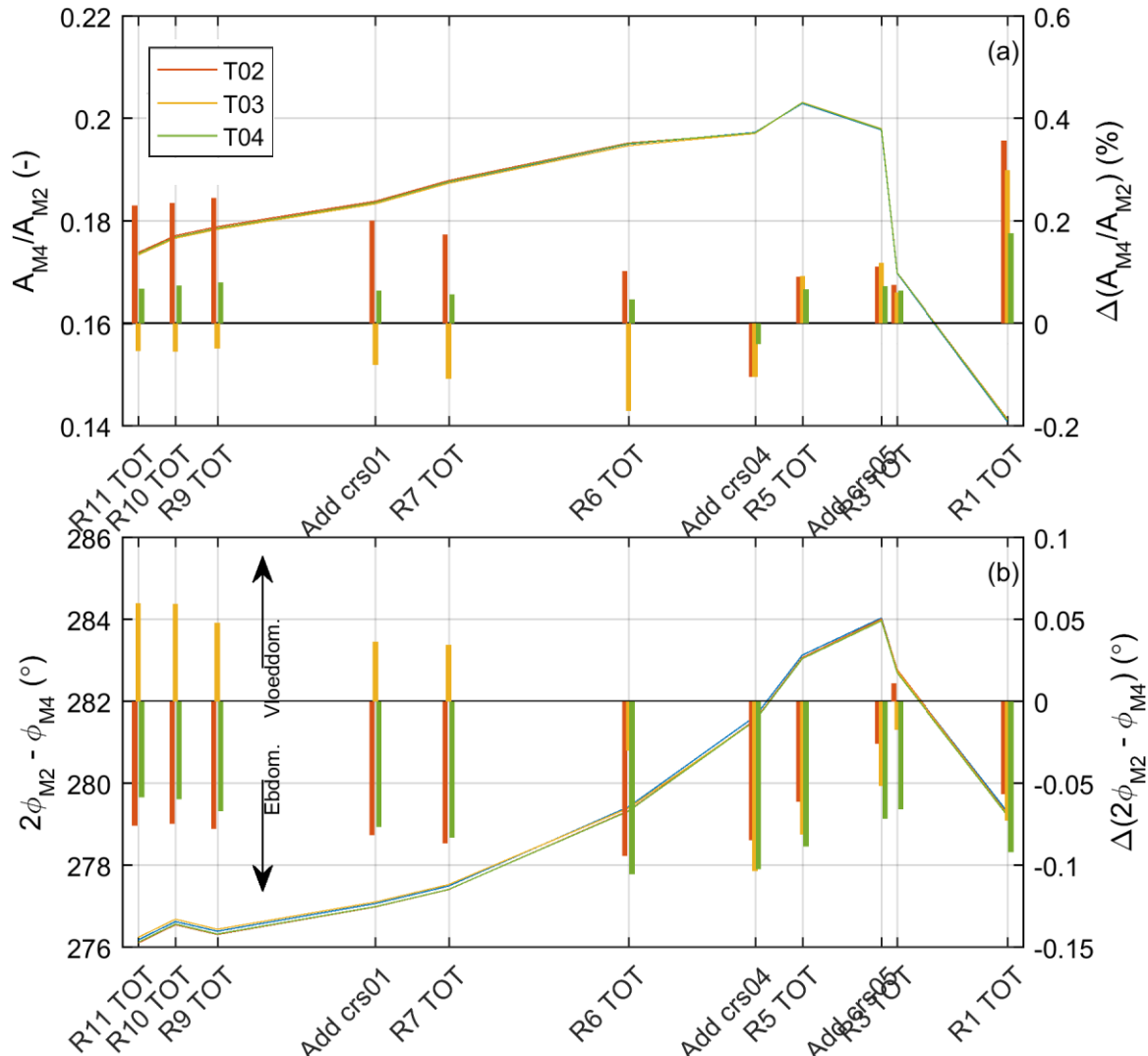
De getijslag, GHW en GLW zijn voor de vier scenario's weergegeven in Figuur 4.11. De verticale balken in de figuren geven voor ieder scenario het verschil ten opzichte van het referentiescenario T01. Uit de figuren volgt dat het effect op het verticale getij minder is dan één centimeter.

De effecten zijn in het oostelijke gedeelte van het estuarium groter dan in het westelijke gedeelte maar de grootte van verandering blijft kleiner dan één centimeter. De resultaten van deze analyse laten zien dat de gekozen stortstrategieën een beperkt effect hebben op het verticale getij (waterstanden) in het estuarium. Het storten in de diepe putten van de vaargeul zorgt voor een grotere weerstand tegen de getijstrooming, waardoor de getijslag en het debiet in het bovenstroomse deel van de Westerschelde wordt verkleind. De grootte van de ingrepen die met het morfologische model zijn doorgerekend zijn enkele orden kleiner dan de ingrepen die zijn gesimuleerd door Schrijvershof en Vroom (2016). Op korte termijn zijn de effecten waarschijnlijk niet waarneembaar, maar op lange termijn (decades) kan er een vermindering zijn van het verticale getij in het bovenstroomse deel van de Westerschelde.



Figuur 4.11 Vergelijking van getijslag (a), gemiddeld hoog water (GHW, b) en gemiddeld laag water (GLW, c) voor de huidige stortstrategie (T01; i.e. voor 2011-2014) en stortstrategieën in de diepe putten (T02 t/m T04).

Het debiet in de geul van de Westerschelde wordt door de stortstrategieën in de diepe putten enigszins verkleind tijdens vloed (met circa 0.1%) en vergroot tijdens het eb. De verandering van de asymmetrie van het horizontale getij is weergegeven in Figuur 4.12. De sterkste verandering vindt plaats voor T02 (verandering  $\Delta(\xi_{M4}/\xi_{M2})$  van circa 0.2% en  $2\phi_{M2}-\phi_{M4}$  van minder dan  $0.1^\circ$ ).

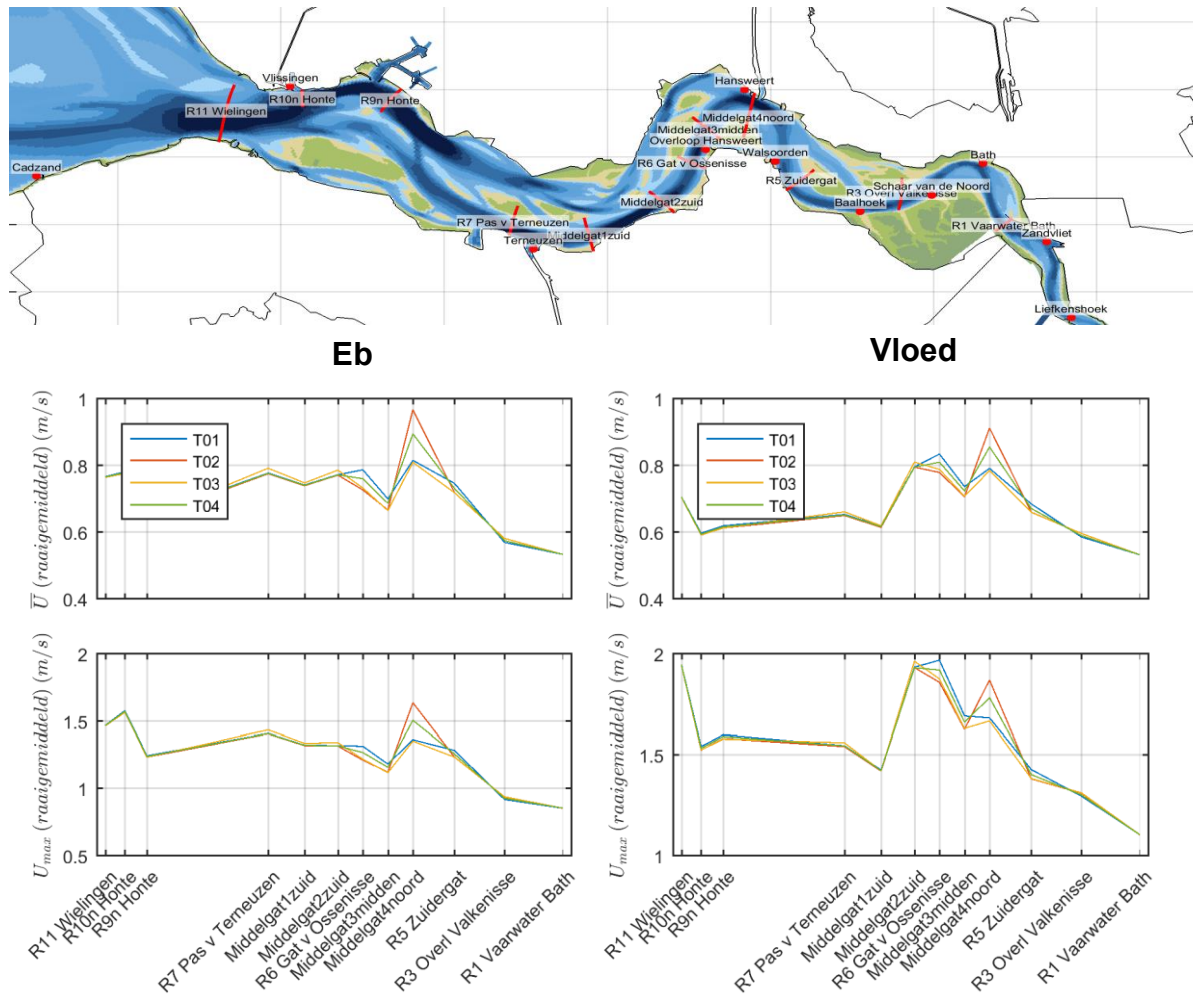


Figuur 4.12 Invloed van stortstrategieën op de getij-asymmetrie van de Westerschelde.

### Lokale stroomsnelheden

Ter plaatse van de diepe putten (waarin gestort wordt) kan er sprake zijn van een vergroting van de stroomsnelheden doordat het doorstroomoppervlak kleiner wordt gemaakt door het storten in de diepe putten. Aan de hand van de debieten en het doorstroomoppervlakte van enkele raaien is de raag gemiddelde stroomsnelheid berekend (Figuur 4.13). Bij de Put van Hansweert bedraagt de toename van de piekstroomsnelheid na een periode van 5 jaar met storten in de Put van Hansweert lokaal ongeveer +0.25 m/s (voor stortstrategie T02). Dit is een bovengrens van de te verwachten verandering, aangezien de beschouwde 'basis simulatie' een relatief grote sedimentatie laat zien in de diepe putten (zie beschrijving gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 4.3).





Figuur 4.13 Maximale en raai gemiddelde ebb- en vloedsnelheid (per stortstrategie) in de Westerschelde voor de dwarsraaien R1 t/m R11 (zie bovenste plot). Linker plot : ebbsnelheid; Rechter plot : vloedsnelheid.

#### 4.6 Morfologische impact

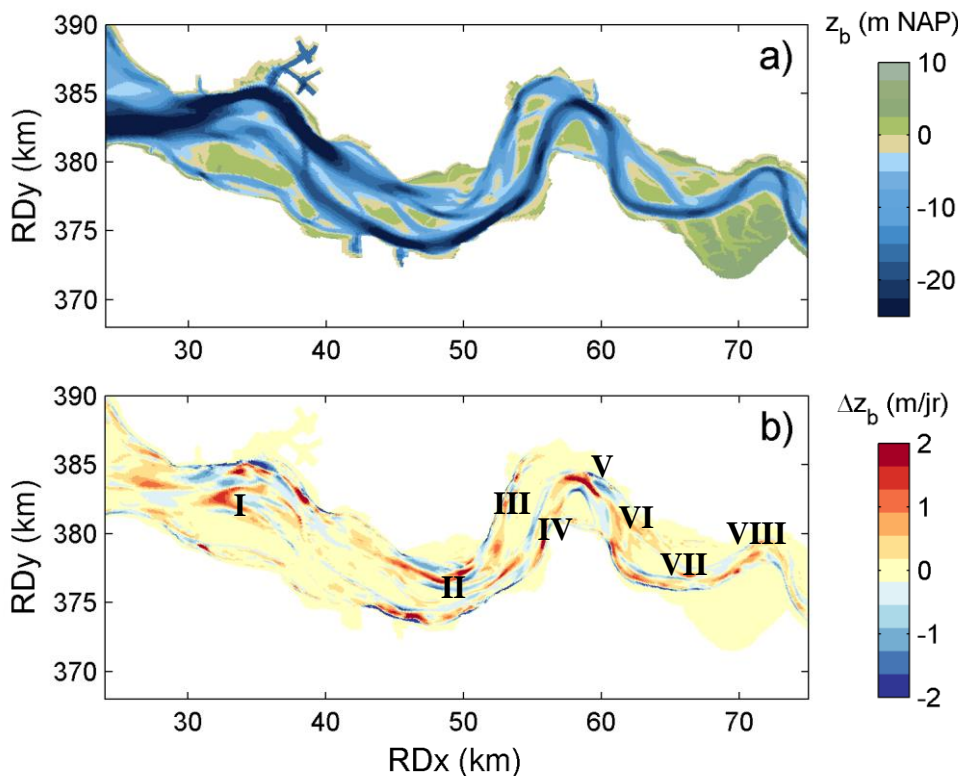
De morfologische impact van elk van de stortstrategieën (Paragraaf 4.2) is onderzocht met het afgeknipte NeVla model (Vroom et al., 2015; Schrijvershof & Vroom, 2016) door de impact op de morfologie te vergelijken met het voortzetten van de huidige stortstrategie (T01). De volgende aspecten zijn hierin geanalyseerd:

- Autonome trends in de morfologie van de Westerschelde en weergave in het numerieke model (Paragraaf 4.6.1)
- de mesoschaal morfologie (i.e. 100 m tot 5 km vanaf stortlocatie; Paragraaf 4.6.2)
- Grootschalige sedimentbalans van de macro-cellen van de Westerschelde (~10 km compartimenten; Paragraaf 4.6.3)

#### 4.6.1 Autonome ontwikkeling mesoschaal morfologie

Een eerste vraag die gesteld moet worden is wat de natuurlijke dynamiek is van de Westerschelde (over een periode van 5 jaar). En in welke mate deze gereproduceerd kan worden met de numerieke modellen.

In Figuur 4.14 worden de gemodelleerde autonome bodemveranderingen in de Westerschelde (gemiddelde over een vijfjarige periode) weergegeven voor de referentie strategie met bagger- en stort activiteiten voor de periode 2011 t/m 2014 (T01), zoals berekend met het basismodel met een werkelijk gemeten initiële bodem. Zichtbaar is dat aanzienlijke bodemveranderingen plaats vinden als gevolg van 1) de natuurlijke processen, 2) de bagger- en stortstrategie en 3) het inspelen van het model. Met name in de bochten van de vaargeul zijn de bodemveranderingen groot (i.e. meer dan 2 m per jaar).



Figuur 4.14 Initiële bathymetrie van de Westerschelde én de autonome gemodelleerde veranderingen van de bodem voor de referentie strategie met bagger- en stort activiteiten voor de periode 2011 t/m 2014 (T01).

#### Vergelijking met historische trends in bodemveranderingen

De gemodelleerde bodemveranderingen voor strategie T01 zijn van vergelijkbare grootte als de veranderingen in bodemhoogte in de gemeten bodems voor de periode tussen 2011 en 2014 (zie Figuur 2.10). De belangrijkste geobserveerde trends in de bodemveranderingen worden in het model weergegeven, alhoewel de snelheid van de veranderingen op sommige plaatsen kan afwijken van de werkelijke snelheid. Dit betreft bijvoorbeeld een iets snellere aanzanding ter plaatse van de Spijkerplaat (I). Het patroon van sedimentatie aan de zuidelijke en westelijke zijde van de Spijkerplaat lijkt op de veranderingen in de gemeten bodems. Tevens wordt de erosie in het middendeel en oostzijde van deze plaat

gereproduceerd. Aan de noord-oostzijde van de drempel van Borssele vindt zowel in het model als in de metingen sedimentatie plaats (en zuid-west zijde van Put van Borssele).

Binnen Macrocel 3 is het oostelijke deel van de Everingen (II) morfologisch zeer actief, wat ook volgens het model zo is. De geul van de Everingen verplaatst hier in zuidelijke richting. In het model is echter sprake van enige mate van opvulling en verschuiving van de Put van Terneuzen en Inloop van Ossenissee (i.e. in zuidelijke richting) welke in de data minder prominent aanwezig is. Verwacht wordt dat deze verschuiving in werkelijkheid verhinderd wordt door harde lagen of constructies. Door de steilheid van de geulwand lijken deze veranderingen echter groter dan ze zijn, aangezien de absolute verschuiving beperkt is (order enkele tientallen meters).

Het patroon en de mate van opvulling van het Middelgat (III), alsmede de verdieping van de Overloop van Hansweert, zijn zowel in de data als in het model zeer vergelijkbaar. Merk op dat zowel in de meetdata als het model sprake is van aanzanding op de geulwand van het Gat van Ossenissee (IV) als gevolg van stortactiviteiten.

Aan de noordoost zijde van de oostelijke Plaat van Ossenissee (V) vindt, zowel in het model als in de metingen, accumulatie van sediment plaats waardoor het plateau van deze plaat naar het Noorden uitbouwt (onder MSL -5m), terwijl deze plaat zich rond MSL terugtrekt naar het Zuiden. Deze verandering is echter sterker aanwezig in het model dan in werkelijkheid. Tevens is er in het model sprake van aanzanding in de Put van Hansweert welke niet in die mate wordt waargenomen in de bathymetrische metingen. Verwacht wordt dat dit te maken heeft met initiële aanpassing van de modelbodem aan de opgelegde hydrodynamische condities. Dit zorgt voor een eenmalige aanpassing (i.e. inspelen) van de bathymetrie. Dit geeft aanleiding om tevens een start modelbodem te gebruiken welke zodanig is dat dit effect wordt gecompenseerd (zie 'ingespeelde bodem' in de gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 4.3). Wat tevens opvalt is dat er sprake is van een kleine noordwaartse verschuiving van de Put van Hansweert, welke in werkelijkheid verhinderd wordt door harde lagen of constructies. Verwacht wordt dat de invloed van deze verschuiving op de evaluatie van stortstrategieën over de gemodelleerde periode zeer beperkt zal zijn.

Binnen Macrocel 5 wordt de aanzanding van de platen van Walsoorden en Schaar van Waarde gereproduceerd, alhoewel de mate van aanzanding iets groter is dan in de metingen (VI). Verwacht wordt dat dit gerelateerd is aan een relatief grote beschikbaarheid van zand in het model vanuit het oostelijke deel van de Put van Hansweert. De verlegging van de bovenstroomse zijde van de Schaar van Valkenisse (VII) wordt in het model minder sterk gereproduceerd, maar is naar verwachting niet zo belangrijk voor de bagger- en stortvolumes. Relevanter is het verondiepen en de zuidelijke migratie van het Zuidergat (westelijk van VII) welke in het model aanwezig zijn, maar niet in de metingen. In feite betreft het hier het naar buiten migreren van de buitenbocht, welke in de praktijk in sterkere mate wordt verhinderd door harde lagen in de bodem en de aanwezigheid van constructies. Dit gedrag is vergelijkbaar met de gemodelleerde ontwikkeling van andere bochten in de Westerschelde (o.a. Inloop van Ossenissee).

Ter hoogte van het Nauw van Bath (VIII) is in het model sprake van een verondieping van de vaargeul en lichte noordwaartse migratie van de geul, terwijl in de metingen sprake is van beperkte aanzanding van de geulwand aan de noord-west zijde van de vaargeul én lichte erosie van de binnenbocht. Het model voorspelt tevens aanzanding aan de zuidzijde van de Overloop van Valkenisse en de Schaar van de Noord, terwijl in de metingen alleen een

verhoging van de bodem te zien is aan de noord-west zijde van het Nauw van Bath (tot 2 m/jr) als gevolg van het storten van sediment op de geulwand in vak SH61.

Op basis van het voorafgaande mag gesteld worden dat het model de belangrijkste geobserveerde bodemveranderingen reproduceert. De snelheid van veranderingen kan op sommige locaties echter verschillen met de observaties (i.e. in de meeste gevallen iets groter). Dit is met name het geval voor 1) de diepe putten welke in het model te veel opvullen, 2) bochten welke de neiging hebben naar buiten te migreren en 3) een neiging van het model om enkele platen (de Spijkerplaat, Schaar van Waarde en Plaat van Walsoorden) in hogere mate te laten sedimenteren.

Bovenstaande bevindingen geven aan dat het basismodel (met gemeten bathymetrie) een adequate weergave geeft van de bodemveranderingen in de Westerschelde. De verschillen in snelheid waarmee processen plaats vinden, alsmede de neiging van de geulen om ter plaatse van de bochten naar buiten te migreren, worden over de beschouwde tijdsperiode nog niet gezien als van grote invloed op de resultaten. Wel dient er bij het basismodel rekening gehouden te worden met het opvullen van de putten waardoor sediment mogelijk minder mobiel is. Om deze reden zou de basis-simulatie als een ondergrens gezien kunnen worden voor de verspreiding van sediment vanuit de diepe putten naar de omgeving.

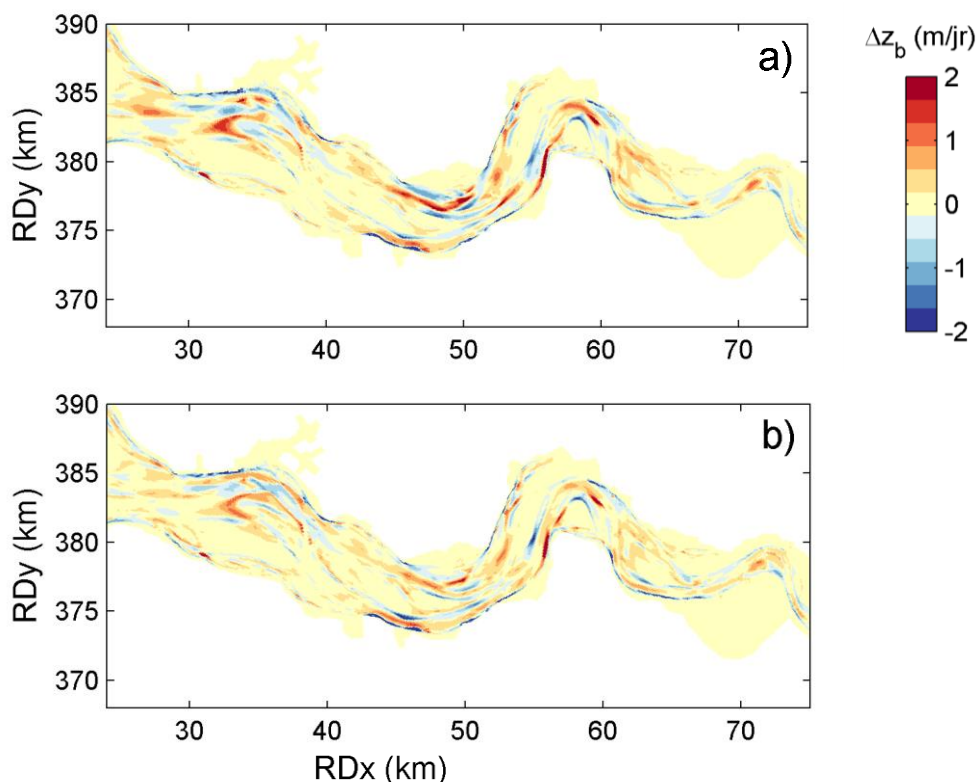
### *Gevoeligheidsanalyses*

Om de gevoeligheid van uitkomsten voor de modelopzet te verkennen is er voor gekozen om ook gebruik te maken van twee aangepaste model-opzetten, welke een indicatie kunnen geven van de bovengrens van de uitkomsten (zie gevoeligheidsanalyses in Paragraaf 4.3). Dit betreft een gemodelleerde startsituatie met (deels) opgevulde putten of gegradieerd sediment en initiële bodemsamenstelling. Beide modelopzetten worden gebruikt om de impact van de stortstrategieën op meso- en macroschaal morfologie te onderzoeken, alsmede de invloed op het onderhoudsbaggerwerk.

Verwacht wordt dat een aanpassing/verhoging van de initiële gemodelleerde bodem in de putten van de Westerschelde zal zorgen voor een betere weergave van het gedrag ter plaatse van de putten (i.e. minder opvulling) waardoor eventuele re-suspensie van gestort materiaal in deze diepe putten realistischer wordt. Door het (deels) opvullen van de putten zal de hydrodynamische forcering namelijk vergroot worden, waardoor sediment in mindere mate zal blijven liggen in de putten. In de berekende morfologische verandering voor een situatie met (deels) opgevulde putten (zie Figuur 4.15a; voor T00) valt te zien dat de sedimentatie in de diepe putten aanzienlijk gereduceerd wordt (i.e. in veel gevallen met factor 2 of meer), terwijl de grootschalige patronen van sedimentatie en erosie op andere locaties niet veel veranderen. Hierdoor zal de schatting van de verplaatsing van sediment van de putten naar de drempels -welke voor het vaargeulonderhoud van groot belang is- naar verwachting verbeteren.

De grootte van bodemveranderingen (sedimentatie en erosie op platen en geulen) wordt daarnaast waarschijnlijk sterk beïnvloed door de beschikbaarheid en eigenschappen van het sediment. In het basismodel is alleen sprake van uniform sediment en eventuele onbeschikbaarheid ter plaatse van (voor-gedefinieerde) harde lagen. In een model met gegradieerd sediment kan meer rekening gehouden worden met de ruimtelijke variabiliteit van het bodemsediment (i.e. grover sediment op de platen en fijner in de geulen). Dit is omdat het lokale sediment beter aansluit bij de werkelijke situatie, en daarom beter bij de lokale hydrodynamica. Verwacht wordt dat de sedimenttransporten hierdoor realistischer zijn. Uit een analyse van de gemodelleerde bodemveranderingen voor een model met gegradieerd

sediment (Figuur 4.15b) komt naar voren dat de jaargemiddelde bodemveranderingen kleiner zijn dan voor het basismodel. Dit kan deels verklaard worden doordat het sediment in de vaargeul in werkelijkheid relatief grof is (i.e. gemiddeld tot grof zand) en daarmee minder mobiel dan het zand dat in het basis model (zonder gegradeerd sediment) wordt gerepresenteerd. Daarnaast verspreidt het gegradeerde sediment zich over een groter gebied dan sediment met uniforme eigenschappen, aangezien de fijnere sedimentfracties veel mobieler zijn dan grovere sediment fracties. Als gevolg is sprake van een gelijkmatiger patroon van erosie- en sedimentatie in de simulaties met gegradeerd sediment. Wat de invloed is van het verschillende verspreidingsgedrag van de grofste en fijnste fracties op het terugvoeren van sediment naar de locatie van drempels is a priori echter lastig aan te geven. Het meenemen van de gradatie van het sediment kan zowel hogere als lagere netto transporten veroorzaken.



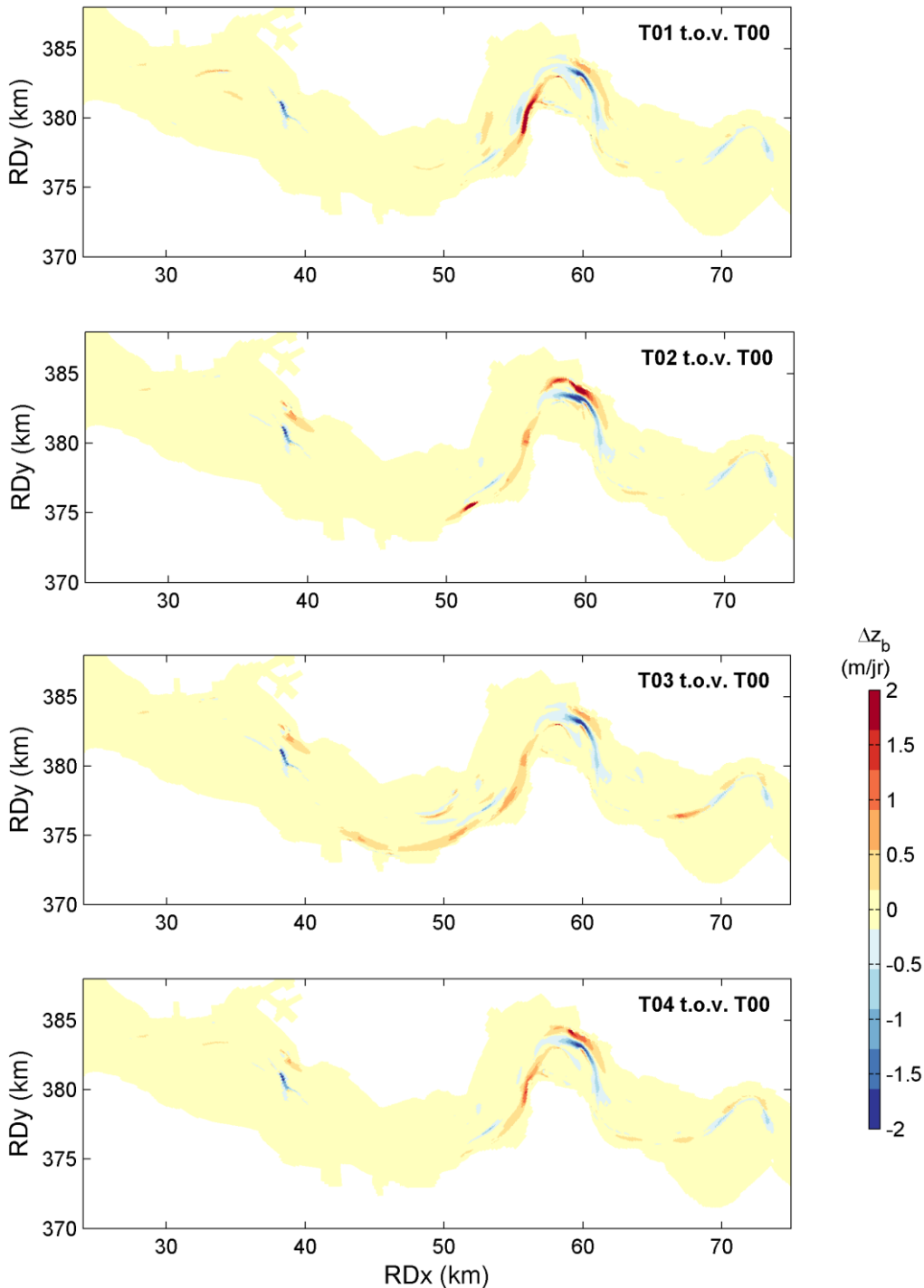
Figuur 4.15 Autonome gemodelleerde veranderingen van de bodem voor de referentie strategie met bagger- en stort activiteiten voor de periode 2011 t/m 2014 (T01). Model met opgevulde putten (a) en met gegradeerd sediment en opgevulde putten (b).

De grootschalige patronen van erosie- en sedimentatie (in alle modellen) zijn vergelijkbaar met de geobserveerde veranderingen. Verwacht wordt dat de gevoeligheidsanalyses met de opgevulde putten (met of zonder gegradeerd sediment) een realistischer schatting geeft van de mobiliteit van het sediment, welke in de praktijk voor kan komen.

#### 4.6.2 Invloed van stortstrategieën op de mesoschaal morfologie

Een belangrijke vraag die met betrekking tot de stortstrategieën gesteld kan worden is “Waar het gestorte sediment zich naar toe beweegt” en “Of de morfologie van de omgeving van het

stortgebied wordt beïnvloed”. Ten behoeve hiervan is de relatieve verandering van de morfologie van de Westerschelde als gevolg van elk van de stortstrategieën T01 t/m T04 uitgezet ten opzichte van de situatie zonder bagger- of stortstrategie (T00). De impact op de morfologie van de Westerschelde, zoals gemodelleerd met het basismodel, wordt weergegeven in Figuur 4.16.



Figuur 4.16 Relatieve invloed van de stortstrategieën (T01 t/m T04) op de mesoschaal morfologie van de Westerschelde, zoals berekend met het basismodel voor de autonome situatie zonder bagger- of stort activiteiten (T00).

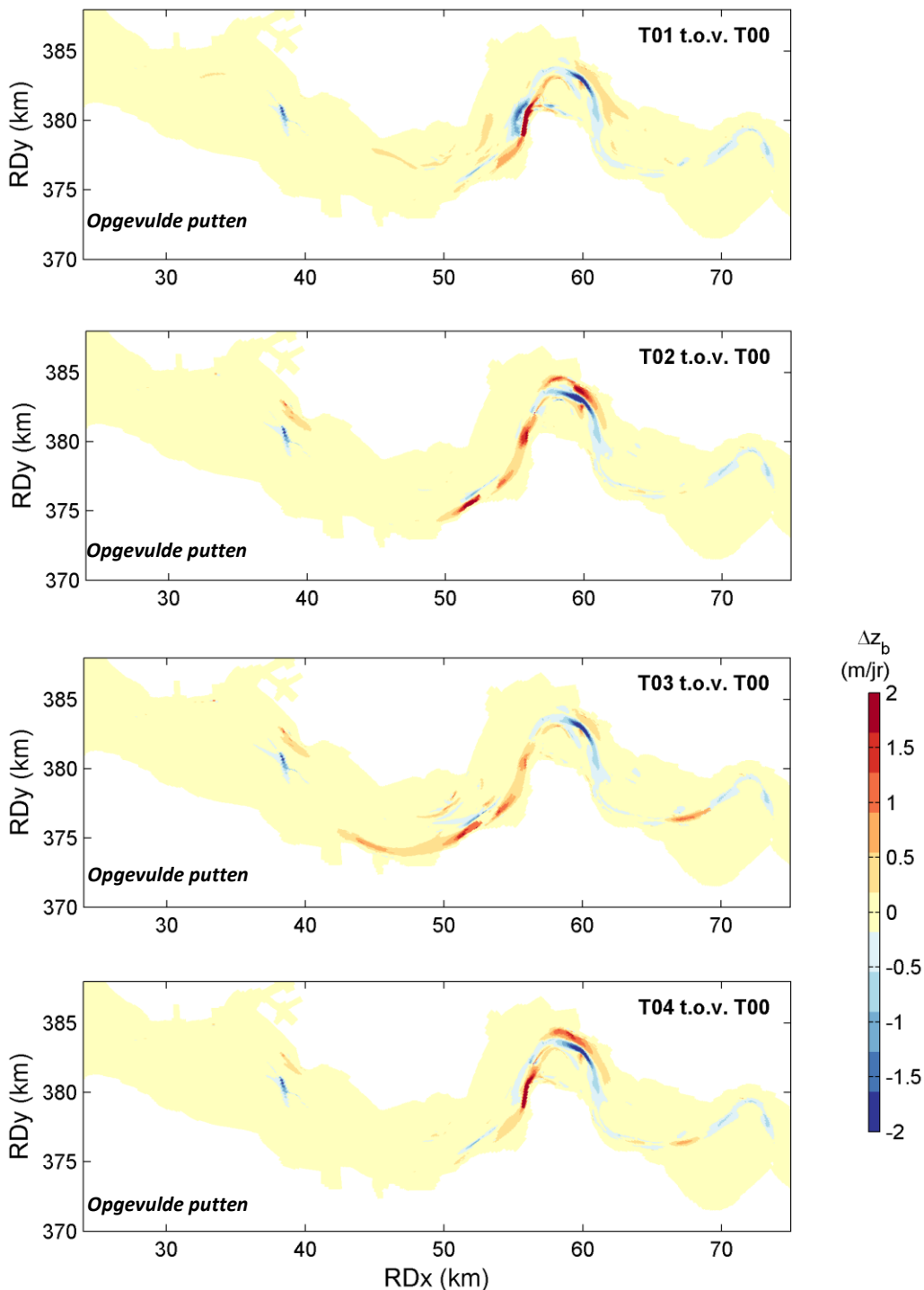
### *Invloed bagger- en stortstrategieën*

Ter plaatse van de bagger- en stortlocaties is een duidelijk impact te onderscheiden op de mesoschaal morfologie (baggerlocaties in blauw en stortlocaties in rood). Dit betreft hoogteveranderingen welke lokaal op de bagger- of stortlocatie enkele meters per jaar kunnen bedragen en voor het direct aanliggende gebied tot 1 m/jr. De locaties waarop wordt gebaggerd of gestort zijn duidelijk te onderscheiden. Opvallend is ook dat in alle gemodelleerde strategieën hoofdzakelijk gebaggerd wordt bij de Drempel van Borssele, Drempel van Hansweert en het Nauw van Bath. Strategie T01 (huidige strategie) wordt gekenmerkt door een aanzienlijke storting in het Gat van Ossensisse, terwijl dat bij de strategieën T02 en T03 in de dichtstbijzijnde of westelijke diepe putten plaats vindt (i.e. ofwel Put van Hansweert of Gat van Ossensisse en Put van Terneuzen). T04 laat een meer gespreide impact zien welke overeenkomt met de verwachting voor een hybride aanpak (i.e. 50% T01 en 50% T02).

De verspreiding van gestort materiaal vindt met name plaats in de lengterichting van de hoofdgeul als gevolg van getijdestroming. Afhankelijk van de locatie in de Westerschelde is het invloedgebied van de bagger- en stortlocaties na vijf jaar ongeveer 1 tot 5 km uitgebreid in beide richtingen. Door de tijd heen groeit dit invloedgebied initieel snel met 0.5 tot 2 km per jaar waarna de snelheid van de ontwikkeling afneemt. De absolute impact van het storten en baggeren op de bodemhoogteverandering zal op grotere afstand echter steeds kleiner worden. Opgemerkt wordt dat de Westerschelde een aanzienlijke natuurlijke variabiliteit kent van de morfologie (zie ook Figuur 4.14).

### *Gevoeligheidsanalyse*

De gevoeligheidsanalyses middels de modellen met opgevulde putten en/of gegradeerd sediment geven vergelijkbare resultaten als het basismodel (Figuur 4.17 en Figuur 4.18). Het invloedgebied is echter wel vergroot in de situatie met opgevulde putten ten opzichte van het basismodel (i.e. orde 3 km vanaf de stortlocatie in plaats van over 2 km lengte). Dit is het gevolg van de grotere mobiliteit van het sediment in de opgevulde putten, aangezien het gestorte materiaal makkelijker wordt gemobiliseerd door de lokaal hogere stroomsnelheid. Tevens dient er door deze vergrote mobiliteit ook meer sediment te worden gebaggerd wat leidt tot een groter stortvolume en grotere impact.

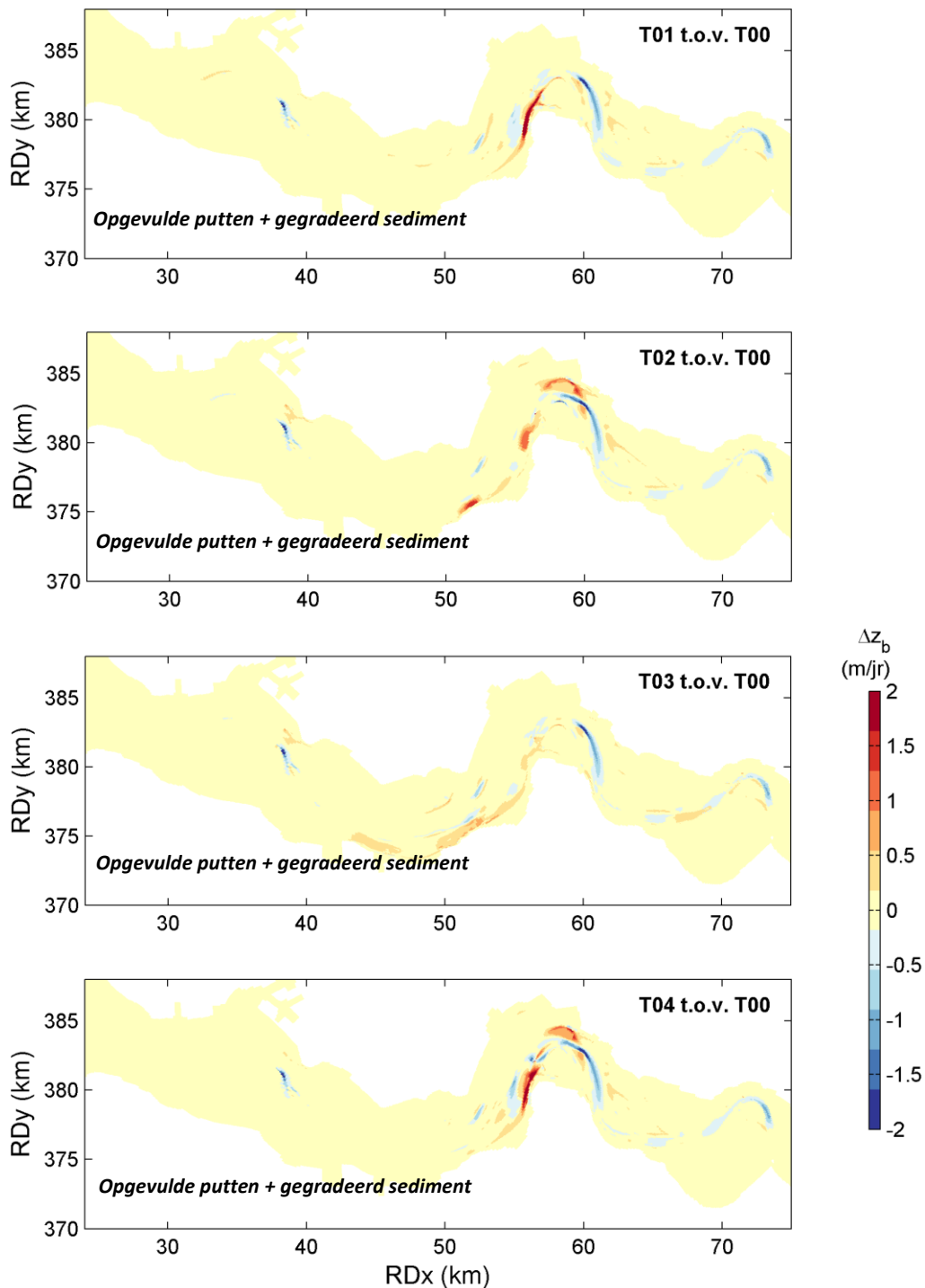


Figuur 4.17 Relatieve invloed van de stortstrategieën (T01 t/m T04) op de mesoschaal morfologie van de Westerschelde, zoals berekend met het model met opgevlude putten voor de autonome situatie zonder bagger- of stort activiteiten (T00).

Daarentegen laten de simulaties met het gegradeerde sediment afhankelijk van de locatie een kleinere of grotere invloedzone zien, maar de globale ruimtelijke verdeling van de impact is vergelijkbaar. Reden voor het verschil in verspreiding van zand is dat het gebaggerde materiaal op de drempels in werkelijkheid een andere korreldiameter heeft dan het uniforme



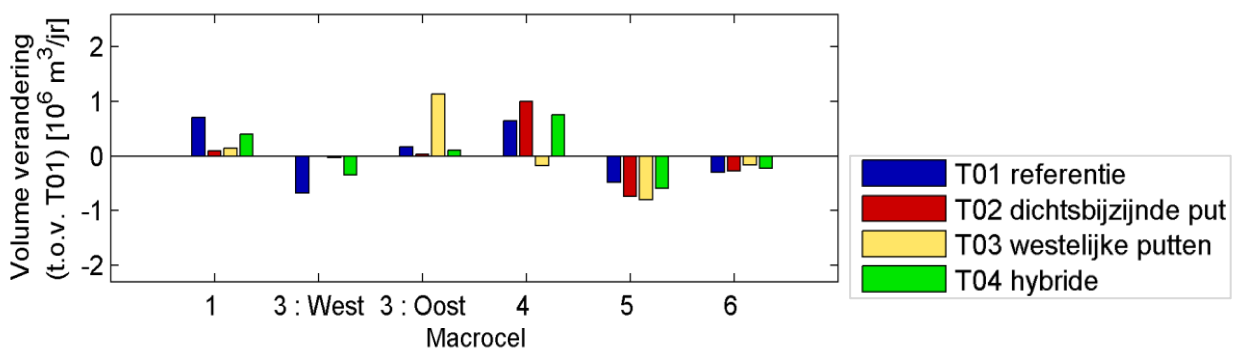
zand dat in de basis-berekening wordt gebruikt. Als gevolg daarvan kan het gebaggerde én gestorte zand in de simulaties met gegradeerd sediment meer of minder mobiel zijn. Tevens kan het verschil in mobiliteit van elk van de sediment fracties er voor zorgen dat het verspreidingsgebied van het gegradeerde sediment groter is dan van uniform sediment, waardoor de bodemveranderingen moeilijker waar te nemen zijn.



Figuur 4.18 Relatieve invloed van de stortstrategieën (T01 t/m T04) op de mesoschaal morfologie van de Westerschelde, zoals berekend met het model met gegradeerd sediment (en opgevlude putten) voor de autonome situatie zonder bagger- of stort activiteiten (T00).

### 4.6.3 Macroschaal morfologie

De invloed van de bagger- en stortstrategieën T01 t/m T04 op de grootschalige sedimentbalans is vastgesteld voor de afzonderlijke macrocellen (Figuur 4.19). Hierbij is macrocel 3 opgedeeld in een westelijk en oostelijk deel (zie Figuur 2.3). Om de invloed van de ingrepen te isoleren is het volumeverschil ten opzichte van de situatie zonder ingrepen (T00) bepaald. Opgemerkt wordt dat een verschuiving van sediment van de ene naar de andere cel niet alleen ontstaat door sediment transport als gevolg van hydrodynamische forcering (o.a. getij), maar in aanzienlijke mate ook door de wijze van verdelen van het gebaggerde zand over de stortlocaties.

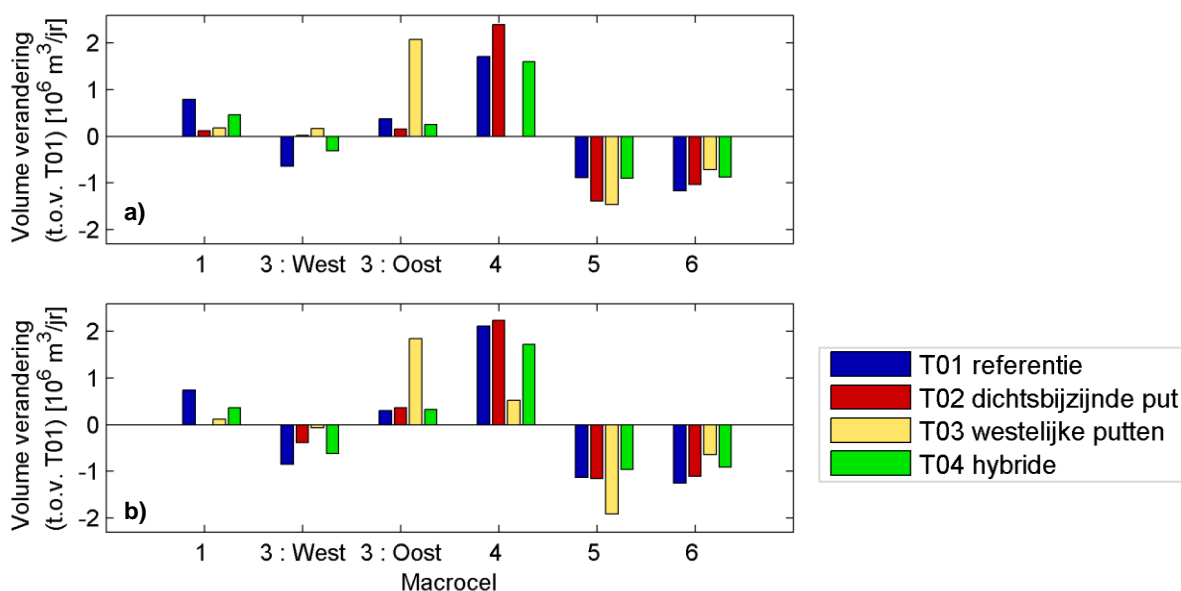


Figuur 4.19 Jaargemiddelde verandering van de volumebalans van de macrocellen van de Westerschelde voor het basismodel (ten opzichte van referentiestrategie T01).

Voor de huidige strategie (T01) wordt met het basismodel een impact van 100,000 tot 700,000 m<sup>3</sup>/jr voorspeld per macrocel (zie Figuur 4.19) welke bepaald is ten opzichte van de situatie zonder ingrepen. Voor de andere strategieën (T02 t/m T04) is de orde van grootte van de impact op de sedimentbalans iets toegenomen (tot maximaal 1 miljoen m<sup>3</sup>/jr voor Macrocel 3-oost in strategie T03). Binnen de macrocellen valt er echter wel een verschil te zien tussen de strategieën. Dit betreft:

- Strategieën T02 en T03 (en ten dele ook T04) verplaatsen geen materiaal meer van macrocel 3-west naar macrocel 1 zoals het geval is in T01. Deze strategieën storten het gebaggerde zand namelijk in een diepe put welke in dezelfde macrocel ligt (bijv. zand verplaatsing van de Drempeel van Borssele naar de Put van Borssele), terwijl de huidige strategie (T01) een deel van het gebaggerde zand van macrocel 3-west (i.e. drempeel van Borssele) naar macrocel 1 (Spijkerplaat) verplaatst.
- Strategie T03 verplaatst een deel van het gebaggerde zand naar de westelijke putten (o.a. Put van Terneuzen en Everingen Oost). Binnen macrocel 3-oost wordt daarom aanzienlijk meer zand gestort in deze strategie, wat afkomstig is uit de macrocellen 4 en 5. De impact hiervan op de macrocellen 4 en 5 is tevens duidelijk te onderscheiden.
- Strategie T02 en T03 verplaatsen meer zand naar macrocel 4 dan de referentiestrategie, aangezien er niet meer gestort wordt op de Plaat van Walsoorden en in de Schaar van Waarde. Dit betekent dat minder zand wordt vastgehouden binnen macrocel 5 (i.e. 100,000 tot 500,000 m<sup>3</sup>/jaar minder in T02 en T03).

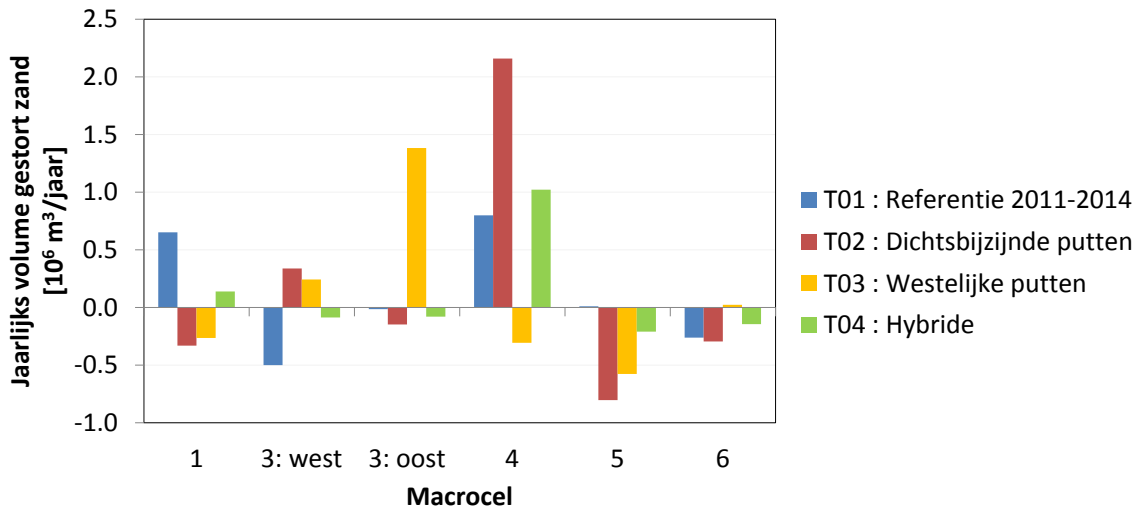
- De volumeveranderingen in Macrocel 6 zijn zeer vergelijkbaar voor elk van de strategieën. Verschillen worden bepaald door de mate waarin zand uit het Nauw van Bath lokaal wordt teruggestort in het systeem.
- De invloed van strategie T04 op de grootschalige sedimentbalans houdt, zoals verwacht, het midden tussen de strategieën T01 en T02.



Figuur 4.20 Jaargemiddelde verandering van de volumebalans van de macrocellen van de Westerschelde voor het model met opgevulde putten (a) en gegradeerd sediment met opgevulde putten (b) ten opzichte van referentiestrategie T01.

Indien gekeken wordt naar de gevoeligheid van de resultaten voor een andere modelopzet (met opgevulde putten of gegradeerd sediment; Figuur 4.20), dan is te zien dat alle modellen een vergelijkbaar ruimtelijk patroon van toe- of afname van het sedimentvolume als gevolg van de stortstrategieën laten zien (Figuur 4.19, Figuur 4.20a en Figuur 4.20b). De mate van verandering van het volume is echter duidelijk groter voor de modellen met opgevulde putten en gegradeerd sediment (orde 2 a 3x zo groot in macrocellen 4 t/m 6; vergelijk Figuur 4.20 met Figuur 4.19). De grootte van de veranderingen wordt namelijk veroorzaakt door de verspreiding van het zand én hiervoor benodigd vaargeulonderhoud wat in aanzienlijke mate wordt bepaald door de modelopzet. De gevoeligheidsanalyses met opgevulde putten en gegradeerd sediment kunnen dus worden gezien als een hogere (maar realistische) schatting van de transportcapaciteit en grootte van morfologische veranderingen.

De gelijkheid in de ruimtelijke verdeling van de impact van de stortstrategieën suggereert dat de ruimtelijke verdeling van zand in de volumebalans niet afhankelijk is van de precieze opzet van het model, maar hoofdzakelijk van het verdeelmechanisme van de stortstrategie. De grootte van veranderingen is echter wel sterk afhankelijk van de opzet van het model. Dit wordt bevestigd als een vergelijking wordt gemaakt tussen de volumeveranderingen in de macrocellen (Figuur 4.19 en Figuur 4.20) en het jaarlijks gestorte volume sediment (Figuur 4.21), waarbij een zeer grote gelijkheid van het patroon wordt gevonden. Dit betekent dat de plaats waar materiaal wordt gestort wordt zeer belangrijk is. Opgemerkt wordt dat het volume gestort materiaal groter is dan de volumeverandering van de macrocel, omdat hierin tevens het recirculeren van sediment binnen de macrocel zelf is meegenomen.



Figuur 4.21 Jaargemiddeld gestort sediment in de macrocellen van de Westerschelde voor de stortstrategieën T01 t/m T04 in het basismodel.

Op middellange tijdschaal (5 a 10 jaar) wordt de morfologische impact van de stortstrategie hoofdzakelijk bepaald door de plaatsing van het zand (i.e. varen met het gebaggerde materiaal). Het zand blijft op deze tijdschaal grotendeels binnen de macrocel waar het gestort wordt. Natuurlijke herverdeling tussen Macrocellen vindt alleen plaats wanneer een stortvak dicht bij de grens van twee macrocellen ligt. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de Inloop van Ossensisse die dicht bij de grens van Macrocel 3 en 4 ligt. Op basis van deze bevindingen kan geconcludeerd worden dat een eventuele verstoring van de grootschalige sedimentbalans relatief eenvoudig gecompenseerd kan worden door te kiezen voor andere stortlocaties (of door te schuiven met een deel van het stortmateriaal naar een andere stortlocatie).

#### 4.7 Impact stortstrategie op baggervolumes

Een belangrijke vraag voor het onderhoud van de vaargeul is in welke mate het storten in diepe putten het baggervolume beïnvloedt. Verwacht wordt dat door het storten op locaties met grote stroomsnelheden, zoals in de diepe putten, ook de recirculatie van gebaggerd sediment naar de drempels zal toenemen. Ten behoeve hiervan is daarom uit de modelresultaten het jaargemiddelde volume bepaald dat gebaggerd wordt voor elk van de stortstrategieën (Tabel 4.3). Opgemerkt wordt dat dit het baggervolume betreft voor het sediment dat bij het storten ook daadwerkelijk op de bodem van de stortlocatie terecht komt, en dus nog geen rekening houdt met andere processen die het tijdens het storten of op korte tijdschaal na het storten kunnen mobiliseren welke in Hoofdstuk 3 zijn beschreven. Aanvullend hierop is het baggervolume weergegeven dat wordt berekend met de gevoeligheidsanalyses met opgevulde putten. De invloed van gegradeerd sediment wordt hier niet afzonderlijk vermeld omdat dit een aanzienlijk kleiner effect heeft dan het opvullen van de diepe putten.

Tabel 4.3 Overzicht baggervolumes voor de beschouwde stortstrategieën

	Vaargeulonderhoud [ $10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$ ]		
	Gemeten bodem basis model (lage schatting)	Ingespeelde modelbodem (beste schatting)	Ingespeelde modelbodem & multifractie * (gevoeligheid)
<b>T01 : Referentie 2011-2014</b>	8.0	10.2	10.2
<b>T02 : Dichtsbijzijnde putten</b>	8.5	12.1	10.8
<b>T03 : Westelijke putten</b>	7.9	10.3	10.6
<b>T04 : Hybride</b>	8.2	10.8	10.5

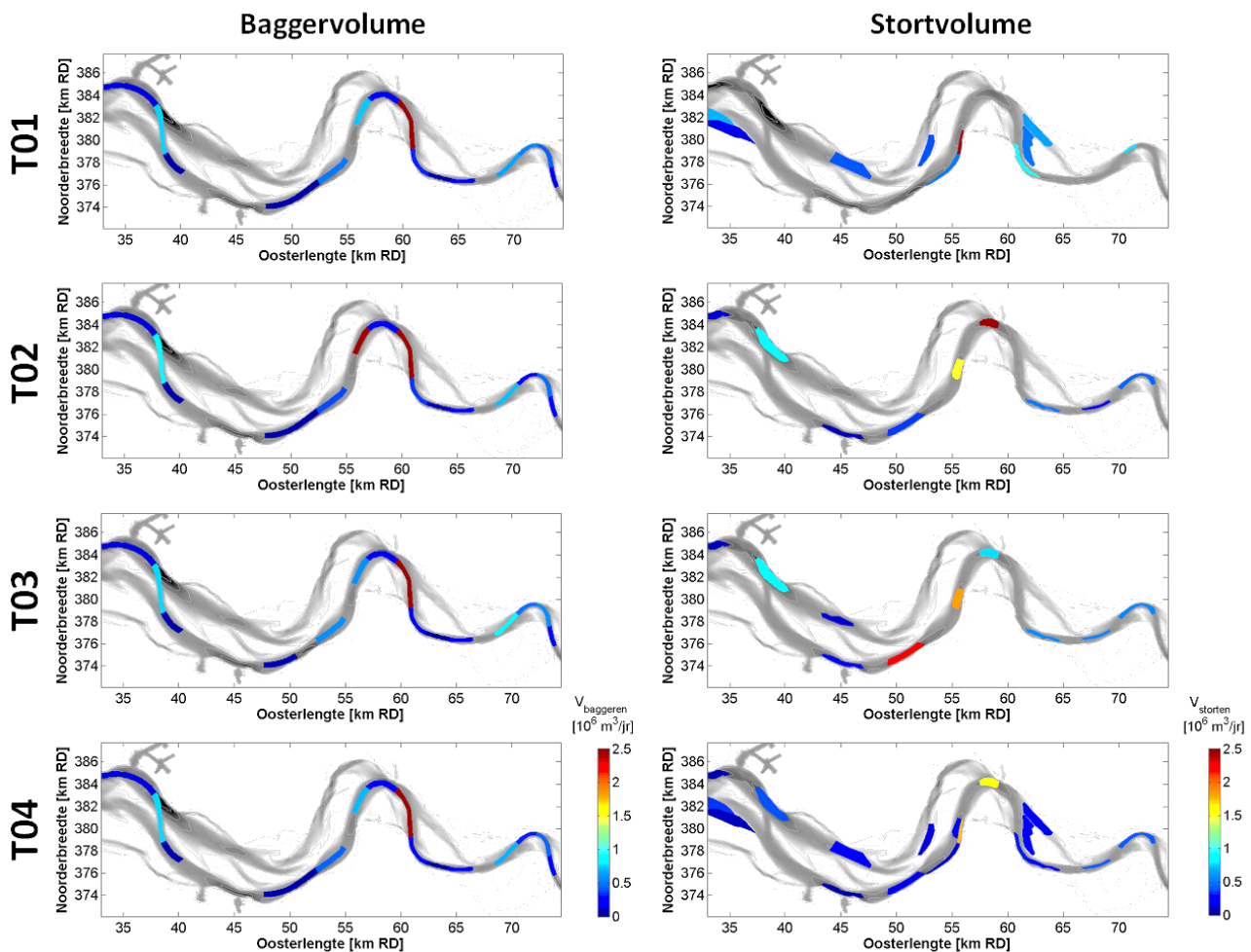
\* Dit betreft een bepaling van het onderhoudsvolume op basis van de simulatie met ingespeelde bodem en gegradeerd sediment (5 sediment fracties).

Het gemodelleerde volume van het vaargeulonderhoud bedraagt 8 tot 10 miljoen  $\text{m}^3/\text{jr}$  voor de huidige stortstrategie (T01 : historisch over de periode 2011-2014). Hierbij dient rekening gehouden te worden met de bovengrens van het baggerbezwaar die voortkomt uit de gevoeligheidsanalyses, aangezien hierin de morfologie van de diepe putten stabiel is.

Het kiezen voor een strategie waarbij de dichtsbijzijnde diepe putten worden gebruikt als stortlocatie (T02; o.a. Put van Hansweert) resulteert in een 10% tot 20% groter baggerbezwaar (tot 12 miljoen  $\text{m}^3/\text{jr}$  na 5 jaar). Het volume van het baggerwerk zal voor T02 in het eerste jaar echter vergelijkbaar zijn met het huidige baggerbezwaar, aangezien er eerst een zekere opvulling van de putten plaats zal vinden alvorens het transport naar de drempel hoger wordt. Op lange termijn (meer dan 10 jaar) zal de recirculatie van gebaggerd sediment mogelijk groter zijn dan de berekende 10% tot 20%, aangezien de putten verder opgevuld zullen zijn waardoor de transportcapaciteit toeneemt.

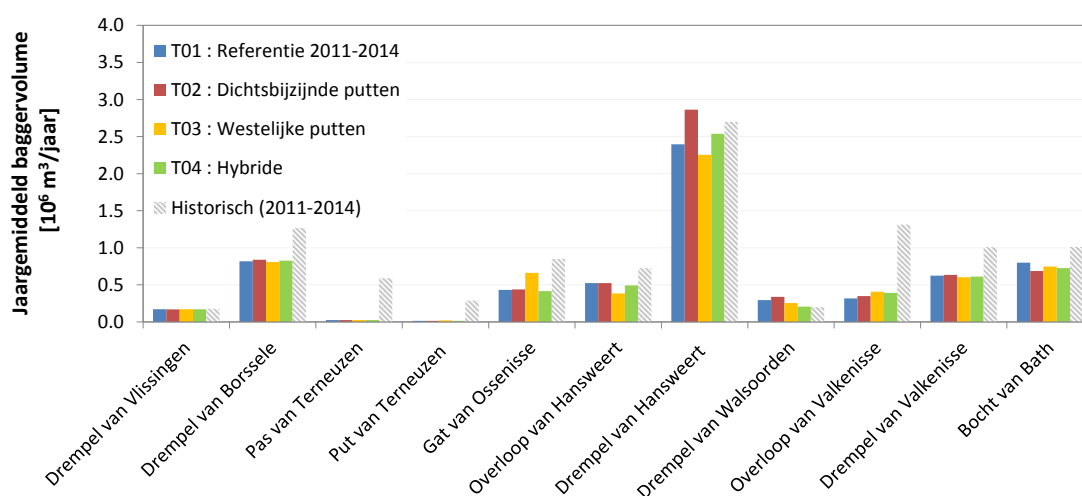
Het storten in de meer westelijke putten (T03; o.a. Put van Terneuzen en Inloop van Ossensisse) resulteert in een vergelijkbaar baggerbezwaar als de bestaande strategie. Indien gekozen wordt voor het spreiden van het storten over zowel de huidige locaties als diepe putten (T04) dan is tevens sprake van een beperkte toename van het vaargeulonderhoud (circa 5 tot 10%).

De belangrijkste locaties voor het vaargeulonderhoud zijn de Drempel van Hansweert en Drempel van Borssele die heel duidelijk naar voren komen als het baggervolume wordt gevisualiseerd (Figuur 4.22). Daarnaast valt op dat er enig baggerwerk is in de Overloop van Ossensisse voor de strategie met storting in de Put van Hansweert en Gat van Ossensisse (T02). Voor het storten valt op dat het storten op de geulwand van het Gat van Ossensisse voor strategie T01 erg belangrijk is, terwijl de Put van Hansweert voor T02 de belangrijkste stortlocatie is. Strategie T03 spreidt het gestorte materiaal tevens over de meer westelijke putten (i.e. Put van Terneuzen en Inloop van Ossensisse).



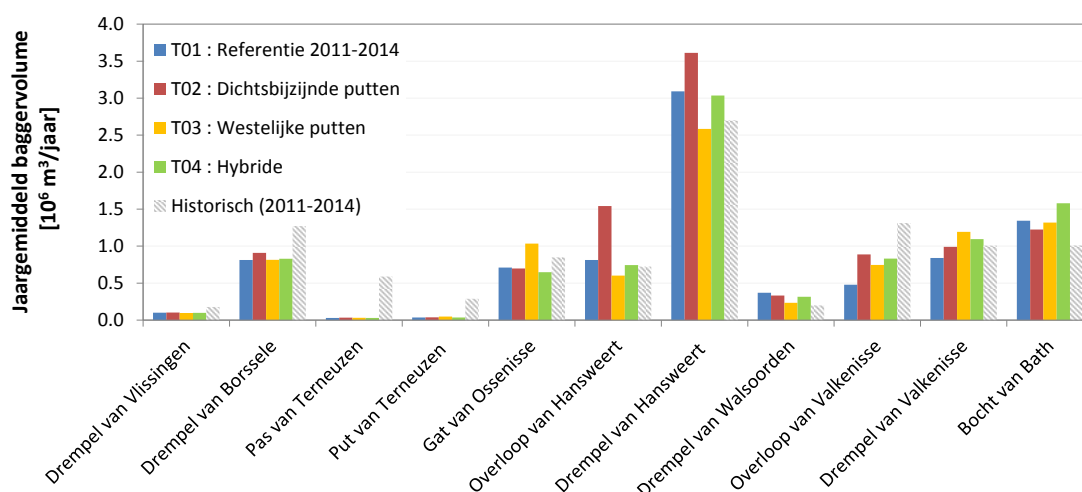
Figuur 4.22 Overzicht van bagger- en stortlocaties met bijbehorende stortvolumes voor strategie T01 t/m T04 op basis van modelresultaten voor het 'opgevlude putten' model (voor jaar 2). Deze figuren zijn bedoeld om een indicatief overzicht te geven van de locaties waar gestort en gebaggerd wordt.

Een overzicht van de baggervolumes per locatie laat zien dat deze volumes voor de referentiestrategie (T01) redelijk goed aansluiten bij de historische baggervolumes over de periode 2011 t/m 2014 (Figuur 4.23). Op de belangrijkste locatie (Drempel van Hansweert) voorspelt het model een realistisch onderhoudsvolume. Echter op andere locaties is een onderschatting aanwezig. Dit geldt in het bijzonder voor de westelijke onderhoudslocaties (met name Pas van Terneuzen en Put van Terneuzen), alhoewel deze zeer beperkt bijdragen aan het totale vaargeulonderhoudsbaggerwerk. Opgemerkt dient te worden dat de volumes gepresenteerd zijn voor het 5e jaar, aangezien er in het er initieel lage baggervolumes worden berekend.



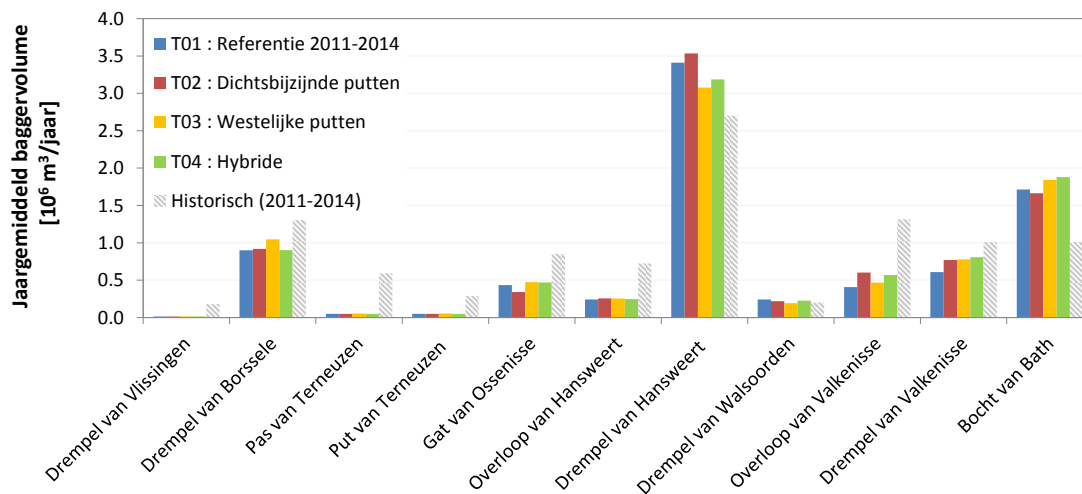
Figuur 4.23 Overzicht van baggervolumes per locatie voor strategie T01 t/m T04 voor het basismodel.

Indien gebruik wordt gemaakt van een bodem met kunstmatig opgevulde putten (Figuur 4.24) dan komt het baggerbezwaar voor de referentiestrategie (T01) ook op veel andere locaties goed overeen met historische baggervolumes over de periode 2011 t/m 2014. De gereduceerde waterdiepte in de putten zorgt lokaal voor hogere stroomsnelheden, waardoor het sedimenttransport naar de drempels realistischer is. Dit suggereert dat de onderschatting van het onderhoudsvolume in het basismodel gerelateerd is aan het morfologisch gedrag van de putten (i.e. te sterk sedimenteren van de putten in het basismodel).



Figuur 4.24 Beste schatting van baggervolumes per locatie voor strategie T01 t/m T04 voor het model met opgevulde putten.

Gevoeligheidssimulaties met gegradeerd sediment laten een vergelijkbaar beeld zien (Figuur 4.25), echter met een aanzienlijk grotere overschatting ter plaatse van de Drempel van Hansweert en Nauw van Bath. De vergelijkbaarheid van de berekende volumes suggereert echter dat resultaten niet sterk gevoelig zijn voor het verschil in transport van de korrelgroottefracties.



Figuur 4.25 Gevoeligheidsanalyse van de baggervolumes per locatie voor strategie T01 t/m T04 voor het model met gegradeerd sediment.

Als een beoordeling gemaakt moet worden van de weergave van de werkelijkheid door de modellen, dan kan op basis van deze gegevens het model met opgevulde putten als het meest realistisch aangemerkt worden. Dit betekent dat eerder rekening gehouden zal moeten worden met de hogere baggervolumes zoals berekend in Tabel 4.3 dan met het berekende onderhoud voor het basismodel. Verder dient als overweging in de beoordeling meegenomen te worden dat het berekende onderhoudsvolume voor de strategie met westelijke putten (T03) mogelijk enigszins wordt onderschat als gevolg van de beperkte reproductie van de onderhoudsvolumes ter plaatse van de Drempel van Terneuzen. Ten behoeve hiervan is het daarom aan te bevelen om rekening te houden met een additioneel onderhoudsvolume dat gelijk is aan de historische baggervolumes voor de Pas en Put van Terneuzen. Opgemerkt wordt dat dit tevens een locatie is waar relatief veel silt en fijn zand sedimenteert (Plancke, 2018).

Opgemerkt wordt verder dat bovenstaande analyse het transport beschouwd van het gestorte materiaal dat ook daadwerkelijk op de bodem van de stortlocatie terecht komt, en dus nog geen rekening houdt met andere processen die het tijdens het storten of op korte tijdschaal na het storten kunnen mobiliseren welke in Hoofdstuk 3 zijn beschreven. Dit initiële verlies zal voor de huidige strategie (T01) beperkt zijn in verband met beperkte waterdiepte op de stortlocaties. Voor de strategieën met stortlocaties in diepe putten (i.e. strategie T02 en T03) dient mogelijk echter rekening gehouden te worden met een verhoogde recirculatie van sediment naar de drempels als gevolg van het initiële verlies van zand op de stortlocaties in de diepe putten.

#### 4.8 Levensduur van diepe putten

Het storten van sediment in de diepe putten van de Westerschelde zorgt voor een geleidelijke opvulling van de putten. De mate waarin dit gebeurt hangt af van de volumes die gestort worden én de snelheid waarmee het sediment uitgeruimd wordt. Indien deze volumes kleiner zijn dan de beschikbare transportcapaciteit naar een dichtbijgelegen drempel zal er slechts zeer beperkte aanzanding zijn, terwijl er bij een overschrijding van de transportcapaciteit minder zand afgevoerd kan worden dan beschikbaar komt door storten in desbetreffende diepe put. In het laatste geval zal sprake zijn van opvulling. Naarmate de put verder opvult zal de transportcapaciteit echter ook toe gaan nemen.



Het model voorspelt een opvulling van de Put van Hansweert na 4 tot 6 jaar voor stortstrategie T02, waarna het sediment op sommige plaatsen in de Put van Hansweert de grens voor het baggeren (op NAP -17.2m) heeft bereikt. Verwacht wordt echter dat de levensduur van het storten in de diepe putten in de praktijk aanzienlijk groter is, omdat er in werkelijkheid meer transportcapaciteit is in de diepe putten dan voorspeld wordt door het model (uitgaande van de werkelijk gemeten bodem in het basismodel).

Op basis van de bergende capaciteit van de Put van Hansweert (circa 11 Miljoen m<sup>3</sup> onder het niveau waarop gebaggerd wordt; i.e. NAP -17.2m), de transportcapaciteit vanuit de Put van Hansweert (van circa 4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) en het volume gestort sediment (4 tot 6 miljoen m<sup>3</sup>/jaar) kan een inschatting worden gegeven van de opvulling van de put. De levensduur bedraagt dan tenminste 5 jaar. Mogelijk is deze stortlocatie aanzienlijk langduriger beschikbaar. Aangeraden wordt om de volumeontwikkeling van de diepe putten (waarin wordt gestort) per kwartaal te monitoren op basis van bodemmetingen.



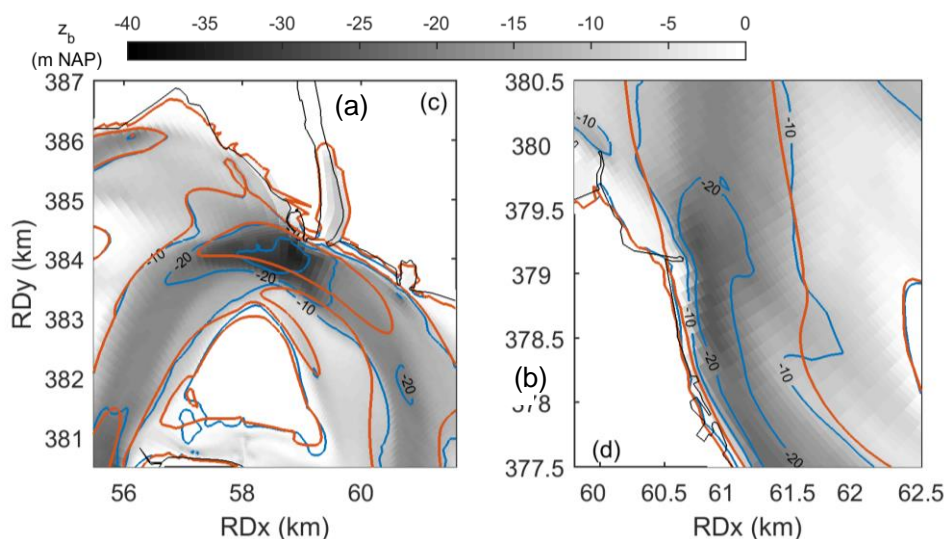
## 5 Detailmodellering diepe putten

### 5.1 Introductie

De bagger- en stortstrategieën die onderzocht zijn in deze rapportage zijn gericht op het storten van sediment in voornamelijk de diepere delen van de Westerschelde. Enkele van deze diepe delen betreffen zeer diepe putten, zoals de Put van Borssele, de Put van Terneuzen en de Put van Hansweert (zie Appendix A). Dit hoofdstuk dient inzicht te verschaffen in de reproductie van het morfologisch gedrag van gestort sediment in diepe putten van de Westerschelde (i.e. tussen model en werkelijkheid).

#### Reproductie morfologische verandering (bij ingespeelde putten)

Uit de analyses in Hoofdstuk 4 blijkt dat deze diepe putten in het model relatief te veel opvullen én dat de geometrie van de diepe put aanzienlijk meer van vorm veranderd (langgerekt in de lengte van de vaargeul; zie Figuur 5.1) dan in werkelijkheid wordt waargenomen. Berekeningen van de stortstrategieën met het basismodel laten zien dat dit invloed heeft op de berekende volumes van het vaargeulonderhoud (zie Figuur 4.23) en de morfologische impact van het storten in deze putten (zie Figuur 4.17). In de huidige studie naar verschillende stortstrategieën (Hoofdstuk 2) wordt dit ondervangen door gebruik te maken van een ingespeelde bodem, waarbij de putten gedeeltelijk zijn opgevuld (i.e. verondiepte put op basis van modelsimulatie na 10 jaar). Voor deze aangepaste bodem wordt een baggerbezwaar gevonden dat zeer vergelijkbaar is met het baggerbezwaar in de periode 2011 t/m 2014 (voor de referentiestrategie T01). Om meer vertrouwen te krijgen in de validiteit van deze aanpak is een modelsimulatie gemaakt van de morfologische verandering na een proefstorting in de Put van Hansweert, waarbij zowel het model met als zonder opgevulde putten wordt gebruikt (zie Paragraaf 5.2). Gekeken wordt in hoeverre de erosie van de proefstorting in de eerste maanden na het storten kan worden gereproduceerd. Dit betreft dus de morfologische verandering na eventuele initiële verliezen (die in Hoofdstuk 3 zijn beschreven).



Figuur 5.1 Ontwikkeling van diepe putten in de modelberekeningen voor de (a) Put van Hansweert en (b) Bocht van Walsoorden. Interval van de dieptecontouren is 10 m. De rode lijnen representeren de gemodelleerde bodem (na 5 jaar) terwijl de gemeten bodem in blauwe contourlijnen wordt weergegeven.

### **Invloed geologie op geometrische vormverandering van diepe put van Hansweert**

De invloed van de verandering in geometrie van de put (langgerekt in de richting van de stroomrichting) is niet goed bekend. Verondersteld wordt dat de vormverandering geen grote invloed heeft op de transporten bij de drempels, aangezien de historische baggervolumes redelijk gereproduceerd kunnen worden met het verkleinde NeVla model (zie Figuur 4.24). Allereerst wordt echter gezocht naar een fysische oorzaak voor het verschil in morfologische vormverandering van de diepe putten (tussen model en observatie). Gedacht wordt aan een belemmering van de geometrische verandering van de diepe putten in werkelijkheid. Ten behoeve daarvan wordt de geologie van de bodem onderzocht in Paragraaf 5.3.

## **5.2 Reproductie morfodynamisch gedrag van diepe putten**

Onderzocht wordt in welke mate het morfodynamische model voor de Westerschelde de waargenomen ontwikkeling van een proefstorting in de Put van Hansweert reproduceert (zie Paragraaf 5.2.3). Deze proefstorting is gekozen als casus omdat de Put van Hansweert dicht bij de Drempel van Hansweert ligt, wat de locatie is met het grootste baggerbezwaar van de Westerschelde (Vroom & Schrijvershof, 2015). De proefstorting die in 2016 is gestort in de put bedroeg ~1 miljoen m<sup>3</sup> (IMDC, 2017; zie ook Hoofdstuk 3). De belangrijkste vragen zijn :

1. Hoe presteert het morfologische model in het reproduceren van de morfodynamica van de Put van Hansweert?
2. In hoeverre is het bestaande morfologische model toereikend om de proefstortingen na te bootsen?

Ten behoeve van de analyse wordt tevens de invloed geëvalueerd van 3D stromingen in de diepe putten welke niet worden meegenomen in het toegepaste 2DH model. Verondersteld wordt namelijk dat er een sterke 3D stroming aanwezig is in de Put van Hansweert. Zowel de met het 2DH als 3D model berekende stroomsnelheden en bodemschuifspanningen worden vergeleken voor een locatie in de Put van Hansweert (Paragraaf 5.2.2).

De gemodelleerde bodemverandering is gerelateerd aan de geobserveerde morfologische veranderingen in de Put van Hansweert (Paragraaf 5.2.3), waarvoor simulaties zijn uitgevoerd die de morfologische ontwikkeling (i.e. erosie) van een proefstorting in de Put van Hansweert reproduceren.

### **5.2.1 Model opzet**

Het model dat gebruikt wordt om het detailonderzoek naar de morfologische modellering van de Put van Hansweert uit te voeren is een uitsnede van het Delft3D NeVla model tussen de Overloop van Ossensisse en Inloop van Valkenisse (i.e. geheel macrocel 5; zie ook Schrijvershof en De Vet, in voorbereiding). Dit model is dus een iets kleinere uitsnede dan het verkleinde NeVla model in Hoofdstuk 4, wat voortkomt uit praktische overwegingen met betrekking tot rekentijd.

Het model voor de Put van Hansweert is in de basis een 2DH model (één verticale laag) waarvoor de hydrodynamische randvoorwaarden afgeleid zijn uit het NeVla model voor het jaar 2013. Voor deze studie is het echter uitgebreid met 16 verticale sigma lagen (3D) waarvan de dikte varieert van 2% van de waterdiepte bij de bodem tot 14% aan het

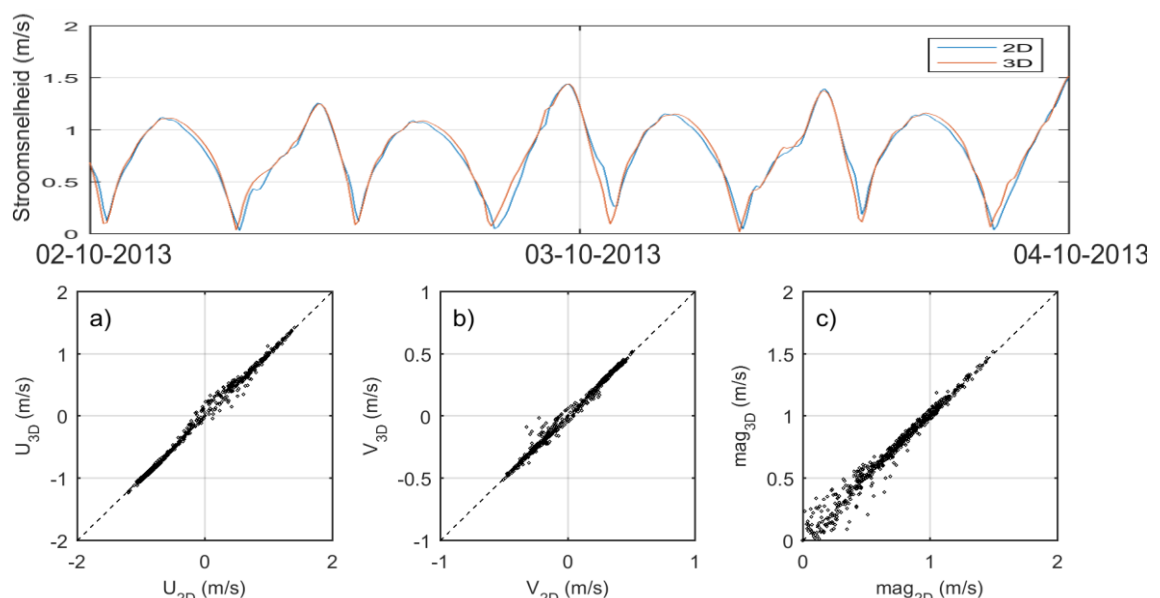
oppervlak. Het detailmodel is hydrodynamisch gekalibreerd op basis van stromingsmetingen die in het plaatrandstortingengebied van de Plaat van Walsoorden zijn gemeten.

Het sediment in het model is geschematiseerd als een ruimtelijk uniforme korrelgrootteverdeling van 200  $\mu\text{m}$ . De TRANSPOR2004 sedimenttransportformule (Van Rijn 2007a,b) wordt gebruikt om de zandtransportfluxen uit te rekenen. De bodemveranderingen die als gevolg van het zandtransport ontstaan worden opgeschaald met een morfologische versnellingsfactor (MORFAC). De simulatieperiode is ingesteld op 3 maanden (hydrodynamisch) en de MORFAC is vervolgens aangepast om tot de gewenste morfologische simulatieperiode te komen. De bodemschematisatie van het model is gebaseerd op de vaklodingen uit 2015. Voor de situatie met proefstorting is hierop een aanpassing gemaakt in de Put van Hansweert op basis van de MONEOS metingen voor de proefstorting (zie Paragraaf 5.2.3).

De morfologische ontwikkeling die door het model voorspeld wordt, wordt deels gestuurd door de dikte van het erodeerbare pakket. De dikte van deze laag is afhankelijk van het bodemniveau waarop erosieresistente lagen voorkomen (bijv. klei, keileem of potklei). In Delft3D wordt dit bodemniveau opgegeven als initiële conditie door de sedimentlaagdikte van het erodeerbare pakket op te geven (zie ook Figuur 2.12; TNO, 2003; Dam, 2013d). Deze sedimentlaagdikte is hetzelfde als in het NeVla model.

### 5.2.2 Evaluatie hydrodynamica, bodemschuifspanningen en morfologie

Om inzicht te krijgen in de invloed van complexe 3D stromingen in de Put van Hansweert zijn de dieptegemiddelde stroomsnelheden en bodemschuifspanningen berekend voor een locatie in de diepe Put van Hansweert (~NAP -35m) voor een periode van 2 dagen (Figuur 5.2). De tijdserie van dieptegemiddelde stroomsnelheid toont dat de stroming in de dominante vloed en eb-richting vergelijkbaar is voor het 2DH en 3D model. De scatterplots tonen nauwelijks een afwijking van de  $x=y$  relatie.

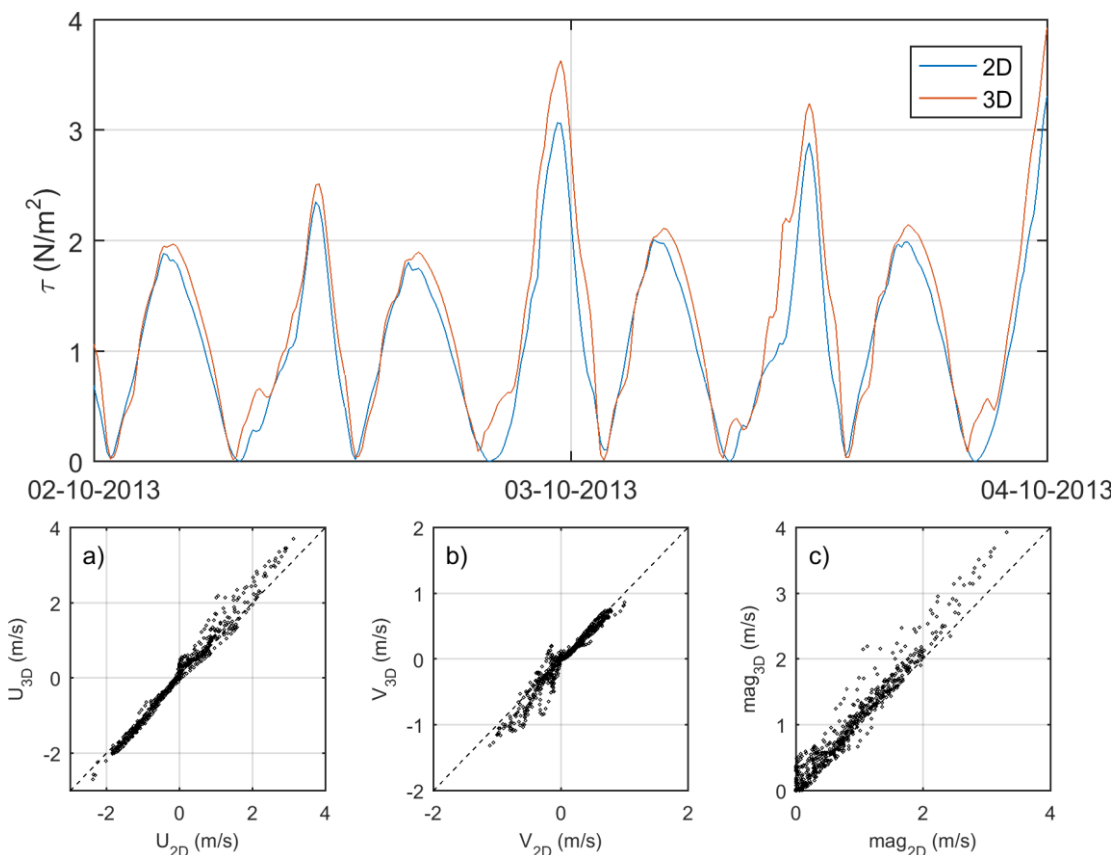


Figuur 5.2 Tijdserie (boven) en scatterplots van U- (a), V-componenten (b) als de magnitude (c) van dieptegemiddelde stroming in het diepste punt van de Put van Hansweert. Richting oosten en noorden zijn de positieve U- en V-componenten, respectievelijk.

De gemodelleerde bodemschuifspanningen in het 3D model zijn iets groter dan in het 2DH model (Figuur 5.3). Dit geldt met name voor de piek-schuifspanningen die in het 3D model circa 10 tot 15% groter zijn dan de schuifspanningen in het 2DH model. Opgemerkt wordt dat het 3D model gebruik maakt van de stroming in de onderste verticale laag waarin dus tevens de spiraalstroming is meegenomen, terwijl het 2DH model de schuifspanning berekend op basis van de dieptegemiddelde stroomsnelheid. De bodemschuifspanning in de put is vrijwel continu boven de kritische waarde voor de initiatie van beweging ( $\tau_{cr} \approx 0,2 \text{ N/m}^2$ ) die als volgt berekend wordt:

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho_w)gD_{50}\theta_{cr}$$

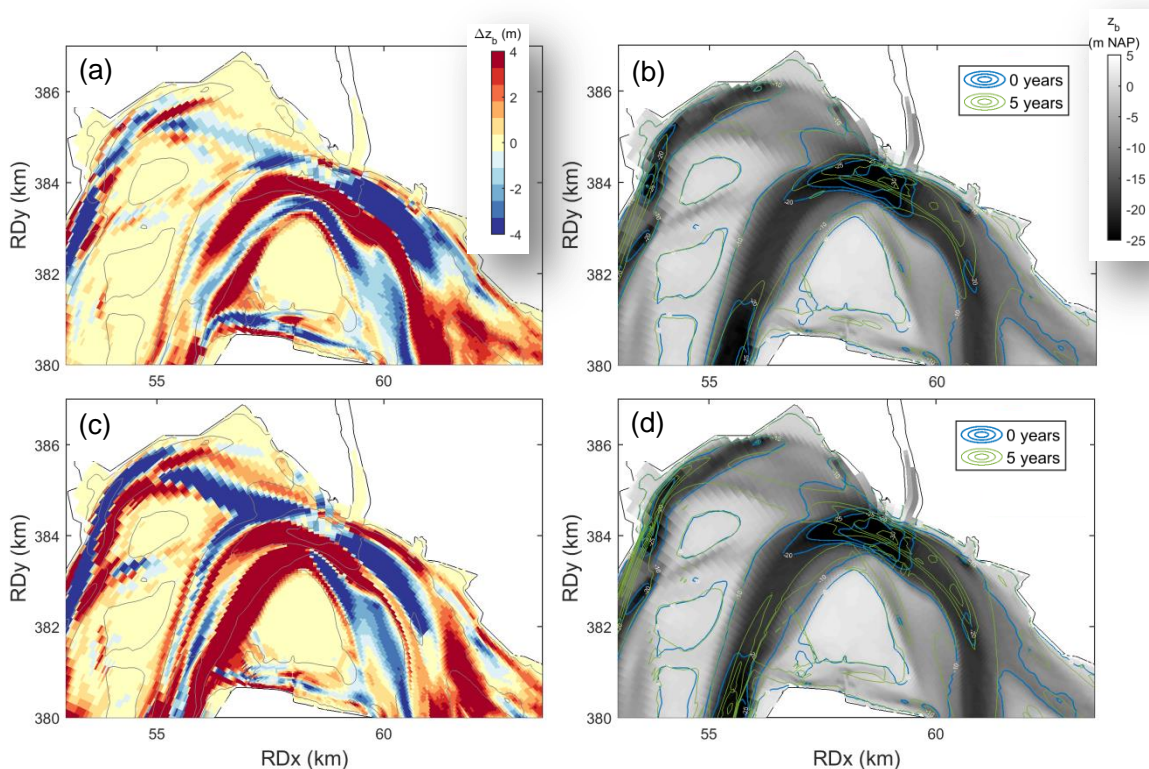
Waar  $\theta_{cr}$  de shieldparameter is als functie van de non-dimensionele korrelgrootte ( $D^*$ ).  $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . Er treedt dus in beide modellen zandtransport op als er bodemmateriaal beschikbaar is. De transporten zullen in het 3D model echter groter zijn dan in het 2DH model als gevolg van de betere modellering van de spiraalstroming. De geparametriseerde implementatie van de bochtstroming in een dieptegemiddelde simulatie lijkt de stroming in de put dus enigszins te onderschatten.



Figuur 5.3 Tijdsree (boven) en scatterplots van U- (a) en V-componenten (b) als de magnitude (c) van de bodemschuifspanning in het diepste punt van de Put van Hansweert. Richting oosten en noorden zijn de positieve U- en V-componenten, respectievelijk.

De prestatie van het model met betrekking tot de morfologische ontwikkeling is geëvalueerd door de bathymetrische veranderingen over een periode van 5 jaar te beschouwen (MORFAC  $\approx$  20), gebruik makend van een gemeten bodem uit 2015. Deze vijfjarige simulatieperiode komt overeen met de inspeeltijd van het NeVla model met ingespeelde putten zoals gebruikt in Hoofdstuk 4.

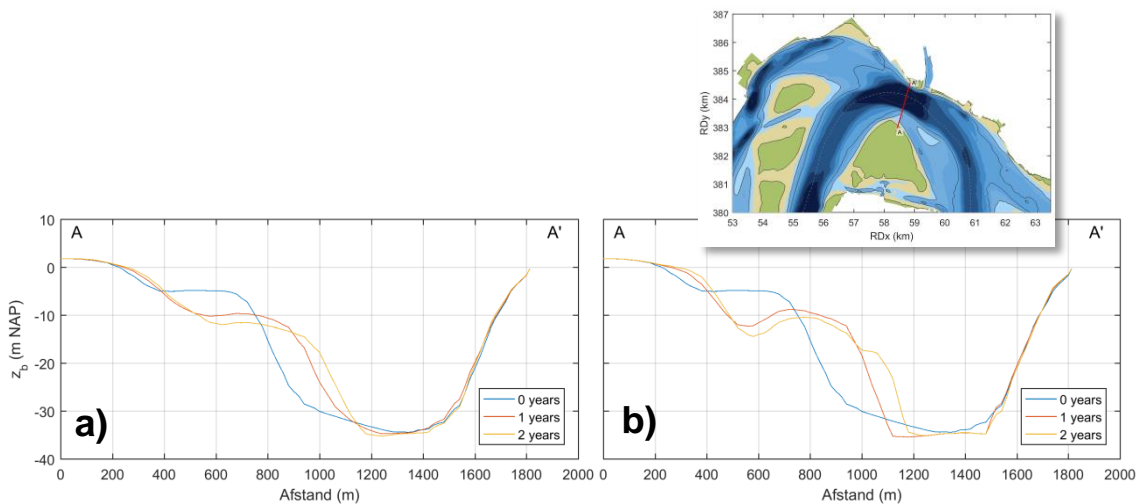
In Figuur 5.4 zijn de erosie-sedimentatiepatronen weergegeven die ontstaan na 5 jaar morfologisch simuleren en in Figuur 5.4b en d zijn de hoogtecontouren aan het begin en het eind van de simulatie weergegeven. De figuren tonen dat in zowel het 2DH als 3D model er aan de zuidelijke rand van de put sedimentatie optreedt. De zuidelijke oever migreert hierdoor in noordelijke richting waardoor de breedte van de put in noord-zuid richting afneemt. Aan de bovenstroomse zijde van de put van Hansweert (i.e. oostzijde) wordt daarentegen juist erosie voorspeld. Onafhankelijk van de keuze voor het 2DH of 3D model ontwikkeld de geometrie van de put zich tot een langgerekte gebogen ellips. Deze langgerekte elliptische vorm komt overeen met de vorm van andere diepe putten in de Westerschelde. De gebogen vorm is hier echter duidelijker aanwezig door de scherpe bocht die de vaargeul maakt ter plaatse van Hansweert.



*Figuur 5.4 Resultierend erosie-sedimentatiepatroon en dieptecontouren van de Put van Hansweert na een 5-jarige morfologische simulatie met het 2DH model (a en b) en 3D model (c en d). De linker plots bevatten het erosie-sedimentatie patroon en de initiële bathymetrie, terwijl de rechter plots de ontwikkeling van de dieptecontouren representeren.*

De sedimentatie van de zuidelijke oever van de put is uitgelicht aan de hand van een dwarsprofiel (Figuur 5.5). De dwarsprofiel geeft duidelijk weer dat er in korte tijd een plateau ontstaat op  $\sim$ NAP -10 m. Op grotere waterdiepte ( $<$  NAP -10m) migreert de zuidrand (noordelijke rand van de Plaat van Ossensisse-Oost) hierdoor richting het noorden. De plateauvorming en het noordwaarts migreren van de Plaat van Ossensisse-Oost tijdens de

morfologische modellering wordt in realiteit ook waargenomen (zie Figuur 2.7c) over de periode 2010-2017. De migratie is in die periode ongeveer 100 meter in zeven jaar (15 m/jaar). De migratiesnelheid wordt in het model echter aanzienlijk overschat (op ongeveer 60 m/jaar). De ontwikkeling die het model voorspelt lijkt dus overeen te komen met de werkelijkheid maar de snelheid waarmee dit gebeurt is hoger.



Figuur 5.5 Morfologische ontwikkeling van de Put van Hansweert voor een doorsnede met het 2DH (a) en 3D model (b).

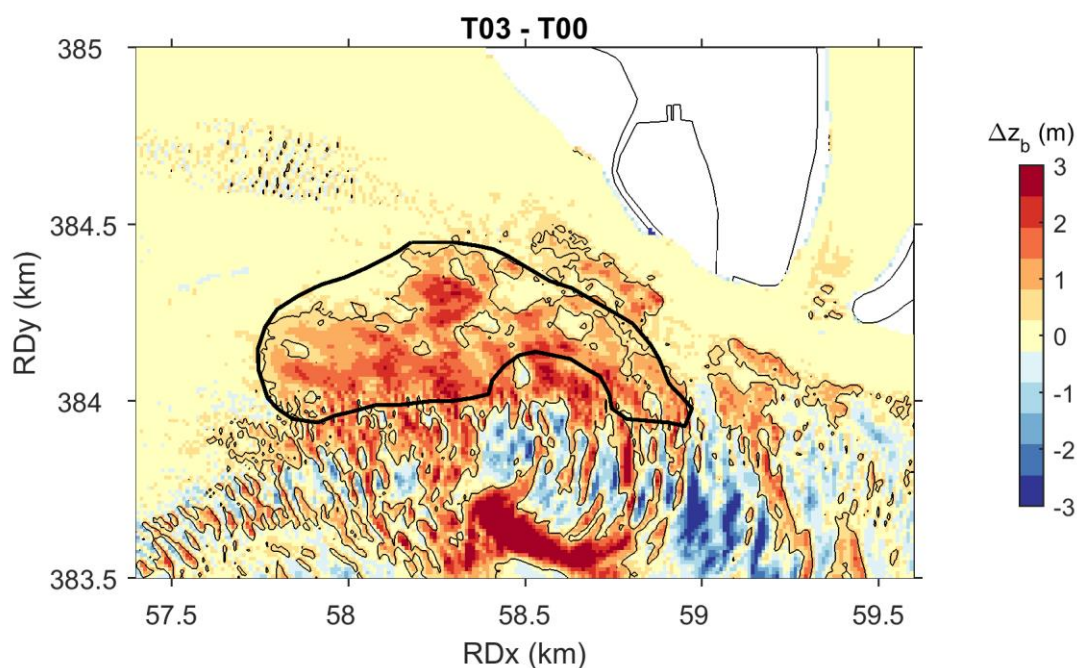
Opvallend is dat de diepte van de Put van Hansweert op deze transect stabiel blijft, aangezien het meer westelijke deel van de put een verondieping laat zien. Verdere verondieping van de put treedt niet op omdat hier geen zandpakket aanwezig is dat kan eroderen. Verder naar de oostelijke rand van de put is wel verondieping waar te nemen doordat hier een erodeerbare laag aan het model is opgegeven. Deze erosie aan de oostelijke zijde van de put is waarschijnlijk te koppelen aan het ontbreken van sediment in de put. De transportcapaciteit in het diepe gedeelte van de put is namelijk groot genoeg om sediment te verplaatsen terwijl er geen zand beschikbaar is om te eroderen. Dit zorgt voor een gradiënt in het zandtransport waardoor voornamelijk bovenstrooms erosie plaatsvindt doordat dit gedeelte van de vaargeul sterk vloedgedomineerd is (zie Schrijvershof & De Vet, in voorbereiding).

### 5.2.3 Modellering proefstorting

Het 2DH model voor de Put van Hansweert is gebruikt om de ontwikkeling van de morfologie na een proefstorting te simuleren, welke tussen 21 maart (T00) en 19 mei 2016 (T03) is gestort in de Put van Hansweert. Deze simulaties zijn bedoeld om de weergave van morfologische veranderingen te onderzoeken in het 'basismodel' (met gemeten bodem) en het model met 'opgevulde putten'. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de voorspelde en geobserveerde erosie in de periode na de eerste storting (maar voor de tweede proefstorting), dit is van 19 mei 2016 (T03) tot 19 juni 2017 (T07) (396 dagen, MORFAC  $\approx$  4,4). Door middel van deze vergelijking wordt er een indicatie gegeven hoe de door een numeriek model voorspelde sedimentverspreiding zich verhoudt tot de werkelijkheid. Ten behoeve van de vergelijking is er een polygoon gedefinieerd dat de proefstorting nauw omsluit (Figuur 5.6).



De proefstorting die in 2016 is uitgevoerd bedroeg ongeveer 1 miljoen  $m^3$ , waarvan slechts 600,000  $m^3$  werd teruggevonden in de bathymetrische opnamen (zie Hoofdstuk 3). Tussen T03 en T04 is er een oeverval opgetreden, waarvan het sediment gedeeltelijk over de proefstorting is gekomen. Om deze toename van volume uit te filteren uit de gemeten data is de polygoon zo gedefinieerd dat de volume-toename als gevolg van de oeverval niet wordt meegerekend. Het volume dat tussen T00 en T03 is toegevoegd en binnen deze polygoon gelegen is, is ongeveer 350,000  $m^3$ .



Figuur 5.6 Verschilbathymetrie aan de hand van de MONEOS bodemopnamen op T03 en T00 met de polygoon gedefinieerd voor de volumeberekeningen van gemeten data en model.

De proefstorting is vervolgens op twee bodemschematisaties geprojecteerd: één waarbij de put de gemeten diepte heeft, en één waarbij de bodemhoogte van de put is verkregen door het NeVla model morfologisch in te laten spelen (zie Paragraaf 4.4). Deze laatste methode is vergelijkbaar met de aanpak van de stortstrategieënmodellering. De put heeft in de metingen een werkelijke diepte van 30 tot 35 meter ten opzichte van NAP, terwijl de maximale diepte van de Put van Hansweert in de 'ingespeelde bodem' ongeveer op NAP -28 m ligt. De hydrodynamische forcering bij de bodem is in de ingespeelde bodem groter dan voor de gemeten bodem, waardoor het morfologisch gedrag naar verwachting beter overeenkomt met de werkelijkheid. De simulaties zijn bedoeld om de invloed van de bodemhoogte op de mobiliteit van het sediment (i.e. transportcapaciteit) te onderzoeken.

De dikte van de erodeerbare laag is voor de scenariosimulaties ( $2D_{\text{proefstorting}}$  en  $2D_{\text{ingespeeld, proefstorting}}$ ) aangepast naar de toename in bodemhoogte als gevolg van de proefstorting. In het stortpolygoon is na de proefstorting ongeveer 350,000  $m^3$  extra erodeerbaar materiaal aanwezig). Het gemiddelde ophoging van de bodem in het controle polygoon is ongeveer 1 m als gevolg van de proefstorting.

De ontwikkeling van het volume binnen de gedefinieerde polygoon is weergegeven in Figuur 5.7, voor de gemeten data, de twee simulaties met proefstorting en twee simulaties die ter

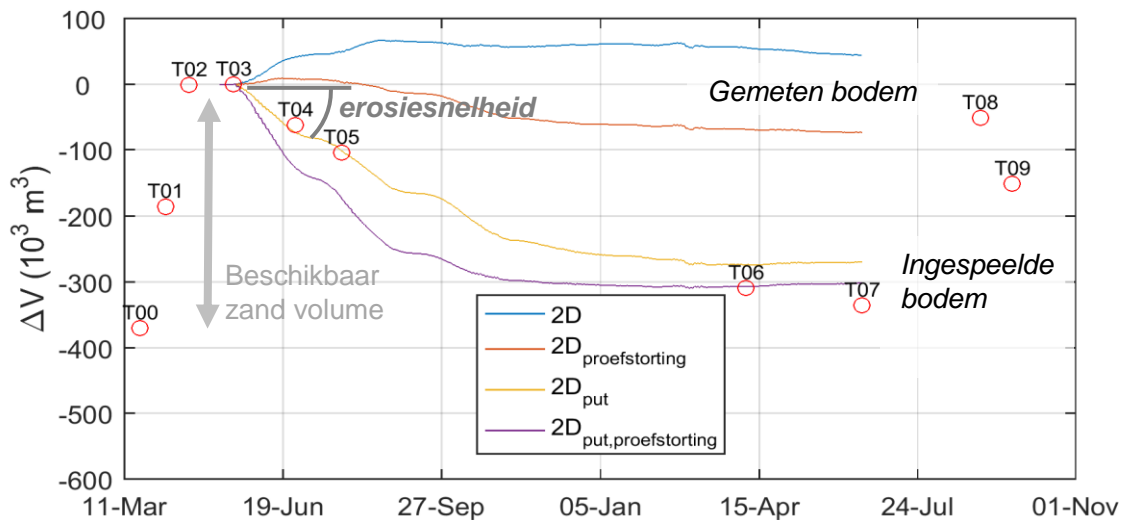
referentie dienen. De simulatie met werkelijke bathymetrie (2D) is vrij stabiel. Dit is gerelateerd aan de lage sedimentbeschikbaarheid op deze locatie. Wanneer de proefstorting op de werkelijke bathymetrie wordt geprojecteerd ( $2D_{\text{proefstorting}}$ ) dan erodeert deze. De snelheid waarmee deze erodeert is echter aanzienlijk lager dan in werkelijkheid het geval is. Verwacht wordt dan ook dat een simulatie van stortstrategieën in diepe putten een onderschatting van het vaargeulonderhoud kunnen opleveren.

Een beter gelijkende erosiesnelheid wordt verkregen met een model waarbij de bathymetrie van de put is ingespeeld ( $2D_{\text{ingespeeld, proefstorting}}$ ). Als een proefstorting is aangebracht dan erodeert deze met een vergelijkbare snelheid als geobserveerd in de data (~ 285,000 m<sup>3</sup>/jaar). Opvallend is dat eenzelfde erosiesnelheid wordt gevonden voor de simulatie met opgevulde put maar zonder proefstorting ( $2D_{\text{ingespeeld}}$ , ~260.000 m<sup>3</sup>/jaar). De reden hiervoor is dat deze simulatie ook zand beschikbaar heeft in de diepe put (de erodeerbare laag is dezelfde als in de simulatie met de proefstorting). Verondersteld wordt dat de erosie voor deze situatie (zonder de proefstorting, maar met zandbeschikbaarheid) het gevolg is van een netto positieve ruimtelijke gradiënt in het transport van zand op deze locatie met een capaciteit van ongeveer 260,000 m<sup>3</sup>/jaar. De grootte van deze transportgradiënt is slechts beperkt afhankelijk van de bodemhoogteverandering als gevolg van de proefstorting zelf. De grootte van de proefstorting is relatief klein ten opzichte van de opvulling van de put.

De resultaten suggereren dat er een transport gradiënt aanwezig is over de lengte van de diepe put welke primair verantwoordelijk is voor erosie van de proefstorting, terwijl de bodemverhoging als gevolg van de proefstorting zelf een beperkte invloed heeft. Deze transport gradiënt wordt groter naarmate de put ondieper is (i.e. voor de ingespeelde put). De situatie met de opgevulde put geeft een veel betere representatie van de transportgradiënt die in werkelijkheid optreedt dan de situatie met de gemeten bodem. De snelheid van de erosie neemt door de tijd heen af, omdat er steeds meer locaties zijn waar na verloop van tijd geen zand meer beschikbaar is.

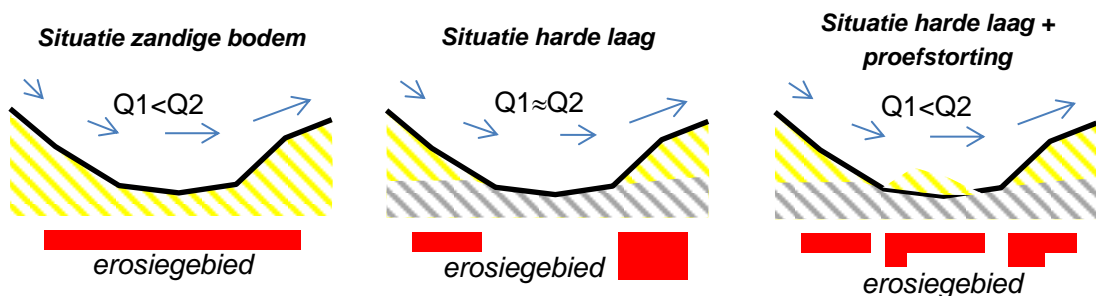
Tabel 5.1 Volumeverandering na 396 dagen voor de integratiepolygoon.

Simulatie	Situatie	$\Delta V$	$\Delta V/\text{jaar}$
2D		1300	1200
$2D_{\text{proefstorting}}$	Proefstorting	-103800	-95500
$2D_{\text{ingespeeld}}$	Ingespeelde bodem & sedimentlaagdikte	-280700	-260000
$2D_{\text{ingespeeld, proefstorting}}$	Proefstorting Ingespeelde bodem & sedimentlaagdikte	-307900	-285000



Figuur 5.7 Volumeontwikkeling binnen de polygoon die de proefstorting omsluit.

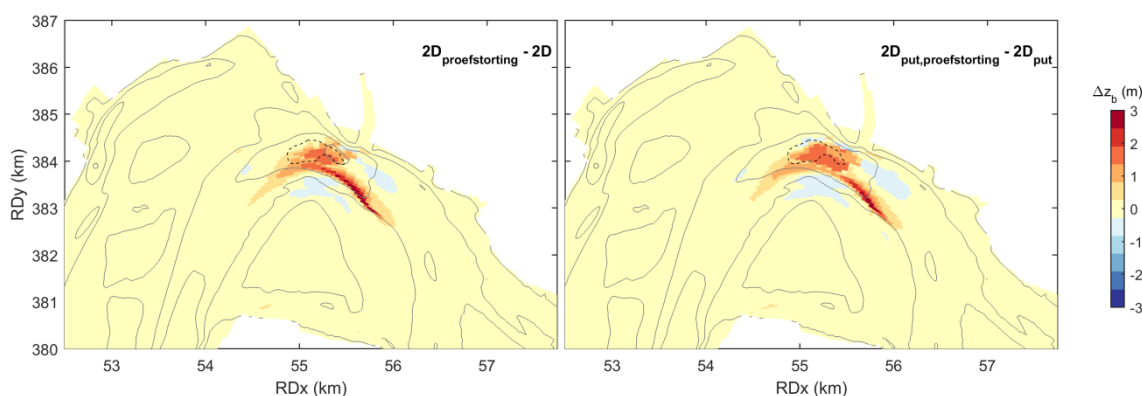
In de praktijk is er in de 'natuurlijke situatie' zonder proefstorting door de harde laag geen transport mogelijk, waardoor er enkel bypass van sediment plaats vindt (zie Figuur 5.8). Zodra er echter na een storting sediment beschikbaar komt om getransporteerd te worden, dan wordt ter plaatse van de storting tevens de 'onbenutte transport gradiënt' gebruikt. Het ligt in de lijn der verwachting dat de erosie aan de benedenstroomse zijde van het gebied met de harde laag vermindert als gevolg van de hogere sedimentconcentraties door erosie van de storting. Indien het volume van de storting groter is dan de lokale transportgradiënt, dan zal de transportgradiënt in de put bepalend zijn voor de erosie.



Figuur 5.8 Principeschets van de transport gradiënt in een gebied met een erosie als gevolg van een harde laag of storting. De gebieden met erosie zijn aangemerkt met rode balken.

Door welke fysische processen de transportgradiënt zelf precies bepaald wordt is niet in detail bekend. Verwacht wordt dat ruimtelijke variaties in hydrodynamische forcering (i.e. door stroming) een rol spelen. Ook de ruimtelijke spreiding van het gestorte materiaal over het stortgebied is van belang (zie Figuur 5.8). Stortingen die alleen in een klein gebied aan één van de zijden van de put plaats hebben zullen minder eroderen dan stortingen met een gelijkmatige verdeling over het hele gebied. In algemene zin wordt verwacht dat een groter bedekt oppervlak zorgt voor meer erosie. Een grotere spreiding zorgt dus waarschijnlijk voor meer verlies dan een kleine lokale storting.

Indien het invloedgebied van de proefstorting zelf wordt beschouwd (zie verschilplot in Figuur 5.9) dan valt op dat een groot deel van het zand naar de binnenbocht van de Put van Hansweert wordt vervoerd (i.e. noordelijke rand van de Plaat van Ossenise-Oost). Tevens blijft een deel van het materiaal in het initiële stortgebied liggen. De simulaties met een opgevlude put geven een zeer vergelijkbare impact van de proefstorting, waarbij echter aangemerkt moet worden dat bij de situatie zonder storting (maar met opgevlude put) ook sediment aanwezig was. Waardoor er voor deze referentiesituatie geen transport beperking was door de harde laag. De algemene tendens om sediment van de proefstorting naar de binnenbocht te verplaatsen is echter voor beide situaties duidelijk aanwezig.



Figuur 5.9 Verschilplot van bodemligging van simulatie met en zonder proefstorting in de Put van Hansweert. Links : invloed van proefstorting in model met gemeten bodem (basismodel). Rechts: invloed van proefstorting in model met opgevlude put. Initiële locatie van de storting is aangegeven met de stippellijn.

Een toename van sedimentatie aan de zuidelijke kant van de put is te verwachten. Om een bocht te doorlopen moet het water namelijk een centripetale versnelling ondergaan. Als reactie oefent het water een naar buiten gerichte centrifugale kracht uit die afhangt van de hoofdstroomsnelheid  $u$  en de bochtstraal  $r$ ,  $u^2/r$ . Doordat  $u(z)$  vanaf de bodem naar de waterspiegel over het algemeen toeneemt terwijl de drukgradiënt uniform over de waterkolom verdeeld is, is de resultante een naar binnen gerichte kracht en dwarsstroming in het onderste deel van de verticaal en een naar buiten gerichte kracht en dwarsstroming in het bovenste deel van de verticaal. De hiermee gepaard gaande bodemschuifspanning  $\tau_{br}$  kan worden geschat door:

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

met  $h$  de waterdiepte,  $\kappa$  ( $\approx 0.4$ ) de Von Karman constante,  $g$  de zwaartekrachtsversnelling,  $C$  de Chézy ruwheidscoëfficiënt en  $\tau_{b\phi}$  de bodemschuifspanning in de richting van de hoofdstroming. Deze term wordt meegenomen in de impulsvergelijking en geschaald met de invoerparameter  $\beta_c = [0,1]$ . Typische waarden voor de Put van Hansweert zijn  $h = 30$  m,  $C = 80$  m<sup>0.5</sup>/s (gegeven een Manning coëfficiënt  $n = 0.022$  m<sup>1/3</sup>/s) en  $r = 2$  km. Dit geeft  $\alpha \approx 0.2$ , oftewel een additionele bodemschuifspanning van 15-20% en dus ~30-40% additioneel sedimenttransport wat deels richting de binnenbocht wordt getransporteerd (uitgaande van  $q_s \sim \tau^m$  met  $m = 1.5$  tot 2). De bochtstroming zal dus een significante bijdrage leveren aan

de erosie van de buitenbocht cq. sedimentatie van de binnenbocht. Opgemerkt wordt dat erosie van de buitenbocht niet mogelijk is in verband met de harde oeverbescherming.

Samenvattend kan gesteld worden dat de simulaties met proefstorting tonen dat de initiële erosie van de proefstorting in de Put van Hansweert onderschat wordt als een gemeten bodem wordt gebruikt. Dit is gerelateerd aan een te lage mobiliteit van het sediment in het numerieke model (ter plaatse van de diepe put). Het is mogelijk dat deze lage schatting van de erosie ook zal resulteren in een lage schatting van het baggerbezwaar, hierbij dient echter aangemerkt te worden dat een te lage erosie in de put zelf kan leiden tot verhoogde erosie aan de rand van de put (als gevolg van beperkte beschikbaarheid van sediment in de waterkolom). Hierdoor is het tevens mogelijk dat een dergelijke onderschatting op niet al te lange termijn (enkele jaren modelberekening) wel meevalt, omdat de transportcapaciteit bij de drempel bepalend is voor het vaargeulonderhoud en niet die in de Put van Hansweert. Stortingen simuleren met een model dat gebruik maakt van de gemeten (niet door het model ingespeelde) bathymetrie zal echter zorgen voor een vergrootte stabiliteit van het gestorte sediment dan in werkelijkheid het geval is.

De numerieke modellen met een proefstorting in een opgevulde put zorgen voor een erosiesnelheid die vergelijkbaar of mogelijk iets groter is dan de snelheid van de geobserveerde erosie van de proefstorting zolang de beschikbaarheid van sediment groot genoeg is (en de put opgevuld blijft). Opgemerkt moet worden dat waarschijnlijk gebruik gemaakt dient te worden van een bodem die voldoende lang ingespeeld is, en zodoende geen (of zeer beperkt) sediment onttrekt aan de omgeving. De snelheid van erosie van de proefstorting zal afvlakken gedurende de simulaties doordat er na verloop van tijd steeds minder locaties zijn in de put waar nog zand beschikbaar is en de diepte van de put toeneemt. Echter tijdens de modellering van stortstrategieën wordt er vrijwel continue sediment gestort in de put, waardoor de opgevulde put niet geheel uitgeruimd wordt. De geobserveerde sedimentverspreiding (en initiële erosie van de proefstorting) is daarom het best gereproduceerd met het NeVla model met de opgevulde (ingespeelde) putten.

### 5.3 Geologische opbouw ondergrond

De geometrische ontwikkeling van de Put van Hansweert in het morfologische model wijkt af van de geobserveerde stabiliteit van de morfologie van de Put van Hansweert. De gemodelleerde erosie aan de oostelijke rand van de put is veel minder sterk waarneembaar in de observaties. Daarnaast is het opvallend dat de Put van Hansweert niet de karakteristiek elliptische vorm heeft. De hypothese is dat de morfologische ontwikkeling van de put ook aan de oostkant gestuurd wordt door de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare lagen. Om dit te toetsen is er op basis van beschikbare boringen een verkennende analyse gedaan naar het voorkomen van erosieresistente kleilagen in de ondergrond rondom de Put van Hansweert. Bron van de boringen is TNO Rijksgeologische dienst, de boringen zijn te verkrijgen via [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl). De boringen zijn gevisualiseerd met behulp van de software iMOD<sup>1</sup>, waar ook een recente bathymetrische kaart in is opgenomen.

Er is een dwarsdoorsnede gedefinieerd, getoond in Figuur 5.10. In deze figuur zijn boringen binnen een afstand van 750 meter van de middenlijn op het profiel geprojecteerd. De getoonde bathymetrie is wel de bathymetrie die zich precies onder de middenlijn bevindt. Door deze methode van projecteren, en doordat boringen op een ander moment zijn

<sup>1</sup> <https://download.deltares.nl/en/download/imod/>

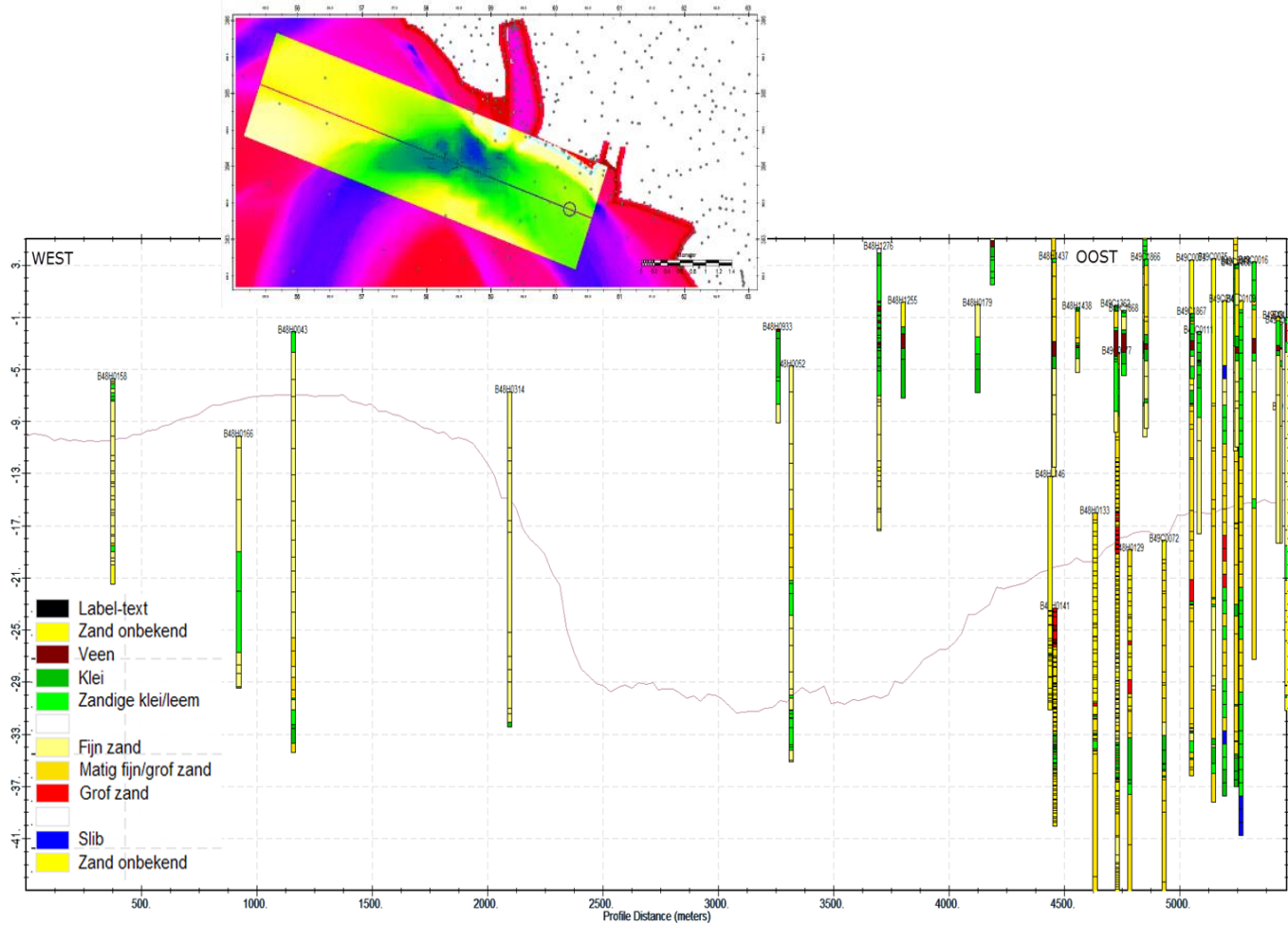
geplaatst, liggen de boringen niet altijd netjes langs het huidige bathymetrische profiel. Daarnaast is in Figuur 5.11 de lithostratigrafie van drie boringen getoond: twee boringen net ten oosten van de put en één boring ten zuiden, op de noordelijke rand van de Plaat van Ossensisse-Oost.

In de dwarsdoorsneden is in veel boringen een kleilaag van ca. 3 a 4 meter dik te zien. In boring B48H0131 (Figuur 5.11, links) ligt de top van deze kleilaag op een diepte van ca NAP -30 m, in boring B48H0141 (Figuur 5.11, midden) ligt deze op ca. NAP -33 m. Deze kleilaag wordt in de boringen meestal gerekend tot de Formatie van Oosterhout, maar soms ook tot de Formatie van Waalre. Deze kleilaag wordt vaak beschreven als stug of hard. Het is deze erosieresistente kleilaag die er voor zorgt dat het historische bathymetrische profiel van de Put van Hansweert nooit lager gelegen is dan het peil NAP -35 m.

In de dwarsdoorsneden zijn in een aantal boringen ook kleilagen op kleinere diepte te vinden, bijvoorbeeld in boring B48H0052, waarvan de lithostratigrafie ook is getoond (Figuur 5.11, rechts). De top van de kleilaag, behorende tot de Formatie van Waalre, is op NAP -21.2 m gelegen. Veel ondieper, boven ca. NAP -10 m, zijn klei- en veenlagen aanwezig behorende tot de Formatie van Naaldwijk (zie dwarsdoorsneden).

De boringen ten oosten van de Put van Hansweert laten een sequentie zien van grof zand, met daarboven op een afwisseling van dunne lagen van matig fijn/grof zand. Deze afzettingen zijn karakteristiek voor restgeulopvullingen. De afzettingen zijn in meerdere boringen van deze raai te vinden, de geul zal dus een oriëntatie hebben gehad die ongeveer noord-zuid was. Deze restgeulopvullingen zijn niet direct te relateren aan een erosieresistente laag maar het is mogelijk dat deze afzettingen compacter zijn dan naastgelegen afzettingen en daardoor moeilijker eroderen en de morfologische ontwikkeling van de Put van Hansweert beïnvloeden.

Opgemerkt wordt dat de beschikbare informatie niet uitsluit dat er een kleilaag aanwezig zou kunnen zijn ter plaatse van de sprong in de bodem aan de oostzijde van de Put van Hansweert (op een diepte van ~NAP -20 m), welke de afwijkende contourlijnen van de put zou kunnen verklaren. Informatie uit andere bronnen of aanvullende boringen zouden hier duidelijkheid over kunnen verschaffen.



Figuur 5.10 Dwarsdoorsnede in oost-west richting over de put. Diepte in meters t.ov. NAP.

## Boormonsterprofiel

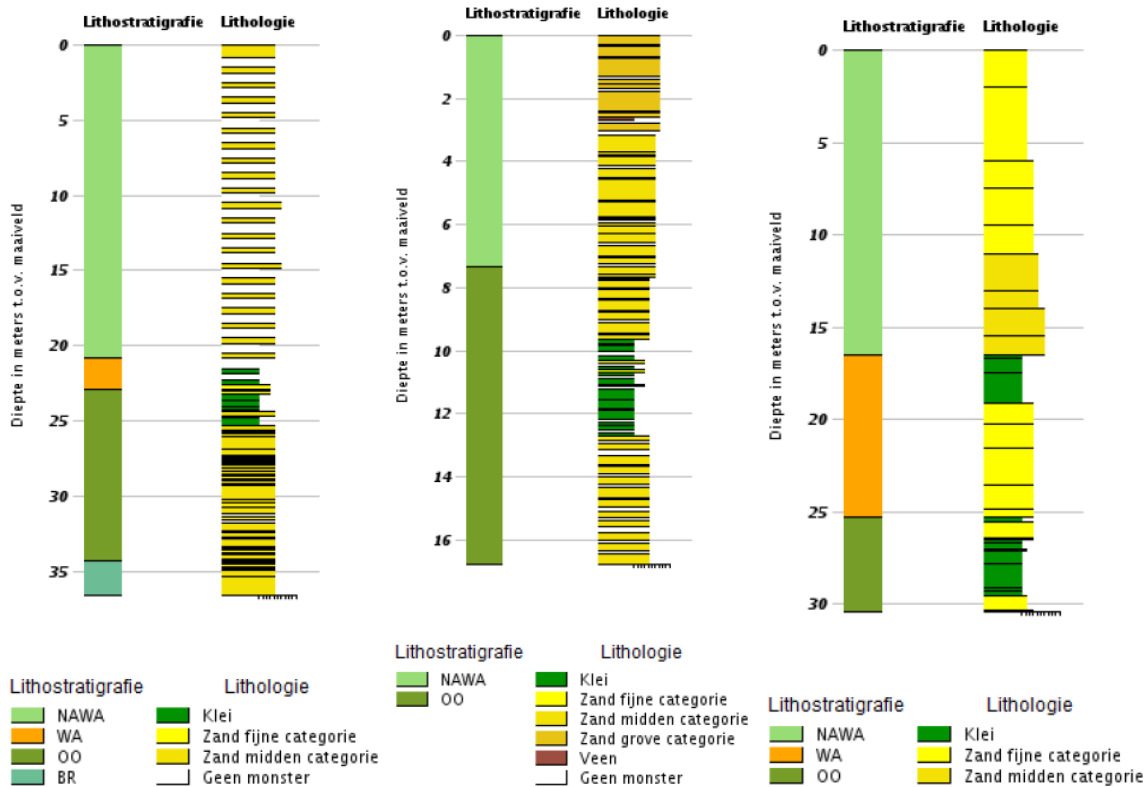
Identificatie: B48H0131  
 Coördinaten: 59246, 382886 (RD)  
 Maaiveld: -8,50 m t.o.v. NAP  
 Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0,00 m - 36,60 m

## Boormonsterprofiel

Identificatie: B48H0141  
 Coördinaten: 59670, 383790 (RD)  
 Maaiveld: -23,30 m t.o.v. NAP  
 Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0,00 m - 16,77 m

## Boormonsterprofiel

Identificatie: B48H0052  
 Coördinaten: 58290, 383327 (RD)  
 Maaiveld: -4,70 m t.o.v. NAP  
 Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0,00 m - 30,40 m



Figuur 5.11 Lithostratigrafie van boring B48H0131 (links), B48H0141 (midden) en B48H0052 (rechts). Zie Figuur 5.7 voor de locatie van de boringen. NAWA=Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren; WA=Formatie van Waalre; OO=Formatie van Oosterhout; BR=Formatie van Breda.

## 5.4 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de bevindingen in dit hoofdstuk kunnen een aantal relevante vragen worden beantwoord, zoals:

1. Hoe presteert het morfologische model in het reproduceren van de morfodynamica van de Put van Hansweert?

De morfologie van de put van Hansweert verandert aanzienlijk gedurende de eerste jaren van de morfologisch simulaties. De zuidelijke oever migreert noordwaarts en de oostelijke rand slijt uit (erosie). Opgemerkt wordt dat noordwaartse migratie van de oever van de Plaat van Ossenisse-Oost ook in historische profielen wordt waargenomen, zij het in kleinere mate. Erosie aan de oostkant komt niet overeen met de werkelijkheid.



Een simulatie met meerdere verticale lagen (3D) geeft enigszins vergrootte bodemschuifspanningen, maar verwacht wordt dat dit niet het volledige verschil in mobiliteit (tussen model en werkelijkheid) verklaart. Met betrekking tot erosie aan de oostelijke rand is de grootste verbetering te halen uit een gedetailleerde geologische kartering van de ondergrond van de put om de aanwezigheid van erosieresistente lagen op een gedetailleerder ruimtelijk niveau te kunnen definiëren.

2. *In hoeverre is het bestaande morfologische model toereikend de proefstortingen na te bootsen?*

Morfologische modellen onderschatten de transporten in de diepe putten van de Westerschelde, waardoor ook de erosiesnelheid van de proefstorting wordt beïnvloed. Dit valt te ondervangen door gebruik te maken van een ingespeelde bodem welke zorgt voor een lokaal hoger transport. Dit inspelen zorgt ook voor een natuurlijke kalibratie van de transportcapaciteit en -gradiënten.

Een aanbeveling die voortkomt uit de analyses in dit hoofdstuk is om de kartering van erosieresistente lagen in de Westerschelde te verfijnen aan de hand van recentere data. Op deze wijze kan een detailniveau worden gerealiseerd dat geschikt is voor de morfologische modellering van diepere delen in de Westerschelde (i.r.t. stortingen in deze diepe delen).



## 6 Conclusies en Aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

Deze studie richt zich op de verspreiding van zandige baggerspecie die is gestort in de diepe geulen van de Westerschelde. Deze analyses zijn uitgevoerd om te toetsen of een aangepaste beheerstrategie voor het storten van gebaggerd materiaal mogelijk is. De beheerstrategie wordt door RWS Zee & Delta (Gert-Jan Liek en Marco Schrijver) en aMT (Frederik Roose, Youri Meersschaut) voorbereid en door de VNSC vastgesteld, als basis voor de nieuwe vergunningen voor storten van baggerspecie in de Westerschelde. De studie omvat onderzoek naar:

- 1) De lokale verliezen tijdens het storten van sediment in diepe putten én lokale morfologische veranderingen (data analyse).
- 2) Invloed van stortstrategieën op het systeem van de Westerschelde (i.e. de grootschalige hydrodynamica en morfologie) alsmede het volume van het baggerwerk voor vaargeul onderhoud (model studies).
- 3) Analyse en validatie van morfologische berekeningen voor een proefstorting in de Put van Hansweert (model studies & data).

De lokale verliezen tijdens het storten van sediment in de diepe putten én lokale morfologische verandering (i.e. erosiesnelheid en verblijftijd gestort sediment) zijn geëvalueerd op basis van velddata van proefstortingen in de Put van Hansweert. Uit de analyses blijkt dat een aanzienlijk deel (orde 30% tot 40%) van het gestorte materiaal al bij het storten (of direct daarna) uit het stortgebied verdwijnt. Voor de proefstorting in de Put van Hansweert was er initieel hoofdzakelijk aanzanding te zien op de geulwand van de binnenbocht. Enkele maanden na de tweede proefstorting is het sediment dat zich op de geulwand langs de binnenbocht had afgezet, echter terug in de put afgegleden door een grootschalige (ca. 1,1 Mm<sup>3</sup>) zettingsvloeiing.

De invloed van stortstrategieën in diepe putten op de grootschalige hydrodynamica van de Westerschelde is geëvalueerd met een variant van het gekalibreerde Delft3D NeVla model voor de Westerschelde. Uit analyses blijkt dat de het storten in diepe putten de getijslag (verschil tussen GHW en GLW) in het oostelijke deel van de Westerschelde enigszins reduceert als gevolg van lokale verondieping ter plaatse van de diepe putten. Lokaal kunnen stroomsnelheden enigszins toenemen.

Het invloedgebied van de verspreiding van zand vanuit de stortlocaties in de diepe putten bedraagt in de numerieke modellen bedraagt enkele kilometers (over 5 jaar). Sediment dat gestort wordt in de Put van Hansweert zet zich hoofdzakelijk af aan de binnenbocht. De autonome dynamiek van de bodem in het gebied is overigens van eenzelfde orde grootte (enkele meters hoogteverandering per jaar) en ter plaatse van de bochten lokaal groter dan de impact van de stortstrategieën. Op lange-termijn heeft het baggeren en storten invloed op de verdeling van sediment over de macrocellen, maar dit kan –indien gewenst- eenvoudig worden gecorrigeerd door de ruimtelijke verdeling van de stortstrategie in een later stadium aan te passen.

Volumes baggerwerk voor vaargeulonderhoud zijn voor onderscheidende varianten van stortstrategieën doorgerkend, waaruit blijkt dat varianten met storten in diepe putten een

10% tot 20% groter vaargeulonderhoud geven (i.e. circa +1 à +2 miljoen m<sup>3</sup>/jaar), waarbij met name de recirculatie bij de Put van Hansweert van belang is. Opgemerkt moet echter worden dat hierbij alleen het transport wordt beschouwd van gestort zand dat stabiel op de bodem ligt, en dus niet de initiële verliezen tijdens en net na het storten. Mogelijk dient het baggerbezwaar nog enigszins naar boven worden bijgesteld als de initiële verliezen zeer groot zijn, maar hiervoor is nog onvoldoende informatie beschikbaar. Verwacht wordt overigens dat het effect van de initieel grote verspreiding van stortingen in de diepe putten beperkt zal zijn als er gekeken wordt naar verplaatsingen over grote ruimteschalen (orde 5 km) welke bepaald worden door evenwichtstransporten (en minder door lokale harde lagen) én langere tijdschalen die nodig zijn voor het transport van het sediment.

Onderzoek naar de reproductie van de erosie van een proefstorting in de diepe put van Hansweert laat zien dat een ingespeelde bodem nodig is om een realistisch transport te verkrijgen in het morfologische model. Het model met een werkelijk gemeten bodem onderschat de transportcapaciteit lokaal in de geul aanzienlijk. Deze onderschatting kan slechts ten dele verklaard worden op basis van de representatie van de spiraalstroming in de modellen (i.e. 2DH of 3D hydrodynamica). Belangrijk voor het uitruimen van een storting in een diepe put is tevens de transport gradiënt die aanwezig is in de put. In de natuurlijke situatie blijft deze transport gradiënt onbenut als gevolg van de afwezigheid van sediment op de harde laag. De aanwezigheid van harde lagen (i.e. klei of veen) is sturend voor de geometrische ontwikkeling van de morfologie van diepe putten in de Westerschelde.

Op basis van de bevindingen wordt verwacht dat het storten in diepe putten lokaal kan leiden tot grote initiële volumeafnames van gestort sediment. Voor de Put van Hansweert wordt dit initieel verloren sediment hoofdzakelijk afgezet op de geulwand van de binnenbocht (wat eventueel kan leiden tot zettingsvloeiingen), wat ook verwacht wordt voor de andere locaties in bochten van de Westerschelde. De diepe Put van Hansweert en de binnenbocht kunnen dus niet als onafhankelijke morfologische entiteiten beschouwd worden, aangezien zand uit de Put van Hansweert op relatieve korte tijdschalen (weken tot maanden) naar de binnenbocht kan worden getransporteerd, en incidenteel terug kan keren naar de diepe put middels een zettingsvloeiing. Het relatief grote initiële verlies betekent niet automatisch dat er een grote impact is op vaargeulonderhoud bij de drempels. Dit vaargeulonderhoud wordt grotendeels bepaald door de transportcapaciteit ter plaatse van de drempels. Er wordt echter een effect verwacht van het gestorte sediment dat in de binnenbocht wordt afgezet. Dit zal niet direct teruggevoerd worden naar de drempel, maar kan wel zorgen voor verhoging van stroomsnelheden op andere plaatsen waardoor netto meer transport plaats vindt.

## 6.2 Aanbevelingen

Ten behoeve van de te kiezen stortstrategie voor de komende jaren wordt aanbevolen om:

- Het storten van zand in de diepe putten van de Westerschelde door de tijd heen langzaam op te bouwen, om zodoende de effecten te kunnen onderzoeken. Door de tijd heen kan, afhankelijk van de initiële ervaringen, het volume zand dat wordt gestort in de diepe putten worden vergroot.
- Het uitvoeren van monitoring van de bodemveranderingen rond stortlocaties in diepe putten van de Westerschelde. Om zodoende tijdig de effecten op de omgeving te kunnen inschatten. Dit geldt met name voor de putten welke een harde bodemlaag hebben, en er daardoor een groot initieel verlies zou kunnen plaatsvinden. Gedacht kan worden aan maandelijkse monitoring in het eerste halfjaar, waarvan tenminste één

meting voor het storten wordt opgenomen. Na verloop van tijd kan de terugkeerfrequentie worden teruggeschoefd tot een (half)jaarlijkse meting. Er dient van tevoren een expert beoordeling gemaakt te worden van het gebied dat beïnvloed zou kunnen worden door de storting. Waarschijnlijk dient tevens de bodemligging in de binnenbocht meegenomen te worden.

- de stortlocaties af te wisselen, om zodoende een te grote verondieping op een enkele stortlocatie te voorkomen (bijv. bij de Put van Hansweert of Gat van Ossensisse).
- Bij de verdeling van het stortmateriaal over de stortlocaties dient rekening gehouden te worden met de grootschalige zandbalans van de Westerschelde, welke beïnvloed zou kunnen worden door de maatregelen. Hierin kan gestuurd worden door een goed beleid.
- De samenstelling van het zand mee nemen bij de keuze van een locatie voor het terugstorten van gebaggerd zand in het estuarium. Sediment dat in grote mate uit silt en fijn zand bestaat kan bijvoorbeeld terug geplaatst worden op laag energetische locaties (o.a. op platen of plaatranden), terwijl gemiddeld en grof zand op hoog energetische locaties (o.a. diepe putten) kan worden geplaatst.

Ter ondersteuning van de bevindingen in dit rapport wordt aanbevolen om nader onderzoek te doen naar:

- De initiële verspreiding van zand na het storten in de diepe putten.  
Een proefstorting dient te worden uitgevoerd om de verspreiding van zand over de diepe put en aangrenzend gebied te monitoren. De nadruk dient te liggen op metingen tijdens én in de eerste dagen na de storting. Gedacht kan worden aan 1) bathymetrische metingen, 2) metingen van sediment transport en stroomsnelheid, 3) kartering van de harde laag in de diepe put voorafgaand aan de proefstorting en 4) sediment samples van de bodem zowel voor als na de storting.
- Oorzaken voor de discrepantie in mobiliteit van sediment in de morfologische modellen van de Westerschelde onderzoeken.  
Gedacht kan worden aan de invloed van turbulentie op lokaal zandtransport, welke verkend kan worden met metingen en numerieke modellen. Tevens is het goed om een nadere onderbouwing te geven van de kalibratie van de transportformulering in het numerieke model (zowel voor de diepe putten als op andere plaatsen in het estuarium).
- Geologie van de bodem onderzoeken in gebieden met grote diepte gradiënten.  
Met name de bodemsamenstelling aan de oostzijde van de Put van Hansweert dient onderzocht te worden aangezien hier een duidelijke diepteovergang waarneembaar is. De momenteel beschikbare informatie biedt onvoldoende detail om met zekerheid vast te kunnen stellen of op deze locaties een harde bodemlaag aanwezig is.
- Cumulatieve effecten van stortstrategieën in de Westerschelde over langere tijdschalen (decades).  
Ten behoeve hiervan dienen er efficiëntere rekenmethodes ingezet te worden, zoals numerieke modellen met een flexibel grid en/of een tijdstap die afhankelijk is van de optredende hydraulische condities. Met dergelijke modellen kunnen toekomstige wijzigingen in stortstrategieën veel efficiënter en nauwkeuriger worden geëvalueerd. Hierdoor kan het cumulatieve effect over decades worden meegenomen.



## Referenties

- Consortium Arcadis-Technum. (2007). "Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergronddocument Baggeren en storten." Antwerp, Belgium.
- Cleveringa, J. (2013). *Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets). Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-16. Project LTV veiligheid en toegankelijkheid; LTV V&T-rapport K-16. 30 augustus 2013. Rapport A2666. I/RA/11387/13.083/GVH.*
- Dam, G. (2013a). *Actualisatie Delft3D model van de Westerschelde. Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Rapport, 077028230:0.1 – C04021.002666.0100. 11 april 2013. Auteur G. Dam. (oplegnotitie I/RA/11387/12.103/GVH, Achtergrondrapport A-27)*
- Dam, G. (2013b). *Simulaties V&T met effectanalyse op mesoschaal. Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Rapport 077010281:0.1. Auteurs P.J. Menninga en G. Dam. C04021.002666.0100. 11 september 2013. (oplegnotitie I/RA/11387/13.095/GVH, Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-20)*
- Dam, G. (2013c). *LTV A-23: validatie FINEL2D/3D model adhv stroommetingen Put van Borssele. Auteur : G.Dam.*
- Dam, G. (2013d). *A-28 LTV - Veiligheid en Toegankelijkheid. Harde lagen Westerschelde.*
- Dam, G. (2013e). *Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Auteur G. Dam. Achtergrondrapport A-26, 1630/U11274/GD/G, 13 augustus 2013. (oplegnotitie I/RA/11387/12.100/GVH, Achtergrondrapport A-26).*
- De Vriend, H.J., Wang, Z.B., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., Ding, P. (2011). *Ecomorphological problems in the Yangtze Estuary and the Western Scheldt. Wetlands 31, 1033–1042. <http://dx.doi.org/10.1007/s13157-011-0239-7>.*
- Gensheimer R.J. (2010). *Dynamics of particle clouds in ambient currents with application to open-water sediment disposal. PhD Thesis, Cambridge Massachusetts Institute of Technology.*
- Huisman, B.J.A., Ruessink, B.G., De Schipper, M.A., Luijendijk, A.P., Stive, M.J.F. (2018). *Modelling of bed sediment composition changes at the lower shoreface of the Sand Motor. Coastal Engineering, Vol. 132, pp. 33-49*
- IMDC (2018a). *Factual datarapport Diepe Delen 2017. I/RA/12161/17.204/GLE/.*
- IMDC (2018b). *Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 1: Flexibel Storten 2017. Maandrapport Flexibel Storten februari - maart 2018. I/RA/11498/18.040/JMA.*
- Kuijper, K., en Lescinski, J. (2013). *Data analyses water levels ebb and flood volumes and bathymetries Western Scheldt, LTV V&T rapport G-05, March 2013.*

- Lanckriet, T., Depreiter, D., Van Holland, G. (2017). *Equilibrium-Type Response Model for the Sediment Volume of Dredging and Disposal Areas*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000406.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M. and Stelling, G. S. (2004). *Development and validation of a three-dimensional morphological model*. *Coastal Engineering*, Vol. 51(8-9), pp. 883-915.
- McLaren, P. (1993). *Patterns of sediment transport in the western part of the Westerschelde*, Tech. Rep., GeoSea Consulting, Cambridge, UK, 1993.
- McLaren, P. (1994). *Sediment transport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde*, Tech. Rep., GeoSea Consulting, Cambridge, UK, 1994.
- Plancke, Y. (2017). *Analyse en D3D modellering stortingen diepe delen*. Waterbouwkundig Laboratorium.
- Plancke, Y., Claeys, S., Verwaest, T., Mostaert, F. (2017a). *Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 23 – Stroming- en sedimentmeting ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. WL Rapporten, 00\_031\_23*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Plancke, Y., Schrijver, M., Meire, D., Verwaest, T., Mostaert, F. (2017b). *Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 22 – Analyse van de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie nabij de Plaat van Walsoorden. Versie 1.0. WL Rapporten, 00\_031\_22*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen & Rijkswaterstaat Zee & Delta: Middelburg.
- Plancke Y. (2018). *Memo 22-1-2018 Korrelanalyse en natte densiteit baggerstalen*. Waterbouwkundig Laboratorium.
- Schrijvershof, R. (2016). *Gedetailleerd D3D model PvW (macrocel 5) tbv plaatrandstortingen; ~1 jaar morfologische ontwikkeling*.
- Schrijvershof, R. en Vroom, J. (2016). *Effecten van realistische (extreme) stortstrategieën in de Westerschelde*. Deltares rapport 1220094.
- Schrijvershof, R.A., De Vet, L. (in voorbereiding). *Morfologisch modelleren plaatrandstortingen Plaat van Walsoorden*. Deltares rapport 1230096-000.
- Schroevens, M., Huisman, B.J.A., Van der Wal, M. en Terwindt, J. (2011). *Measuring ship induced waves and currents on a tidal flat in the Western Scheldt Estuary*. *Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM), 2011 IEEE/OES 10th*. Pp. 123-129
- TNO, 2003, *Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium*, TNO rapport 03-213-B1208
- Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, ISBN 90-800356-2-9.
- Van Rijn, L.C. (2007a). *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves I – Initiation of motion, bed roughness and bed load transport*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133 (6), pp. 649-667.



*Van Rijn, L.C. (2007b). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves II – Suspended transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133 (6), pp. 668-689.*

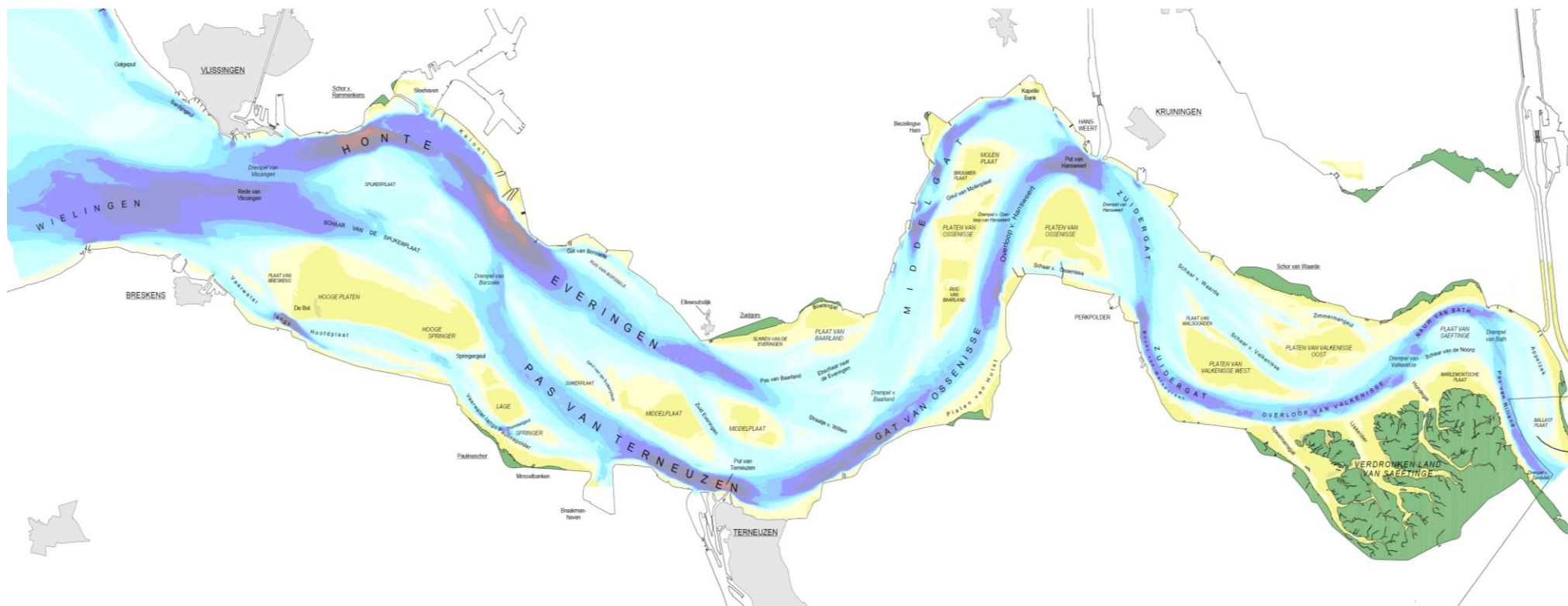
*Vroom, J., & Schrijvershof, R. (2015). Overzicht van menselijke ingrepen in de Westerschelde en haar mondingsgebied in de periode 1985-2014.*

*Vroom, J., de Vet, P.L.M. en Van der Werf, J.J. (2015). Validatie waterbeweging Delft3D NeVla model Westerscheldemonding. Deltares rapport 1210301-001.*

*Wijnberg, K.M. (2002). Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Hollandcoast. Marine Geology 189, 227–247.*



## A Overzicht naamgeving geulen en platen







Tabel B.2 Verdeling van gebaggerd materiaal over de stortlocaties voor strategie T02 'dichtstbijzijnde putten'

DredgeDepth	ZBO	S1	S2	W2	W2N	Honte	Hooge Platen Noord	Hooge Platen West	Geul van de Spijkerplaat (SN11)	Put van Borselle	Everingen (SN31)	Put van Terneuzen	Rug van Baardand	Inloop van Ossenisse	Gat van Ossenisse (SH41)	Overloop van Hansweert	Put van Hansweert	Zuidegat (SH51)	Zuidegat zuid (SH51)	Schaar van Waarde (SH51)	Plaat van Walsoorden	Overloop van Valkenisse Dump	Nauw van Bath (gaulwand)	Nauw van Bath Put
DumpDistr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zeebrugge	18.02	61%	25%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Geul 1 West	18.76	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Geul 1 Oost	18.76	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pas van het Zand	18.36	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Scheur West	18.76	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Scheur Oost	17.96	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Wielingen	17.46	0%	0%	0%	20%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Vlissingen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Borselle	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pas van Terneuzen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Put van Terneuzen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gat van Ossenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	43%	0%	57%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Overloop van Hansweert	16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	0%	40%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Hansweert	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	68%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Walsoorden	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Overloop van Valkenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	73%	0%	27%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Valkenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	77%	0%	23%	0%	0%	0%	0%	0%
Nauw van Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	63%	0%	16%	0%	7%	0%	13%	0%
Drempel van Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47%	0%	22%	0%	0%	0%	31%	0%
Vaarwater boven Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16%	0%	27%	0%	0%	14%	0%	43%

Tabel B.3 Verdeling van gebaggerd materiaal over de stortlocaties voor strategie T03 'westelijke putten'

DredgeDepth	ZBO	S1	S2	W2	W2N	Honte	Hooge Platen Noord	Hooge Platen West	Geul van de Spijkerplaat (SN11)	Put van Borselle	Everingen (SN31)	Put van Terneuzen	Rug van Baardand	Inloop van Ossenisse	Gat van Ossenisse (SH41)	Overloop van Hansweert	Put van Hansweert	Zuidegat (SH51)	Zuidegat zuid (SH51)	Schaar van Waarde (SH51)	Plaat van Walsoorden	Overloop van Valkenisse Dump	Nauw van Bath (gaulwand)	Nauw van Bath Put
DumpDistr	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	3	3	1	1	3	1	3	1
Zeebrugge	18.02	61%	25%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Geul 1 West	18.76	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Geul 1 Oost	18.76	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pas van het Zand	18.36	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Scheur West	18.76	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Scheur Oost	17.96	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Wielingen	17.46	0%	0%	0%	20%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Vlissingen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	90%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Borselle	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pas van Terneuzen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Put van Terneuzen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gat van Ossenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Overloop van Hansweert	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Put van Hansweert	16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	30%	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Hansweert	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Walsoorden	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Overloop van Valkenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Valkenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	50%
Nauw van Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	50%
Drempel van Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	50%
Vaarwater boven Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	50%

Tabel B.4 Verdeling van gebaggerd materiaal over de stortlocaties voor strategie T04 'hybride'

DumpDistr	DredgeDieph	ZBO		S1	S2	W2	W2N	Honte	Hooge Platen Noord	Hooge Platen West	Geul van de Spijkerslaan (SN11)	Put van Borselle	Eveningen (SN31)	Put van Terneuzen	Rug van Baarland	Inloop van Ossenisse	Gat van Ossenisse (SH41)	Overloop van Hansweert	Put van Hansweert	Zuidgat (SH51)	Zuidgat zuid (SH51)	Schaar van Waarde (SN51)	Plaat van Walsoorden	Overloop van Valkenisse Dump	Nauw van Bath (geulwand)	Nauw van Bath Put
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	3	3	1	1	3	1	3	1
Zeebrugge	18.02	61%	25%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Geul 1 West	18.76	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Geul 1 Oost	18.76	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pas van het Zand	18.36	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Scheur West	18.76	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Scheur Oost	17.96	0%	47%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Wielingen	17.46	0%	0%	0%	20%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Vlissingen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	50%	10%	10%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Borselle	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	3%	38%	50%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Pas van Terneuzen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	6%	21%	0%	23%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Put van Terneuzen	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	47%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gat van Ossenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	22%	0%	3%	22%	22%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Overloop van Hansweert	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	16%	34%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Put van Hansweert	16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	13%	0%	0%	0%	0%	13%	30%	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%
Drempel van Hansweert	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%	38%	0%	50%	3%	0%	5%	2%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Walsoorden	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	33%	0%	0%	13%	50%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
Overloop van Valkenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	26%	0%	0%	11%	50%	6%	5%	0%	0%	0%	0%
Drempel van Valkenisse	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	27%	0%	0%	8%	0%	3%	4%	25%	7%	25%	
Nauw van Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	11%	0%	10%	0%	25%	16%	25%	
Drempel van Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	4%	0%	0%	13%	0%	2%	7%	25%	22%	25%	
Vaarwater boven Bath	17.2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	5%	24%	25%	13%	25%	