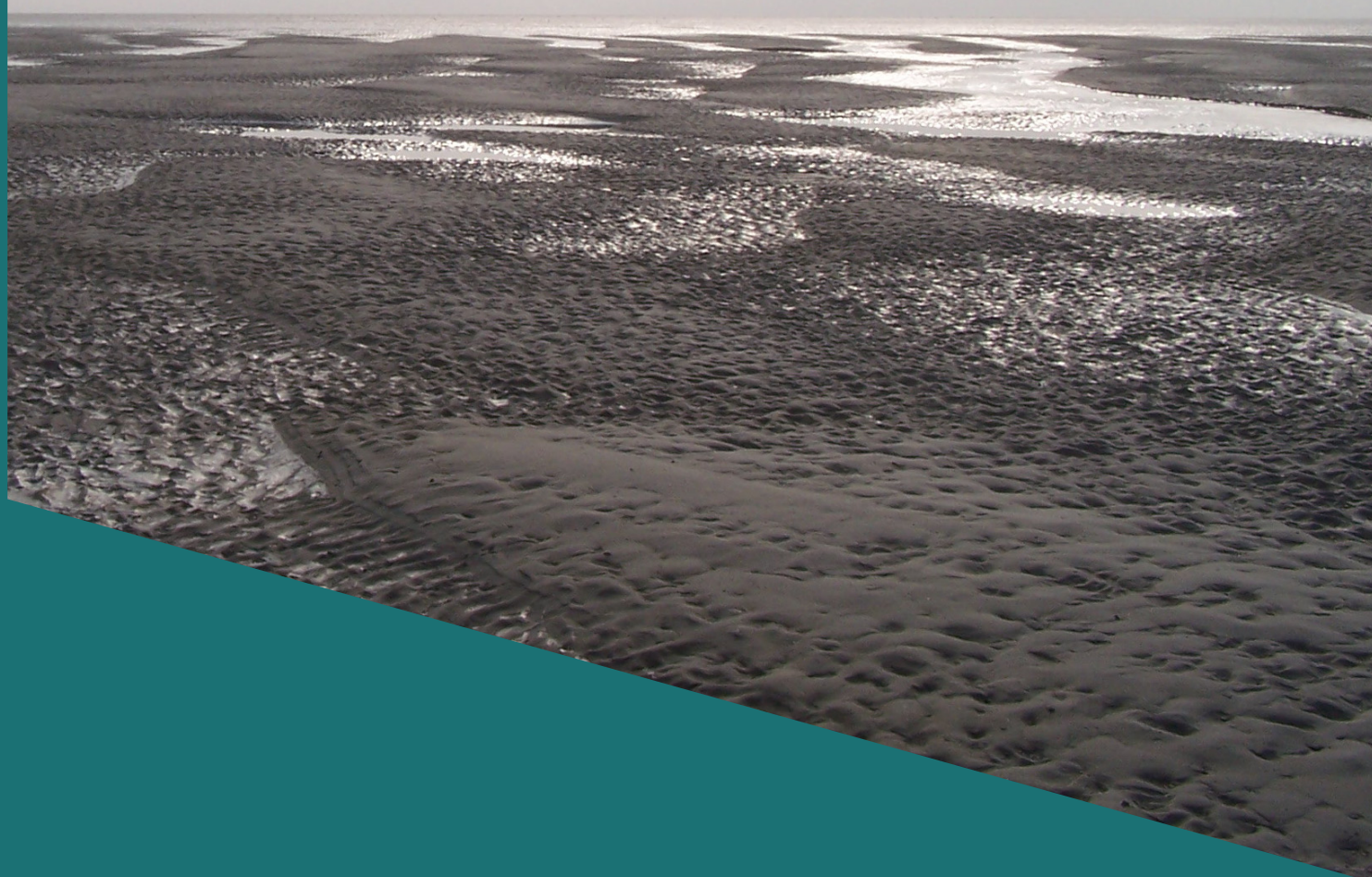




Vlaanderen
is wetenschap



14_024_12
WL rapporten

Morfologie mesoschaal – scenario's diepe delen

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

Deelrapport 12
Sedimentatie ter hoogte van drempels
scenario's stortingen diepe delen

waterbouwkundiglaboratorium.be

Morfologie mesoschaal – scenario's diepe delen

Deelrapport 12 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: scenario's stortingen diepe delen

Plancke, Y.; Meire, D.; De Maerschalck, B.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2019
D/2019/3241/204

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Meire, D.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F. (2019). Morfologie mesoschaal – scenario's diepe delen: Deelrapport 12 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: scenario's stortingen diepe delen. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_12. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2019R14_024_12
Keywords (3-5):	Numerieke modellering, sediment, Schelde-estuarium, stortingen		
Tekst (p.):	25	Bijlagen (p.):	5
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Plancke, Y.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire, D. De Maerschallck, B.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2019-09-11 10:04:53 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Dieter Meire</i> Getekend door: Bart De Maerschallck (Signature) Getekend op: 2019-09-03 13:49:55 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Bart De Maerschallck</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2019-10-01 12:30:06 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-09-03 13:53:53 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

In het kader van het onderzoeksprogramma “Agenda voor de Toekomst” wordt binnen thema 7 “Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie” onderzoek uitgevoerd naar de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal. Binnen dit project wordt naast de data-analyse ook gebruik gemaakt van numerieke modellen. In dit rapport is onderzoek gebeurd naar de sedimentdynamica van gestorte specie ter hoogte van stortzones in diepe delen van de vaargeul, met name SH41, SH51, diepe put Hansweert en inloop Ossensisse.

Met behulp van een numeriek morfologisch model (NeVla) werden scenario's onderzocht waarbij een vast hoeveelheid sediment gestort werd. In de eerste fase werd de referentie-simulatie (zonder stortingen) vergeleken met de waargenomen morfologische ontwikkelingen in de verschillende stortzones. Vervolgens werd met het model onderzocht hoe en waarheen de gestorte sedimenten zich verplaatsen. Hieruit wordt enerzijds de stabiliteit afgeleid en anderzijds de retourstroom van het sediment naar de drempel van Hansweert.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Doelstelling.....	1
2 Waargenomen morfologische ontwikkelingen	2
2.1 Stortzone SH51	2
2.2 Stortzone SH41	3
2.3 Stortzone diepe put van Hansweert.....	4
2.4 Stortzone inloop Ossenissee	5
3 Numeriek model	7
3.1 Grid	7
3.2 Topo-Bathymetrie	8
3.3 Randvoorwaarden	8
3.3.1 Opwaartse randvoorwaarden	8
3.3.2 Afwaartse randvoorwaarden.....	8
3.3.3 Sediment.....	9
3.3.4 Morfologie	9
3.3.5 Stortingen	9
4 Scenario's.....	10
4.1 Beschrijving scenario's.....	10
4.2 Verwerking resultaten	11
4.2.1 Morfologische ontwikkelingen stortingen	11
4.2.2 Stabiliteit gestorte specie	12
4.2.3 Sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert	12
5 Resultaten.....	13
5.1 Referentie-simulatie	13
5.1.1 Modellerings	13
5.1.2 Vergelijking waarnemingen - modellerings	14
5.2 Stortzone SH51	15

5.3	Stortzone SH41	16
5.4	Stortzone diepe put Hansweert	18
5.5	Stortzone inloop Ossensisse	19
5.6	Sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert	22
6	Conclusies	24
7	Referenties	25
Bijlage – Resultaten simulaties		B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht scenario's	10
Tabel 2 – Morfologische trend op basis van waarnemingen en in referentiesimulatie (H519).....	15
Tabel 3 – Stabiliteit van gestorte specie.....	21
Tabel 4 – Retourstroming van het totale gestorte sedimentvolume (3 Mm ³) naar drempel van Hansweert	23

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Ontwikkelingen van het watervolume op de middellange termijn (links) en het sedimentvolume op korte termijn (rechts) en het gestorte sedimentvolume (cumulatief) binnen de polygoon SH51	3
Figuur 2 – Ontwikkelingen van het watervolume op de middellange termijn (links) en het sedimentvolume op korte termijn (rechts) en het gestorte sedimentvolume (cumulatief) binnen de polygoon SH41	3
Figuur 3 – Ontwikkelingen van de gemiddelde diepte onder 0 mNAP binnen de stortzone DPHW	4
Figuur 4 – Morfologische ontwikkelingen stortzone DPHW tussen 1985 en 2005.....	4
Figuur 5 – Volumeveranderingen in stortzone DPHW sinds het uitvoeren van een stortproef van 1 Mm ³ (links) en verschilkaart T5 (26/07/2016) en T6 (07/04/2017)	5
Figuur 6 – Ontwikkelingen van de gemiddelde diepte onder 0 mNAP binnen de stortzone INOS.....	5
Figuur 7 – Morfologische ontwikkelingen stortzone INOS tussen 1990 en 2015	6
Figuur 8 – Volumeveranderingen in stortzone INOS sinds het uitvoeren van een stortproef van 1 Mm ³ (links) en verschilkaart T0 (28/04/2016) en T7 (04/04/2017)	6
Figuur 9 – Illustratie van het NEVLA rooster	7
Figuur 10 – Cyclisch morfologisch getij ter hoogte van Vlissingen (m TAW)	8
Figuur 11 – Overzicht stortzones gebruikt in scenario-onderzoek Westerschelde.....	11
Figuur 12 – Erosie-sedimentatie patronen in de referentiesimulatie nabij de beschouwde stortzones na 2 jaar Links: INOS en SH41 Rechts: DPHW en SH51	14
Figuur 13 – Overzicht sedimentvolume binnen verschillende polygoon in referentiescenario H519	14
Figuur 14 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon SH51 absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie H519 (rechts).....	16
Figuur 15 – Overzicht morfologische ontwikkelingen t.o.v. referentie voor scenario H518 (links – SH51), H517 (rechts – SH41)	17
Figuur 16 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon SH41 absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie H519 (rechts)	17
Figuur 17 – Overzicht morfologische ontwikkelingen t.o.v. referentie voor scenario H514 (links), H515 (midden) en H516 (rechts) H514: 3 Mm ³ over volledige stortzone, H515: 3 Mm ³ in afwaartse deel, H516: 3 Mm ³ in opwaartse deel	19
Figuur 18 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon DPHW absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie H519 (rechts) x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) y-as: sedimentvolume binnen polygoon.....	19
Figuur 19 – Overzicht morfologische ontwikkelingen t.o.v. referentie voor scenario H511 (links), H512 (midden) en H513 (rechts), H511: 3 Mm ³ over volledige stortzone, H512: 3 Mm ³ in afwaartse deel, H513: 3 Mm ³ in opwaartse deel	20
Figuur 20 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon INOS absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie (rechts)	21
Figuur 21 – Overzicht volumeverandering drempel van Hansweert t.o.v. referentie	23

Figuur 22 – Bathymetrie (m NAP) en morfologische veranderingen in referentiesimulatie na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)	B1
Figuur 23 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h211 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B2
Figuur 24 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h212 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B2
Figuur 25 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h213 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B3
Figuur 26 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h214 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B3
Figuur 27 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h215 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B4
Figuur 28 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h216 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B4
Figuur 29 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h217 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B5
Figuur 30 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h218 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder).....	B5

1 Inleiding

1.1 Situering

In de periode 2014-2017 zal het vier jaar durend onderzoeksprogramma “Agenda voor de Toekomst” van het Schelde-estuarium uitgevoerd worden. Deze Agenda voor de Toekomst kwam tot stand in het kader van de eerste evaluatie van het Verdrag gemeenschappelijk Beleid en Beheer. De Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie heeft met deze Agenda ingestemd op de najaarsvergadering van 2013.

Hierop volgend werd een Plan van Aanpak (Beirinckx *et al.*, 2013) opgesteld, dat de leidraad is voor het onderzoek 2014-2017. Op basis hiervan zullen deelopdrachten gedefinieerd worden met gedetailleerdere onderzoeksvragen. Voorliggend rapport past in het onderzoek naar de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal, dat onderdeel is van thema 7 uit de Agenda “Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie”.

Binnen dit project zal naast de data-analyse ook gebruik gemaakt worden van numerieke modellen. Deze modellen zullen worden ingezet om de morfologische ontwikkelingen op de mesoschaal te reproduceren. De aandacht zal uitgaan naar zowel de sedimentatie ter hoogte van drempels als de sedimentdynamica van gestorte specie. Volgende rapporten zullen hiervoor opgesteld worden:

- Sedimentatie ter hoogte van drempels
 - Data-analyse (Vos *et al.*, 2017)
 - Gevoeligheidsonderzoek numeriek model (Meire *et al.*, s.d.)
 - Validatie van het numerieke model (Stark *et al.*, 2017)
- Sedimentdynamica van gestorte specie in diepe delen
 - Data-analyse (Plancke *et al.*, s.d.)
 - Gevoeligheidsonderzoek numeriek model (Vos *et al.*, s.d.)
 - Scenario-onderzoek (voorliggend rapport)

1.2 Doelstelling

Voorliggend rapport kadert in het onderzoek dat het doel heeft de kennis inzake sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal te verbeteren, en daardoor een bijdrage te leveren aan de toekomstige bagger- en stortstrategie.

In dit rapport wordt een scenario-onderzoek uitgevoerd met behulp van de numerieke modellen voor het simuleren van de sedimentdynamica ter hoogte van stortzones in diepe delen. Hierbij wordt gekeken naar de stabiliteit van de gestorte specie en de verspreiding van de specie, met speciale aandacht voor de aangrenzende drempel van Hansweert.

2 Waargenomen morfologische ontwikkelingen

Aangezien in voorliggend rapport numerieke morfologische modelsimulaties worden ingezet, is een vergelijking tussen de waargenomen ontwikkelingen en de modelresultaten noodzakelijk om de toepasbaarheid van het model in te kunnen schatten. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de waargenomen morfologische ontwikkelingen ter hoogte van de verschillende stortzones die in de scenario's worden gebruikt. Het betreft:

- SH51
- SH41
- Diepe put van Hansweert
- Inloop Ossensisse

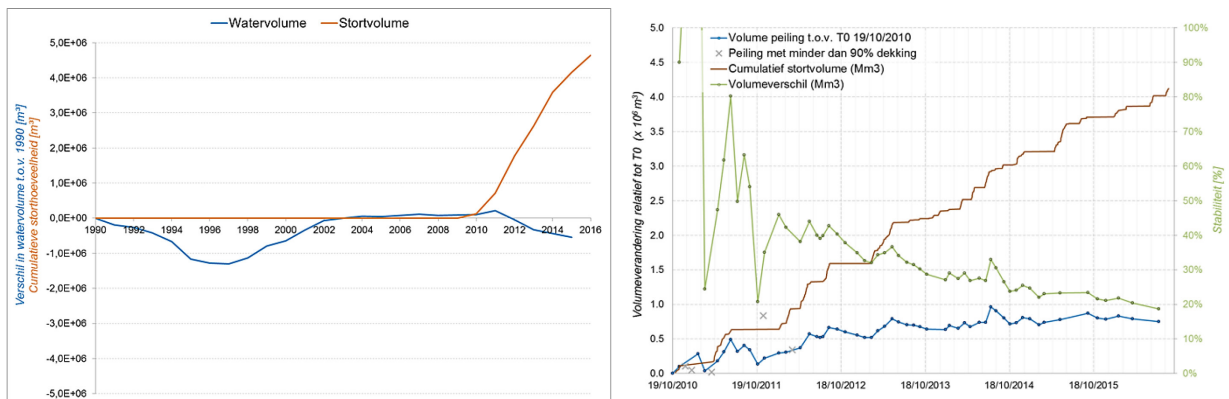
In het kader van dit project werd in (Plancke *et al.*, s.d.) een analyse uitgevoerd van de morfologische ontwikkelingen ter hoogte van stortzone SH51 en SH41, zowel op de korte (sinds 2010, op basis van MBES-peilingen, inclusief stortingen) als de middellange termijn (sinds 1990, op basis van SBES-vaklodingen). In (IMDC, 2017a) is een analyse uitgevoerd van de lange termijn ontwikkelingen (sinds 1955, op basis van SBES-vaklodingen) van de verschillende stortzones. Tenslotte werd in (Vos *et al.*, 2017), op basis van beschikbare MBES-peilingen, een analyse uitgevoerd van de waargenomen sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert in perioden zonder baggerwerken.

2.1 Stortzone SH51

Op basis van de vaklodingen (Rijkswaterstaat) werden de veranderingen van het watervolume onder 0m NAP bepaald ten opzichte van de toestand in 1990 (Figuur 1 - links). Op deze figuur is tevens het cumulatieve stortvolume terug te vinden sinds 1990 in de stortzone SH51. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze zone pas sinds 2010 in gebruik is. Echter, voor 2010 werd ook in de omgeving sediment teruggestort, met name nabij het Konijnenschor (vak Bs uit (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2001)). Voor het vak SH51 blijven de volumeveranderingen beperkt. Over de periode 1990-2010 is er quasi geen volumeverandering. Begin jaren 1990 is er een afname van het volume (ca. 1 Mm³), die in de 2^e helft van de jaren 1990 verdwijnt. Deze initiële afname van het watervolume kan gerelateerd worden aan de stortingen in vak Bs "Konijnenschor" (tussen 1 en 3 Mm³/jaar over de periode 1990-1996).

Sinds 2010 wordt de zone gebruikt voor het terugstorten van onderhoudsspecie. In totaal is ca. 4 Mm³ specie gestort in de periode 2010-2016, waarbij ca. 0,8 Mm³ nog terug te vinden is binnen de polygoon (stabiliteit van ca. 20%) (Figuur 1 - rechts).

Figuur 1 – Ontwikkelingen van het watervolume op de middellange termijn (links) en het sedimentvolume op korte termijn (rechts) en het gestorte sedimentvolume (cumulatief) binnen de polygoon SH51

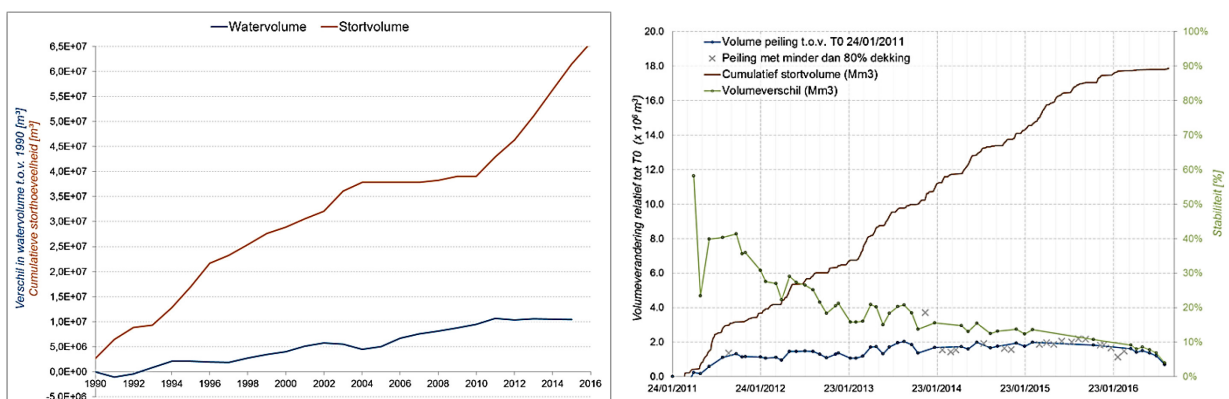


2.2 Stortzone SH41

Op basis van de vaklodingen (Rijkswaterstaat) werden de veranderingen van het watervolume onder 0m NAP bepaald ten opzichte van de toestand in 1990 (Figuur 2 - links). Op deze figuur is tevens het cumulatieve stortvolume terug te vinden sinds 1990 in de stortzone SH41. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze zone pas sinds 2010 in gebruik is. Echter, voor 2010 werd ook in de omgeving sediment teruggestort, met name in het Gat van Ossensisse (vak Is uit (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2001)). Voor het vak SH41 is er over de periode 1990-2010 een quasi continue toename in het watervolume te zien (10 Mm³ over 20 jaar), dit ondanks intensieve stortingen in de omgeving (ca. 2 à 4 Mm³/jaar).

Sinds 2010 wordt de zone gebruikt voor het terugstorten van onderhoudsspecie. In totaal is ca. 18 Mm³ specie gestort in de periode 2010-2016, waarbij ca. 1 Mm³ nog terug te vinden is binnen de polygoon (stabiliteit van ca. 5%) (Figuur 2 - rechts).

Figuur 2 – Ontwikkelingen van het watervolume op de middellange termijn (links) en het sedimentvolume op korte termijn (rechts) en het gestorte sedimentvolume (cumulatief) binnen de polygoon SH41

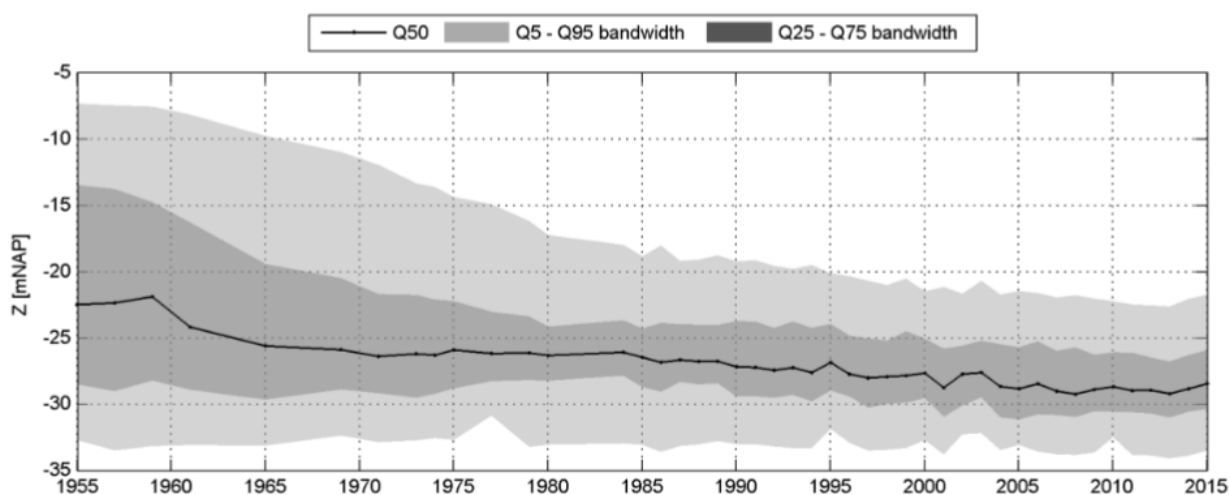


2.3 Stortzone diepe put van Hansweert

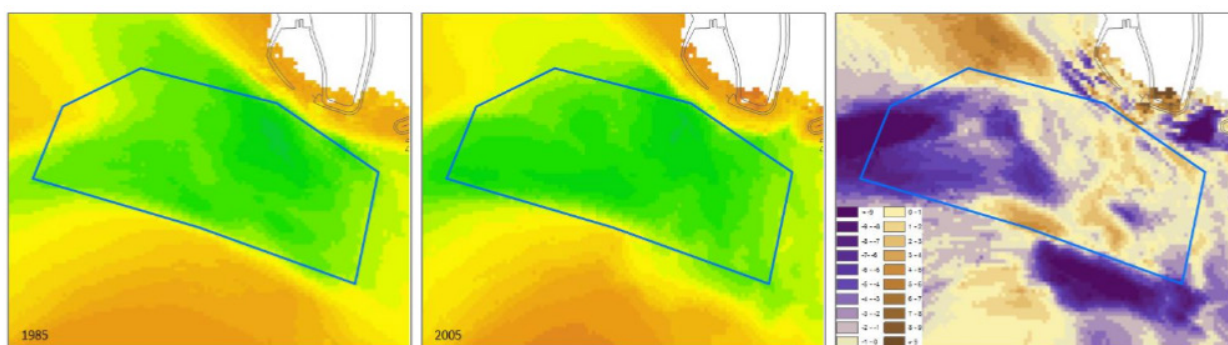
Op basis van de vaklodingen (Rijkswaterstaat) werden door IMDC (IMDC, 2017a) de veranderingen van de gemiddelde diepte sinds 1955 geanalyseerd (Figuur 3) voor de diepe put van Hansweert (DPHW). Initieel is er een verdieping waar te nemen, die te relateren is aan de morfologische ontwikkelingen in macrocel 4. In de periode 1985-2005 is er een geleidelijke verdieping van de zone, die vervolgens stagneert. De verdieping vindt plaats in het afwaartse deel (Figuur 4) en hangt samen met de vergroting van de Overloop van Hansweert, die zich in de tweede helft van de 20^e eeuw als hoofdgeul manifesteert.

In 2016 werd een stortproef uitgevoerd in deze stortzone, waarbij, verspreid over 2 maanden, 1 Mm³ sediment werd gestort. Figuur 5 (links) geeft de volumeveranderingen weer binnen de stortzone (uit (IMDC, 2017b)). Hierbij valt het op dat na de stortingen amper 55% van het gestorte sediment wordt teruggevonden binnen de polygoon, maar dat in het volgende jaar de stabiliteit gelijk blijft. Uit de verschilkaarten (Figuur 5 – rechts) is echter te zien dat er een grote dynamiek optreedt, waarbij het moeilijk te oordelen is of er een herverdeling van het gestorte sediment plaatsvindt, of dat er uitwisseling van sediment plaatsvindt met de aangrenzende gebieden.

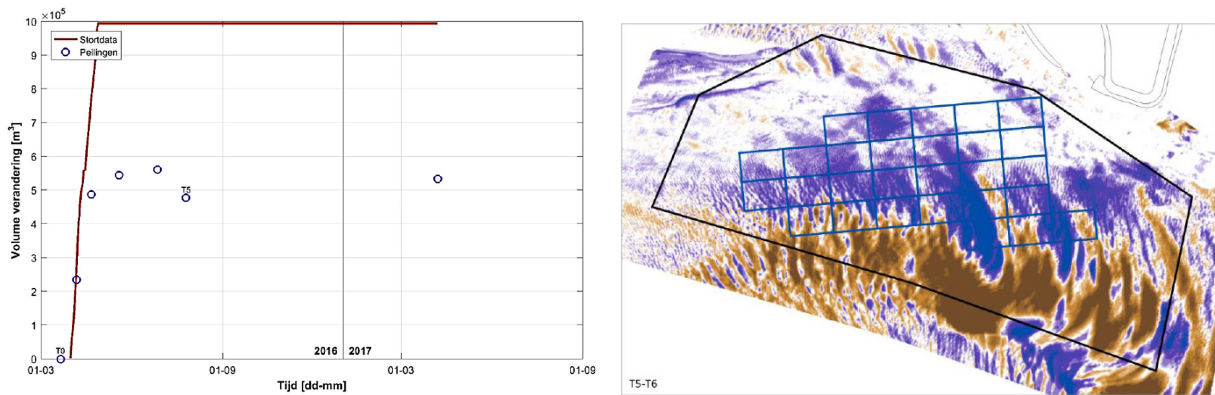
Figuur 3 – Ontwikkelingen van de gemiddelde diepte onder 0 mNAP binnen de stortzone DPHW
Bron: (IMDC, 2017a)



Figuur 4 – Morfologische ontwikkelingen stortzone DPHW tussen 1985 en 2005
Bron: (IMDC, 2017a)



Figuur 5 – Volumeveranderingen in stortzone DPHW sinds het uitvoeren van een stortproef van 1 Mm³ (links) en verschilkaart T5 (26/07/2016) en T6 (07/04/2017)
Bron: (IMDC, 2017b)

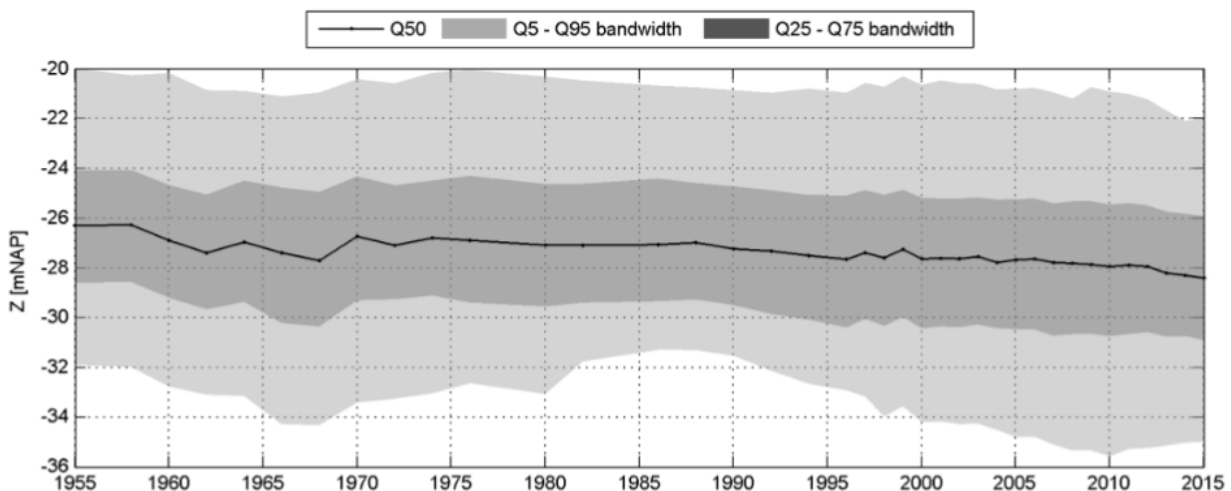


2.4 Stortzone inloop Ossenissee

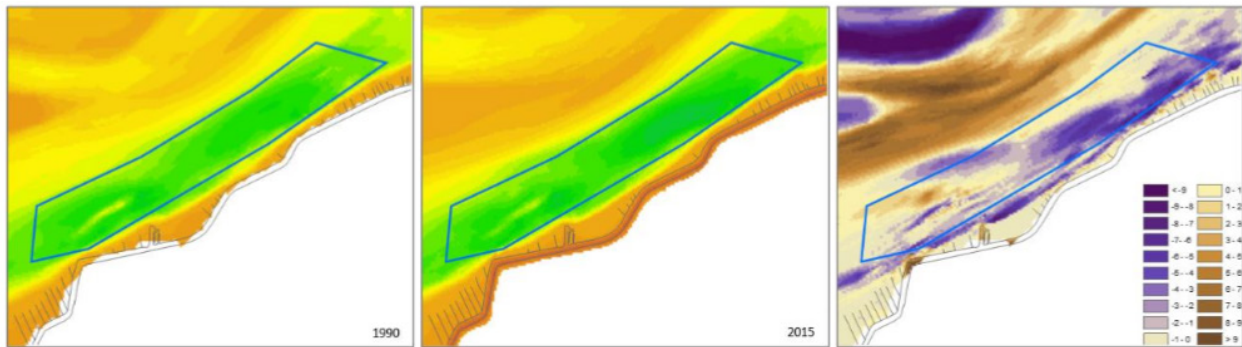
Op basis van de vaklodingen (Rijkswaterstaat) werden door IMDC (IMDC, 2017a) de veranderingen van de gemiddelde diepte sinds 1955 geanalyseerd (Figuur 6) voor de inloop Ossenissee (INOS). Over de periode 1955-2015 is er een geleidelijke (beperkte) verdieping van de zone waar te nemen. De verdieping vindt plaats in het opwaartse deel en langs de oever (Figuur 7).

In 2016 werd een stortproef uitgevoerd in deze stortzone, waarbij, verspreid over 2 weken, 1 Mm³ sediment werd gestort. Figuur 8 (links) geeft de volumeveranderingen weer binnen de stortzone (uit (IMDC, 2017b)). Na de stortingen wordt ongeveer 80% van het gestorte sediment teruggevonden. In het volgende jaar neemt de stabiliteit geleidelijk af, om na 1 jaar nog 65% te bedragen. Uit de verschilkaarten (Figuur 8 - rechts) is te zien dat dat de storting grotendeels stabiel is.

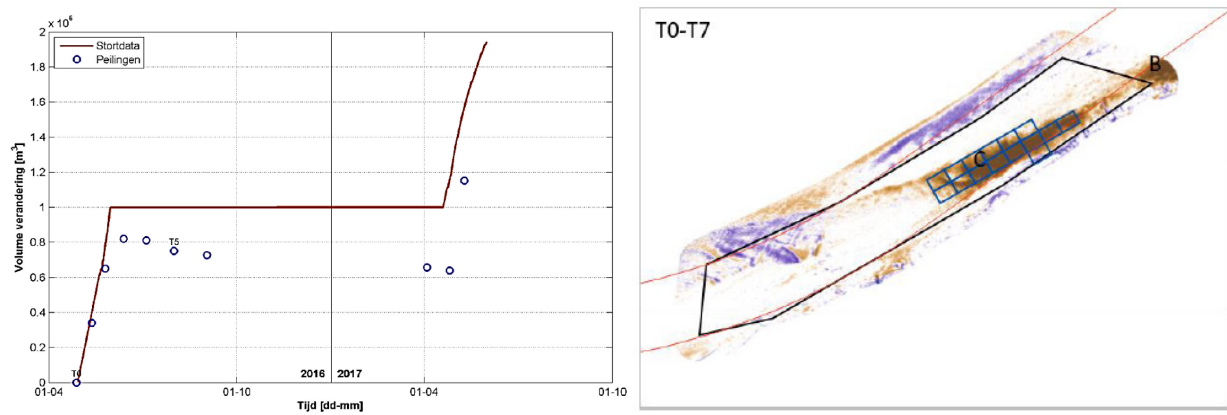
Figuur 6 – Ontwikkelingen van de gemiddelde diepte onder 0 mNAP binnen de stortzone INOS
Bron: (IMDC, 2017a)



Figuur 7 – Morfologische ontwikkelingen stortzone INOS tussen 1990 en 2015
Bron: (IMDC, 2017a)



Figuur 8 – Volumeveranderingen in stortzone INOS sinds het uitvoeren van een stortproef van 1 Mm³ (links) en
verschilkaart T0 (28/04/2016) en T7 (04/04/2017)
Bron: (IMDC, 2017b)



3 Numeriek model

Voor de morfologische modellering van de stort-scenario's werd gebruik gemaakt van het NEVLA model. Het NEVLA-model is een hydrodynamisch model dat ontwikkeld werd in SIMONA (Maximova *et al.*, 2016; Verheyen *et al.*, 2012). In onderstaande paragrafen worden de modelspecificaties beschreven die meest relevant zijn met betrekking tot voorliggende studie. Voor een meer volledige modelomschrijving binnen de studie 'morfologie mesoschaal' wordt verwezen naar Meire *et al.* (s.d.) en Vos *et al.* (s.d.).

Figuur 9 – Illustratie van het NEVLA rooster



3.1 Grid

Het NEVLA-grid dekt het volledige Schelde estuarium af en omvat meer specifiek een deel van de Noordzee, de Vlake van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de getijgebonden zijrivieren (Figuur 9). De afwaartse rand van het NEVLA-model is gelegen in de Noordzee, de opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied. De resolutie van het rekenrooster varieert van ongeveer 400 m op de Noordzee en neemt geleidelijk af tot ongeveer 30 meter in de buurt van Schelle. Ter hoogte van de interessegebieden bedraagt de roosterresolutie zo'n 100 m. Deze resolutie kan als voldoende beschouwd worden om hydrodynamische processen op mesoschaal te bestuderen (Stark *et al.*, 2017).

In het gevoeligheidsonderzoek werd de afwaartse rand van het model afgesneden ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand (witte lijn op Figuur 9) om de rekentijd te reduceren. Bij het doorrekenen van morfologische simulaties bleken er instabiliteiten op te treden in het mondingsgebied. Dit was ook al eerder vastgesteld (Meire *et al.*, 2017) maar door enkele parameters aan te passen werd dit binnen de perken gehouden en bleek dit geen probleem in het gevoeligheidsonderzoek. Aangezien de instabiliteiten toch bleven manifesteren, werd voor dit scenario-onderzoek besloten de rand te behouden in de Noordzee.

3.2 Topo-Bathymetrie

De topo-bathymetrie van de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde is gebaseerd op metingen van 2011 aangeleverd door respectievelijk Rijkswaterstaat en Vlaamse Hydrografie. De bathymetrie van de intertidale gebieden is gebaseerd op LIDAR-metingen van 2011. Bij overlap tussen LIDAR en bathymetrische gegevens, is voorkeur gegeven aan bathymetrie. TAW wordt gebruikt als verticaal referentievlak.

De bathymetrische data van de Westerschelde zijn beschikbaar met een resolutie van 20x20m (interpolatie van singlebeam echosounding raaien). De bathymetrische data van de Zeeschelde zijn beschikbaar met een resolutie van 1x1m (gebiedsdekkende multibeam peilingen). Deze werden ten behoeve van deze studie omgezet naar een 5x5m grid om de totale bestandsgrootte van het samengestelde bathymetrische grid werkbaar te houden. Aangezien de gridcellen van het model groter zijn dan 5x5 m vormt dit geen probleem voor het aanmaken van de modelbathymetrie. Het gebruikte coördinatenstelsel is RD. De topo-bathymetrische gegevens werden geïnterpoleerd op het NEVLA-grid gebruik makende van de 'grid cell averaging' tool in Delft 3D.

3.3 Randvoorwaarden

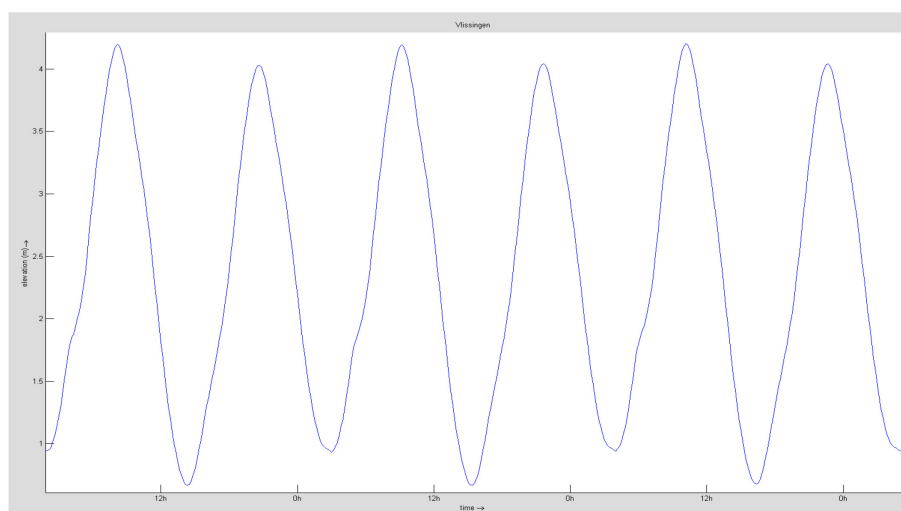
3.3.1 Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse rand worden debieten opgelegd, meer bepaald dagelijkse meetwaarden van het jaar 2009. Aangezien het interessegebied hier de Westerschelde betreft zullen deze randvoorwaarden de resultaten nauwelijks beïnvloeden.

3.3.2 Afwaartse randvoorwaarden

De afwaartse rand wordt opgelegd aan de zeewaartse randen in de Noordzee. Het betreft randvoorwaarden die werden gegenereerd met het CSM-ZuNo model. Als randvoorwaarde wordt een waterhoogte opgelegd. Voor dit scenario-onderzoek is ervoor geopteerd te werken met een cyclisch morfologisch getij. Het morfologisch maatgevend getij voor de Westerschelde wordt gekarakteriseerd door een getijfactor van 1,08 (Tank, 1996). Er is geopteerd om een opeenvolging van 2 opgetreden getijden (duur = 24u50) in de tijd te herhalen. Op basis van het getijverschil voor het gemiddeld getij te Vlissingen in de periode 2001-2010, werd over een periode van 4 weken naar 2 opeenvolgende getijden gezocht waarvoor de getijfactor 1,08 het best benaderd werd. Figuur 10 geeft de 2 zich herhalende getijden weer te Vlissingen.

Figuur 10 – Cyclisch morfologisch getij ter hoogte van Vlissingen (m TAW)



3.3.3 Sediment

Aangezien binnen dit scenario-onderzoek morfologische simulaties worden doorgerekend, zal ook sedimenttransport worden doorgerekend. Omwille van de resultaten uit het gevoeligheidsonderzoek, is gekozen gebruik te maken van de transportformule van Van Rijn (Van Rijn, 1993) met een uniforme korrelgrootte ($d_{50} = 200 \mu\text{m}$).

Aan de afwaartse randen is een constante concentratie opgelegd (50 mg/l), terwijl aan de opwaartse randen geen sediment aangevoerd worden (0 mg/l).

3.3.4 Morfologie

Om effecten van het inspelen van de waterbeweging op de morfologie te vermijden, vinden er gedurende de eerste dag van de simulatie geen morfologische updates plaats.

Morfologische processen zijn traag in vergelijking met de waterbeweging en spelen zich af op een tijdschaal van maanden tot decennia. Om de rekentijden te beperken wordt een morfologische versnellingsfactor (morfac) gebruikt, die de morfologische veranderingen per tijdstap opschaalt. Er werd gekozen voor een morfac van 24,5 die toegepast wordt op het morfologische getij. De simulaties binnen voorliggend onderzoek lopen over een periode van 30 dagen (1 dag inspelen) wat overeenkomt met een morfologische periode van 735 dagen, ca. 2 jaar.

3.3.5 Stortingen

In dit scenario-onderzoek zal er op verschillende locaties sediment “gestort” worden. Om onzekerheden uit te schakelen gerelateerd aan het baggeren in het model, is ervoor gekozen de stortingen te implementeren als sediment supplementies (“nourishment”). Hierbij wordt materiaal gestort in de stortpolygoon, zonder dat er elders gebaggerd wordt. Er wordt dus netto sediment toegevoegd aan het model. Voor een vergelijking tussen de verschillende mogelijkheden voor het terugstorten van sediment in Delft3D wordt verwezen naar (Vos *et al.*, s.d.).

Voor elk scenario wordt echter op eenzelfde wijze gestort: 3 Mm³ wordt gespreid over 3 dagen (start stortingen valt samen met aanvang morfologische updates, i.e. 2^e dag van simulatie) continu gestort binnen de gekozen stortpolygoon; morfologisch komt dit overeen met ca. 3 maanden, oftewel ca. 1 Mm³ per maand, wat realistisch is aangezien jaarlijks ca. 9-10 Mm³ in situ wordt gestort. De netto-sediment toevoeging is dus gelijk in de verschillende scenario's. Modelmatig wordt er sediment toegevoegd aan het systeem. Voor deze simulaties zal dit gezien de korte simulatieperiode weinig effect hebben op de conclusies. Voor lange termijn voorspellingen dient men echter gebruik te maken van de gekoppelde bagger- en stortmodules.

4 Scenario's

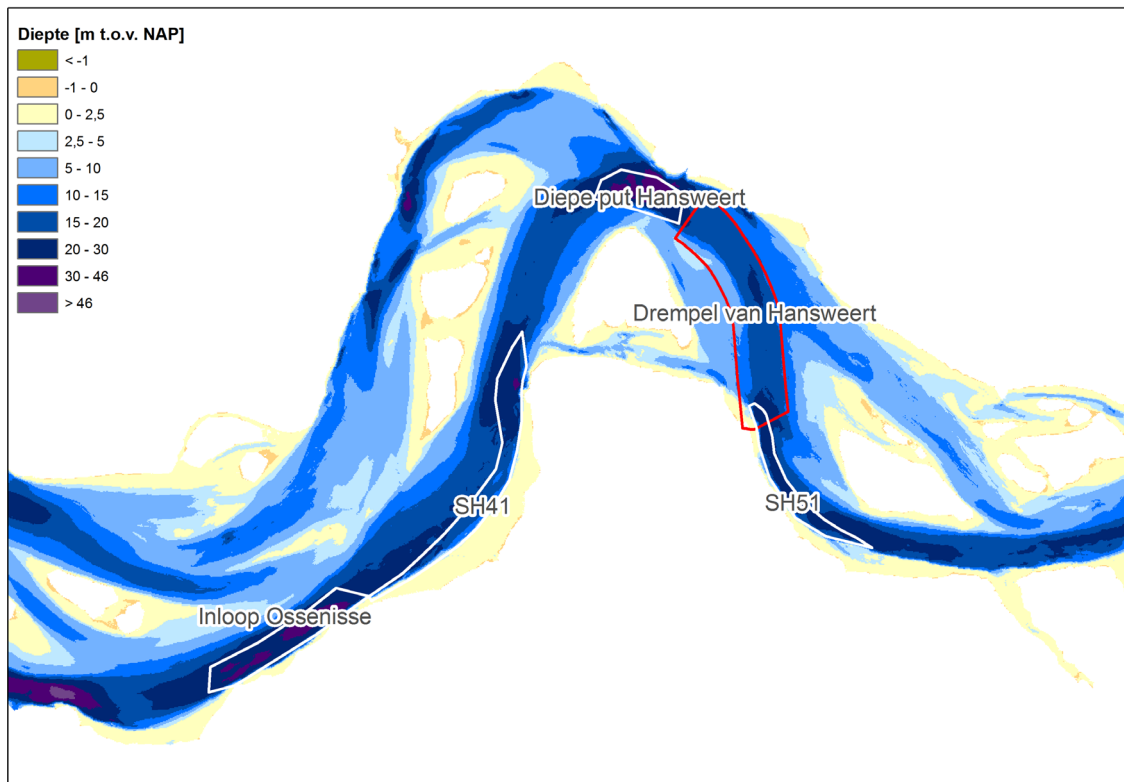
4.1 Beschrijving scenario's

Er is geopteerd om een aantal scenario's door te rekenen waarbij steeds een zelfde hoeveelheid sediment gestort werd over een zelfde tijdsduur. De keuze van de stortzones is gebaseerd op de locaties (Figuur 11) die vandaag de dag reeds gebruikt worden: SH41, SH51, diepe put Hansweert (DPHW) en inloop Ossensisse (INOS). Er is tevens voor gekozen een aantal bijkomende scenario's door te rekenen waarbij slechts een deel van de stortzone gebruikt wordt, om zo te onderzoeken of het sediment zich op een andere manier verspreid wanneer het eerder in het afwaartse, dan wel in het opwaartse deel van de stortzone aangebracht wordt. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende scenario's en de bijhorende stortzones.

Tabel 1 – Overzicht scenario's

Scenario	Stortzone	Storthoeveelheid	Opmerking
H519	-	-	Referentie
H511	INOS	3 Mm ³	
H512	INOS-afw	3 Mm ³	INOS opgedeeld in opwaarts en afwaarts deel
H513	INOS-opw	3 Mm ³	INOS opgedeeld in opwaarts en afwaarts deel
H514	DPHW	3 Mm ³	
H515	DPHW-afw	3 Mm ³	DPHW opgedeeld in opwaarts en afwaarts deel
H516	DPHW-opw	3 Mm ³	DPHW opgedeeld in opwaarts en afwaarts deel
H517	SH41	3 Mm ³	
H518	SH51	3 Mm ³	

Figuur 11 – Overzicht stortzones gebruikt in scenario-onderzoek Westerschelde (bathymetrie in m NAP)



4.2 Verwerking resultaten

De scenario's hebben tot doel inzicht te krijgen in de verspreiding van de gestorte sedimenten. In de analyse zal hierbij gefocust worden op de ruimtelijke sedimentatie-erosie patronen, de volumeveranderingen binnen de stortpolygoon (stabiliteit) en de sedimentatie ter hoogte van de drempels. Aangezien de drempel van Hansweert de belangrijkste baggerlocatie in de Westerschelde is, en deze locatie in de nabijheid van de verschillende stortzone ligt, zal dan ook op de volumeveranderingen op deze drempel gefocust worden (retourstroming gestorte specie).

4.2.1 Morfologische ontwikkelingen stortingen

De morfologische ontwikkeling van de stortingen worden in eerste instantie geanalyseerd op basis van de ruimtelijke sedimentatie-erosie patronen. In de uitgevoerde simulaties is op regelmatige tijdstippen (gekozen op dagelijkse frequentie – i.e. 24,5 dagen voor morfologie) de bathymetrie uitgevoerd (map-files). Omwille van het overzicht is gekozen om volgende tijdstippen (morfologische tijd) te weerhouden:

- 122,5 dagen: na het beëindigen van de storting van 3 Mm³ over 3 maanden
- 367,5 dagen: ca. 1 jaar na aanvang van de simulatie, of ca. 9 maanden na beëindigen van de stortingen
- 735 dagen: ca. 2 jaar na aanvang van de simulatie, of ca. 21 maanden na beëindigen van de stortingen

Aangezien er ook zonder stortingen morfologische veranderingen plaatsvinden, zal bij de interpretatie van de resultaten hiermee rekening worden gehouden door een verschil te beschouwen ten opzichte van de referentiesimulatie (h219).

4.2.2 Stabiliteit gestorte specie

Om de stabiliteit van de gestorte specie te kwantificeren wordt de verandering van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon berekend. Dit gebeurt op basis van de bathymetrie die met een dagelijkse frequentie (i.e. 24,5 dagen voor morfologie) wordt geëxporteerd. Ook hier dient rekening gehouden te worden met de trend die in de referentiesimulatie reeds aanwezig is.

4.2.3 Sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert

Analoog aan de stabiliteit van de gestorte specie, wordt de sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert gekwantificeerd door de verandering van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon te berekenen. Dit gebeurt op basis van de bathymetrie die met een dagelijkse frequentie (i.e. 24,5 dagen voor morfologie) wordt geëxporteerd. Ook hier dient rekening gehouden te worden met de trend die in de referentiesimulatie reeds aanwezig is.

Tevens wordt ook de “retourstroming van het sediment” berekend. Hierbij wordt de verhouding berekend van het extra (ten opzichte van de referentie) volume sediment op het drempelgebied tot het extra (ten opzichte van de referentie) geërodeerde volume sediment op de stortzone, na het beëindigen van de stortingen (i.e. initieel verlies tijdens stortingen wordt niet meegenomen).

5 Resultaten

5.1 Referentie-simulatie

5.1.1 Modelling

In Bijlage – Resultaten simulatie wordt de topo-bathymetrie en de verschilkaarten weergegeven (Figuur 22) zoals gesimuleerd in het referentie scenario, na respectievelijk ca. 1 en 2 jaar. De belangrijkste wijzigingen doen zich voor ter hoogte van de drempelgebieden waar kleinere geulen en een relatief grotere dynamiek vertonen. Ook ter hoogte de stortzones zijn er belangrijke veranderingen waar te nemen in de referentiesimulatie. Figuur 13 geeft de ontwikkelingen van het sedimentvolume in het referentie-simulatie H519.

Ter hoogte van stortzone SH51 (Figuur 12 – rechts) blijven de morfologische veranderingen eerder beperkt. Netto gezien treedt hier in de referentiesimulatie op 2 jaar een toename van het sedimentvolume op van ca. 300.000 m³ (Figuur 13). Naast de stortzone treden echter grote veranderingen op, met een sterke sedimentatie ter hoogte van het Oude Hoofd van Walsoorden.

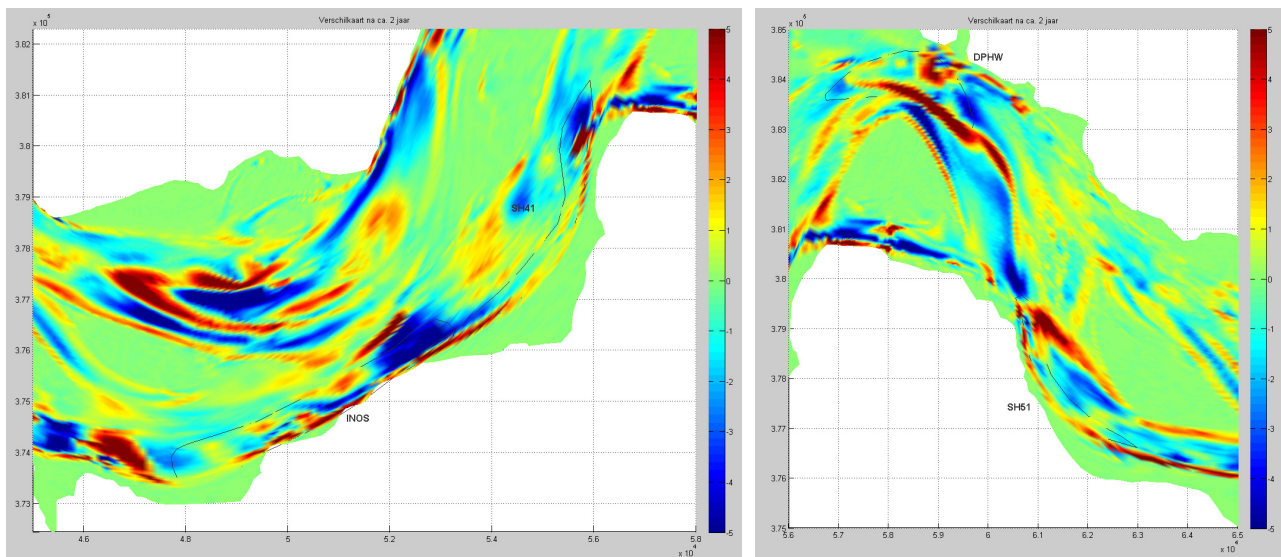
Ter hoogte van stortzone DPHW (Figuur 12 – rechts) treden sterke morfologische verandering op, met uitgesproken erosieve en sedimenterende zones. Netto gezien treedt hier in de referentiesimulatie op 2 jaar een toename van het sedimentvolume op van ca. 3.000.000 m³ (Figuur 13). Deze is vooral te wijten aan de sedimentatie langs de zuidzijde van de stortzone, langs de kop van de Platen van Ossensisse. Aangezien in de werkelijkheid de put relatief stabiel is, is het gebruikte 2D-model niet in staat de realiteit hier goed te reproduceren. Een mogelijke verklaring zijn 3D-effecten die optreden ter hoogte van deze bocht en bijbehorende put (Plancke *et al.*, 2017). Dit moet dan ook meegenomen worden bij de interpretatie van de resultaten.

Ter hoogte van stortzone SH41 (Figuur 12 – links) is het centrale deel relatief stabiel, terwijl langs de op- (Nol van Ossensisse) en afwaartse (langs de geulwand) uiteinden er sterke morfologische veranderingen optreden. Netto gezien wijzigt het sedimentvolume hier maar zeer gering (< 100.000 m³) (Figuur 13).

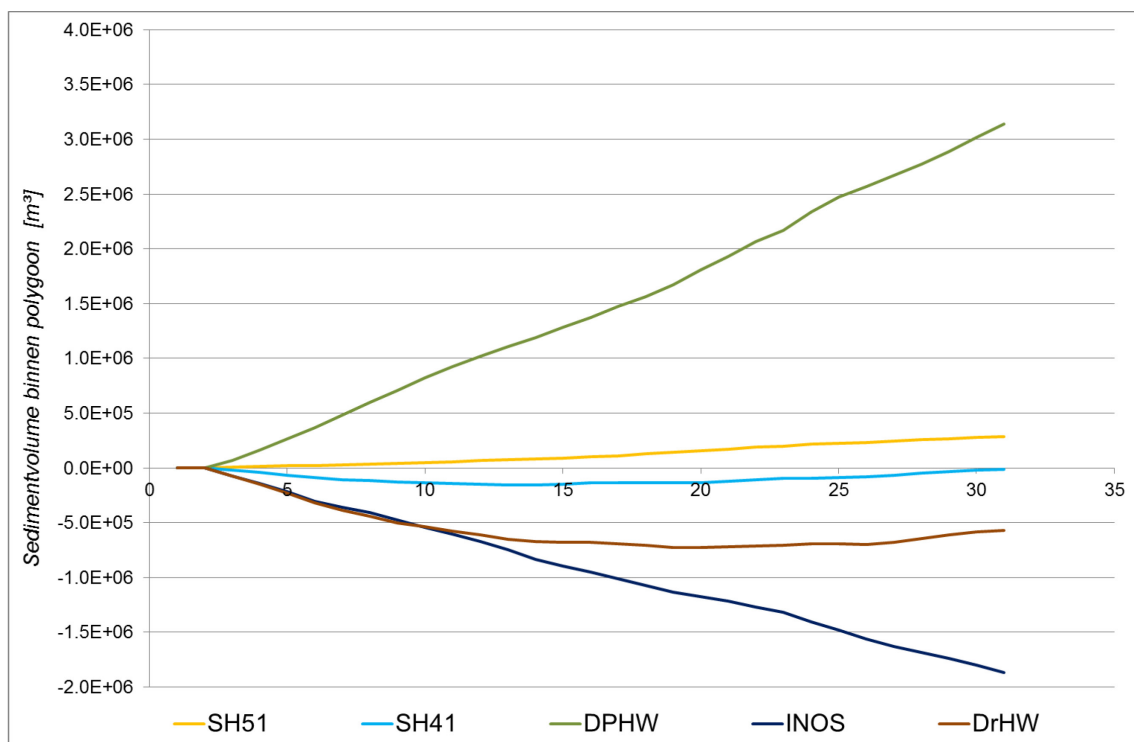
Ter hoogte van stortzone INOS (Figuur 12 – links) is het afwaartse deel relatief stabiel, terwijl het opwaartse deel gekarakteriseerd wordt door sterke morfologische veranderingen. Met name in het opwaartse uiteinde van het gebied vindt er sterke erosie plaats. Dit resulteert dan ook in een netto afname van het sedimentvolume met ca. 2.000.000 m³ over 2 jaar (Figuur 13).

Ter hoogte van de drempel van Hansweert (Figuur 12 – rechts) treedt er langs de noord-westelijke zijde (kant Platen van Ossensisse) en centraal sedimentatie op, terwijl in het zuid-westen en het noorden (overgang diepe put van Hansweert) erosie optreedt. Dit resulteert dan ook in een netto afname van het sedimentvolume met ca. 500.000 m³ over 2 jaar (Figuur 13).

Figuur 12 – Erosie-sedimentatie patronen in de referentiesimulatie nabij de beschouwde stortzones na 2 jaar
Links: INOS en SH41 | Rechts: DPHW en SH51



Figuur 13 – Overzicht sedimentvolume binnen verschillende polygonen in referentiescenario H519
x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) | y-as: sedimentvolume binnen polygoon



5.1.2 Vergelijking waarnemingen - modellering

In Hoofdstuk 2 is een beschrijving gegeven van de waargenomen morfologische ontwikkelingen ter hoogte van de bestudeerde stortlocaties. In voorgaande paragraaf 5.1.1 worden de resultaten uit de referentiesimulatie beschreven. Tabel 2 geeft de vergelijking tussen de waargenomen en gemodelleerde trends. Voor stortzone SH51 (stabiel) en INOS (eroderend) worden de waargenomen trends door het model

gereproduceerd (kwalitatief). Voor stortzone SH41 vertoont het model een stabiel gedrag, terwijl in de realiteit een sterke erosie optreedt. Voor DPHW treedt er sedimentatie op in het model, terwijl in de realiteit de put eerder stabiel is (qua volume, wel grote dynamiek binnen de zone). Een mogelijke verklaring voor deze laatste afwijking is het ontbreken van 3D-effecten (helicoïdale stroming, zoals ook vastgesteld in de metingen, zie (Plancke *et al.*, 2017)) in het gebruikte 2D-model.

Tabel 2 – Morfologische trend op basis van waarnemingen en in referentiesimulatie (H519)

Locatie	Waarnemingen	Modellering
SH51	Stabiel	Stabiel
SH41	Eroderend (sterk)	Stabiel
Diepe put Hansweert	Stabiel	Sedimenterend (sterk)
Inloop Ossensisse	Eroderend (licht)	Eroderend (sterk)

5.2 Stortzone SH51

Figuur 15 (links) geeft de morfologische veranderingen weer van de storting ter hoogte van SH51 (H518). Initieel is een toename in de hoogte van de bodem over de volledige polygoon te zien van ca. 4m. In Tabel 3 is te zien dat 88% van het gestorte sediment onmiddellijk na het eindigen van de stortingen terug te vinden is binnen de polygoon. Dit impliceert dat 12% verdwijnt in de periode van storten. Aangezien de stortingen geïmplementeerd zijn als “nourishment” zal er geen sediment tijdens het storten in de waterkolom getransporteerd worden. Het verlies kan dus toegeschreven worden aan erosie van het sediment (direct) na het storten, of morfologische ontwikkeling in het model als respons op de verhoging van de bodem door de stortingen. Ter vergelijking: gedurende de eerste stortcampagne in situ (2010-2011) bleek de initiële stabiliteit nog lager, ca. 70%¹ (zie Figuur 1).

Ten gevolge van de storting treedt er een erosie op in de geul naast de stortzone (overgang tussen het Zuidergat en de zuidrand van de Plaat van Walsoorden), waarbij (een deel van) het sediment zich ten noorden van de erosieve zone afzet. Dit is zichtbaar zowel na 1 jaar als na 2 jaar (Figuur 15 - links). Daarnaast verspreidt het sediment zich in op- en afwaartse richting, waarbij meer in afwaartse richting lijkt te bewegen.

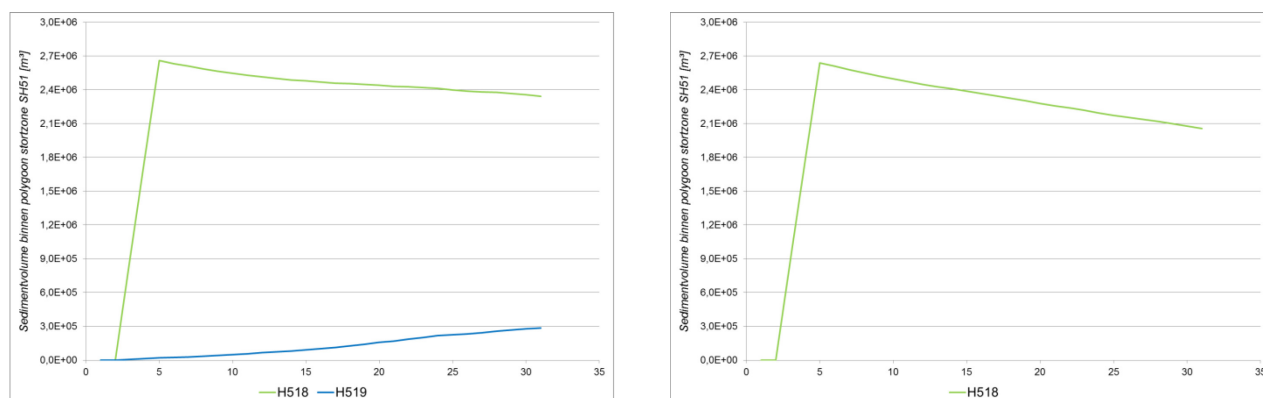
De stabiliteit van de gestorte specie wordt weergegeven in Figuur 14, zowel absoluut (i.e. zonder verrekening van trend uit referentie) als relatief (i.e. met verrekening van trend uit referentie). Het relatieve verloop toont een geleidelijke afname van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon.

²Ca. 1 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 88% (78%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon.. Ca. 2 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 78% (69%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. Deze stabiliteit is aanzienlijk hoger dan deze waargenomen in situ: na 1 jaar bleek dat amper 40% van de gestorte hoeveelheid binnen de polygoon teruggevonden werd, na 2 jaar amper 30%.

¹ Aangezien de stortingen in situ meer verspreid plaatsvonden, is het moeilijk een initiële stabiliteit vast te leggen. Er werd voor gekozen de stabiliteit te nemen om het moment dat de eerste grote stortcampagne afgerond was.

² De hier gepresenteerde stabiliteit betreft de stabiliteit van de specie die na het beëindigen van de stortingen teruggevonden wordt binnen de polygoon. Tussen haken wordt telkens ook de stabiliteit weergegeven ten opzichte van de totale (constante) gestorte hoeveelheid (i.e. 3 Mm³).

Figuur 14 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon SH51 absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie H519 (rechts)
 x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) | y-as: sedimentvolume binnen polygoon



5.3 Stortzone SH41

Aangezien het model een stabiel gedrag vertoont, terwijl in de realiteit een sterke erosie optreedt, dienen de hier gepresenteerde resultaten met de nodige voorzichtigheid behandeld worden. De aanbeveling wordt gemaakt om een verdere kalibratie/validatie van het model uit te voeren voor deze locatie op basis van beschikbare metingen (initieel waterbeweging, later morfologie).

Figuur 15 (rechts) geeft de morfologische veranderingen weer van de storting ter hoogte van SH41 (H517). Initieel is een toename in de hoogte van de bodem over de volledige polygoon te zien van ca. 2m. In Tabel 3 is te zien dat 88% van het gestorte sediment onmiddellijk na het eindigen van de stortingen terug te vinden is binnen de polygoon. Dit impliceert dat 12% verdwijnt in de periode van storten. Aangezien de stortingen geïmplementeerd zijn als “nourishment” zal er geen sediment tijdens het storten in de waterkolom getransporteerd worden. Het verlies kan dus toegeschreven worden aan erosie van het sediment (direct) na het storten, of morfologische ontwikkeling in het model als respons op de verhoging van de bodem door de stortingen. Ter vergelijking: gedurende de eerste stortcampagne in situ (2010-2011) bleek de initiële stabiliteit nog lager, ca. 40%³ (zie Figuur 2).

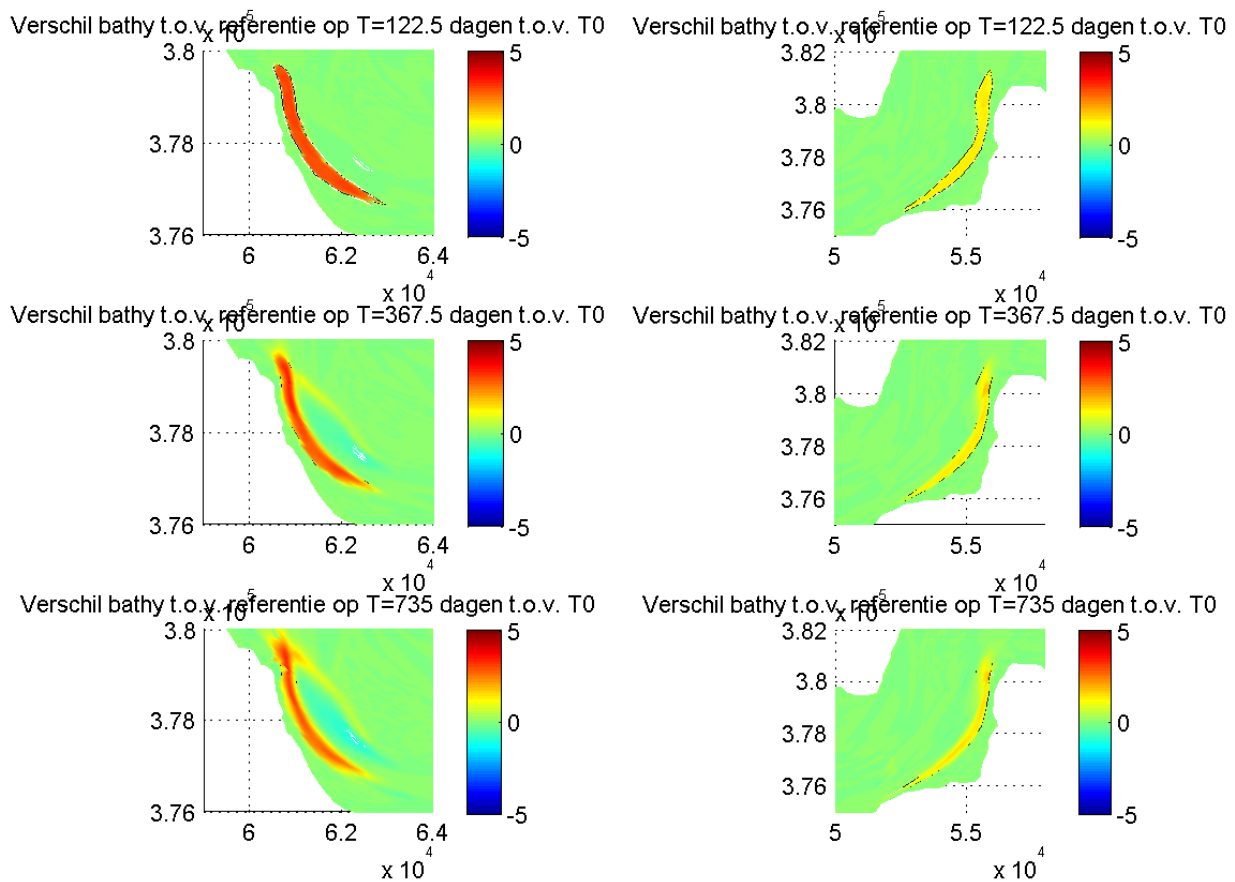
De morfologische ontwikkelingen in de omgevingen ten gevolge van de stortingen zijn zeer beperkt. Na 1 en 2 jaar verspreidt het sediment zich in op- en afwaartse richting (Figuur 15 - rechts), waarbij met name in het noordelijke deel sediment naar opwaartse lijkt te bewegen.

De stabiliteit van de gestorte specie wordt weergegeven in Figuur 16, zowel absoluut (i.e. zonder verrekening van trend uit referentie) als relatief (i.e. met verrekening van trend uit referentie). Het relatieve verloop toont een geleidelijke afname van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon.

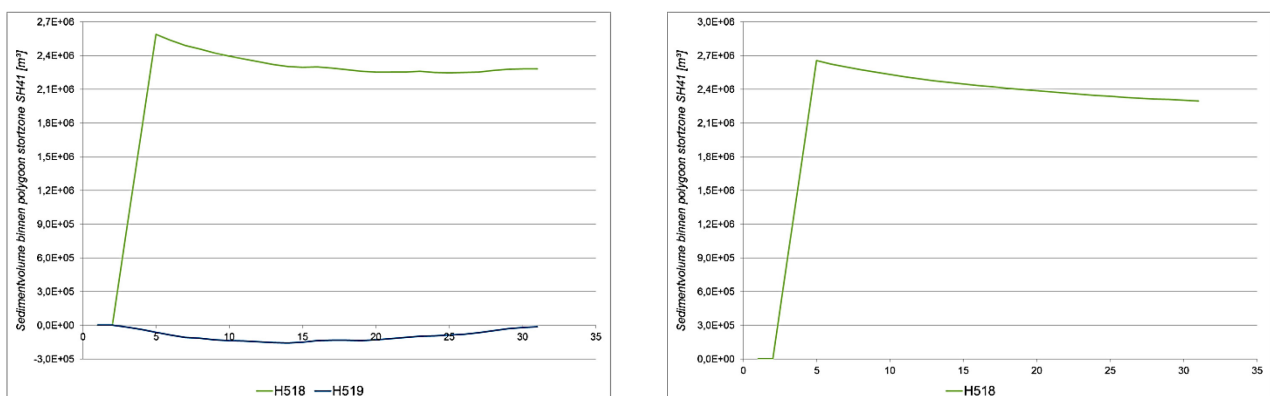
Ca. 1 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 91% (80%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. Ca. 2 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 86% (77%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. Deze stabiliteit is aanzienlijk hoger dan deze waargenomen in situ: na 1 jaar bleek dat amper 30% van de gestorte hoeveelheid binnen de polygoon teruggevonden werd, na 2 jaar amper 20%.

³ Aangezien de stortingen in situ meer verspreid plaatsvonden, is het moeilijk een initiële stabiliteit vast te leggen. Er werd voor gekozen de stabiliteit te nemen om het moment dat de eerste grote stortcampagne afgerond was.

Figuur 15 – Overzicht morfologische ontwikkelingen t.o.v. referentie voor scenario H518 (links – SH51), H517 (rechts – SH41)



Figuur 16 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon SH41 absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie H519 (rechts)
x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) | y-as: sedimentvolume binnen polygoon



5.4 Stortzone diepe put Hansweert

Aangezien het model een sedimentatie-trend geeft in de referentiesituatie die niet in de realiteit wordt teruggevonden, dienen de hier gepresenteerde resultaten met de nodige voorzichtigheid behandeld worden. De aanbeveling wordt gemaakt om een verdere kalibratie/validatie van het model uit te voeren voor deze locatie op basis van beschikbare metingen (initieel waterbeweging, later morfologie).

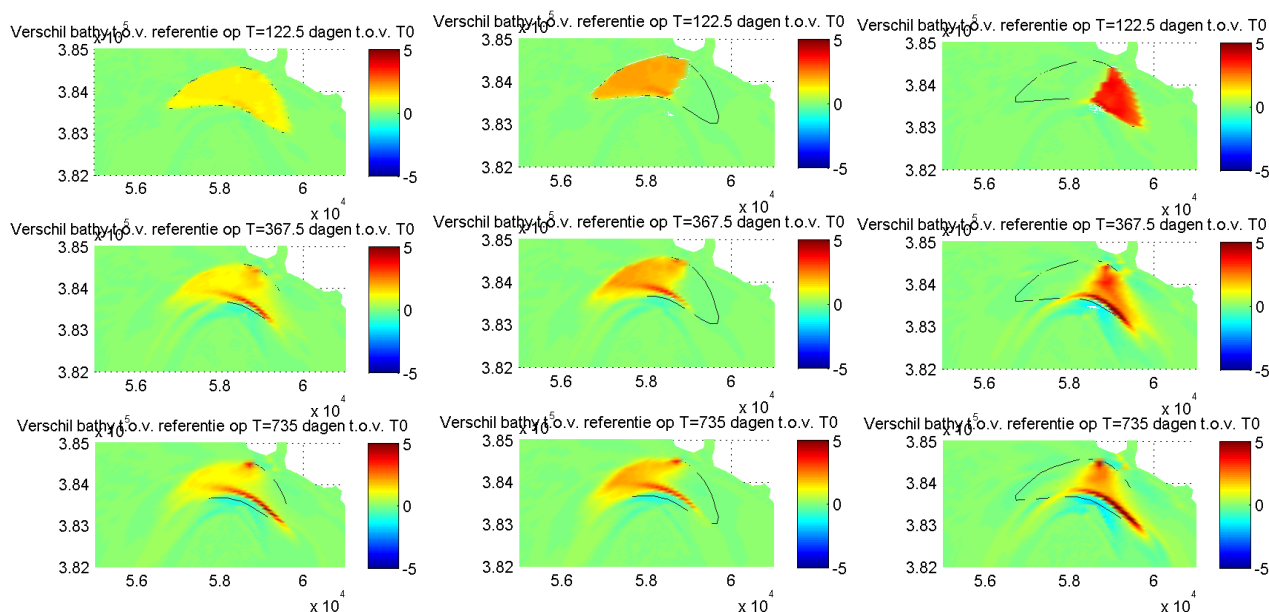
Figuur 17 geeft voor de 3 scenario's de morfologische veranderingen weer van de stortingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Deze scenario's zijn respectievelijk het volledige gebruik van het stortvak (H514), het gebruik van het afwaartse deel van het stortvak (H515) en het gebruik van het opwaartse deel van het stortvak (H516). Initieel is een toename in de hoogte van de bodem over de stortpolygoon te zien: wanneer de volledige polygoon gebruikt wordt is de verhoging ca. 2m, bij het afwaartse deel ca. 3m en bij het opwaartse deel ca. 4m. In Tabel 3 is te zien dat voor de verschillende scenario's 91 tot 94% van het gestorte sediment onmiddellijk na het eindigen van de stortingen terug te vinden is binnen de polygoon. Ter vergelijking: gedurende de eerste stortcampagne in situ (2016) bleek de initiële stabiliteit aanzienlijk lager, ca. 55% (zie Figuur 5).

Ten gevolge van de stortingen treedt er een beperkte erosie op langs de noordrand van de Platen van Ossensisse. In het scenario waarbij de volledige polygoon gebruikt wordt (h514), verspreidt de gestorte specie zich deels naar afwaarts en vindt er deels een herverdeling binnen de polygoon plaats, waarbij met name langs de zuidelijke zijde van de stortzone een accumulatie optreedt; ook in het noorden is er beperkte ophogende zone zichtbaar (Figuur 17 - links). Deze tendensen zijn ook terug te vinden wanneer maar een deel van de stortpolygoon gebruikt wordt, al is er bij de opwaartse stortingen in het eerste jaar ook een deel van het sediment dat opwaartse wordt getransporteerd (Figuur 17 - rechts).

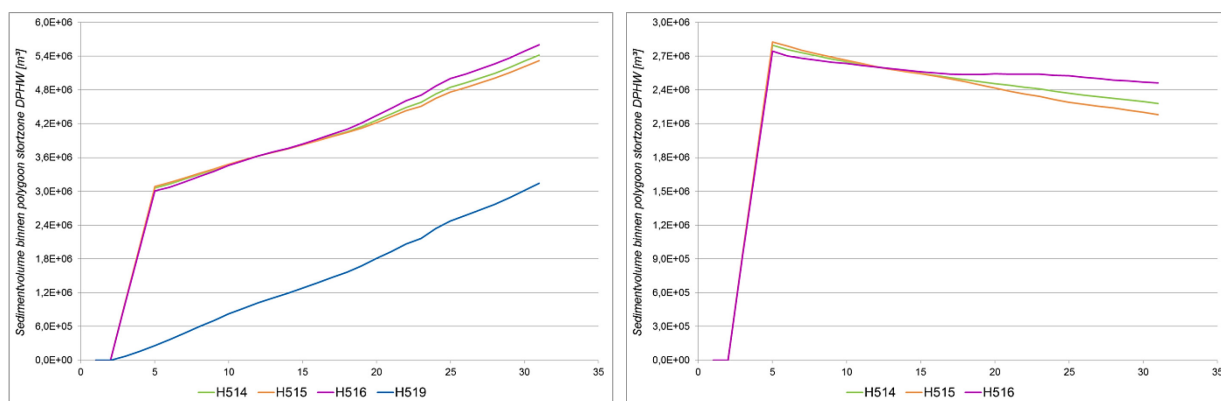
De stabiliteit van de gestorte specie wordt weergegeven in Figuur 18, zowel absoluut (i.e. zonder verrekening van trend uit referentie) als zowel relatief (i.e. met verrekening van trend uit referentie). Het relatieve verloop toont een geleidelijke afname van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon.

Ca. 1 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 87-92% (83-85%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. Ca. 2 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 77-90% (73-82%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. De variant waarbij in het afwaartse deel gestort wordt (h515) heeft de laagste stabiliteit, de variant waarbij in het opwaartse deel gestort wordt (h516) heeft de hoogste stabiliteit. Deze stabiliteit ligt in de buurt van wat waargenomen is in situ: na 1 jaar was de stabiliteit quasi gelijk aan deze vlak na het beëindigen van de stortingen.

Figuur 17 – Overzicht morfologische ontwikkelingen t.o.v. referentie voor scenario H514 (links), H515 (midden) en H516 (rechts)
H514: 3 Mm³ over volledige stortzone, H515: 3 Mm³ in afwaartse deel, H516: 3 Mm³ in opwaartse deel



Figuur 18 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon DPHW absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie H519 (rechts)
x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) | y-as: sedimentvolume binnen polygoon



5.5 Stortzone inloop Ossensisse

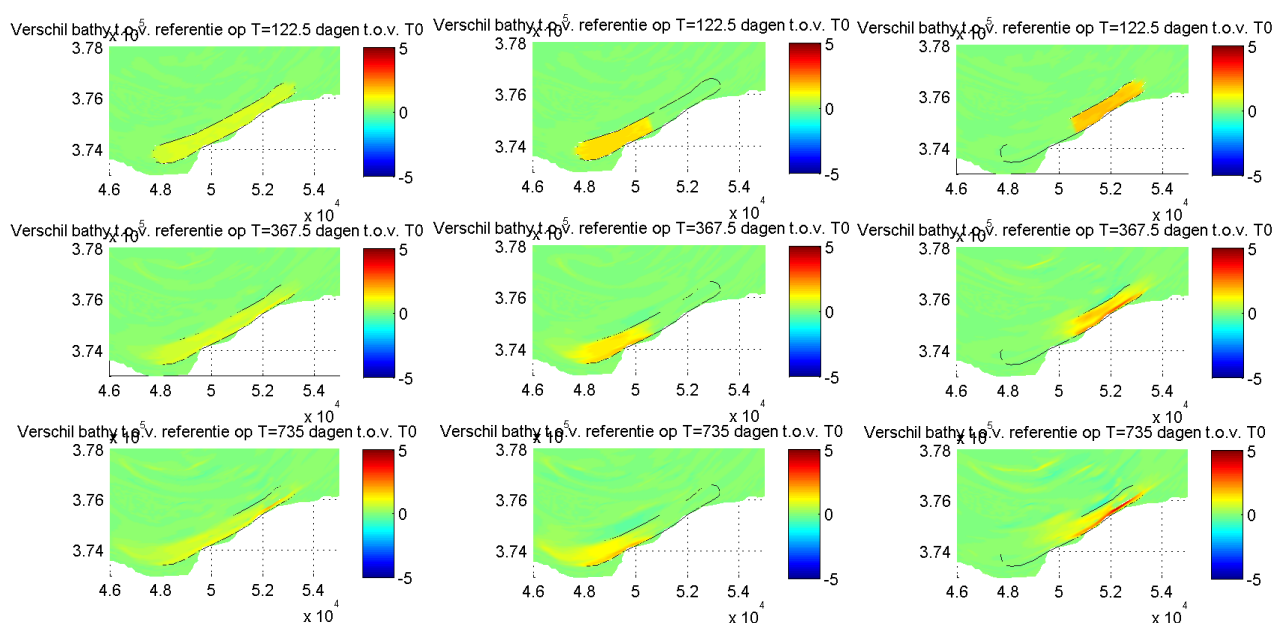
Figuur 19 geeft voor de 3 scenario's de morfologische veranderingen weer van de stortingen ter hoogte van de inloop van Ossensisse. Deze scenario's zijn respectievelijk het volledige gebruik van het stortvak (H511), het gebruik van het afwaartse deel van het stortvak (H512) en het gebruik van het opwaartse deel van het stortvak (H513). Initieel is een toename in de hoogte van de bodem over de stortpolygoon te zien: wanneer de volledige polygoon gebruikt wordt is de verhoging ca. 1m, bij het op- en afwaartse deel ca. 2m. In Tabel 3 is te zien dat voor de verschillende scenario's 93,5% van het gestorte sediment onmiddellijk na het eindigen van de stortingen terug te vinden is binnen de polygoon. Ter vergelijking: gedurende de eerste stortcampagne in situ (2016) bleek de initiële stabiliteit lager, ca. 80% (zie Figuur 8).

De morfologische ontwikkelingen in de omgevingen ten gevolge van de stortingen zijn zeer beperkt. In het scenario waarbij de volledige polygoon gebruikt wordt (h511), verspreidt de gestorte specie zich deels naar afwaarts en deels naar opwaarts. Wanneer slechts een deel van het stortvak gebruikt wordt, zijn de tendensen gelijkaardig: bij storting in het afwaartse deel, vindt met name transport naar afwaarts plaats (eb-gedomineerd) (Figuur 19 - midden), terwijl bij storting in het opwaartse deel met name transport naar opwaarts plaatsvindt (vloed-gedomineerd) (Figuur 19 - rechts). Deze patronen zijn gerelateerd aan de invloed van de vloedgeul Everingen: het afwaartse deel van het stortvak wordt afgeschermd van de vloedstroming uit de Everingen door de aanwezigheid van Middelplaten, terwijl het opwaartse deel wel onder invloed staat van de vloedstroming vanuit de Everingen.

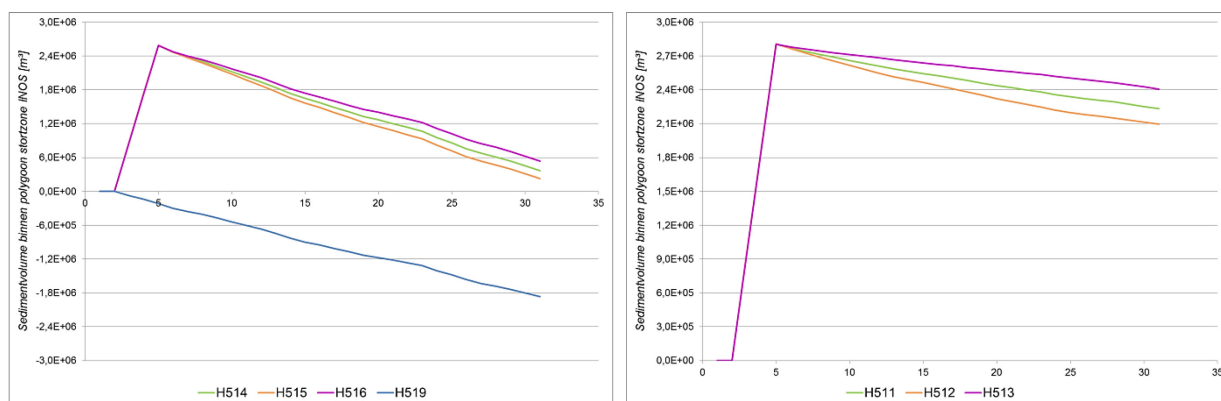
De stabiliteit van de gestorte specie wordt weergegeven in Figuur 20, zowel absoluut (i.e. zonder verrekening van trend uit referentie) als relatief (i.e. met verrekening van trend uit referentie). Het relatieve verloop toont een geleidelijke afname van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon.

Ca. 1 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 85-93% (79-87%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. Ca. 2 jaar na het einde van de stortingen wordt nog 75-86% (70-80%) van het sediment aangetroffen binnen de polygoon. De variant waarbij in het afwaartse deel gestort wordt (h512) heeft de laagste stabiliteit, de variant waarbij in het opwaartse deel gestort wordt (h513) heeft de hoogste stabiliteit na het eindigen van de stortingen. Deze stabiliteit komt in de buurt van wat waargenomen is in situ: na 1 jaar bedroeg de stabiliteit nog hier 65%, of rekening houdend met het verlies tijdens de stortingen ca. 80%.

Figuur 19 – Overzicht morfologische ontwikkelingen t.o.v. referentie voor scenario H511 (links), H512 (midden) en H513 (rechts), H511: 3 Mm³ over volledige stortzone, H512: 3 Mm³ in afwaartse deel, H513: 3 Mm³ in opwaartse deel



Figuur 20 – Overzicht stabiliteit gestorte specie binnen polygoon INOS absoluut (links) en relatief t.o.v. referentie (rechts)
x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) | y-as: sedimentvolume binnen polygoon



Tabel 3 – Stabiliteit van gestorte specie

Initieel: stabiliteit van gestorte specie (3 Mm³) na beëindigen stortingen

Na X jaar: stabiliteit van de specie die na X jaar teruggevonden wordt t.o.v. het volume na het beëindigen van de stortingen;
tussen haken wordt de stabiliteit weergegeven t.o.v. de totale gestorte hoeveelheid (i.e. 3 Mmm³)

Scenario	Initieel		Na 1 jaar		Na 2 jaar	
	Model	In situ	Model	In situ	Model	In situ
H211	93,4%	80%	88,5% (82,7%)	(65%)	79,6% (74,4%)	-
H212	93,5%	-	84,9% (79,4%)	-	74,6% (69,8%)	-
H213	93,4%	-	92,7% (86,6%)	-	85,8% (80,2%)	-
H214	93,3%	55%	89,0% (83,0%)	(55%)	81,5% (76,0%)	-
H215	94,2%	-	87,6% (82,5%)	-	77,2% (72,7%)	-
H216	91,5%	-	92,4% (84,5%)	-	89,8% (82,1%)	-
H217	88,5%	40%	90,7% (80,3%)	(30%)	86,4% (76,5%)	(20%)
H218	88,0%	70%	88,1% (77,5%)	(40%)	77,9% (68,5%)	(30%)

5.6 Sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert

Figuur 21 geeft de extra volumetoename van het sediment weer voor de drempel van Hansweert. Hieruit blijkt dat de stortingen in de inloop Ossensisse (h511-h513) en SH41 (h517) quasi geen effect hebben op de sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert. Dit is toe te schrijven aan de grote afstand tussen deze 2 gebieden.

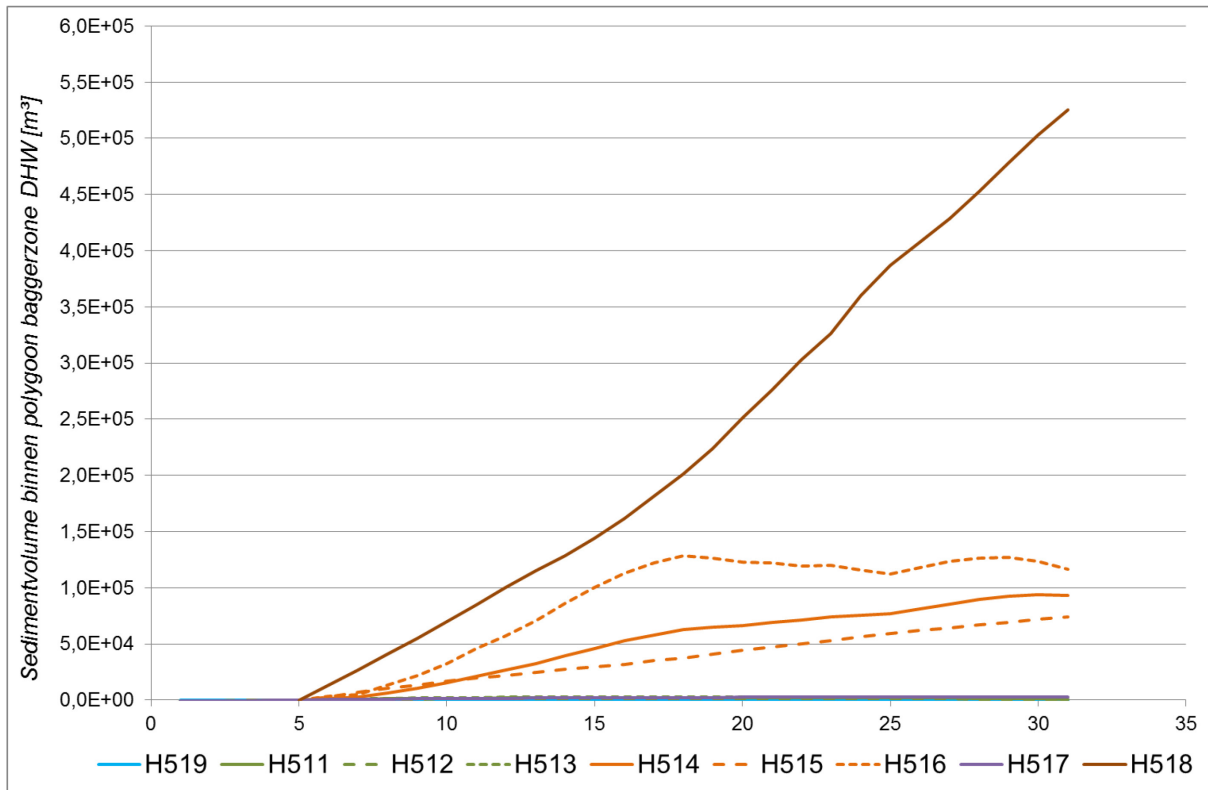
De stortingen in de diepe put van Hansweert (h514-h516) tonen wel een toename van de sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert. Dit effect is logisch aangezien de stortzone net afwaarts van de drempel gelegen is en het residuele sedimenttransport hier vloed-gedomineerd is (dus richting drempel). Wanneer enkel in het opwaartse deel gestort wordt, is deze toename in het eerste jaar het sterkst, om in het 2^e jaar stil te vallen. De overige 2 scenario's tonen een geleidelijke toename van het sedimentvolume.

De sterkste toename van de sedimentatie ter hoogte van de drempel van Hansweert wordt teruggevonden bij de stortingen in SH51 (simulatie H518). Ook deze stortzone is vlakbij (opwaarts) van de drempel gelegen en het residuele sedimenttransport hier eb-gedomineerd is (dus richting drempel). Het verschil ten opzichte van de stortscenario's in de diepe put van Hansweert (eveneens vlakbij met residueel transport richting drempel) kan vermoedelijk gevonden worden in de relatieve verstoring die door de stortingen wordt gerealiseerd: om 3 Mm³ te kunnen aanbrengen worden de diepere delen opgevuld tot ca. -17m LAT voor SH51, terwijl dit bij de diepe put van Hansweert lager is dan -20m LAT.

Tabel 4 geeft de retourstroming van het sediment weer tussen de stortzone en de drempel van Hansweert. Voor de inloop van Ossensisse is de retourstroming quasi onbestaande. Voor de diepe put van Hansweert komt na 2 jaar 11% (h515 - bij storting in het afwaartse deel) tot 42% (h516 - bij storting in het opwaartse deel) van het geërodeerde sediment terecht op de drempel. Voor SH51 (h518) komt na 2 jaar 90% van het geërodeerde sediment terecht op de drempel.

Door de temporele variatie in zowel de extra (t.o.v. referentie H519) sedimentatie op de drempel als de stabiliteit van het gestorte sediment, kan de retourstroming van het sediment variëren in de tijd. Zo kan voor scenario h516 in het eerste jaar een sterke aanvoer naar de drempel vastgesteld worden die vervolgens in het 2^e jaar niet wijzigt. Hierdoor zal de retourstroming dalen in de tijd (60% => 40%). Voor scenario h518 is de aanvoer naar de drempel sterker in het 2^e jaar, waardoor de retourstroming toeneemt in de tijd (65% => 90%).

Figuur 21 – Overzicht volumeverandering drempel van Hansweert t.o.v. referentie
x-as: morfologische tijdstap TS (werkelijke tijd = TS x 24,5 dagen) | y-as: sedimentvolume binnen polygoon baggerzone DHW [m³]
H511-513: INOS | H514-516: DPHW | H517: SH41 | H518: SH51



Tabel 4 – Retourstroming van het totale gestorte sedimentvolume (3 Mm³) naar drempel van Hansweert
H511-513: INOS | H514-516: DPHW | H517: SH41 | H518: SH51

Scenario	Na 1 jaar	Na 2 jaar
H211	0,6%	0,2%
H212	0,3%	0,0%
H213	1,3%	0,4%
H214	20,4%	18,0%
H215	10,7%	11,5%
H216	61,4%	41,6%
H217	1,0%	0,7%
H218	64,1%	90,1%

6 Conclusies

In dit rapport is een scenario-onderzoek uitgevoerd met behulp van het morfologisch model op basis van de NeVla schematisatie voor het simuleren van de sedimentdynamica ter hoogte van stortzones in diepe delen. Zowel de regulier vergunde stortzones SH41 en SH51, als de proefstortzones “diepe put Hansweert” en “inloop Ossensisse” werden beschouwd. Hierbij is gekeken naar de stabiliteit van de gestorte specie en de verspreiding van de specie, met speciale aandacht voor de aangrenzende drempel van Hansweert.

Een eerste conclusie heeft betrekking tot de performantie van het numerieke model. De trend van de waargenomen morfologische ontwikkelingen wordt door het model voor bepaalde locaties wel (SH51, INOS) en voor andere niet (DPHW, SH41) gereproduceerd. Daarnaast is de stabiliteit van de gestorte specie in de simulaties vergeleken met de waarnemingen. De initiële stabiliteit (i.e. volume sediment dat na beëindigen stortingen wordt teruggevonden) is groter in het model. Dit kan enerzijds toegeschreven worden aan de manier van storten (“nourishment”) waardoor er geen sediment in de waterkolom terecht tijdens het storten. Anderzijds, is het mogelijk dat bepaalde processen onvoldoende door het model gereproduceerd worden: (1) het niet correct reproduceren van lokale stromingscondities ter hoogte van de diepe delen of (2) de keuze voor een uniforme sedimentfractie (200 μm) in het numerieke model. Verder onderzoek kan in beeld brengen hoe belangrijk deze 2 processen zijn.

Gelet op bovenstaande vaststellingen, is er dan ook voor gekozen om de resultaat relatief te beschouwen, de aanname makend dat de afwijking van het model tussen de referentietoestand en de scenario's gelijkaardig is. Hierbij dient sowieso opgemerkt worden dat mits deze benadering, de resultaten steeds met de nodige voorzichtigheid moeten geïnterpreteerd worden!

Met betrekking tot de stabiliteit, vertonen de scenario's waarbij in het opwaartse deel van de diepe put van Hansweert en de inloop van Ossensisse wordt gestort de grootste stabiliteit (ca. 92% na 1 jaar en 86-90% na 2 jaar volgens het model). De laagste stabiliteit is terug te vinden bij de afwaartse gebieden van deze stortzones. Dit stemt overeen met de waarnemingen (met name na het beëindigen van de stortingen), doch voor de diepe put van Hansweert wordt de waargenomen dynamiek minder terug in het model.

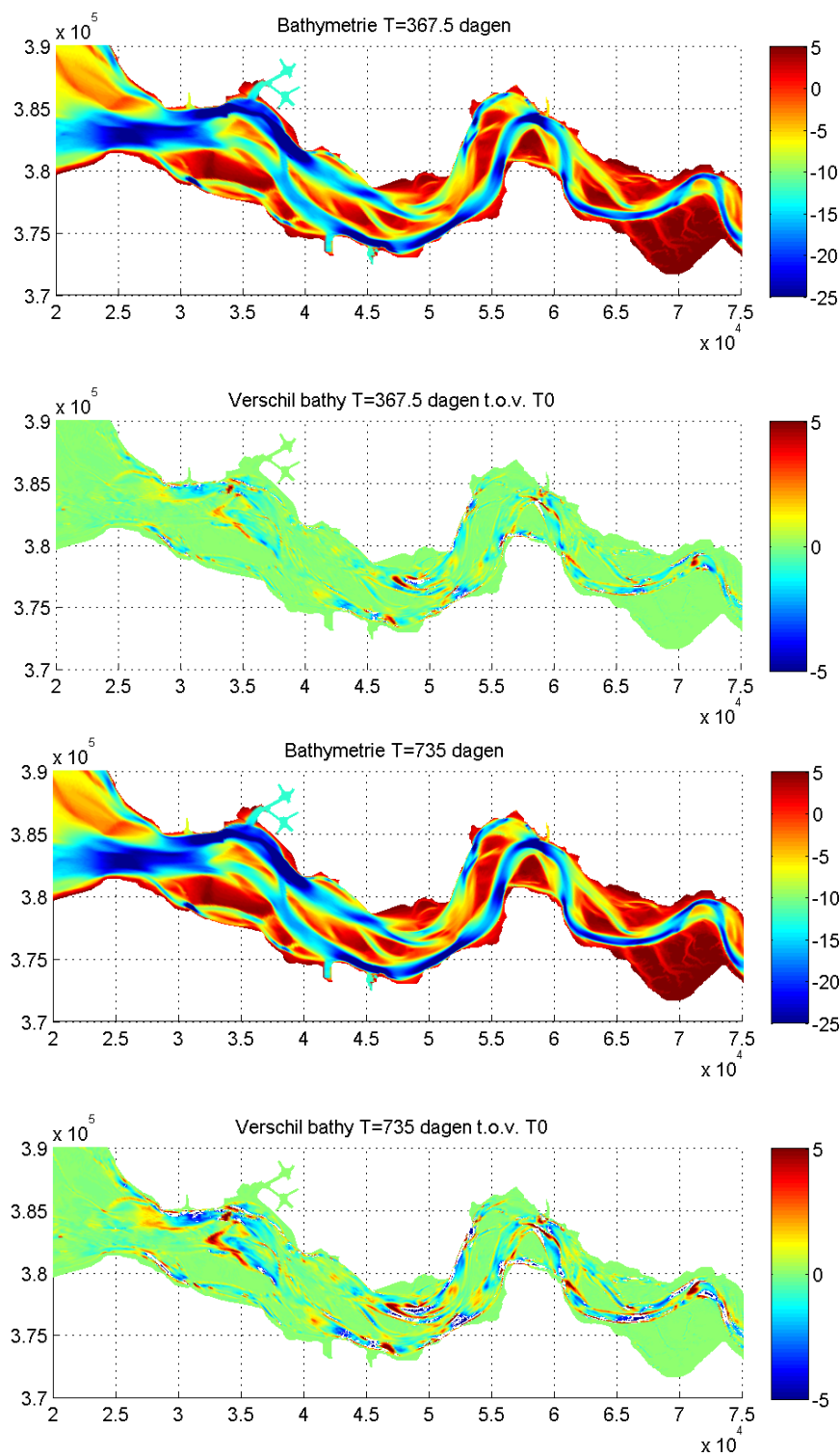
Met betrekking tot de retourstroming naar de drempel van Hansweert, zal 60-90% van het geërodeerde sediment uit SH51 op de drempel van Hansweert terecht komen, terwijl dit voor het opwaartse deel van diepe put van Hansweert 40-60% is. Dit is logisch aangezien beide stortzones grenzen aan dit drempelgebied. De retourstroming vanuit SH41 en inloop Ossensisse is volgens het model quasi onbestaande. Hierbij dient opgemerkt worden dat (1) de retourstroming door het model mogelijks onderschat wordt en (2) de tijdshorizon van de simulaties (i.e. 2 jaar) mogelijks te kort is om het sediment van de stortlocatie tot op de drempel van Hansweert te transporteren..

7 Referenties

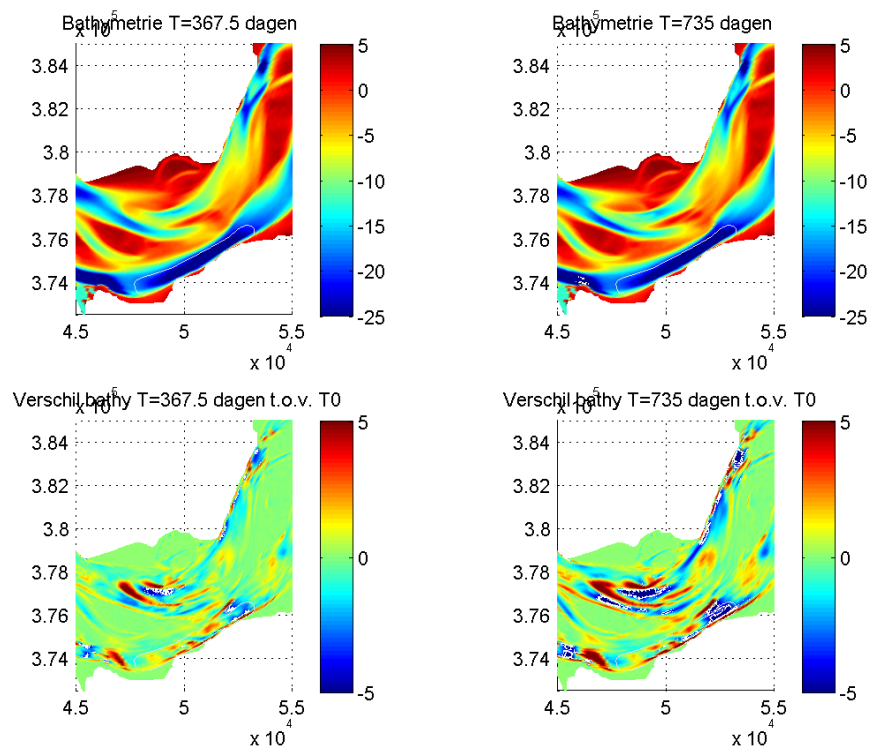
- Beirinckx, K.; Taal, M.; Plancke, Y.; Van den Bergh, E.** (2013). Plan van Aanpak Onderzoek Agenda voor de Toekomst
- IMDC.** (2017a). Analyse drempels en stortzone SH41 in de vaargeul van de Westerschelde
- IMDC.** (2017b). Maandrapport Flexibel Storten april-mei 2017
- Maximova, T.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Vervolgonderzoek bevaarbaarheid Bovenzeeschede: subreport 4 – Modelling Train CSM – ZUNO: validation 2013. *RPRT. WL Rapporten*, 13_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerp
- Meire, D.; Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Mostaert, F.** (S.d.). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 2 – Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties in de Westerschelde
- Plancke, Y.; Claeys, S.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Overleg Flexibel Storten: deelrapport 23. Stroming- en sedimentmeting ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. *RPRT. WL Rapporten*, 00_031_23. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=289694>
- Plancke, Y.; Wouters, K.; Meire, D.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (S.d.). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 5 – Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van stortingen
- Rijksinstituut voor Kust en Zee.** (2001). Morfologische ontwikkeling Westerschelde 1931 - 2000
- Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2017). Morfologie mesoschaal: Deelrapport 7 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model.
- Tank, F.T.G.** (1996). Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Literatuurstudie en hypothesen
- Van Rijn, L.C.** (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas
- Verheyen, B.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Mostaert, F.** (2012). NEVLA3D randvoorwaardenmodel: deelrapport 6. Scenarioberekeningen LTV zandhuishouding. *RPRT. WL Rapporten*, 00_018. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vos, G.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (S.d.). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 8 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: gevoeligheidsanalyse stortingen
- Vos, G.; Wouters, K.; Deleu, J.; Meire, D.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Agenda voor de toekomst – Stroming en sedimenttransport op de mesoschaal in het Schelde-estuarium: Deelrapport 1 – Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van drempels

Bijlage – Resultaten simulaties

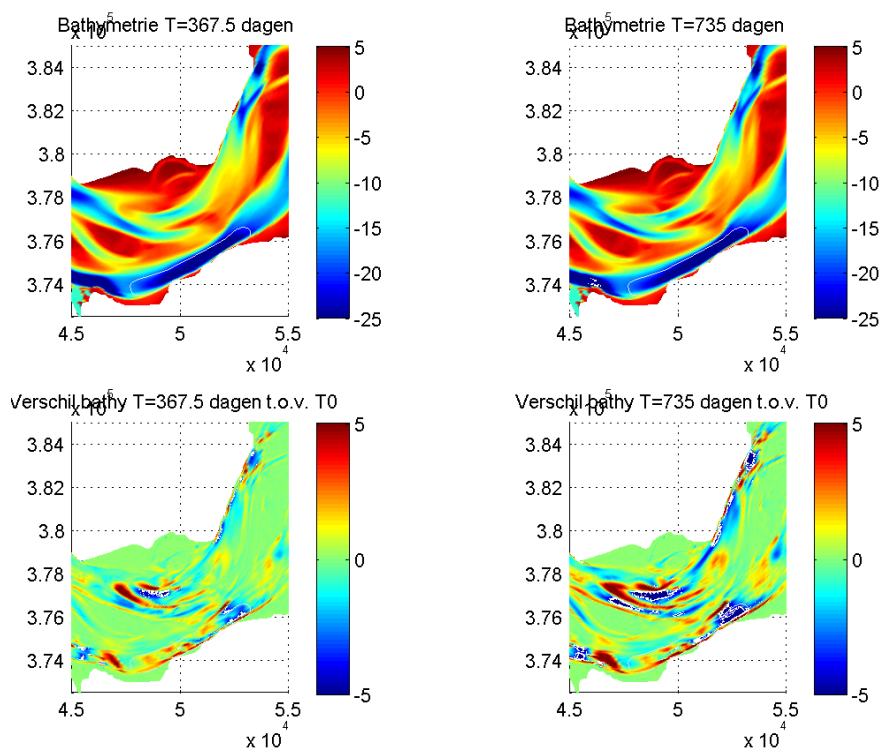
Figuur 22 – Bathymetrie (m NAP) en morfologische veranderingen in referentiesimulatie na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



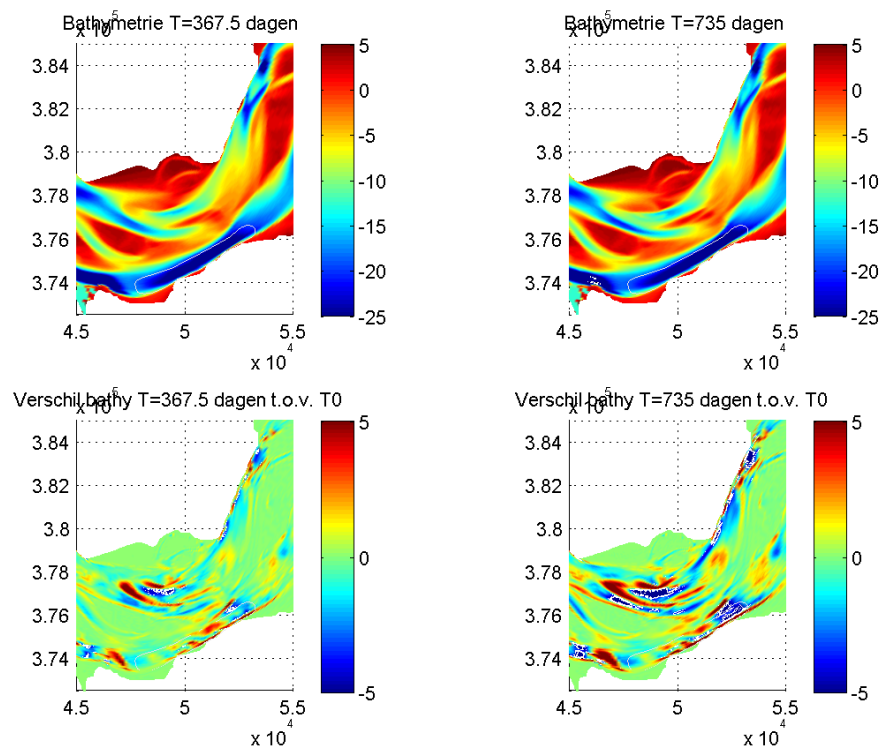
Figuur 23 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h211 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



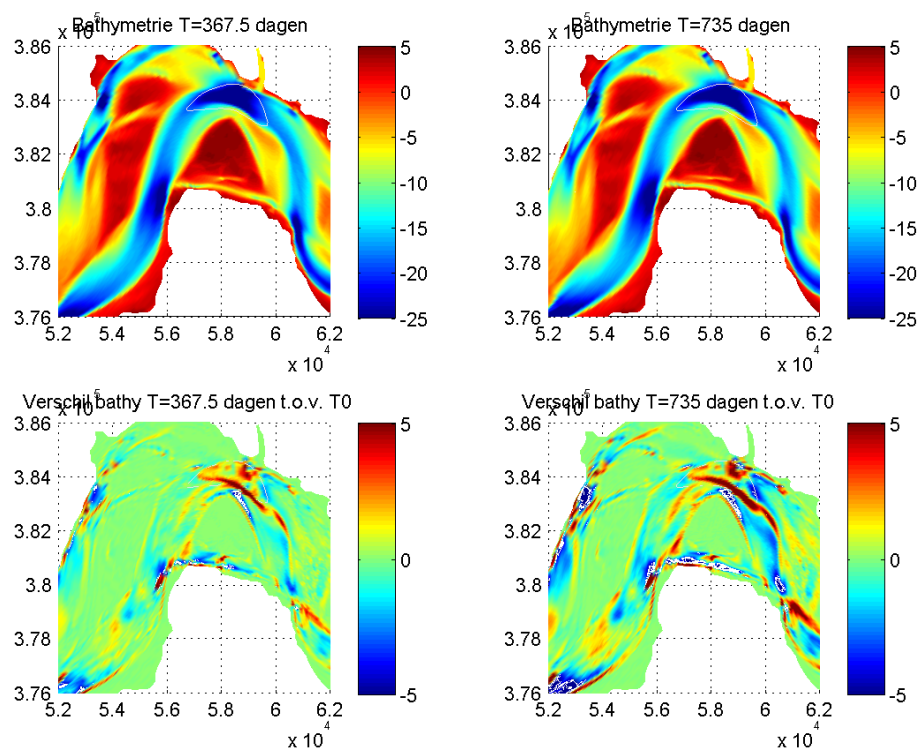
Figuur 24 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h212 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



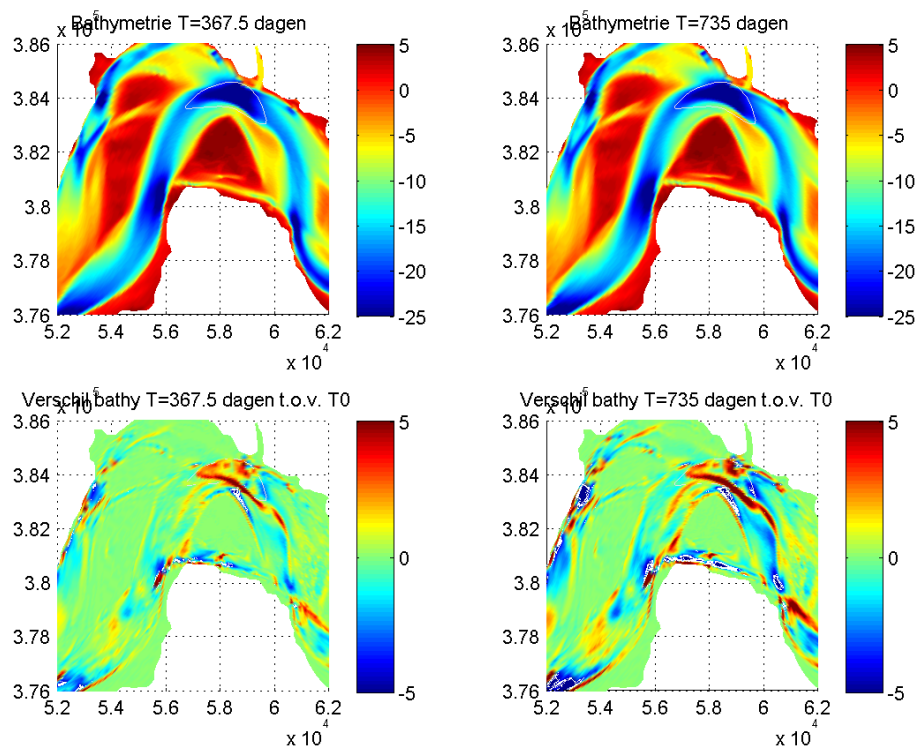
Figuur 25 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h213 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



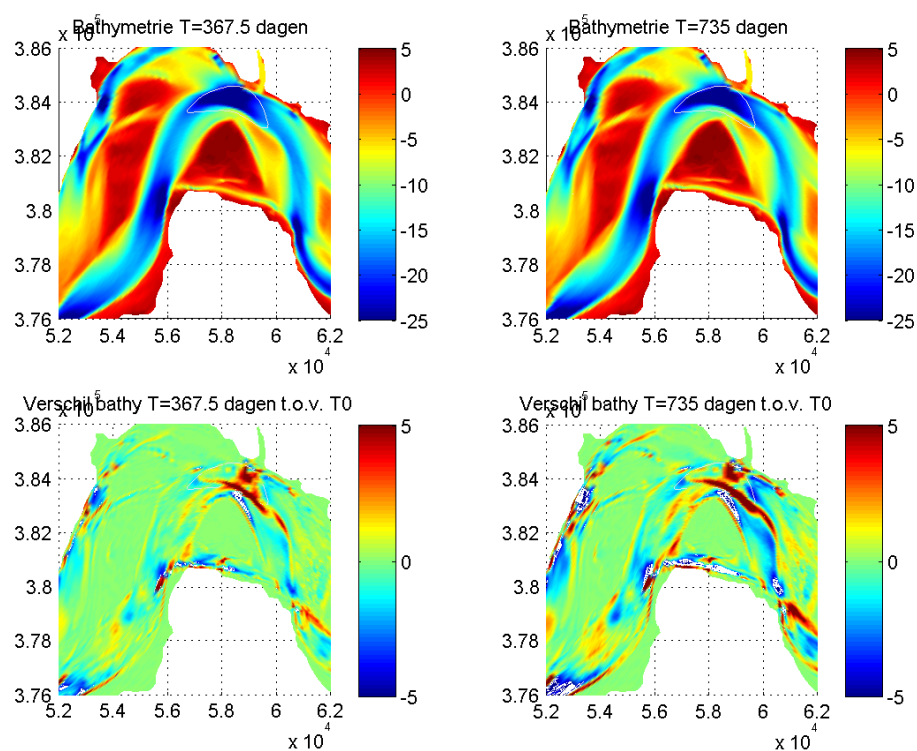
Figuur 26 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h214 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



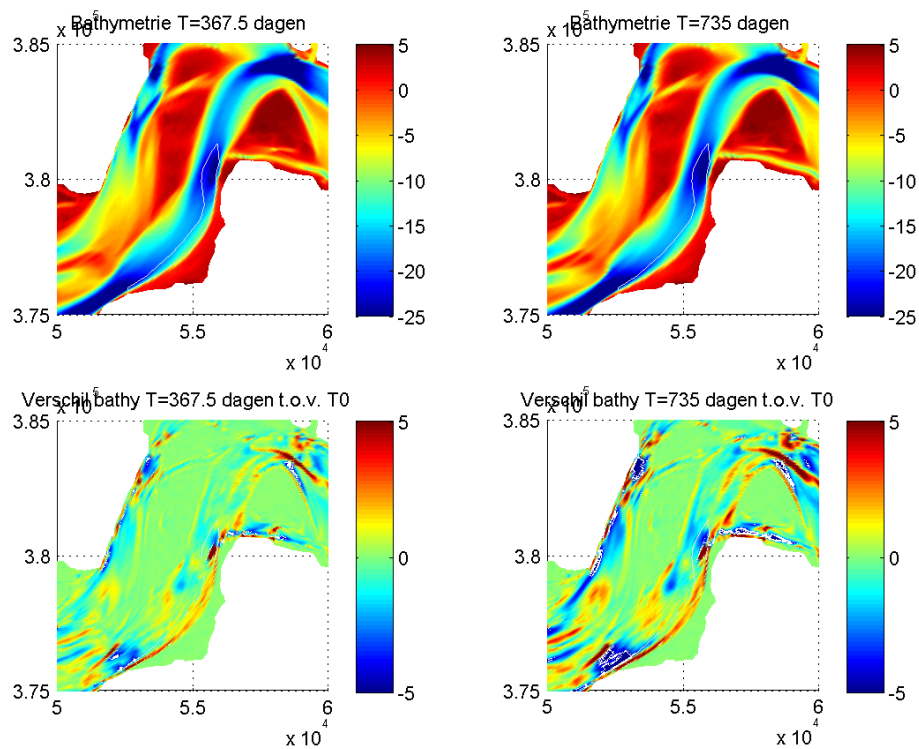
Figuur 27 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h215 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



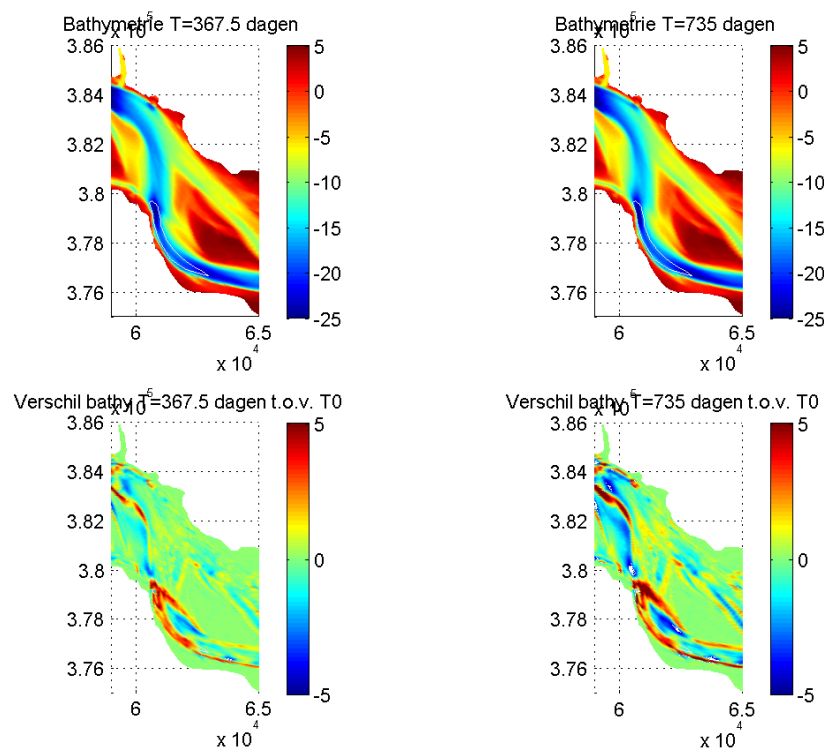
Figuur 28 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h216 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



Figuur 29 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h217 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



Figuur 30 – Bathymetrie en morfologische veranderingen in scenario h218 na ca. 1 jaar (boven) en na ca. 2 jaar (onder)



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be