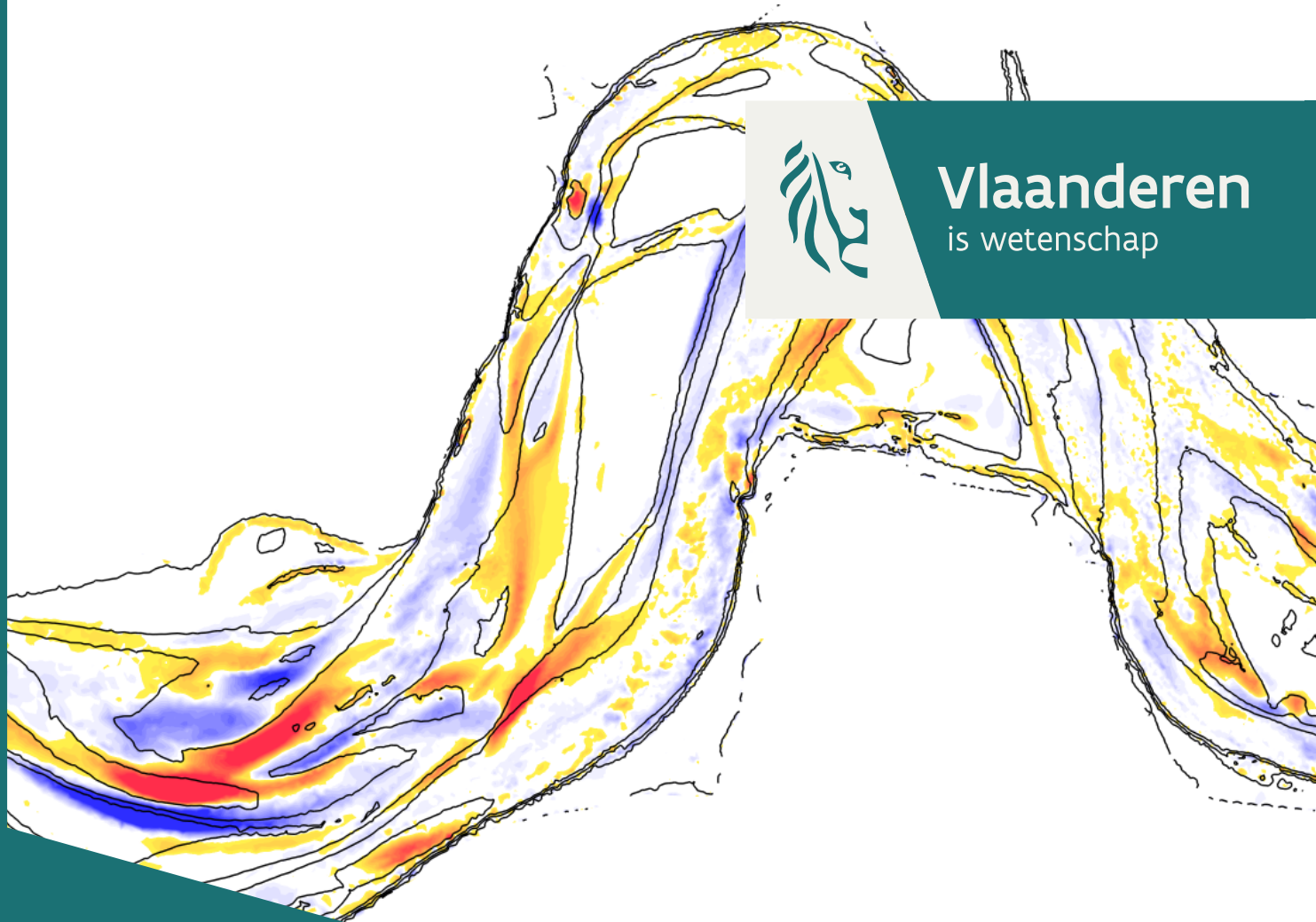




Vlaanderen
is wetenschap



17_088_12
WL rapporten

Agenda v/d Toekomst Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Deelrapport 12
Scenario's stortingen diepe delen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Scenario's stortingen diepe delen

Stark, J.; De Maerschallck, B. Plancke, Y.; 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 2020

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; De Maerschalck, B. Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Scenario's stortingen diepe delen. Versie 2.2. WL Rapporten, 17_088_12. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2020R17_088_12
Keywords (3-5):	Numerieke modellering, waterbeweging, morfologie, Schelde-estuarium		
Kennisdomeinen	Hydraulica en Sediment > Morfologie > Baggeren en storten > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	43	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s)	Stark, J.
-----------	-----------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Maerschalck, B.	Getekend door: Bart De Maerschalck (Signa) Getekend op: 2020-05-18 14:49:10 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Bart De Maerschalck</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2020-05-18 16:07:20 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-05-18 14:51:15 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

Het onderzoeksproject 'Sedimenttransport op verschillende tijdschalen' tracht de inzichten in de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op verschillende temporale en spatiale schalen te verbeteren. Het onderzoek kadert ondermeer binnen thema 7 uit de Agenda van de Toekomst (AvdT): "Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie". De studie voorziet erin elk jaar ad hoc modelscenario's op vraag van de klant uit te voeren en te analyseren. In dit rapport worden de modelscenario's voor het jaar 2019 gepresenteerd. Deze scenario's staan in het teken van stortingen in diepe delen zoals de Diepe put van Hansweert, Inloop van Ossensisse en stortlocaties SH41 en SH51.

Aan de hand van een reeks modelscenario's wordt de gevoeligheid voor de schematisering van sedimentstortingen binnen het morfologische Delft3D-NEVLA model (2DH) onderzocht. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen stortingen in een morfologisch actieve run en stortingen op een run met een vaste bodem. Enkel bij simulaties met actieve sedimentbodem kan de morfologische impact van sedimentstortingen worden geanalyseerd. In het algemeen blijkt dat stortingen zorgen voor een relatieve verondieping in de geul opwaarts en afwaarts van de stortlocatie en een relatieve verdieping van de geulwand evenwijdig aan de stortlocatie. Kwantitatief kan de morfologische invloed van stortingen vanwege de onzekerheid omtrent de prestatie van het morfologisch model niet adequaat worden bepaald. Wel blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat de stortstabiliteit van geobserveerde proefstortingen in stortzone Inloop van Ossensisse goed wordt benaderd in de morfologische runs.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Introductie	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Modelopzet	3
2.1 Het Delft3D-Nevla model	3
2.2 Modelsoftware	3
2.3 Modelrooster.....	4
2.4 Bathymetrische gegevens.....	4
2.5 Afwaartse randvoorwaarden.....	5
2.6 Opwaartse randvoorwaarden	5
2.7 Saliniteit.....	5
2.8 Bodemruwheid	6
2.9 Instellingen morfologisch model	7
2.10 Overige modelinstellingen.....	9
3 Geobserveerde morfologische veranderingen.....	10
3.1 Geobserveerde morfologische veranderingen.....	10
3.2 Geobserveerde stabiliteit stortingen proefstortzones.....	12
4 Gevoeligheidsanalyse modellering stortingen	17
4.1 Basissimulatie morfologische ontwikkeling	17
4.2 Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in proefstortzone Diepe put van Hansweert	20
4.2.1 Storting in Diepe put van Hansweert met morfologische ontwikkeling	20
4.2.2 Storting in Diepe put van Hansweert zonder autonome morfologische ontwikkeling	20
4.2.3 Verspreiding van stortfractie in morfologisch actieve simulatie.....	23
4.2.4 Stortingen in Diepe put van Hansweert na één jaar autonome morfologische ontwikkeling	25
4.2.5 Geleidelijke stortactiviteit ten opzichte van instantane storting Diepe put van Hansweert ..	27

4.3	Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in proefstortzone Inloop van Ossenisse	29
4.3.1	Storting in Inloop van Ossenisse met morfologische ontwikkeling.....	29
4.3.2	Storting in Inloop van Ossenisse zonder autonome morfologische ontwikkeling	29
4.4	Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in stortzone SH41	31
4.4.1	Storting SH41 met morfologische ontwikkeling.....	31
4.4.2	Storting SH41 zonder autonome morfologische ontwikkeling	31
4.5	Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in stortzone SH51	33
4.5.1	Storting SH51 met morfologische ontwikkeling.....	33
4.5.2	Storting SH51 zonder autonome morfologische ontwikkeling	33
4.6	Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in stortzone Plaat van Walsoorden	35
4.6.1	Storting langs Plaat van Walsoorden met morfologische ontwikkeling.....	35
4.6.2	Storting langs Plaat van Walsoorden zonder autonome morfologische ontwikkeling	35
4.7	Invloed sedimentdiameter	37
4.8	Vergelijking met geobserveerde stabiliteit stortingen.....	38
5	Discussie & Conclusies.....	41
5.1	Algemene conclusies scenario-analyse morfologisch model	41
5.2	Schematisering sedimentstortingen.....	41
5.3	Aanbevelingen	42
6	Referenties	43

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet)	5
Tabel 2 – Basisinstellingen morfologisch model Delft3D-NeVla	7
Tabel 3 – Basisinstellingen sediment in Delft3D-NeVla simulatie	7
Tabel 4 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model	9
Tabel 5 – Gemodelleerde en geobserveerde stabiliteit van sedimentstortingen.....	38

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied.....	2
Figuur 2 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster.....	4
Figuur 3 – Opgelegd morfologisch getij aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Delft3D-NeVla.....	5
Figuur 4 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.....	6
Figuur 5 – Manning's ruwheidsveld Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model.	6
Figuur 6 – Dikte sedimentlaag in Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model..	8
Figuur 7 – Geobserveerde morfologische ontwikkeling tussen 2015 en 2018.	11
Figuur 8 – Locaties vaargeulsecties en stortpolygoenen.	12
Figuur 9 – Tijdsverloop van het cumulatief volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de complete stortzone Diepe put van Hansweert	13
Figuur 10 – Tijdsverloop van het cumulatief volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de complete stortzone Inloop van Ossensisse.....	14
Figuur 11 – Overzicht van gestorte hoeveelheden, gepeilde volumes en stabiliteit gestorte specie in stortzone SH41.....	15
Figuur 12 – Overzicht van gestorte hoeveelheden, gepeilde volumes en stabiliteit gestorte specie in stortzone SH51.....	15
Figuur 13 – Tijdsverloop van het cumulatief volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de stortzone Plaat van Walsoorden	16
Figuur 14 – Geobserveerde en gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D referentiesimulatie.	19
Figuur 15 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties DPVH_RUN32.	21
Figuur 16 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties DPVH_RUN32 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).....	21
Figuur 17 – Gemodelleerde sedimentverspreiding na één jaar met simulatie DPVH_RUN34 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) zonder autonome morfologische ontwikkeling.	22
Figuur 18 – Dwarsdoorsnede met gemodelleerde morfologische ontwikkeling bij Diepe put van Hansweert na één jaar met simulaties DPVH_RUN32 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).	22
Figuur 19 – Dwarsdoorsnede met gemodelleerde morfologische ontwikkeling bij Diepe put van Hansweert na één jaar met simulaties DPVH_RUN34 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) zonder autonome morfologische ontwikkeling.....	23
Figuur 20 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor simulaties DPVH_RUN32 en DPVH_RUN34.	23
Figuur 21 – Gemodelleerde verspreiding stortfractie na één jaar met simulatie DPVH_RUN33b (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) met autonome morfologische ontwikkeling.	24

Figuur 22 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na twee jaar met simulaties DPVH_RUN39 (storting van 3.0 Mm3 in diepe put van Hansweert na één morfologisch jaar) en NEVLA_RUN23 (tweejarige referentiesimulatie).	26
Figuur 23 – Gemodelleerde sedimentverspreiding na één jaar met simulatie DPVH_RUN38 zonder aanwezige sedimentlaag (storting van 3.0 Mm3) met een initiële bathymetrie na één jaar autonome morfologische ontwikkeling.	26
Figuur 24 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor simulaties DPVH_RUN38 en DPVH_RUN39.	27
Figuur 25 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na twee jaar met simulaties DPVH_RUN40 (geleidelijke storting van 3.0 Mm3 in diepe put van Hansweert gedurende het eerste jaar) en DPVH_RUN39 (instantane na één morfologisch jaar).	28
Figuur 26 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor simulaties DPVH_RUN29 en DPVH_RUN40.	28
Figuur 27 – Dwarsdoorsnede met gemodelleerde morfologische ontwikkeling bij Diepe put van Hansweert met simulaties DPVH_RUN39 (éénmalige storting na jaar 1) en DPVH_RUN40 (geleidelijke storting gedurende jaar 1).	29
Figuur 28 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties OSSE_RUN52 (storting van 3.0 Mm3 in Inloop van Ossensisse) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).	30
Figuur 29 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie OSSE_RUN54 (storting van 3.0 Mm3 in Inloop van Ossensisse) zonder autonome morfologische ontwikkeling.	30
Figuur 30 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Inloop van Ossensisse voor simulaties OSSE_RUN52 en OSSE_RUN54.	31
Figuur 31 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties SH41_RUN72 (storting van 3.0 Mm3 in stortvak SH41) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).	32
Figuur 32 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie SH41_RUN74 (storting van 3.0 Mm3 stortvak SH41) zonder autonome morfologische ontwikkeling.	32
Figuur 33 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon SH41 voor simulaties SH41_RUN72 en SH41_RUN74.	33
Figuur 34 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties SH51_RUN82 (storting van 3.0 Mm3 in stortvak SH51) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).	34
Figuur 35 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie SH51_RUN84 (storting van 3.0 Mm3 stortvak SH51) zonder autonome morfologische ontwikkeling.	34
Figuur 36 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon SH51 voor simulaties SH51_RUN82 en SH51_RUN84.	35
Figuur 37 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties PVWA_RUN62 (storting van 3.0 Mm3 langs Plaat van Walsoorden) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).	36
Figuur 38 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie PVWA_RUN64 (storting van 3.0 Mm3 langs Plaat van Walsoorden) zonder autonome morfologische ontwikkeling.	36
Figuur 39 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Plaat van Walsoorden voor simulaties PVWA_RUN62 en PVWA_RUN64.	37
Figuur 40 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor stortingen met variërende sedimentdiameters.	37

1 Introductie

1.1 Situering

In het kader van het onderzoeksprogramma “Agenda voor de Toekomst” (AvdT) voert het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) onderzoek uit naar het sedimenttransport in het Schelde-estuarium op verschillende tijdschalen, dit binnen thema 6 *“Slib in het estuarium: wat zijn de condities voor een systeemomslag?”* en thema 7 *“Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie”* uit het AvdT programma. Dit rapport is onderdeel van de AvdT-studie *“Sedimenttransport op verschillende tijdschalen”*. Binnen dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van data-analyse, *expert judgement*, geïdealiseerde en complexe modellen.

Binnen één van de onderdelen van deze studie worden complexe numerieke modellen ingezet om de invloed van stortstrategieën op de morfologische processen in het estuarium te onderzoeken. Meer specifiek wordt in dit rapport onderzocht wat de effecten zijn van sedimentstortingen in de diepe delen van het estuarium. Dit gebeurt aan de hand van een gevoeligheidsanalyse van het morfologisch model en een scenario-analyse die verschillende storthoeveelheden en stortlocaties omvat.

Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het Delft3D-NeVla model dat in de eerdere AvdT-studie naar *“Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”* door Stark et al. (2019) gevalideerd werd. Binnen het huidige project werd dit model al ingezet bij een gevoeligheidsanalyse (Deelrapport 3; Stark et al., 2020a) en voor het simuleren van morfologische veranderingen op lange termijn (Deelrapport 7; Stark et al., 2020b).

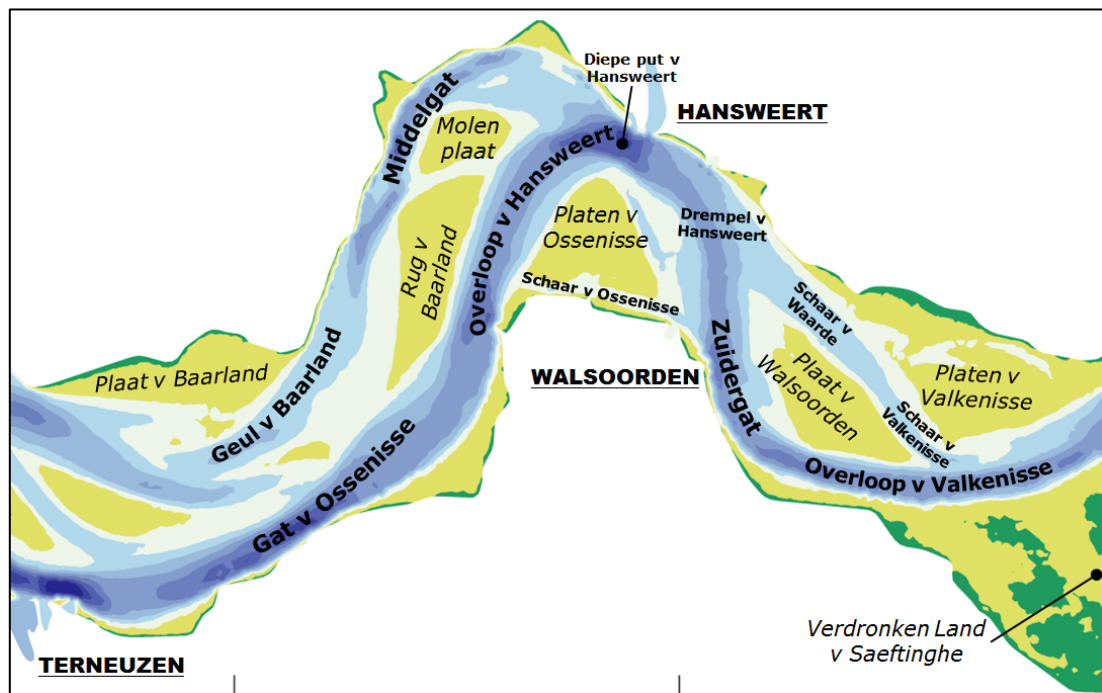
1.2 Doelstelling

Voordat dit numerieke model ingezet kan worden om reële cases te bestuderen zal eerst de modelprestatie worden getest door middel van een gevoeligheidsanalyse en een vergelijking met geobserveerde morfologische veranderingen na stortingen in diepe delen van het estuarium.

In deze gevoeligheidsanalyse wordt het belang van de schematisering van de sedimentstortingen onderzocht. De focus ligt hierbij voornamelijk op het stortgebied in de diepe put van Hansweert in de Westerschelde tussen Terneuzen en Walsoorden (Figuur 1). Dit deel van de Westerschelde omvat verschillende momenteel vergunde en potentiële toekomstige stortlocaties. Aangezien de huidige vergunning voor het terugstorten van onderhoudsspecie begin 2022 afloopt, dienen deze verbeterde inzichten (o.a. verspreiding van gestorte specie) om de toekomstige stortstrategie optimaal in te kunnen invullen.

Vervolgens zullen ook stortscenario's worden doorgerekend om de invloed van stortingen in diepe delen te onderzoeken. De diepe delen waarvoor stortscenario's onderzocht worden zijn de proefstortzones Inloop van Ossenis en Diepe put van Hansweert en bestaande stortzones in de hoofdgeulen SH41 (i.e., Gat van Ossenis) en SH51 (i.e., Zuidergat). Ook wordt het effect van stortingen in het stortgebied aan de afwaartse punt van de Plaat van Walsoorden onderzocht.

Figuur 1 – Overzichtsk kaart van geulen en platen in het studiegebied.



1.3 Leeswijzer

Dit rapport omvat in Hoofdstuk 2 eerst een modelbeschrijving van het Delft3D-NeVla model dat gebruikt wordt voor het doorrekenen van de stortscenario's. Vervolgens worden in Hoofdstuk 3 de geobserveerde morfologische verandering en stabiliteit van stortingen in de stortzones Diepe put van Hansweert, Inloop van Ossenisse, SH41, SH51 en Plaat van Walsoorden omschreven. Hoofdstuk 4 bevat de modelresultaten van simulaties met stortingen op de verschillende stortlocaties. De stortingen worden steeds geïmplementeerd in een model met een initiële sedimentlaag en in een model met een vaste onderlaag. Tot slot worden in Hoofdstuk 5 de belangrijkste bevindingen op basis van de stortscenario's opgesomd. Ook wordt hier een vergelijking tussen de geobserveerde en gemodelleerde stabiliteit van de stortingen gemaakt.

2 Modelopzet

2.1 Het Delft3D-NeVla model

Een van de modellen van het Schelde-estuarium die voor dit onderzoek beschikbaar zijn is het twee-/driedimensionale Delft3D-NeVla model (zie Maximova et al., 2009 voor een uitvoerige kalibratie van de waterbeweging in NeVla). In deze studie wordt de 2D-versie van het model ingezet. Dit model kan ingezet worden om de waterbeweging in het estuarium te modelleren, evenals om het sedimenttransport te modelleren. In het kader van een voorgaande AvdT-studie (i.e., *“Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”*; Stark et al., 2019) werd het tweedimensionale NeVla model gekalibreerd om gemeten stroomsnelheden en sedimenttransporten rond de Drempel van Hansweert te simuleren. Tevens werd in het kader van deze voorgaande studie een gevoeligheidsanalyse voor de instellingen van het morfologisch model uitgevoerd (Meire et al., 2017). In Deelrapport 3 en Deelrapport 7 binnen het huidige project werd het Delft3D-NeVla model vergeleken met een Telemac/Sisyphé model voor wat betreft de hydrodynamische modelprestatie in het studiegebied, alsmede de morfologische modelprestatie op korte en lange termijn (Stark et al., 2020a; 2020b).

Uit deze rapporten blijkt dat de representatie van de stroomsnelheden op en rondom de Platen van Ossensisse beter is in het Delft3D-model. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat het Delft3D model uitvoerig werd gekalibreerd voor snelheidsmetingen aan de hand van spatiaal variabele ruwheidsvelden in dit studiegebied, terwijl dit voor het Telemac model slechts summier werd gedaan. Ook de morfologische runs met Delft3D toonden een iets betere overeenkomst met geobserveerde morfologische veranderingen. Uit lange termijn simulaties in Deelrapport 7 (Stark et al., 2020b) blijkt dat dit model in staat is de algehele verdieping van de hoofdgeulen en de sedimentatie aan de afwaartse rand van de Plaat van Walsoorden op lange termijn te reproduceren. Opvallende afwijkingen zijn het ontbreken van de verondieping van het Middelgat, maar ook de migratie van de Schaar van Valkenisse in noordelijke in plaats van zuidelijke richting en de gesimuleerde sedimentatieband aan de westrand van de Platen van Ossensisse waar in werkelijkheid afkalving plaats vond tussen 2001 en 2016. Als bagger- en stortactiviteiten worden geïmplementeerd in de Delft3D simulatie lijkt de gemodelleerde morfologische ontwikkeling van de hoofdgeul beter op de geobserveerde trends. De ligging van de platen en hoofdgeul blijft dan ongeveer hetzelfde en er is geen sprake van de noordwaartse migratie van het ondiepe plateau langs de noordoostkant van de Platen van Ossensisse. Er bestaan echter nog grote verschillen in sedimentatiehoogtes en erosiedieptes, alsmede in de exacte locaties van erosie- en sedimentatiezones, welke door middel van modelkalibratie en een meer gedetailleerde implementatie van het vaargeulonderhoud en de stortstrategieën verkleind zouden kunnen worden. Op basis van de modelresultaten in Deelrapport 7 kan geconcludeerd worden dat bagger- en stortactiviteiten een significant effect hebben op de morfologische ontwikkelingen in dit gebied. Bovendien is het implementeren van baggeren en storten noodzakelijk om (meerjarige) morfologische ontwikkelingen goed te kunnen simuleren.

Tot slot kon op basis van testsimulaties met stortingen in de diepe put van Hansweert in Deelrapport 3 (Stark et al., 2020a) gesteld worden dat het Delft3D model op deze locatie een hogere stortstabiliteit geeft dan het Sisyphé/Telemac-3D model. Deze stortingen werden in beide modellen geschematiseerd als verondiepingen in de bathymetrie, waarna de stortstabiliteit werd bepaald door verschilkaarten te maken met een referentiesimulatie waarin de autonome morfologische ontwikkeling werd gesimuleerd.

2.2 Modelsoftware

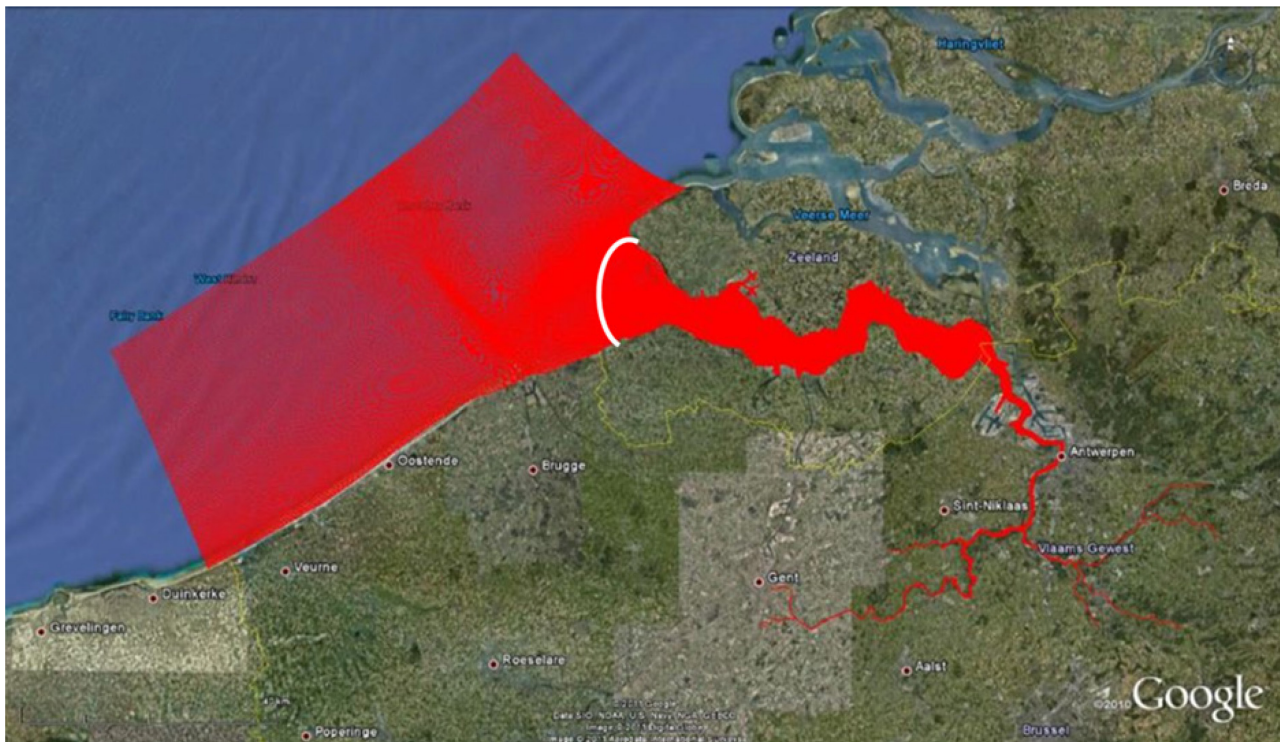
Gedetailleerde informatie over de Delft3D software is beschikbaar in de Delft3D-FLOW user manual (Deltares, 2011).

2.3 Modelrooster

Het NeVla-rooster omvat het volledige Schelde estuarium van de Noordzee, de Vlake van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de getijgebonden zijrivieren (Figuur 2). De afwaartse rand van het NeVla-model is gelegen in de Noordzee, de opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebed. 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 het studiegebied nabij Hansweert bedraagt de roosterresolutie ongeveer 100 m.

Voor de validatie van de getijvoortplanting en stroming werd in voorgaande studies het model beperkt tot het estuarium (zie Figuur 2). Voor het doorrekenen van morfologische simulaties is het gehele NeVla-modelrooster (i.e., inclusief de kustzone) gebruikt omdat het afsnijden ter hoogte van Westkapelle - Cadzand in eerdere studies tot instabiliteiten in morfologische simulaties heeft geleid (Meire et al., 2017).

Figuur 2 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster



2.4 Bathymetrische gegevens

De bathymetrische data in het studiegebied is identiek aan de bathymetrische data die is gebruikt voor het eerder gekalibreerde Delft3D-NeVla model binnen het AvdT-project *“Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”* (Stark et al., 2019). Dit houdt meer specifiek in dat voor de Westerschelde bathymetrische gegevens uit het jaar 2015 met een resolutie van 20 x 20 m zijn gebruikt. Voor het studiegebied rond de Platen van Ossensisse werd gebruik gemaakt van multibeam echo-sounding peilingen, opgemeten in het kader van de opvolging binnen Flexibel Storten, die in dezelfde periode werden uitgevoerd als wanneer de stroommetingen plaatsvonden (april-mei 2016). In het kustgebied en in de Zeeschelde is de bathymetrische data identiek aan de data van het Scaldis-2013 model (Smolders et al., 2016).

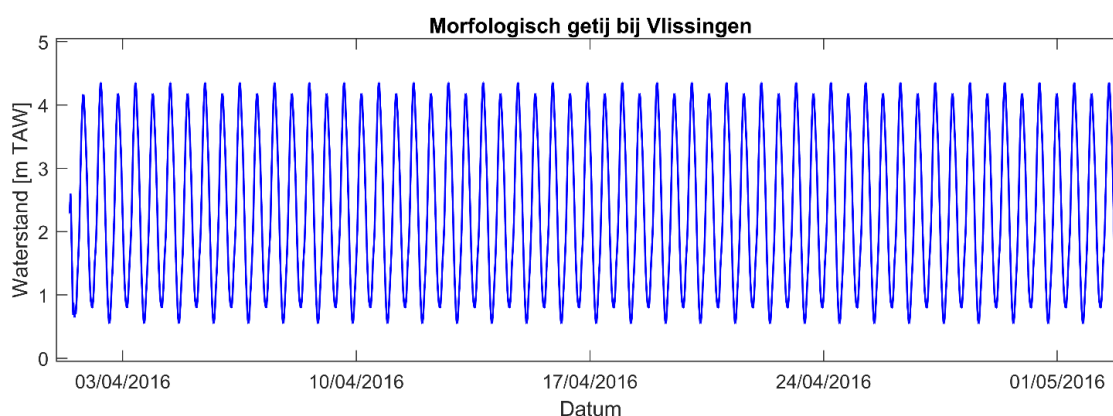
Het gebruikte coördinatenstelsel is RD Parijs, het verticaal referentiepeil is uitgedrukt in m TAW.

2.5 Afwaartse randvoorwaarden

Afwaartse randvoorwaarden voor morfologische simulaties in Delft3D

Er wordt, evenals in de eerdere Delft3D modelstudies door Meire et al. (2017) en Stark et al. (2019), gerekend met een morfologisch getij aan de afwaartse rand (Figuur 3). Hiermee kan het residueel sedimenttransport in een volledige springtij-doodtij cyclus gerepresenteerd worden door slechts één of twee getijcomponenten met een *MorFac* (e.g. Lesser, 2009). In de morfologische simulaties wordt daarnaast gerekend met een *MorFac* van 24.5, waardoor een simulatieduur van 15 dagen één volledig morfologisch jaar representeert.

Figuur 3 – Opgelegd morfologisch getij aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Delft3D-NeVla.



2.6 Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse randen (i.e., Boven-Zeeschelde en getij-gebonden zijrivieren) worden de jaargemiddelde debieten van het jaar 2009 opgelegd (Cornet, 2010) zoals opgesomd in Tabel 1. Deze randvoorwaarde is in overeenkomst met de opwaartse randvoorwaarden die werden opgelegd in de voorgaande AvdT-studie “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal” (Stark et al., 2019).

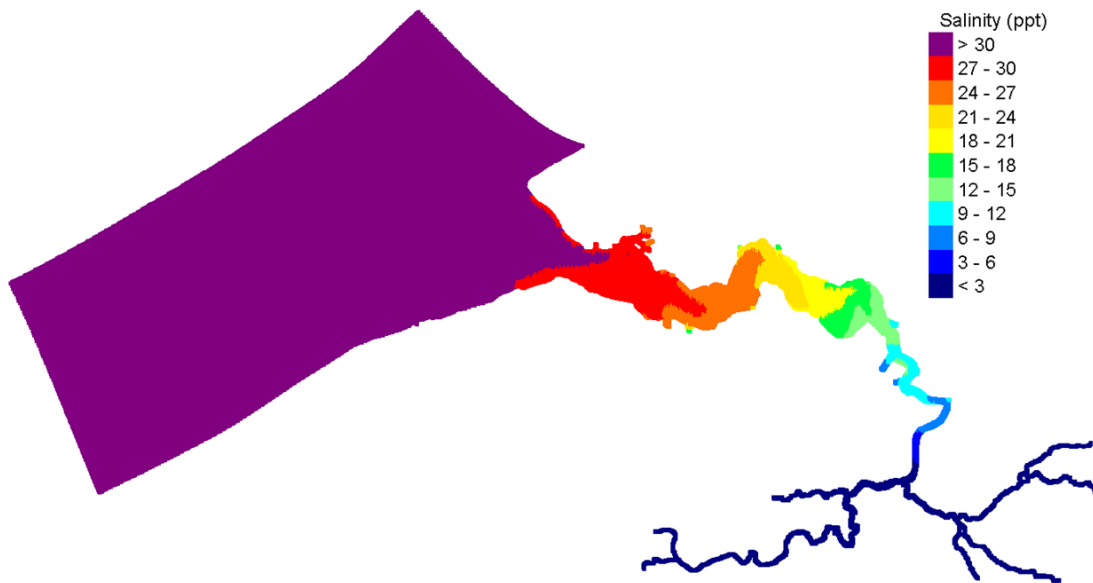
Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).

Locatie	Debiet [m ³ /s]
Boven-Zeeschelde	30.9
Dender	9.8
Zenne	10.0
Dijle	19.8
Grote Nete	4.0
Kleine Nete	5.3

2.7 Saliniteit

In alle modelsimulaties wordt rekening gehouden met de invloed van saliniteit. In de Delft3D-NeVla simulaties is aan de afwaartse rand een constante saliniteitswaarde van 31.0 PSU opgelegd. In de Delft3D-NeVla simulaties wordt het initiële zoutveld geadopteerd uit de eerdere AvdT modelstudie door Stark et al. (2019). Dit zoutveld wordt weergegeven in Figuur 4.

Figuur 4 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.

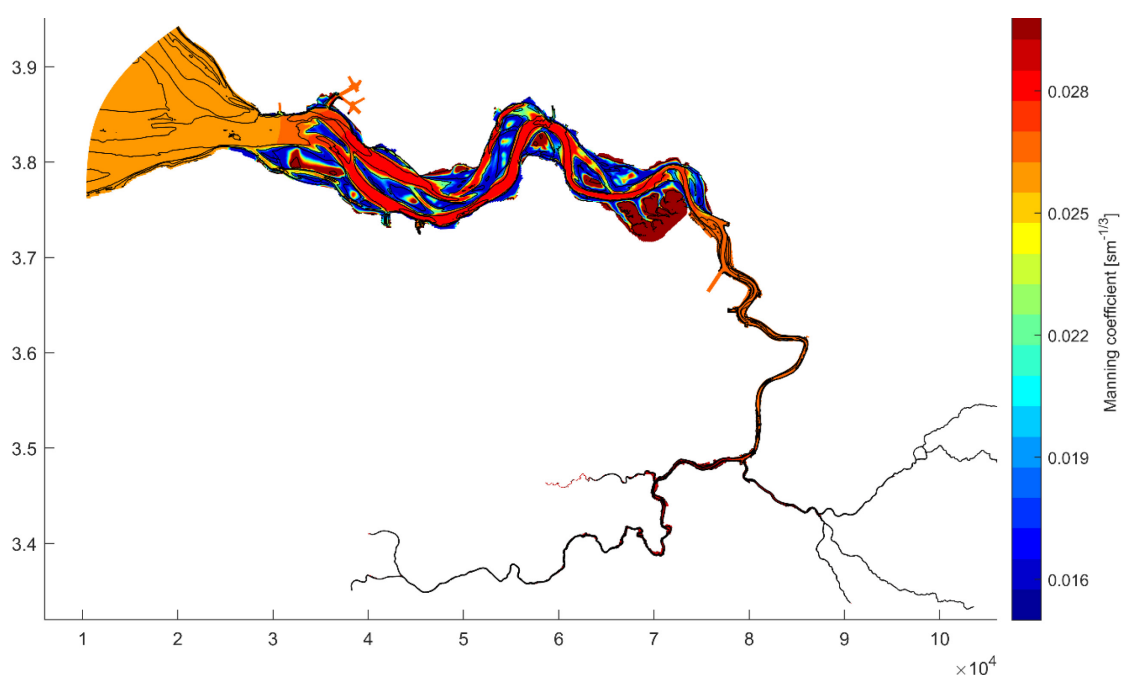


2.8 Bodemruwheid

Delft3D-NeVla

Voor de Delft-3D simulatie waarmee de modelresultaten worden vergeleken is het ruwheidsveld gebruikt zoals door Stark et al. (2019) gekalibreerd voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model (zie Figuur 5). In dit ruwheidsveld is de bodemruwheid op de ondiepe en intertidale delen verlaagd om de hoge stroomsnelheden en de neervorming op de Platen van Ossensisse beter te representeren.

Figuur 5 – Manning's ruwheidsveld Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model.



2.9 Instellingen morfologisch model

De invoerwaarden en modelconfiguratie voor het door Stark et al. (2019) gekalibreerd sedimenttransport-model voor de Drempel van Hansweert worden in onderstaande tabellen opgesomd.

Tabel 2 – Basisinstellingen morfologisch model Delft3D-NeVla

Parameter	Waarde
Morphological scale factor	24.5
time interval after which morphological changes will be calculated	1440 min
threshold sediment thickness for reducing sediment exchange	0.05 m
Morphological update	true
Neumann boundary condition for non-cohesive suspended sediment concentrations at inflow boundaries	true
Include effect of sediment on density gradient	false
Van Rijn's reference height	$\alpha_{ks} = 1 * \alpha_{ks}' [-]$
Longitudinal bed gradient factor for bedload transport	$\alpha_{Bs} = 1.0 [-]$ (Van Rijn, 1993)
Transverse bed gradient factor for bedload transport	$\alpha_{Bn} = 1.5 [-]$ (Ikeda, 1984)
Current-related suspended sediment transport factor	1.0
Current-related bedload transport factor	1.0
Minimum depth for sediment calculations	0.1 m
Global / maximum dry cell erosion factor	0 [-]
Maximum depth for variable THETSD	1.5 m
Option for k_s and k_w	lopKCW = 1 (i.e.,)
Current related roughness k_s	RDC = 0.01 m

Tabel 3 – Basisinstellingen sediment in Delft3D-NeVla simulatie

Parameter	Waarde
Reference density for hindered settling calculations	$c_{ref} = 1600 \text{ kg/m}^3$
Option for determining suspended sediment diameter	lopSus = 0 (i.e., Van Rijn, 1993 method)
Sediment type	Sand
Specific density of sediment fraction	$P_{sol} = 2650 \text{ kg/m}^3$
Sediment diameter	$d_{50} = 200 \mu\text{m}$
Dry bed density	$CDryB = 1600 \text{ kg/m}^3$
Factor for determining suspended sediment diameter	FacDSS = 1 (i.e., $D_{sus} = FACDSS \cdot d_{50}$)

Randvoorwaarden sedimenttransport

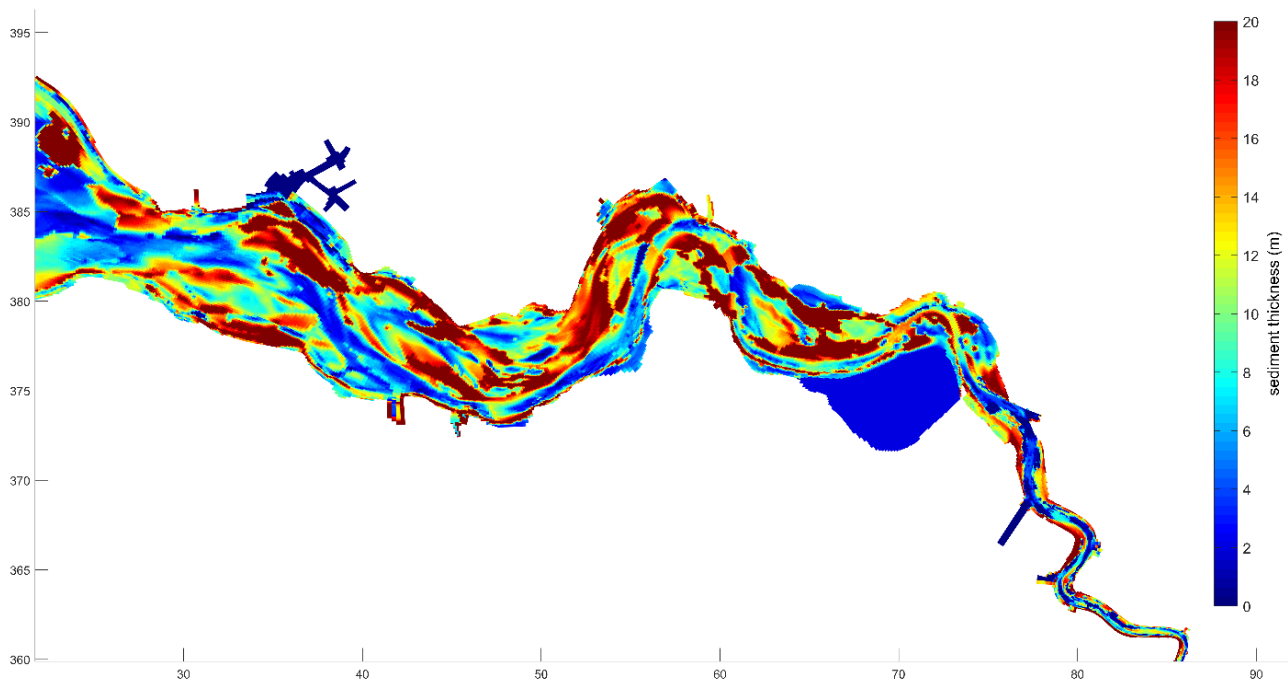
In het Delft3D-NeVla model is het sedimenttransportmodel aan de afwaartse rand in de Noordzee open voor sediment. Er is aan de afwaartse rand een referentieconcentratie van 0.05 kg/m^3 opgelegd. De opwaartse debietranden zijn wel gesloten voor sediment.

Beschikbaarheid sediment op de bodem

In de instellingen van de Delft3D simulaties door Stark et al. (2019) wordt gebruik gemaakt van een harde laag (i.e., variabele initiële dikte van de sedimentlaag). Dit gebeurt op basis van lithologische kaarten (zie Vos et al., 2016a). De initiële dikte van de sedimentlaag in de Boven-Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren is op 0 m gesteld, i.e. de bodem in de Boven-Zeeschelde ligt vast, dit om te voorkomen dat eventueel sterke (onrealistische) bodemveranderingen in de Boven-Zeeschelde het getij ter hoogte van het interessegebied gaan beïnvloeden. Figuur 6 geeft de initiële dikte van de sedimentlaag in de Westerschelde weer.

In de gevoeligheidsanalyse in dit rapport wordt nagegaan wat het effect is van het implementeren van een initiële sedimentlaag op de gemodelleerde morfologische impact van stortingen in diepe delen. Er worden dus simulaties uitgevoerd zonder initiële sedimentlaag (i.e., enkel met sediment van de storting zelf) en simulaties waarin de autonome morfologische ontwikkeling wordt gesimuleerd en stortingen tijdens de morfologische ontwikkeling worden toegevoegd.

Figuur 6 – Dikte sedimentlaag in Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model.



2.10 Overige modelinstellingen

De overige modelinstellingen voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model zijn opgesomd in Tabel 4.

Tabel 4 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model

Parameter	Waarde
Time step	0.05 min
Salinity	True
Sediment	True
Secondary Flow	True
Reflection parameter	100 s ²
Gravity	9.81 m/s ²
Water density	1023 kg/m ³
Air density	1 kg/m ³
Temperature	15 °C
Wall roughness	Free
Horizontal eddy viscosity	0.1 m ² /s
Horizontal eddy diffusivity	1.0 m ² /s
Drying and flooding	Centres and faces
Depth specified at	Grid cell corners
Depth at centre	Max
Depth at faces	Mor
Threshold depth	0.05 m
Marginal depth	0.05 m
Smoothing time	120 min
Advection scheme for momentum	cyclic
Advection scheme for Transport	cyclic
Horizontal Forester filter	True
Map results Interval	745 min
History output interval	10 min

3 Geobserveerde morfologische veranderingen

3.1 Geobserveerde morfologische veranderingen

Figuur 7 geeft de tussen 2015 en 2018 geobserveerde sedimentatie- en erosiegebieden in het studiegebied weer. De waargenomen morfologische verandering in de geulen (i.e., Gat van Ossenis, Overloop van Hansweert en Zuidergat) was vrij beperkt, wat uiteraard verklaard kan worden door het reguliere vaargeulonderhoud waarbij de vaargeul onderhouden wordt op een vaste diepte.

In (met name de zuidelijke helft van) de diepe put van Hansweert worden enkele kleine sterke sedimentatiezones geobserveerd (i.e., A in Figuur 7), die deels het gevolg lijkt te zijn van een plaatvallen die in dit gebied regelmatig voorkomen (Van Dijk et al., 2018). Ook is de sedimentatie in de put waarschijnlijk nog het resultaat van de proefstortingen die in de Diepe Put van Hansweert werden uitgevoerd. Direct opwaarts van deze diepe put is juist een erosiezone waarneembaar (i.e., B in Figuur 7).

Tegen de geulwanden langs van de Platen van Ossenis is in het algemeen sprake van sedimentatie, met name aan de westrand (i.e., C in Figuur 7). De sedimentatie aan de westkant van de Platen van Ossenis kan deels toegeschreven worden aan de grote storthoeveelheden in stortvak SH41 in deze omgeving (i.e., IMDC, 2015; Plancke et al., 2016), zie ook Figuur 8.

Aan de oostrand van de plaat lijkt de ondiepe afscheiding tussen de Platen van Ossenis en de ondiepte zich juist verder uit te diepen (i.e., D in Figuur 7). Deze uitschuring tussen de plaat en ondiepte strekt zich uit langs de gehele oostrand van de plaat. Ook de noordelijke punt van de plaat is aan erosie onderhevig, mogelijk deels ten gevolge van plaatvallen.

De geulwand tussen het ondiepe plateau en de Drempel van Hansweert kende weinig verandering in bodemhoogte, al werd hier wel veel sediment weggebaggerd voor het vaargeulonderhoud. Dit verklaart uiteraard de geringe morfologische verandering op deze locatie.

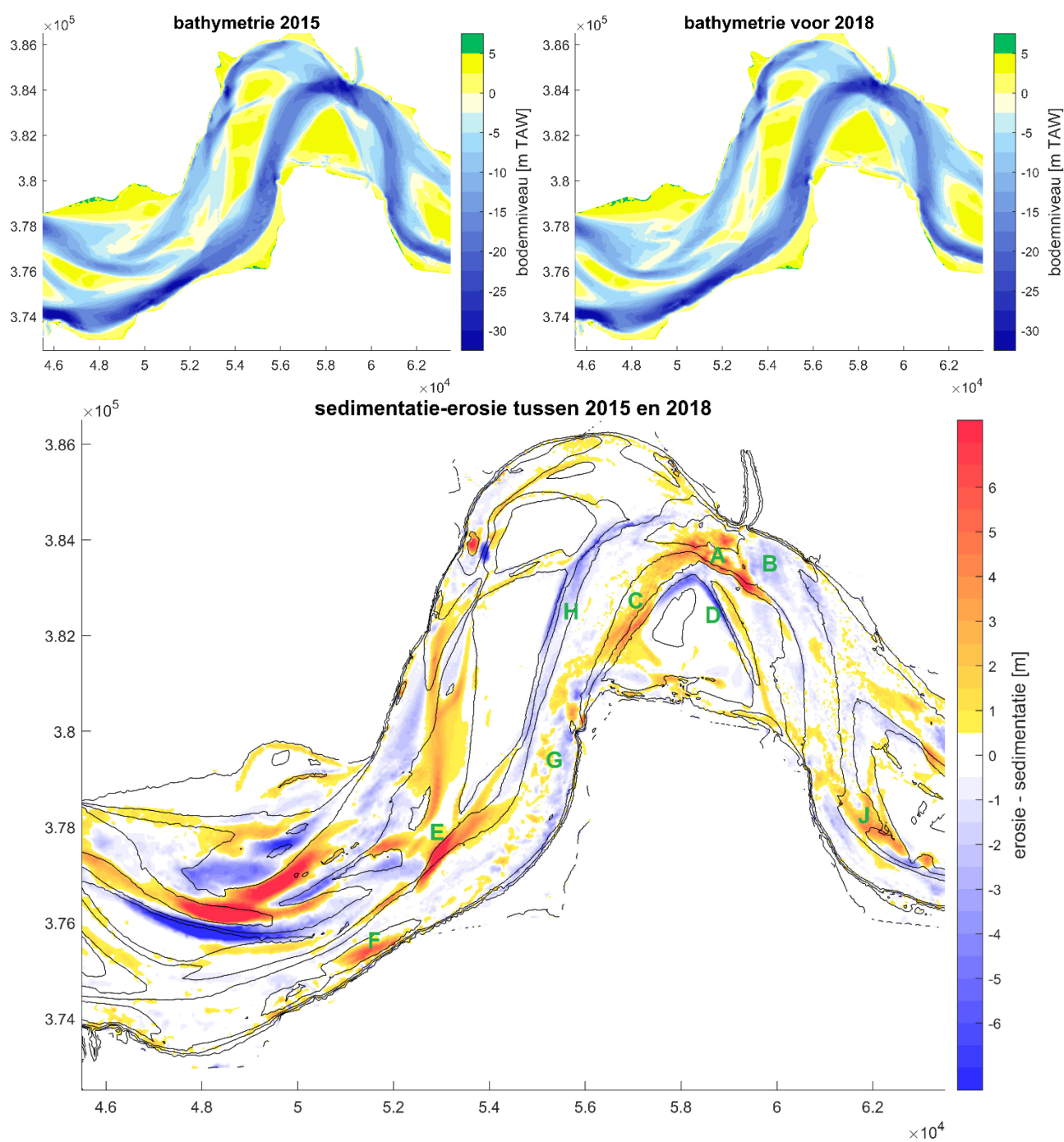
Verder westelijk was er sprake van sedimentatie langs de afwaartse kant van de Rug van Baarland (i.e., E in Figuur 7), zowel aan de zijde van het Middelgat als aan de zijde van het Gat van Ossenis.

In de omgeving van de stortzone Inloop van Ossenis is eveneens sprake van een lokale sterke sedimentatiezone die gerelateerd kan worden aan sedimentstortingen in dit gebied (i.e., F in Figuur 7).

De morfologische veranderingen in het Gat van Ossenis en stortvak SH41 zijn relatief beperkt ten opzichte van de grote hoeveelheden sediment die hier zijn gestort (i.e., IMDC, 2015; Plancke et al., 2016), zie ook Figuur 8. Er is sprake van een verdieping langs de buitenbocht en lichte sedimentatie centraal in de geul (i.e., G in Figuur 7). Ook verder opwaarts is er sprake van afkalving van de geulwand tegen de Rug van Baarland in de buitenbocht van de Overloop van Hansweert (i.e., H in Figuur 7).

Opwaarts van de Drempel van Hansweert is nog een vrij sterke sedimentatiezone waarneembaar aan de zuidrand van de Plaat van Walsoorden (i.e., J in Figuur 7).

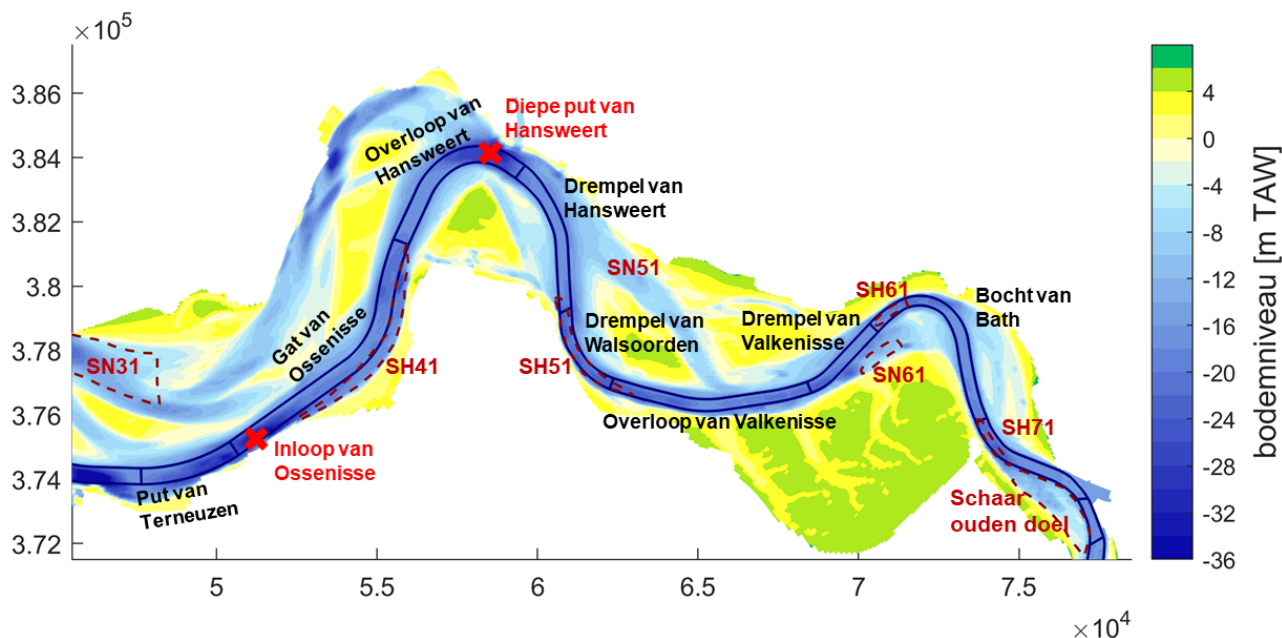
Figuur 7 – Geobserveerde morfologische ontwikkeling tussen 2015 en 2018.



3.2 Geobserveerde stabiliteit stortingen proefstortzones

De locaties van proefstortzones Diepe put van Hansweert en Inloop van Ossenis, alsmede de overige stortzones en vaargeulsecties, zijn aangeduid in Figuur 8.

Figuur 8 – Locaties vaargeulsecties en stortpolygoon.



Diepe put van Hansweert

In de proefstortzone bij de Diepe put van Hansweert werd in maart en april 2016 een stortproef van ong. 1.0 Mm^3 uitgevoerd. Deze stortproef werd herhaald in juli en augustus 2017 toen eveneens 1.0 Mm^3 baggerspecie gestort in deze stortzone. Tot slot vond begin 2018 een plaatvloeiing plaats waardoor het sedimentvolume in de Diepe put van Hansweert met ongeveer 0.8 Mm^3 toenam tussen december 2017 en januari 2018. Een overzicht van het cumulatieve stortvolume en de geobserveerde sedimentvolumes binnen de stortpolygoon is weergegeven in Figuur 9.

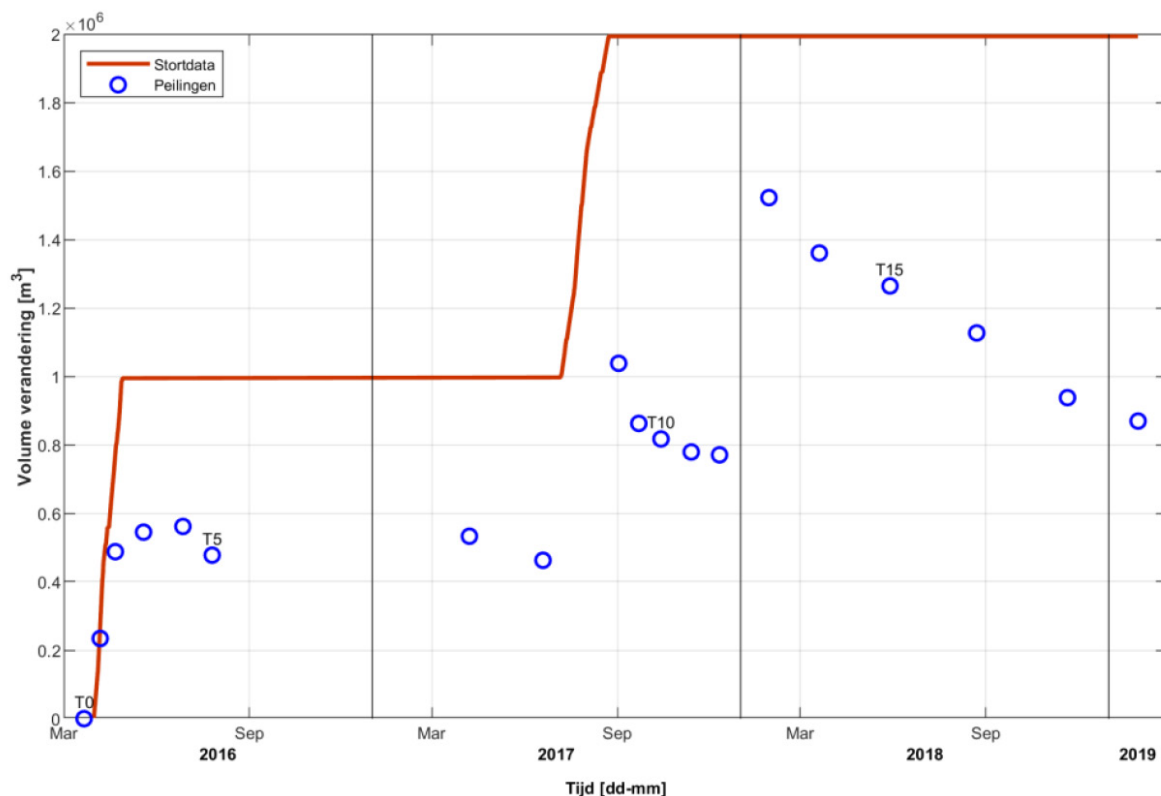
Kort na de periode van de eerste proefstorting van ca 1.0 Mm^3 in mei 2016 was nog slechts 56% van het gestorte volume aanwezig binnen de stortpolygoon. Het is onduidelijk of dit volume al tijdens het storten verloren is gegaan of het gevolg is van morfologische trends. Na één jaar was de stortstabiliteit van de eerste proefstorting nagenoeg onveranderd, aangezien er nog 46% van het gestorte volume binnen het polygoon aanwezig was (IMDC et al., 2019). De stabiliteit van het gestorte volume lag dus hoog na het initiële volumeverlies in de eerste maand na de storting. Meer specifiek was van het volume van 0.54 Mm^3 dat kort na de proefstorting in mei 2016 binnen de polygoon werd aangetroffen nog 0.46 Mm^3 aanwezig in juni 2017 (i.e., omgerekend 86% stabiliteit na één jaar). De stabiliteit van sediment dat niet direct na de storting uit het polygoon verdwijnt lag dus significant hoger.

Ook kort na de tweede proefstorting in de zomer van 2017 was een groot deel van het stortvolume niet meer aanwezig binnen de stortpolygoon. Tussen juni 2017 en september 2017 werd ca 1.0 Mm^3 sediment gestort in de Diepe put van Hansweert, maar het sedimentvolume binnen de stortpolygoon nam slechts met 0.42 Mm^3 toe. Er werd dus 58% van het stortvolume verloren voor de eerste peiling drie maanden na de tweede proefstorting plaatsvond en de stortstabiliteit was bij die peiling nog slechts 42%. In de daaropvolgende periode nam de het overgebleven sedimentvolume verder af naar 31% van het totaal in eind 2017 (i.e., een half jaar na de tweede proefstorting). De stabiliteit van het gestort volume was dus wederom hoger na de eerste drie maanden. Concreet nam het sedimentvolume binnen de stortpolygoon na de tweede proefstorting af van 1.04 Mm^3 tot 0.77 Mm^3 af over een periode van 5 maanden (i.e., omgerekend 38%

stabiliteit per jaar). Hierbij wordt opgemerkt dat de volumeverandering zich ongeveer één kwartaal na de tweede storting lijkt te stabiliseren. De stabiliteit na één jaar zou dus hoger kunnen liggen. Er zijn echter geen bodemopmetingen die deze hypothese direct onderbouwen omdat er begin 2018 een grote volumetoename was door een plaatval aan de zuidkant van de drempel binnen de stortpolygoon (i.e., nabij A in Figuur 7).

Na deze plaatval begin 2018 is de stabiliteit op lange termijn beduidend lager. Het sedimentvolume in de stortpolygoon nam na voornoemde plaatval met 57% af tussen januari 2018 en januari 2019. De 'stortstabiliteit' na één jaar was dus slechts 43%. Het verschil in stabiliteit met de sedimentstortingen kan uiteraard te maken hebben met de locatie binnen de stortpolygoon waar het sediment terecht is gekomen. Na de plaatval blijft het sedimentvolume binnen de stortpolygoon lineair afnemen gedurende het eerste jaar.

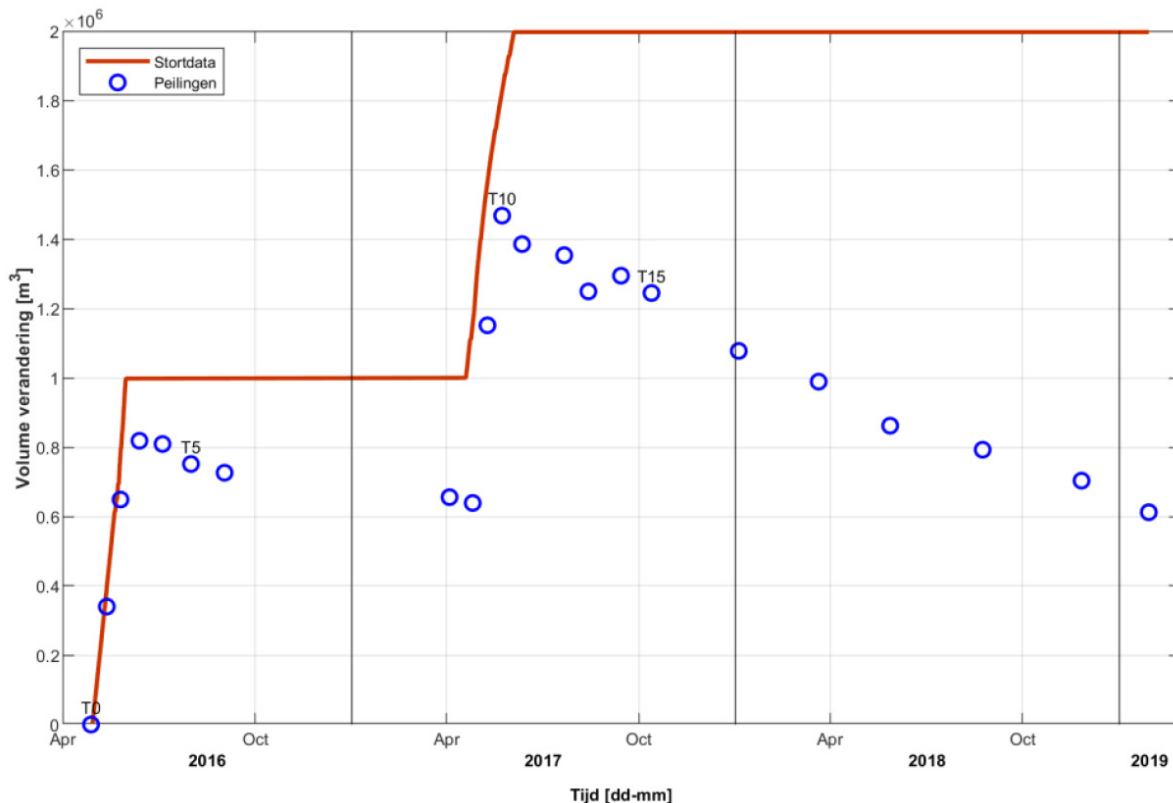
Figuur 9 – Tijdsverloop van het cumulatief volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de complete stortzone Diepe put van Hansweert (IMDC et al., 2019).



Inloop van Ossensisse

Ook bij proefstortlocatie Inloop van Ossensisse zijn tot nu toe twee proefstortingen van 1.0 Mm^3 uitgevoerd (IMDC et al., 2019). De eerste campagne werd uitgevoerd in april en mei 2016 en de tweede stortcampagne was van april tot juni 2017. De afname van het sedimentvolume binnen de stortpolygoon is voor de Inloop van Ossensisse meer geleidelijk. Voor beide stortingen geldt dat bij de eerste meting na de storting niet het volledige volume aan gestort sediment werd geobserveerd. Het initieel volumeverlies voor de eerste peiling na de storting bedroeg in beide gevallen 15-20% van de gestorte 1.0 Mm^3 . In de periode na de eerste storting nam het sedimentvolume binnen de stortpolygoon van 0.82 Mm^3 tot 0.66 Mm^3 af over een periode van 11 maanden (i.e., omgerekend 79% stortstabiliteit na één jaar). Na de tweede proefstorting nam het sedimentvolume binnen de stortpolygoon van 1.39 Mm^3 tot 0.61 Mm^3 af over een periode van 19 maanden (i.e., omgerekend 65% stortstabiliteit na één jaar). Bij de laatste peiling in januari 2019 werd nog slechts 0.61 Mm^3 of 31% van de gestorte 2.0 Mm^3 aangetroffen binnen de stortpolygoon. Een overzicht van het cumulatieve stortvolume en de geobserveerde sedimentvolumes binnen de stortpolygoon is weergegeven in Figuur 10.

Figuur 10 – Tijdsverloop van het cumulatief volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de complete stortzone Inloop van Ossensisse (IMDC et al., 2019).



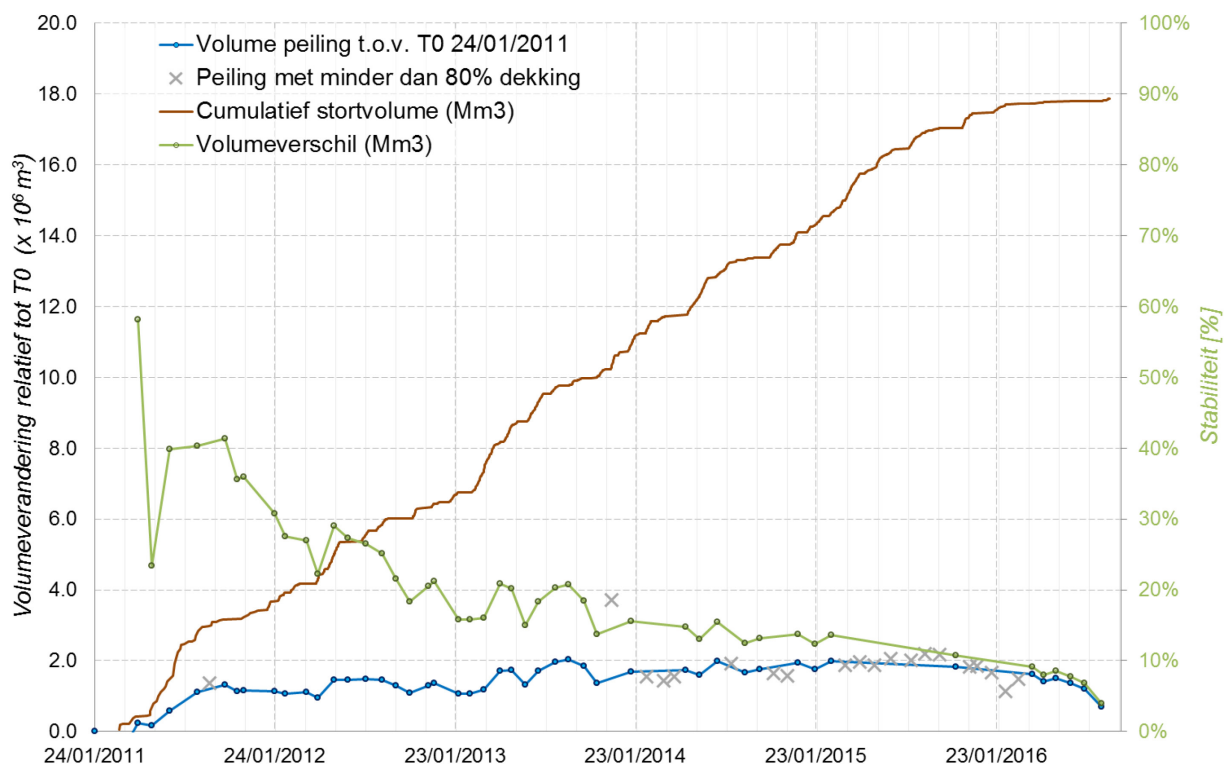
SH41

De stortstabiliteit van stortzone SH41 werd binnen de AvdT-studie *“Stroming en sedimenttransport op de mesoschaal in het Schelde-estuarium”* geanalyseerd door Plancke et al. (2016). Figuur 11 laat het cumulatief stortvolume en de geobserveerde volumeveranderingen binnen het stortgebied SH51 voor de periode 2011 tot 2016 zien. Gedurende deze periode werd er verspreidt over verschillende periodes in totaal bijna 18.0 Mm^3 gestort in stortzone SH41. In het laatste jaar van de analyse door Plancke et al. (2016), ca. vijf jaar na aanvang van de stortingen, bedroeg de stabiliteit nog ongeveer 5% van het volledige stortvolume over die periode. Zelfs in het laatste jaar waarin nauwelijks sediment werd gestort binnen de stortpolygoon daalde de stabiliteit nog van 10% naar 5%. Stortzone SH41 kent dus een zeer lage stabiliteit van het gestort materiaal en het gebied blijft dus uitruimen.

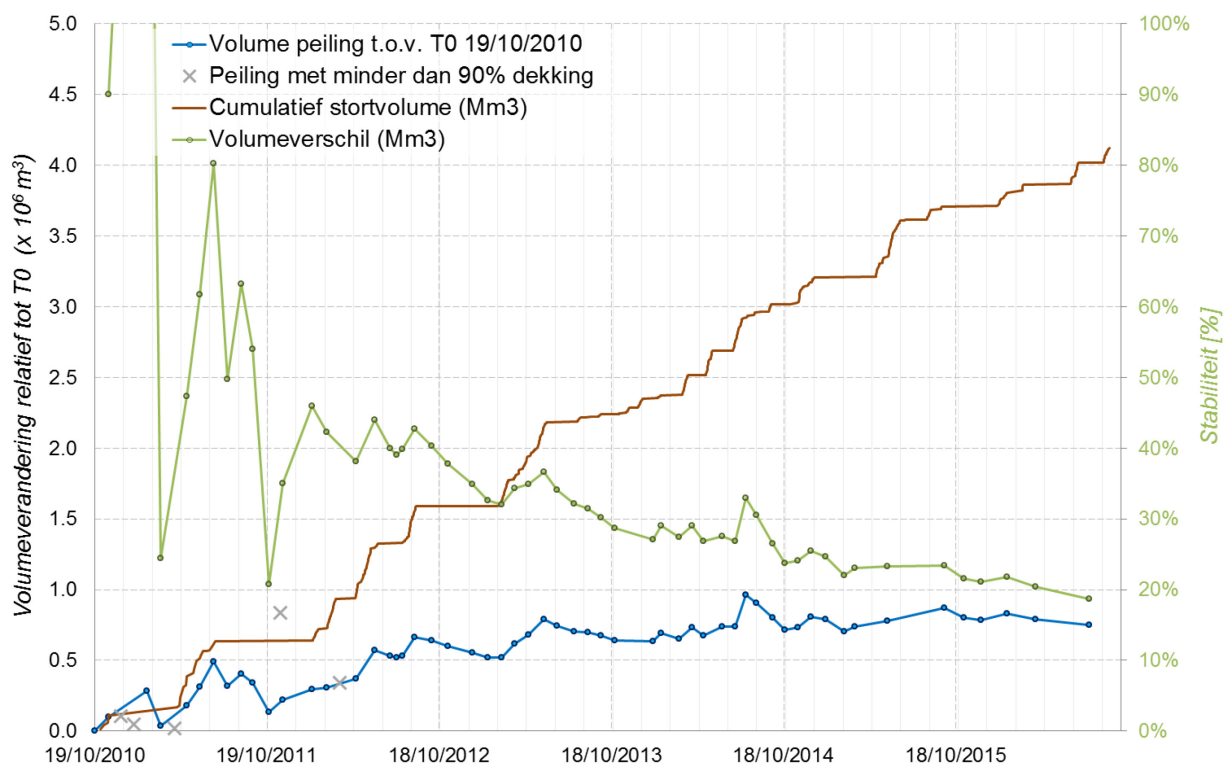
SH51

De stortstabiliteit van stortzone SH51 werd ook geanalyseerd door Plancke et al. (2016). Figuur 12 weergeeft het cumulatief stortvolume en de geobserveerde volumeveranderingen binnen het stortgebied SH51 over de periode 2010-2016. Gedurende deze periode werd er verspreidt over verschillende periodes in totaal iets meer dan 4.0 Mm^3 gestort in stortzone SH51. Eén jaar na aanvang van de stortingen in 2010 bedroeg de stabiliteit voor SH51 nog ruim 40%. In 2016, of ca. 5 jaar na aanvang van de stortingen, bedroeg de stabiliteit echter nog amper 20%. Stortzone SH51 kent dus eveneens een lage stabiliteit van het gestort materiaal. In 2015 is het volume in de stortzone nagenoeg stabiel ondanks de stortingen. De stabiliteit van de stortingen in 2015 is dus nagenoeg 0%.

Figuur 11 – Overzicht van gestorte hoeveelheden, gepeilde volumes en stabiliteit gestorte specie in stortzone SH41 (Plancke et al., 2016).



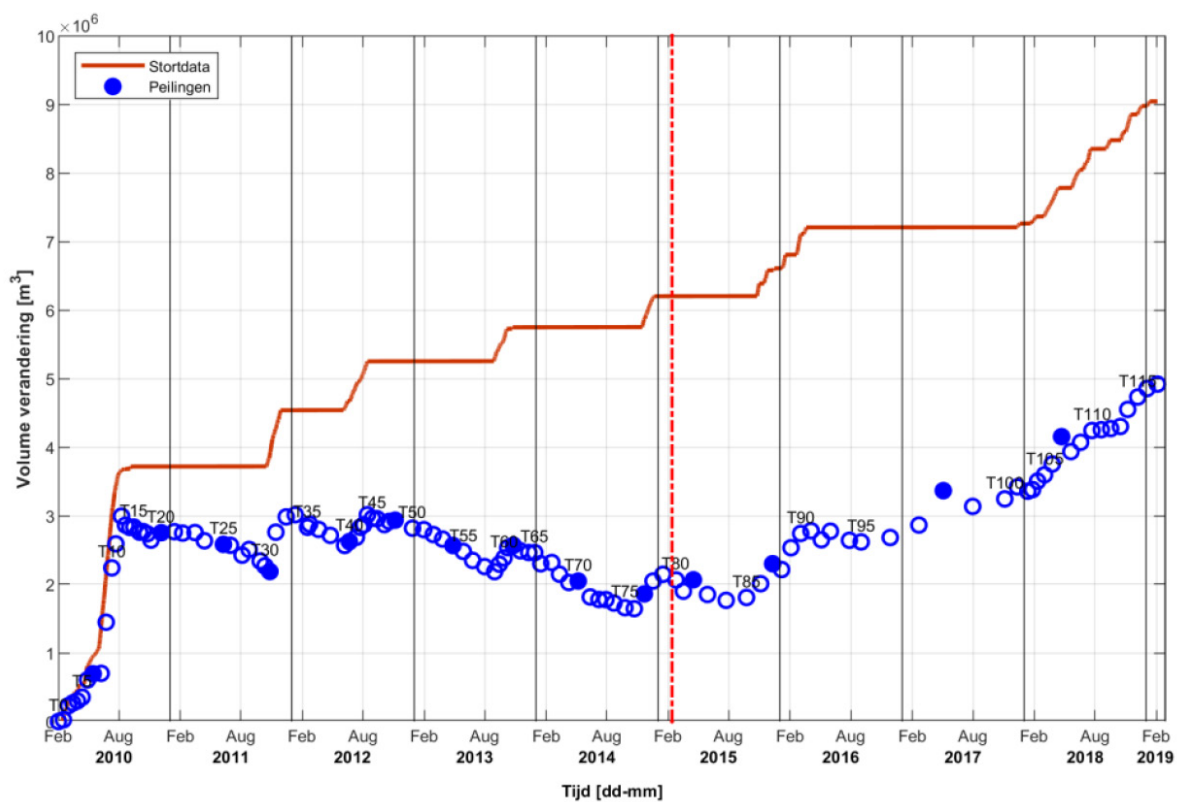
Figuur 12 – Overzicht van gestorte hoeveelheden, gepeilde volumes en stabiliteit gestorte specie in stortzone SH51 (Plancke et al., 2016).



Plaat van Walsoorden

Figuur 13 toont de gecumuleerde stortvolumes en geobserveerde veranderingen in sedimentvolumes voor de stortpolygoon Plaat van Walsoorden van 2010 tot februari 2019. In de stortzone Plaat van Walsoorden werd in 2016 en 2017 nauwelijks sediment gestort, terwijl het sedimentvolume binnen de stortpolygoon met ongeveer $+0.9 \text{ Mm}^3$ toenam. Er was in deze periode dus sprake van natuurlijk sedimentatie. Tussen februari 2018 en februari 2019 werden wel stortingen uitgevoerd binnen de stortpolygoon Plaat van Walsoorden. In totaal bedroeg het stortvolume toen 1.75 Mm^3 . Het sedimentvolume binnen de stortpolygoon nam over dezelfde periode met $+1.54 \text{ Mm}^3$ toe, wat inhoudt dat de stortstabiliteit 88% was voor de stortingen in de periode tussen februari 2018 en februari 2019. Dit percentage is echter niet gecorrigeerd voor de natuurlijke sedimentatietrend die in de voorafgaande periode werd waargenomen.

Figuur 13 – Tijdsverloop van het cumulatief volume gestort materiaal en het cumulatieve verschilvolume uit de peilingen voor de stortzone Plaat van Walsoorden (IMDC et al., 2019).



4 Gevoeligheidsanalyse modellering stortingen

Om de autonome morfologische ontwikkeling (i.e., zonder bagger- en stortactiviteiten) in beeld te brengen wordt een referentierun van één (morfologisch) jaar uitgevoerd met de modelinstellingen zoals bediscussieerd in Hoofdstuk 2. Vervolgens wordt onderzocht hoe gevoelig het gedrag van gestort sediment is voor het al dan niet implementeren van de autonome morfologische ontwikkeling. Er wordt dus nagegaan wat het effect is van het implementeren van een initiële sedimentlaag op de gemodelleerde morfologische impact van stortingen in diepe delen. Hiervoor worden simulaties uitgevoerd zonder initiële sedimentlaag (i.e., harde bodem met daarop enkel het sediment van de storting zelf) en simulaties waarin de autonome morfologische ontwikkeling wordt gesimuleerd en stortingen tijdens de morfologische ontwikkeling worden toegevoegd. Deze stortingen worden geïmplementeerd in de diepe proefstortzones Diepe put van Hansweert en Inloop van Ossensisse en de bestaande stortgebieden SH41, SH51 en Plaat van Walsoorden. Aanvullend worden enkel voor de stortingen in de Diepe put van Hansweert tweejarige simulaties uitgevoerd waarbij de storting pas na één jaar morfologische inspeeltijd worden uitgevoerd. Op deze manier kan de eventuele invloed van de initiële morfologische respons van het model geminimaliseerd worden (Roelvink, 2011). Door de resultaten van deze simulaties onderling te vergelijken kan de gevoeligheid van de modelresultaten voor het implementeren van de autonome morfologische ontwikkeling worden geanalyseerd. Tot slot wordt ook het effect van de sedimentdiameter van het gestorte sediment onderzocht.

4.1 Basissimulatie morfologische ontwikkeling

Figuur 14 toont de geobserveerde morfologische verandering die eerder in Figuur 7 werd getoond, alsmede de modelresultaten van één jaar morfologische verandering gesimuleerd met het Delft3D-NeVla model zonder bagger- of stortwerkzaamheden (i.e., NEVLA_RUN22).

Er zijn enkele duidelijke morfologische trends herkenbaar in de modelresultaten. In de Diepe put van Hansweert (i.e., A in Figuur 14 - onder) is sprake van een erosiezone die net opwaarts van de stortpolygoon het sterkst is (i.e., tot ong. 5 m toename in diepte). Dat de dieptetoename binnen de stortpolygoon beperkter is kan het gevolg zijn van de implementatie van de niet-erodeerbare laag.

Langs de noord- en ooststrand van de Platen van Ossensisse is juist een sedimentatieband aanwezig (i.e., C in Figuur 14 - onder). Deze sedimentatieband valt gedeeltelijk binnen de stortpolygoon en beïnvloedt de netto volumeverandering binnen het stortgebied dus sterk. Na één morfologisch jaar bedraagt de volumeverandering binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert slechts $+0.06 \text{ Mm}^3$. Langs de westrand van de Platen van Ossensisse wordt eveneens een duidelijke sedimentatieband wordt gemodelleerd (i.e., B in Figuur 14 - onder), geflankeerd door een erosiezone in het overig deel van de Overloop van Hansweert.

Ook op de ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse wordt door het Delft3D model lichte sedimentatie voorspeld, terwijl de uitschuring tussen deze ondiepte en de Platen van Ossensisse verder uitdiept (i.e., D in Figuur 14 - onder).

Ten oosten van dit gebied is aan de afwaartse kant van de Schaar van Waarde en Platen van Walsoorden sprake van sedimentatie in de morfologische referentierun (i.e., resp. G en F in Figuur 14 - onder). Binnen de stortpolygoon langs de Plaat van Walsoorden is het sedimentatievolume $+1.9 \text{ Mm}^3$. In het Zuidergat en binnen stortzone SH51 wordt een voornamelijk erosieve trend gemodelleerd. Na de éénjarige morfologische simulatie bedraagt de volumeverandering binnen stortzone SH51 -1.0 Mm^3 .

Ter hoogte van stortzone SH41 geeft het morfologisch model sedimentatie in de geul aan (i.e., H in Figuur 14 - onder), terwijl er ten westen van de Schaar van Ossensisse (i.e., het noordelijk deel van het stortvak SH41) lokaal juist sprake is van sterke erosie. Opgemerkt wordt dat de kribben ter hoogte van de Nol van Ossensisse niet als harde constructies in het model zijn geïmplementeerd zodat de sterke initiële

sedimentatie- en erosiepieken in het noordelijk deel van het stortvak een artefact van de modelschematisering kunnen zijn. De netto volumeverandering binnen stortzone SH41 na de éénjarige morfologische run bedraagt -1.5 Mm^3 . Voor de proefstortzone Inloop van Ossenisie bedraagt de volumeverandering binnen de stortpolygoon na één jaar -0.2 Mm^3 .

Vergelijking met geobserveerde morfologische veranderingen

In vergelijking met de geobserveerde morfologische veranderingen in het studiegebied (Figuur 7 en Figuur 14 - boven) tussen 2015 en 2018 blijkt het sedimentatie-erosiepatroon dat met Delft3D-NeVla werd gemodelleerd (Figuur 14 - onder) op een aantal punten overeen te komen. Zo worden de geobserveerde lokale sedimentatiezone nabij de voorhaven in de Diepe put van Hansweert en de lokale erosiezone direct opwaarts van deze put ook weergegeven in het Delft3D model (i.e., A in Figuur 14). Wel is de sedimentatiezone in deze referentiesimulatie minder uitgebreid, wat verklaard kan worden door het ontbreken van de proefstortingen en plaatvallen in de modelsimulatie.

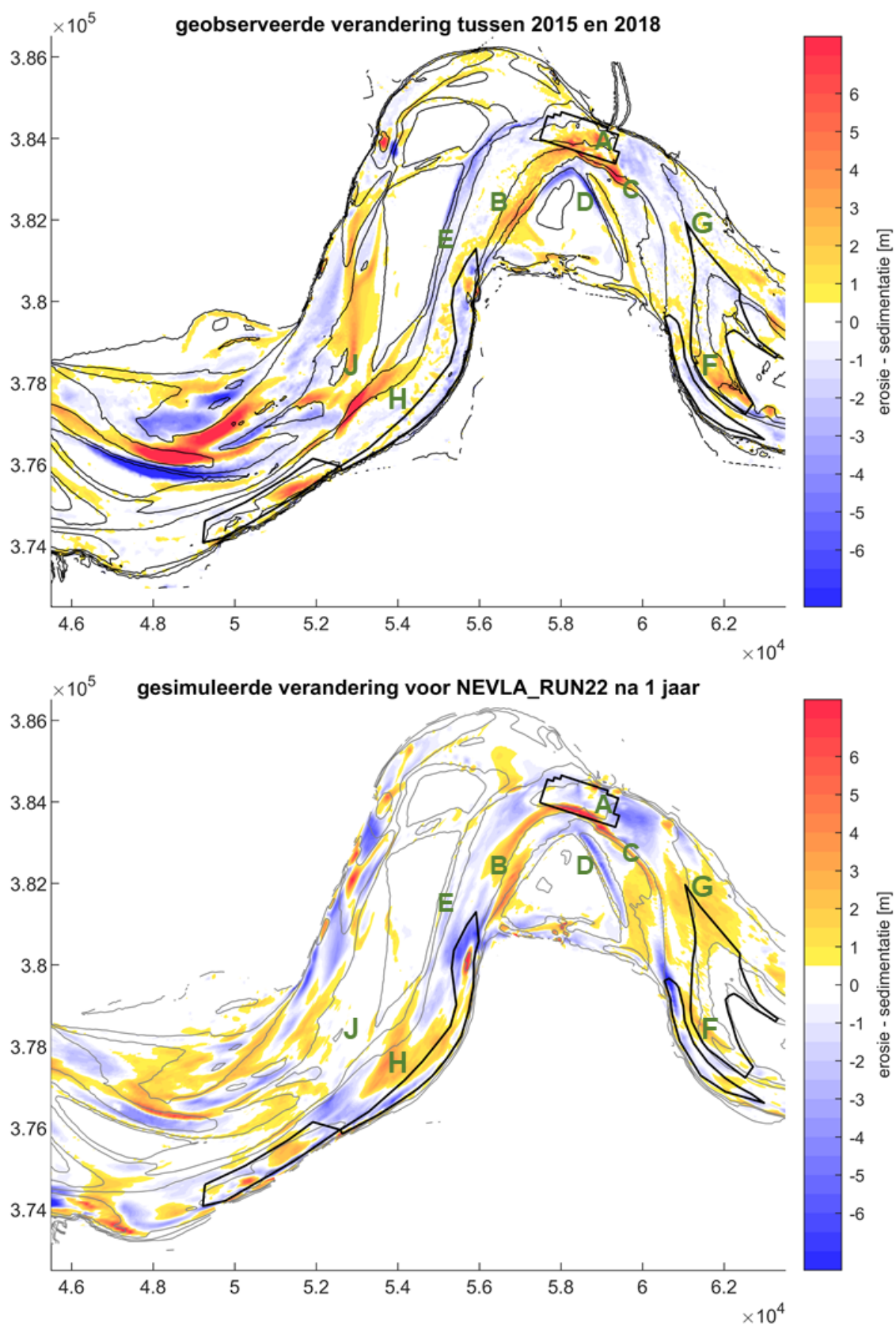
Ook worden de sedimentatiezones langs de randen van de Platen van Ossenisie (i.e., B en C in Figuur 14) en de sedimentatie op de Drempel van Hansweert (i.e., niet goed waarneembaar in de geobserveerde verschilkaart omdat de vaargeuldiepte hier in werkelijkheid onderhouden wordt) gereproduceerd. Hetzelfde geldt voor de uitschuring langs de ooststrand van de Platen van Ossenisie (i.e., D in Figuur 14).

Andere morfologische ontwikkelingen die overeen komen zijn de erosie van de geulwand aan de oostzijde van de Rug van Baarland langs de buitenbocht van de Overloop van Hansweert (i.e., E in Figuur 14) en de sedimentatiezone aan de zuidkant van de Plaat van Walsoorden (i.e., F in Figuur 14).

Er zijn echter ook duidelijke verschillen tussen de geobserveerde morfologische trends en de modelresultaten. In vergelijking met de geobserveerde veranderingen (Figuur 7) valt vooral op dat de gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen sterker zijn. Er zijn ook kwalitatieve verschillen, die met name in de geulen waarneembaar zijn. De gemodelleerde uitdieping van de Diepe put van Hansweert wordt bijvoorbeeld niet waargenomen in de verschilplot van de observaties (i.e., A in Figuur 14). Het ontbreken van stortingen in de referentiesimulatie vormt hiervoor een logische verklaring. Ook zijn de gemodelleerde sterke morfologische veranderingen in de vaargeul niet (in die mate) in de tussen 2015 en 2018 waargenomen. De gemodelleerde sedimentatiezone nabij de Schaar van Waarde komt niet in de observaties voor (i.e., G in Figuur 14). Hetzelfde geldt voor de sedimentatiezone in het Gat van Ossenisie (i.e., H in Figuur 14). De geobserveerde sedimentatie langs de afwaartse randen van de Rug van Baarland ontbreekt juist in de modelsimulatie (i.e., J in Figuur 14).

Dergelijke afwijkingen kunnen deels liggen aan het vaargeulonderhoud en de sedimentstortingen die niet in het model werden geïmplementeerd. Resultaten van lange termijn morfologische simulaties in Deelrapport 7 (Stark et al., 2020b) lieten al zien dat het implementeren van deze activiteiten essentieel is voor het correct reproduceren van de morfologische ontwikkeling van de geulen en drempels. Daarnaast is het een gekend fenomeen dat morfologische simulaties in Delft3D geuldieptes van hoofdgeulen vaak overschatten.

Figuur 14 – Geobserveerde en gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D referentiesimulatie.



4.2 Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in proefstortzone Diepe put van Hansweert

De geschematiseerde stortingen in deze paragraaf worden uitgevoerd in de stortpolygoon Diepe put van Hansweert en bedragen 3.0 Mm^3 . Dit stortvolume komt niet overeen met de sedimentvolumes die tijdens de verschillende proefstortingen in de Diepe put van Hansweert werden gestort. De stortingen zijn geschematiseerd als éénmalige storting en worden in de beginfase van de simulatie geïmplementeerd met de *dredging-and-dumping* module in Delft3D en. Er is dus geen continue influx van sediment in de stortpolygoon. Verder zijn de stortingen zo geschematiseerd dat de diepere delen binnen de stortpolygoon het eerst worden opgevuld.

4.2.1 Storting in Diepe put van Hansweert met morfologische ontwikkeling

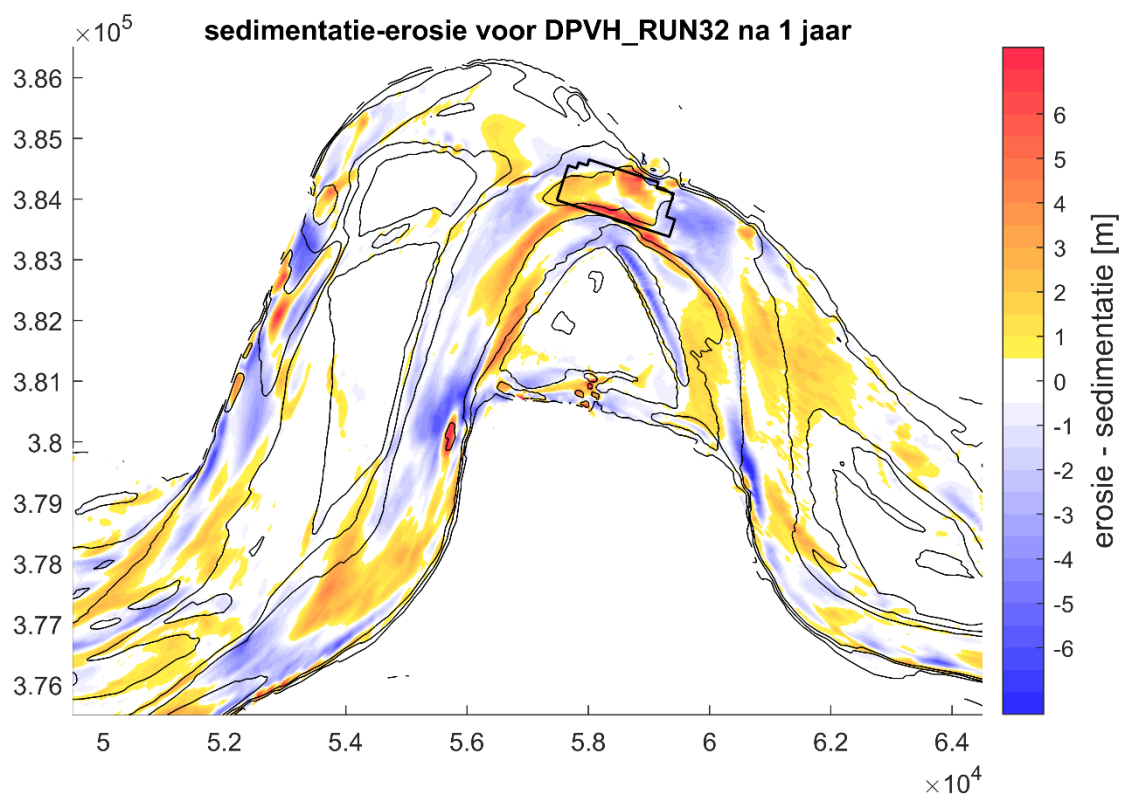
Het effect van een storting in de Diepe put van Hansweert wordt eerst onderzocht door een storting van 3.0 Mm^3 uit te voeren aan het begin van de morfologische run zoals omschreven in §4.1. Figuur 15 toont de gemodelleerde morfologische ontwikkeling en Figuur 16 en Figuur 18 tonen het verschil in bodemligging na één jaar ten opzichte van de referentierun. De gesimuleerde morfologische ontwikkeling met stortingen in de diepe put van Hansweert is gelijkaardig aan de morfologische ontwikkeling zonder storting. Enkel in de Diepe Put van Hansweert zelf is sprake van een groot verschil met de autonome morfologische ontwikkeling in Figuur 14. Na één morfologisch jaar bevindt het grootste deel van het gestorte materiaal zich namelijk nog binnen de stortpolygoon. Afwaarts van de stortzone is in de Overloop van Hansweert wel sprake van een lichte toename in sedimentatie in de simulaties met stortingen. Hetzelfde geldt voor een kleine zone direct opwaarts van het stortgebied. Ook lijkt er als gevolg van de storting van 3.0 Mm^3 een lichte relatieve verdieping ($< 1 \text{ m}$ verschil in bodemligging) plaats te vinden aan de noordrand van de Platen van Ossensisse ten opzichte van de referentierun. Deze relatieve afkalving van de geulwand ten opzichte van de referentierun kan een direct gevolg zijn van de lokale verondieping en bijbehorende veranderingen in stroompatronen door de storting (i.e., tot 8 meter in de diepste delen van de put; zie Figuur 18) als gevolg van veranderende stroompatronen en leidt op zijn beurt weer tot een lichte toename in sedimentatie aan de noordoostrand van de Platen van Ossensisse.

De stortstabiliteit in de Delft3D simulatie met sedimentstorting van 3.0 Mm^3 is na één jaar 65%. De stortstabiliteit werd bepaald met de relatieve volumeverandering ten opzichte van de referentierun. Als de absolute volumeverandering (i.e., zonder de autonome morfologische ontwikkeling van $+0.06 \text{ Mm}^3$ mee te tellen) in rekening zou worden gebracht, dan zou de stortstabiliteit 67% bedragen (Figuur 20).

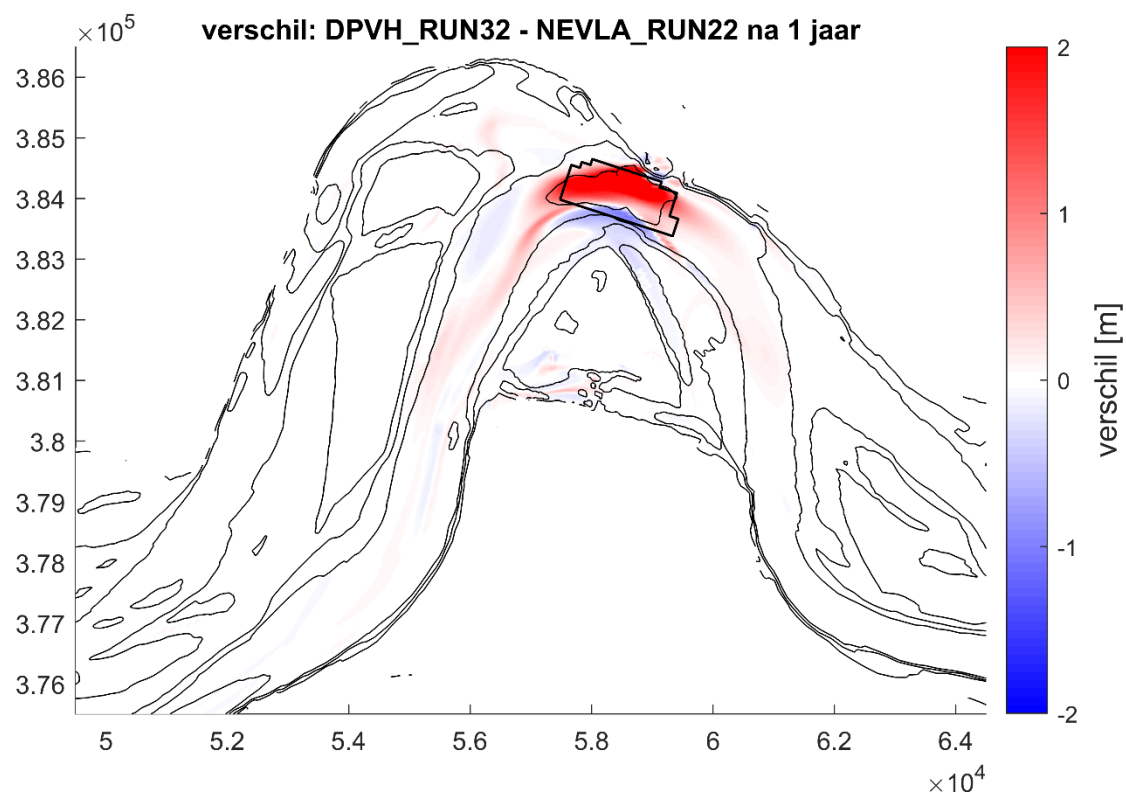
4.2.2 Storting in Diepe put van Hansweert zonder autonome morfologische ontwikkeling

Het effect van een storting in de Diepe put van Hansweert kan ook gemodelleerd worden door een identieke storting van 3.0 Mm^3 uit te voeren in een simulatie zonder autonome morfologische ontwikkeling. Dit wordt geschematiseerd door geen initiële sedimentlaag te implementeren. Het enige aanwezige sediment in het morfologisch model is dan het sediment dat aan het begin van de simulatie geïntroduceerd wordt binnen de stortpolygoon. Figuur 17 toont de verspreiding van het sediment na één jaar en Figuur 19 toont de morfologische ontwikkeling voor een dwarsdoorsnede ter hoogte van de diepe put. Het gestorte sediment verspreidt zich zowel afwaarts als opwaarts van de stortlocatie in de Diepe put van Hansweert. Opwaarts van de stortlocatie ontstaat een sedimentatiezone aan de afwaartse punt van de Plaat van Walsoorden. Afwaarts van de stortlocatie zijn sedimentatiezones zichtbaar aan het noordelijke uiteinde van het Middelgat. Een deel van het sediment is na één morfologisch jaar nog steeds binnen de stortpolygoon aanwezig. Dit achtergebleven sedimentvolume bevindt zich enkel in de buitenbocht. De stortstabiliteit tijdens de simulatie is weergegeven in Figuur 20. Na één morfologisch jaar is nog slechts 24% van het gestorte sediment binnen de stortpolygoon aanwezig. De gemodelleerde stortstabiliteit is dus significant lager als de autonome morfologische ontwikkeling niet wordt geïmplementeerd in de morfologisch run.

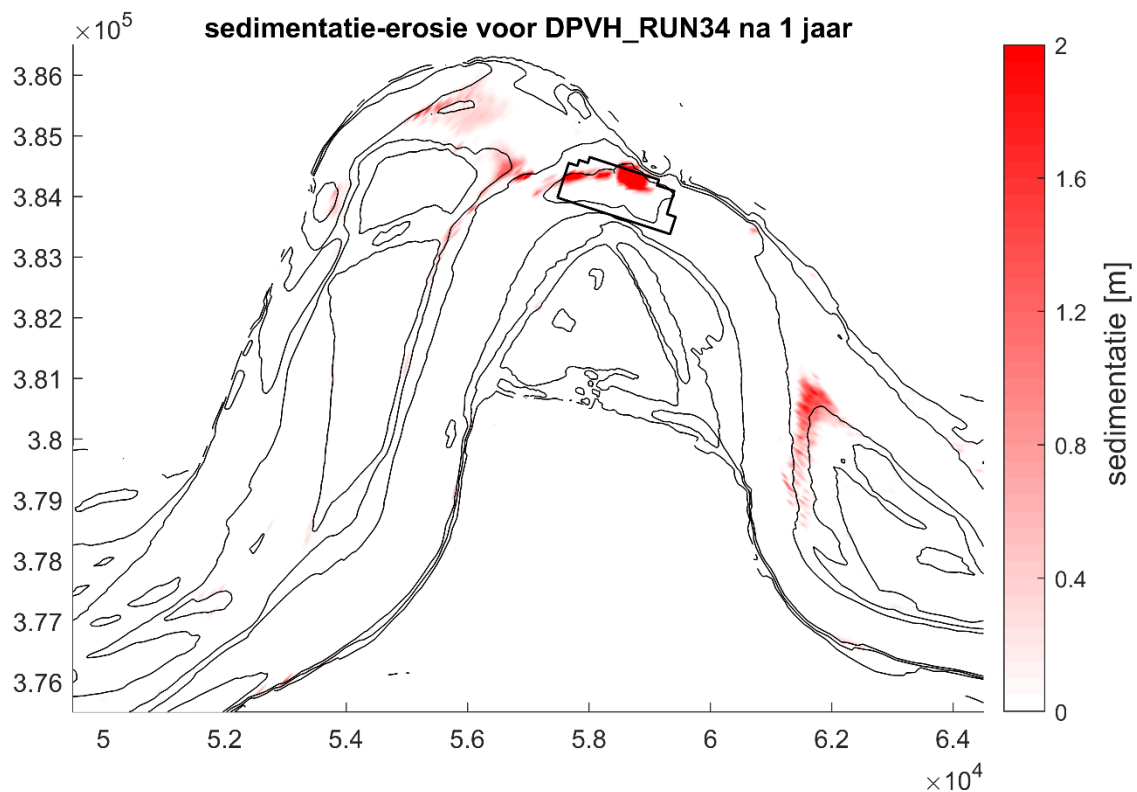
Figuur 15 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties DPVH_RUN32.



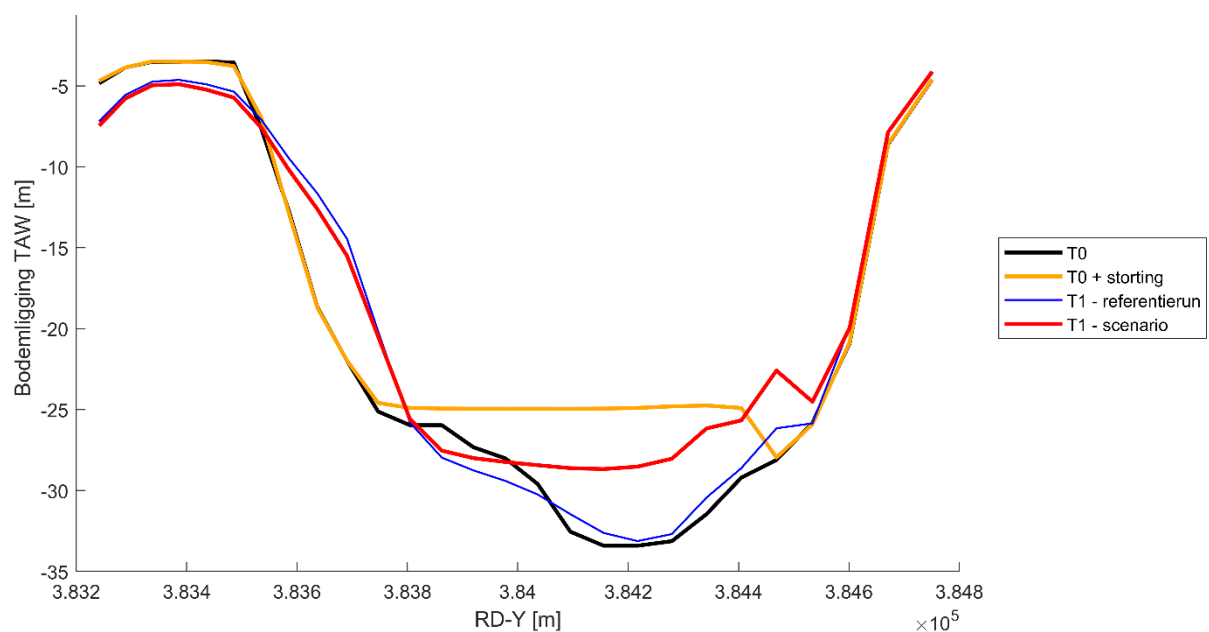
Figuur 16 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties DPVH_RUN32 (storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).

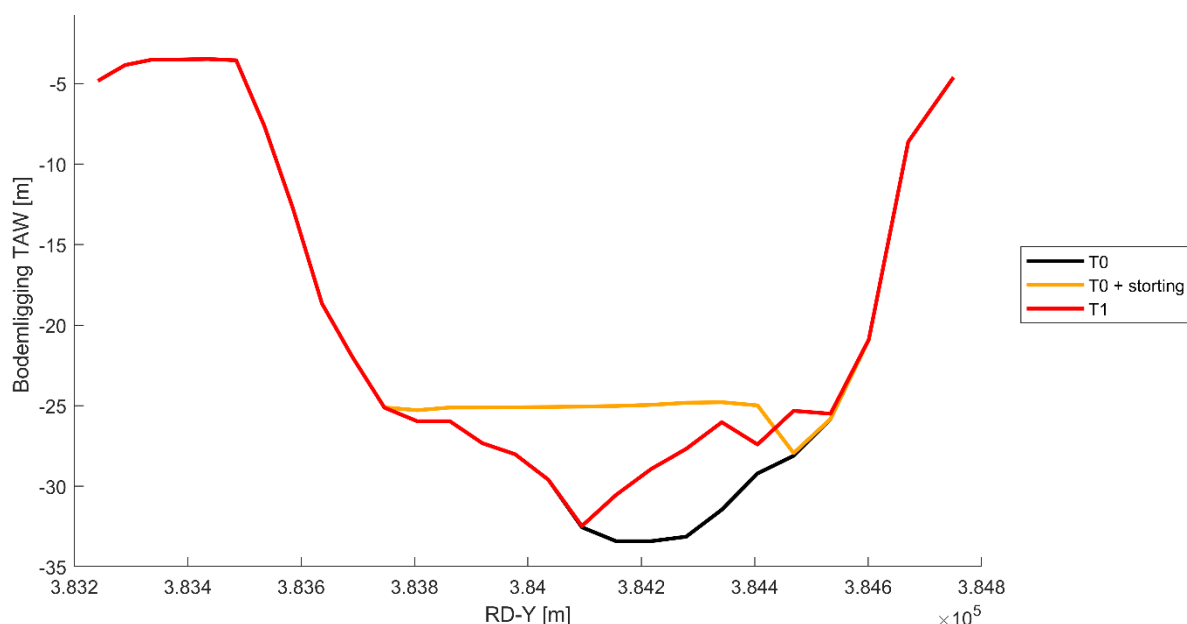


Figuur 17 – Gemodelleerde sedimentverspreiding na één jaar met simulatie DPVH_RUN34 (storting van 3.0 Mm3 in diepe put van Hansweert) zonder autonome morfologische ontwikkeling.

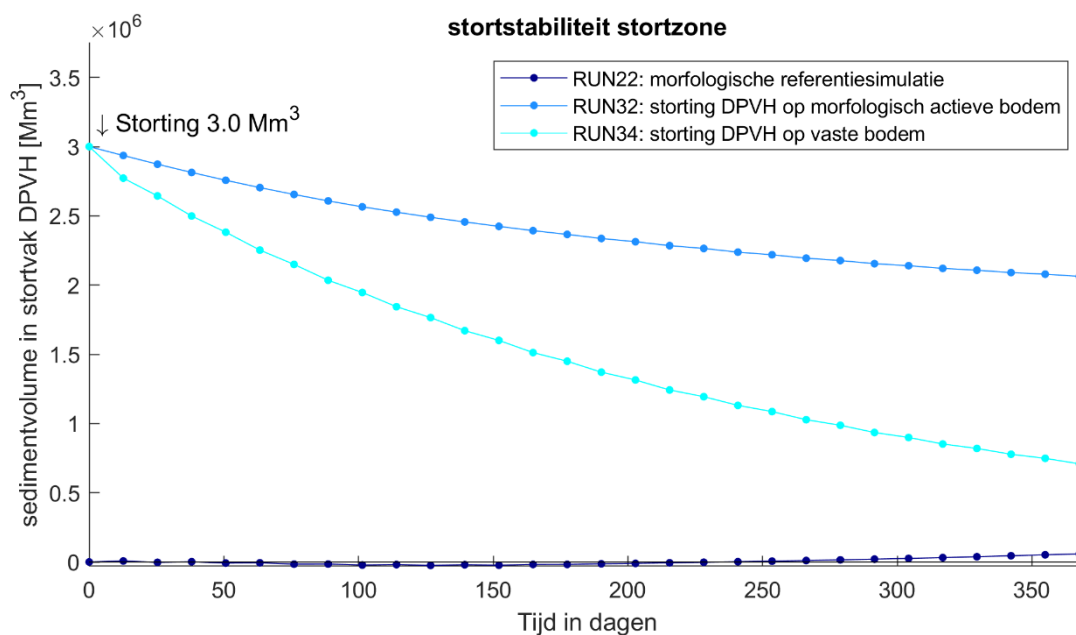


Figuur 18 – Dwarsdoorsnede met gemodelleerde morfologische ontwikkeling bij Diepe put van Hansweert na één jaar met simulaties DPVH_RUN32 (storting van 3.0 Mm3 in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).



Figuur 19 – Dwarsdoorsnede met gemodelleerde morfologische ontwikkeling bij Diepe put van Hansweert na één jaar met simulaties DPVH_RUN34 (storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert) zonder autonome morfologische ontwikkeling.


Figuur 20 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor simulaties DPVH_RUN32 en DPVH_RUN34.



4.2.3 Verspreiding van stortfractie in morfologisch actieve simulatie

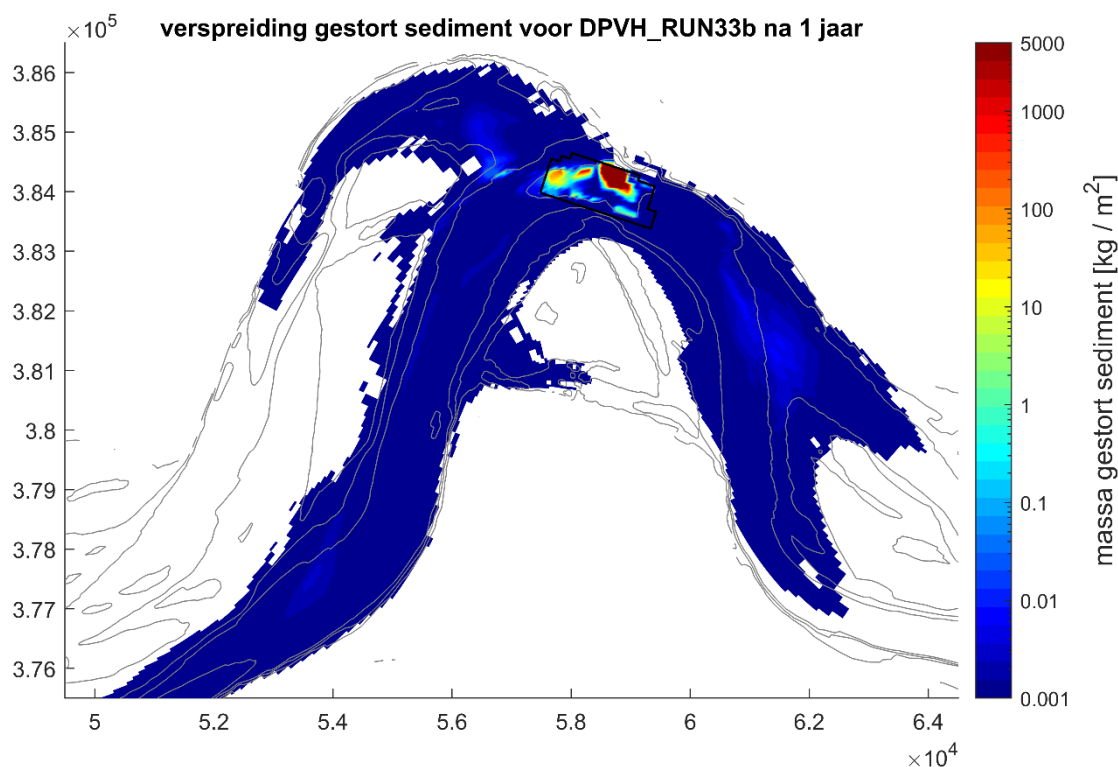
Door gebruik te maken van een aparte sedimentfractie met identieke sedimenteigenschappen voor de schematisering van de sedimentstorting kan de gemodelleerde verspreiding van de gestorte fractie ook in een morfologisch actieve run onderzocht worden. Om deze verspreiding zo goed als mogelijk te modelleren dient de sedimentbodem met verschillende onderlagen geschematiseerd worden in plaats van gebruik te maken van één enkele sedimentlaag (i.e., *'one well mixed layer'*). Door van relatief dunne bovenlagen in de sedimentbodem gebruik te maken kan het reguliere sediment bedekt worden door de stortfractie en kan de stortfractie zich ruimtelijk verspreiden. Als er daarentegen slechts één sedimentlaag gebruikt zou worden,

dan zou de gestorte fractie zich verticaal vermengen onder het reguliere sediment met een onderschatting van de sedimentverspreiding tot gevolg. Als er verschillende bodemlagen worden gebruikt blijft er desalniettemin sprake van geringe verticale vermenging van de sedimentfractie (i.e., afhankelijk van de dikte van de sedimentlagen). De geschematiseerde dikte van de onderlagen in de uitgevoerde simulatie (i.e., run *DPVH33b*) zijn van hoog naar laag: 0.02 m (i.e., transportlaag), 0.04 m, 0.10 m, 0.24 m, 0.60 m, 1.00 m en een basislaag met variabele dikte afhankelijk van de lithologische data (zie: Figuur 6). In eerste instantie bestaan alle sedimentlagen volledig uit de reguliere sedimentfractie. Pas als de sedimentstorting in het model wordt uitgevoerd (door middel van de '*dredging and dumping module*') zullen de bovenste lagen in de stortzone volledig uit de stortfractie bestaan.

Het gebruik van onderlagen in plaats van één enkele sedimentlaag heeft overigens geen effect op het sedimentatie- en erosiepatroon. Het sedimentatie-erosiepatroon is voor een simulatie met onderlagen dus identiek aan het patroon in Figuur 15. Als er gebruik zou worden gemaakt van sedimentfracties met verschillende sedimenteigenschappen (e.g. variabele sedimentdiameter) dan heeft dit wel invloed op de gemodelleerde morfologische ontwikkeling.

Figuur 21 laat de verspreiding van de stortfractie (voor hoeveelheden groter dan 1.0 g/m^2) na één jaar zien voor een morfologisch actieve run met een sedimentstorting van 3.0 Mm^3 in de Diepe put van Hansweert. Het grootste deel van de stortfractie bevindt zich na één jaar nog binnen de stortzone. De verspreiding van de stortfractie is zowel opwaarts richting de Drempel van Hansweert als afwaarts richting de Overloop van Ossensisse en in mindere mate het Middelgat. De stortfractie verspreidt zich nauwelijks naar ondiepe en intertidale gebieden. Bij de Drempel van Hansweert opwaarts van het stortvak en de inloop van het Middelgat ten westen van de stortzone zijn lokaal zones zichtbaar waar iets grotere hoeveelheden gestort sediment ophopen.

Figuur 21 – Gemodelleerde verspreiding stortfractie na één jaar met simulatie *DPVH_RUN33b* (storting van 3.0 Mm^3 in diepe put van Hansweert) met autonome morfologische ontwikkeling.



4.2.4 Stortingen in Diepe put van Hansweert na één jaar autonome morfologische ontwikkeling

Het hierboven verkregen effect van een storting in de Diepe put van Hansweert wordt wellicht beïnvloedt door de initiële morfologische respons van het model (Roelvink, 2011). Daarom worden de simulaties in §4.2.1 en §4.2.2 nog herhaald met een storting van 3.0 Mm³ in de Diepe put van Hansweert na afloop van één jaar autonome morfologische ontwikkeling. Na deze morfologische inspeelperiode zullen eventuele oneffenheden en initiële effecten uit het model zijn verdwenen en is de morfologische impact van de sedimentstorting louter nog het effect van de getijstrooming (i.e., als er geen sedimentlaag wordt geïmplementeerd) en van de interactie met de lange termijn trends in de morfologische ontwikkeling (i.e., als wel een initiële sedimentlaag wordt geïmplementeerd). In het geval van de run met een harde onderlaag wordt de na één jaar verkregen bathymetrie uit de morfologisch actieve simulatie als initiële bathymetrie voor het tweede jaar geïmplementeerd. Beide simulaties starten het tweede jaar dus met eenzelfde bathymetrie.

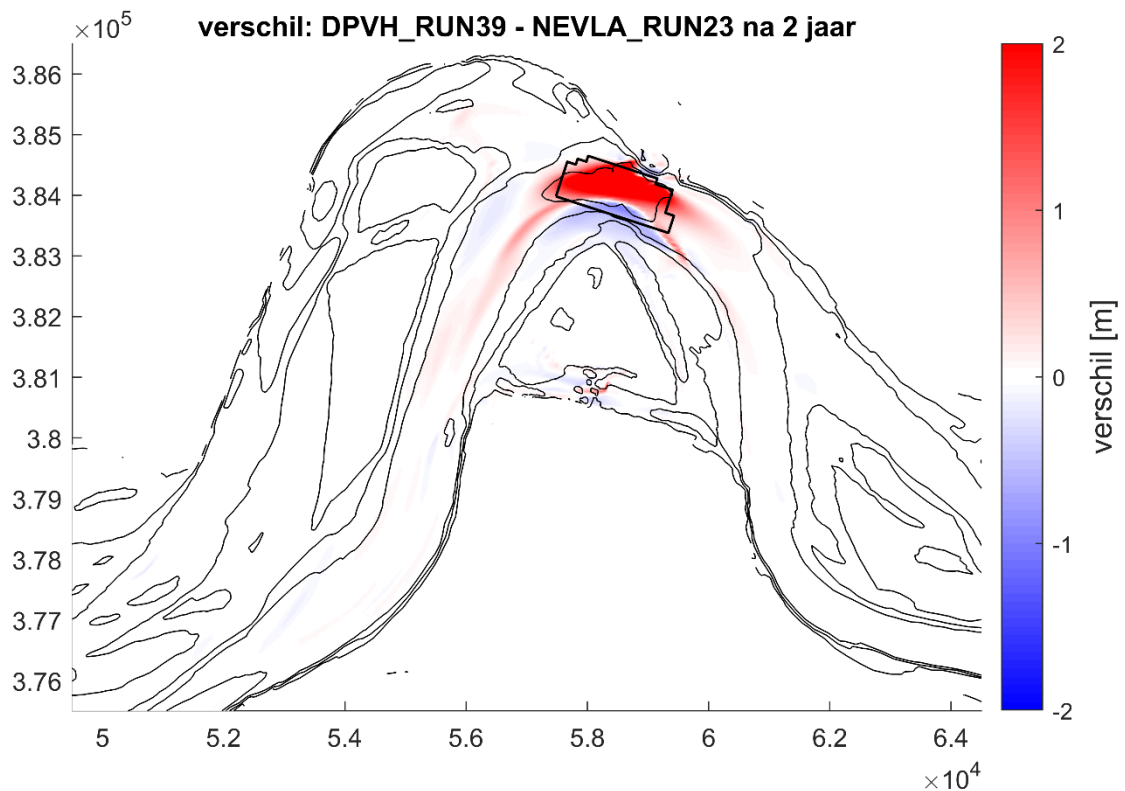
Figuur 22 en Figuur 23 tonen de invloed of verspreiding van de storting na één jaar op het sedimentatie- en erosiepatroon in het gebied rondom de stortlocatie. Figuur 24 toont de stortstabiliteit gedurende één jaar voor een storting die plaatsvindt aan het begin van het tweede morfologische jaar (i.e., met en zonder autonome morfologische ontwikkeling in jaar twee).

De invloed van een storting van 3.0 Mm³ na één jaar morfologische inspeeltijd op het sedimentatie-erosiepatroon (i.e., DPVH_RUN39 in Figuur 22) is gelijkaardig aan die van een storting op basis van de run met 2016 bathymetrie zonder morfologische inspeeltijd (i.e., DPVH_RUN32 in Figuur 16). De stortstabiliteit is echter wel hoger als de storting na één jaar morfologische inspeeltijd wordt uitgevoerd. Bij een storting van 3.0 Mm³ na een jaar morfologische ontwikkeling is de stabiliteit na het tweede jaar 77% (Figuur 24), terwijl de stabiliteit van een storting die op de initiële 2016 bathymetrie wordt uitgevoerd slechts 65% is (Figuur 20). Bovenstaande percentages werden beiden bepaald met de relatieve volumeverandering ten opzichte van de referentierun.

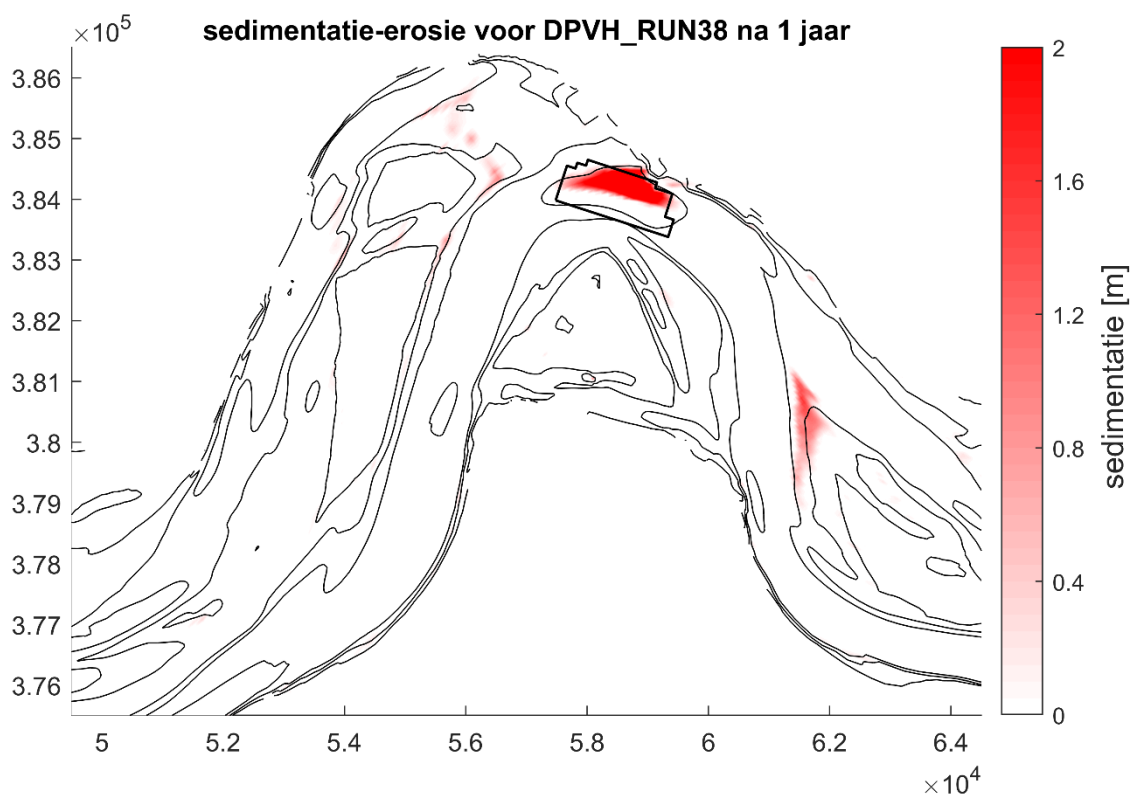
Ook de ruimtelijke verspreiding van het gestort sediment in een simulatie zonder autonome morfologische ontwikkeling met een initiële bathymetrie na één jaar morfologische inspeeltijd (i.e., DPVH_RUN38 in Figuur 23) is gelijkaardig aan die van een storting op basis van de run met 2016 bathymetrie zonder morfologische inspeeltijd (i.e., DPVH_RUN34 in Figuur 17). De sedimentatiezone aan de afwaartse punt van de Plaat van Walsoorden is gelijkaardig. Echter is de verspreiding afwaarts van de stortzone kleiner. Ook blijft een relatief groter deel van de storting aanwezig binnen de stortpolygoon. De stortstabiliteit is echter hoger als de storting wordt uitgevoerd na één jaar morfologische ontwikkeling. Figuur 24 toont een stortstabiliteit van 55% na één jaar voor simulatie DPVH_RUN39 met een initiële bathymetrie na één jaar morfologische inspeeltijd, terwijl de stortstabiliteit op basis van de 2016 bathymetrie slechts 24% na één jaar bedroeg (Figuur 20).

Als de initiële morfologische respons van het model in rekening wordt gebracht voordat de storting in de simulatie wordt geïmplementeerd leidt dit dus tot een hogere stortstabiliteit. De hogere stortstabiliteit kan eveneens verklaard worden aan de hand van de autonome morfologische ontwikkeling die in het eerste jaar gesimuleerd wordt (Figuur 14). Deze bestaat binnen de stortpolygoon voornamelijk uit een kleine verdieping van 0-5 m (i.e., die qua volume wordt gecompenseerd door een sterke sedimentatieband aan de zuidkant van het polygoon). Een storting die na één jaar morfologische inspeeltijd wordt geïmplementeerd vindt dus plaats op een diepere locatie en is daarmee minder erosiegevoelig.

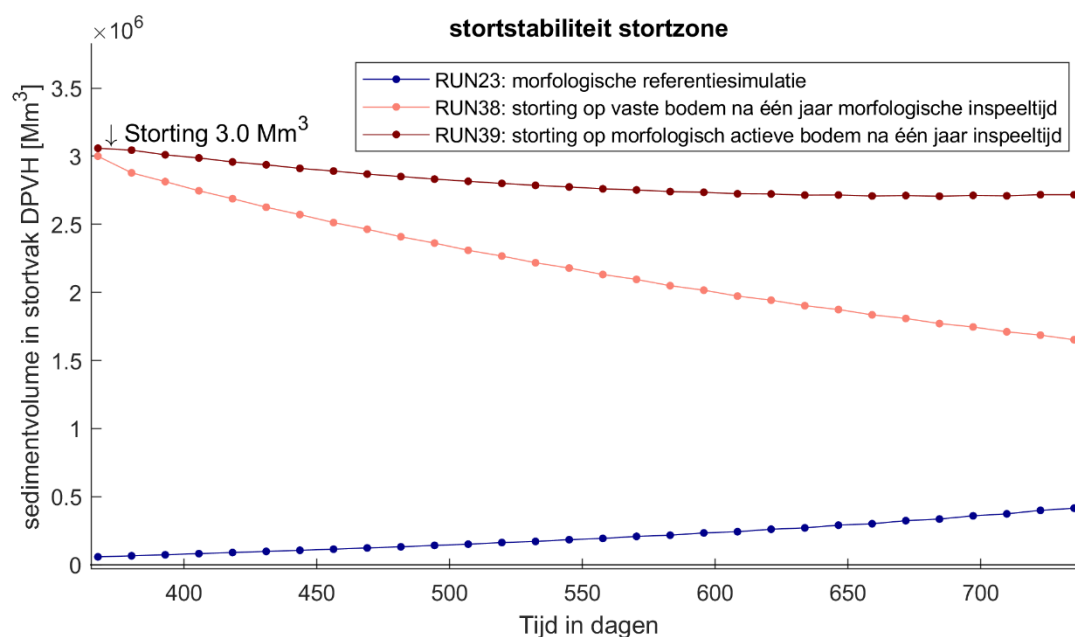
Figuur 22 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na twee jaar met simulaties DPVH_RUN39 (storting van 3.0 Mm3 in diepe put van Hansweert na één morfologisch jaar) en NEVLA_RUN23 (tweejarige referentiesimulatie).



Figuur 23 – Gemodelleerde sedimentverspreiding na één jaar met simulatie DPVH_RUN38 zonder aanwezige sedimentlaag (storting van 3.0 Mm3) met een initiële bathymetrie na één jaar autonome morfologische ontwikkeling.



Figuur 24 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor simulaties DPVH_RUN38 en DPVH_RUN39.



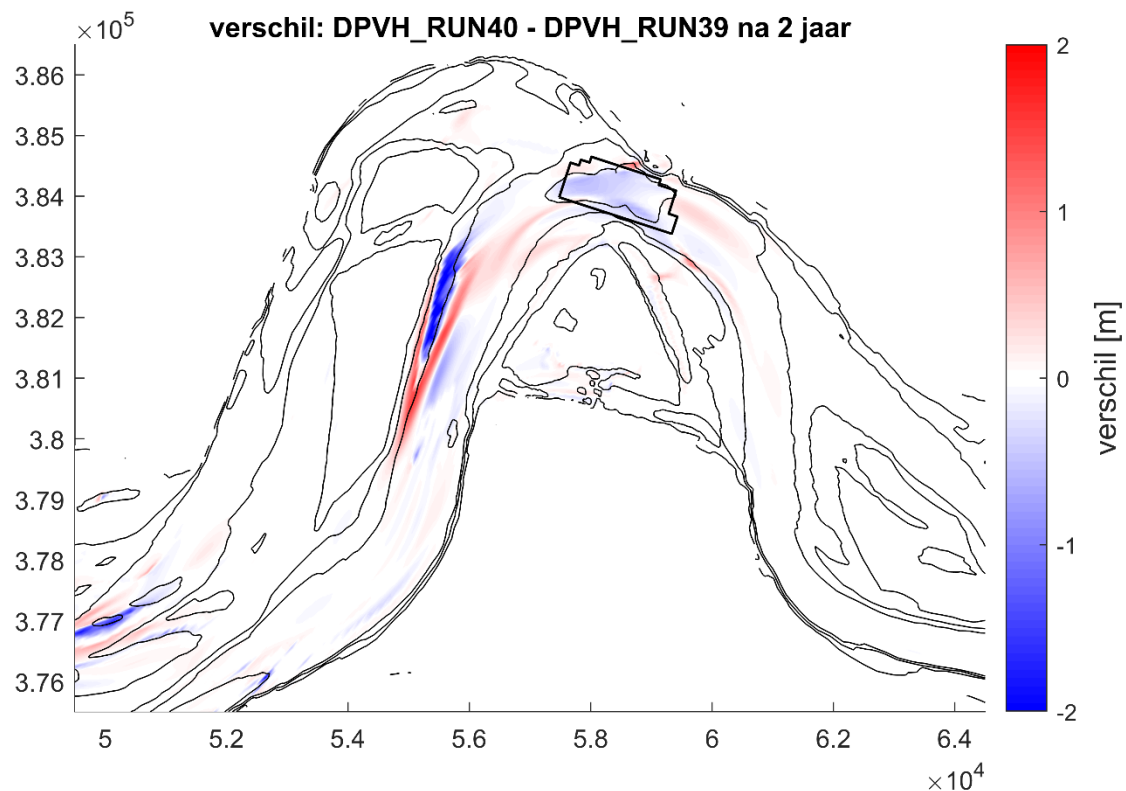
4.2.5 Geleidelijke stortactiviteit ten opzichte van instantane storting Diepe put van Hansweert

In simulatie DPVH_RUN40 wordt het stortvolume van 3.0 Mm^3 over het eerste simulatiejaar verspreidt geleidelijk geïmplementeerd door een constante stortflux van 8220 m^3 per morfologische dag. Na afloop van het eerste jaar is dan ook 3.0 Mm^3 gestort. Door de resultaten van deze simulatie te vergelijken met de resultaten van DPVH_RUN39, waarin na afloop van het eerste simulatie jaar een éénmalige storting van 3.0 Mm^3 is geïmplementeerd kan worden onderzocht wat het effect van een instantane storting is ten opzichte van het (meer realistische geleidelijk) storten. In Figuur 25 wordt de gemodelleerde verandering na afloop van tweejarige morfologisch actieve simulaties tussen DPVH_RUN39 (i.e., éénmalige storting na eerste jaar) en DPVH_RUN40 (i.e., geleidelijk storten gedurende eerste jaar) vergeleken. In Figuur 26 wordt de volumeverandering binnen het stortvak voor beide simulaties en een referentiesimulatie zonder stortingen (i.e., NEVLA_RUN23) getoond.

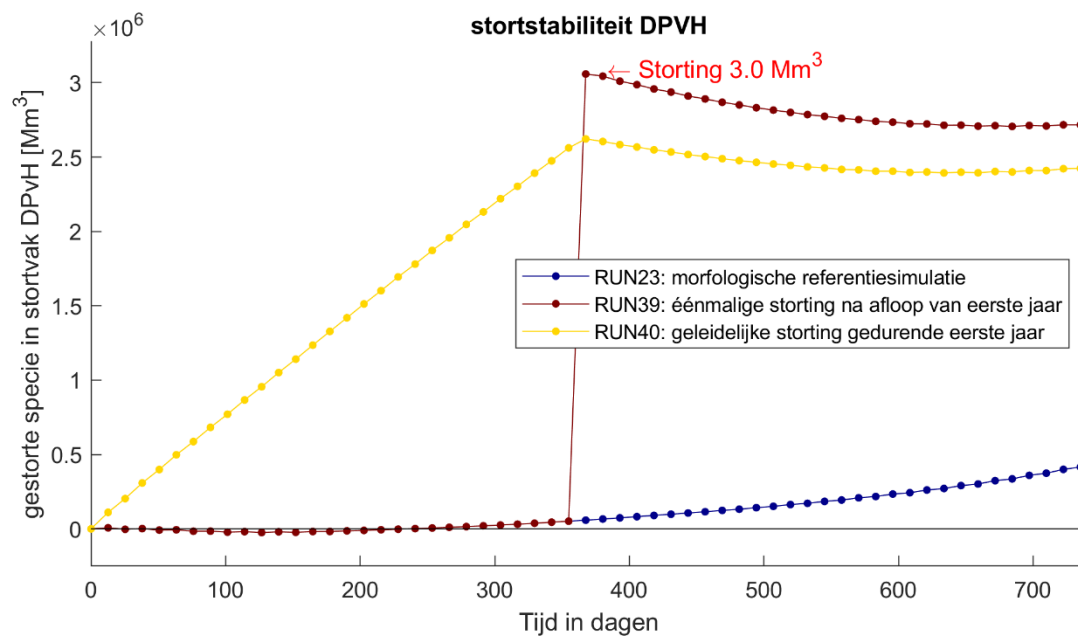
De resultaten laten zien dat er bij een geleidelijke storting een iets lagere stabiliteit wordt gemodelleerd dan bij een éénmalige storting. De verschilkaart laat een iets lagere bodemligging in de put zelf zien (i.e., verschil $< 0.5 \text{ m}$). In het geval van het geleidelijk inbrengen van het stortvolume is na één jaar nog 2.56 Mm^3 of 85% van het stortvolume in het stortvak aanwezig. De stabiliteit is dus hoger dan in simulatie DPVH_RUN32 waarin de 3.0 Mm^3 aan het begin van de simulatie werd ingebracht en de stabiliteit 67% bedroeg (i.e., zonder de autonome morfologische ontwikkeling in rekening te brengen). Na afloop van de storting gedurende het eerste jaar is de gemodelleerde stabiliteit in simulatie DPVH_RUN40 wederom hoger dan in simulatie DPVH_RUN39 met een éénmalige storting na afloop van het eerste jaar: 95% één jaar na afloop van het geleidelijk storten en 89% één jaar na de eenmalige storting. In bovenstaande percentages is geen rekening gehouden met de autonome morfologische ontwikkeling in de referentierun, die voor beide simulaties identiek is.

Een dwarsprofiel van de bodemligging in beide simulaties en de referentiesimulatie toont aan dat er na het eerste of na het tweede morfologische jaar nauwelijks verschillen zijn in de gesimuleerde morfologische ontwikkeling van de put (Figuur 27). Alle kenmerkende veranderingen, zoals de verondieping van de flanken van de put en de erosie aan de noordoever zijn gelijkaardig voor deze simulaties. De verschillen in sedimentatie- en erosiepatronen zoals getoond in Figuur 25 lijken dus klein te zijn ten opzichte van de grootschalige morfologische veranderingen die in alle simulaties voorkomen.

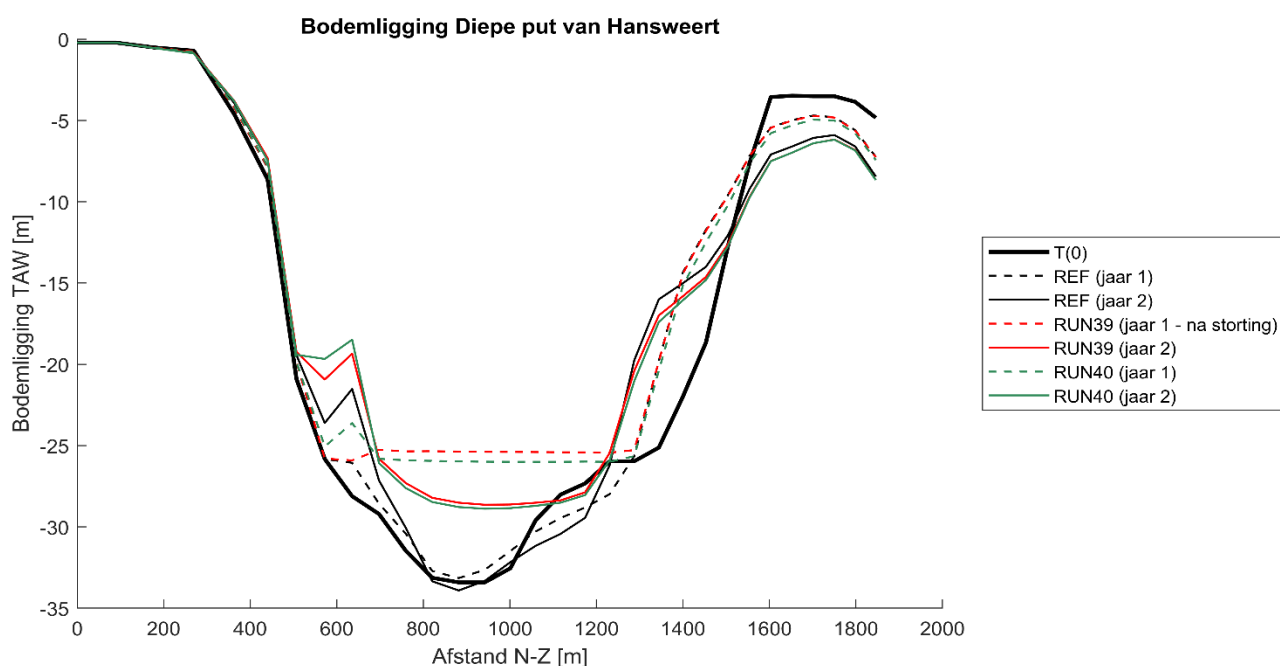
Figuur 25 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na twee jaar met simulaties DPVH_RUN40 (geleidelijke storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert gedurende het eerste jaar) en DPVH_RUN39 (instantane na één morfologisch jaar).



Figuur 26 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor simulaties DPVH_RUN29 en DPVH_RUN40.



Figuur 27 – Dwarsdoorsnede met gemodelleerde morfologische ontwikkeling bij Diepe put van Hansweert met simulaties DPVH_RUN39 (éénmalige storting na jaar 1) en DPVH_RUN40 (geleidelijke storting gedurende jaar 1).



4.3 Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in proefstortzone Inloop van Ossensisse

De geschematiseerde stortingen in deze paragraaf worden uitgevoerd in de stortpolygoon Inloop van Ossensisse en bedragen 3.0 Mm^3 .

4.3.1 Storting in Inloop van Ossensisse met morfologische ontwikkeling

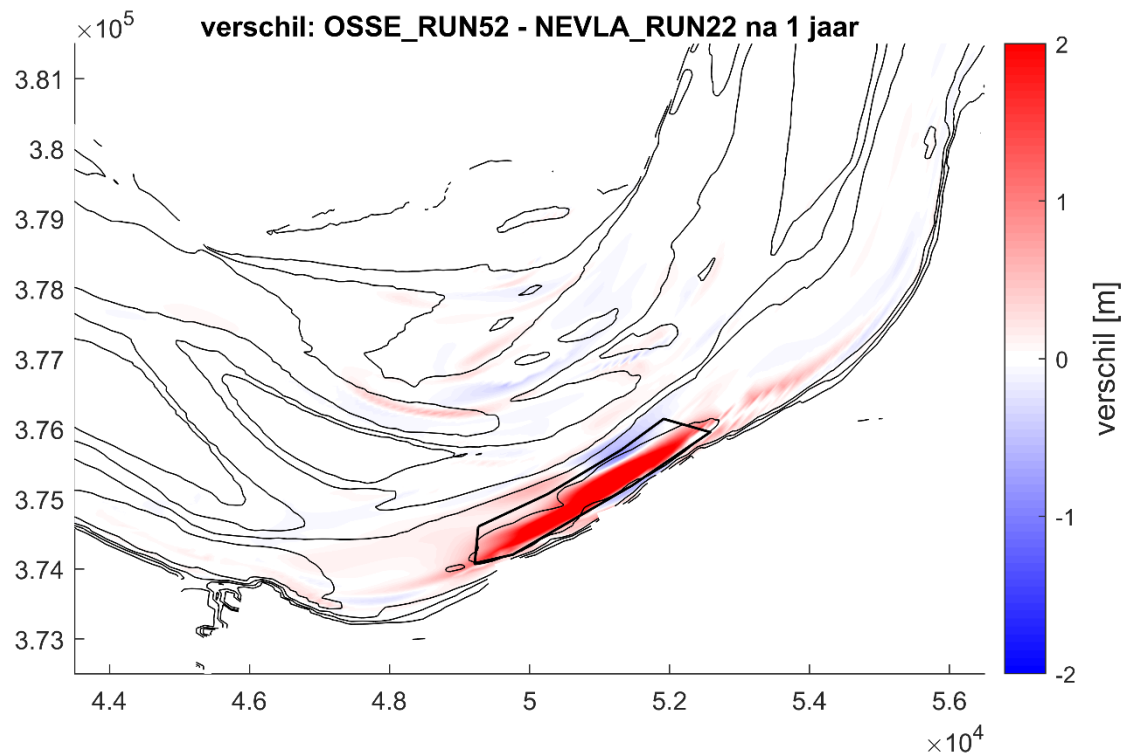
Het effect van een storting in de proefstortzone Inloop van Ossensisse wordt eveneens eerst gemodelleerd door een storting van 3.0 Mm^3 uit te voeren (i.e., met de *dredging-and-dumping* module in Delft3D) aan het begin van de morfologische run zoals omschreven in §4.1. Figuur 28 toont het verschil in bodemligging na één jaar ten opzichte van de referentierun. De gesimuleerde morfologische ontwikkeling met stortingen is enkel in de omgeving van de stortzone anders dan de autonome morfologische ontwikkeling in Figuur 14. Na één morfologisch jaar bevindt het grootste deel van het gestorte materiaal zich namelijk nog binnen de stortpolygoon (Figuur 30). De stortstabiliteit na afloop van de éénjarige morfologische simulatie bedraagt 76%. Zowel op- als afwaarts van de stortzone is sprake van een relatieve bodemverhoging (i.e., ten opzichte van de referentierun). De absolute stabiliteit (i.e., niet verdisconteerd met de volumeverandering door de autonome morfologische ontwikkeling) is 70%. Ook lijkt er als gevolg van de storting van 3.0 Mm^3 lichte erosie ten opzichte van de referentierun plaats te vinden aan de noordkant van de vaargeul. Deze relatieve verbreding kan een direct gevolg zijn van de lokale verondieping.

4.3.2 Storting in Inloop van Ossensisse zonder autonome morfologische ontwikkeling

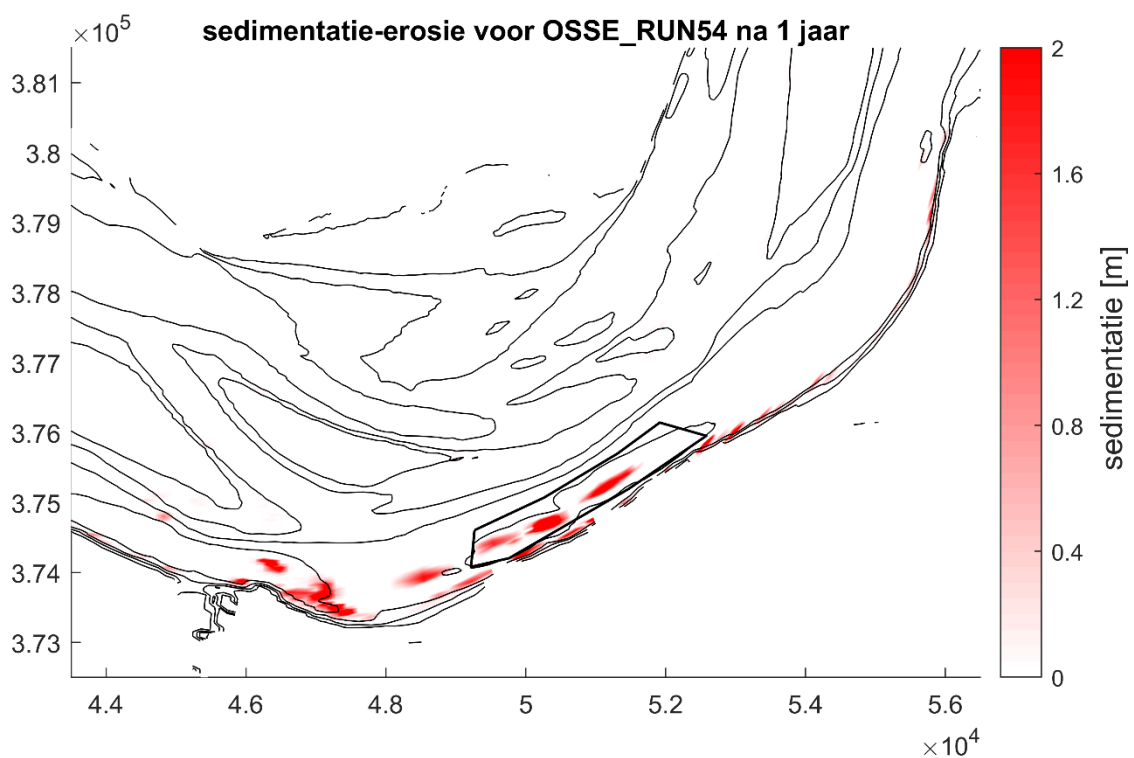
Het effect van een storting in de Inloop van Ossensisse kan ook gemodelleerd worden door een identieke storting van 3.0 Mm^3 uit te voeren in een simulatie zonder autonome morfologische ontwikkeling. Figuur 29 toont de verspreiding van het sediment na één jaar. Het gestorte sediment verspreidt zich voornamelijk afwaarts van de proefstortzone Inloop van Ossensisse in de omgeving van de Put van Terneuzen. Opwaarts van de stortlocatie ontstaat een kleine sedimentatiezone aan oeverkant. Slechts 19% van het sediment is na één morfologisch jaar nog steeds binnen de stortpolygoon aanwezig (Figuur 30). De gemodelleerde

stortstabiliteit is dus significant lager wanneer de autonome morfologische ontwikkeling niet wordt geïmplementeerd in het scenario.

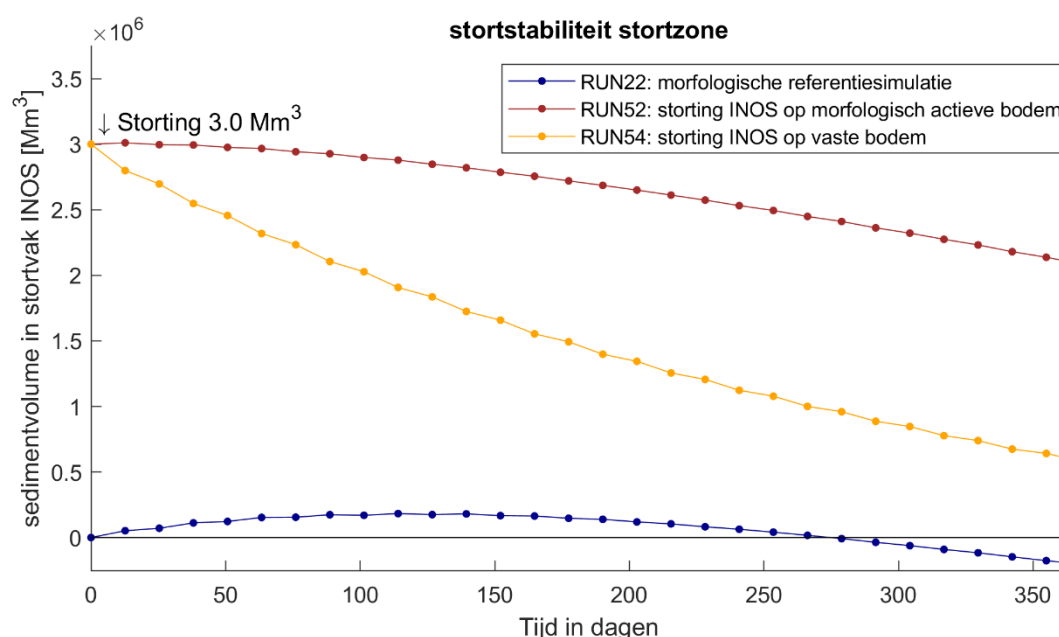
Figuur 28 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties OSSE_RUN52 (storting van 3.0 Mm3 in Inloop van Ossensisse) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).



Figuur 29 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie OSSE_RUN54 (storting van 3.0 Mm3 in Inloop van Ossensisse) zonder autonome morfologische ontwikkeling.



Figuur 30 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Inloop van Ossensisse voor simulaties OSSE_RUN52 en OSSE_RUN54.



4.4 Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in stortzone SH41

De geschematiseerde stortingen in deze paragraaf worden uitgevoerd binnen de stortzone SH41 en bedragen 3.0 Mm^3 . Omdat de storting in het diepste deel van de stortzone wordt uitgevoerd bevindt deze zich voornamelijk in het noordelijke deel en het meest zuidelijke deel van de stortzone.

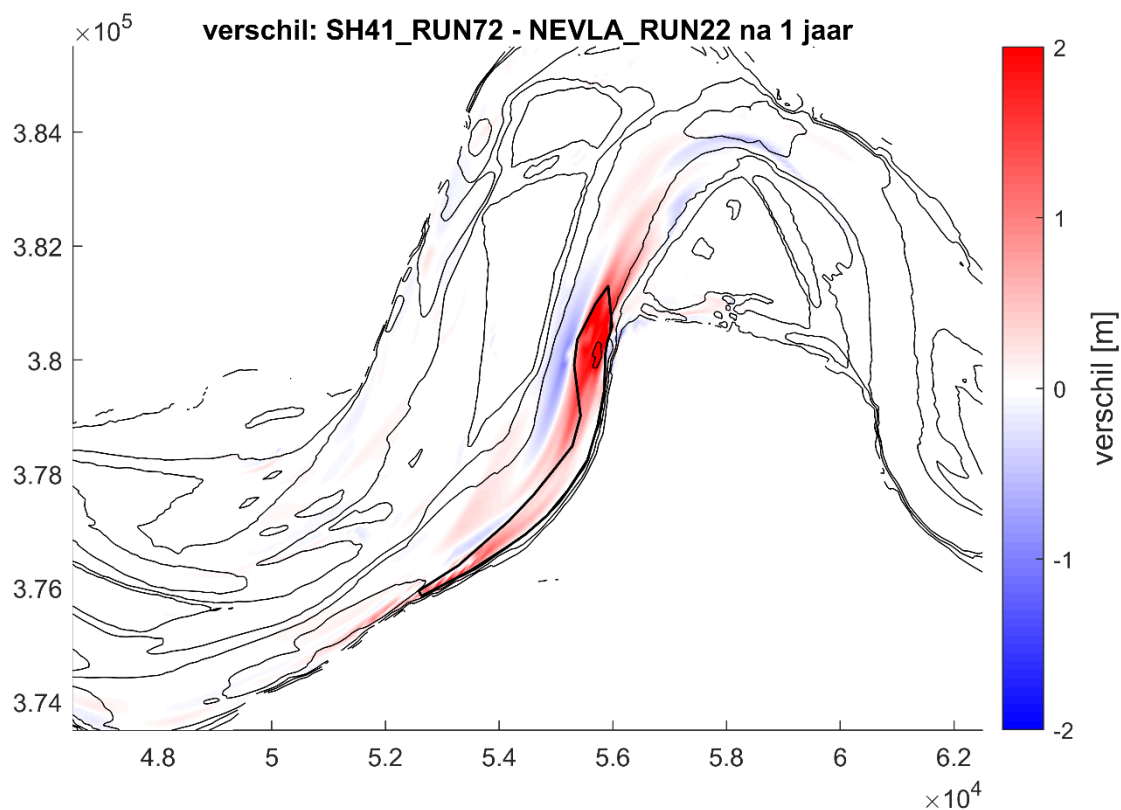
4.4.1 Storting SH41 met morfologische ontwikkeling

Het effect van een storting van 3.0 Mm^3 in stortvak SH41 aan het begin van de simulatie op de morfologische ontwikkeling wordt getoond in Figuur 31. De storting in SH41 leidt zowel opwaarts als afwaarts tot relatieve verondieping (i.e., ten opzichte van de autonome morfologische ontwikkeling) in de vaargeul. Net als bij de overige stortlocaties leidt de storting in het diepe deel van de hoofdgeul tot een relatieve verdieping van de geul direct naast de stortzone. Ten opzichte van de referentierun bedraagt de stortstabiliteit na één jaar 66% voor de storting van 3.0 Mm^3 in SH41 (Figuur 33). De absolute stortstabiliteit (i.e., zonder de autonome morfologische ontwikkeling in rekening te brengen) is echter slechts 16%.

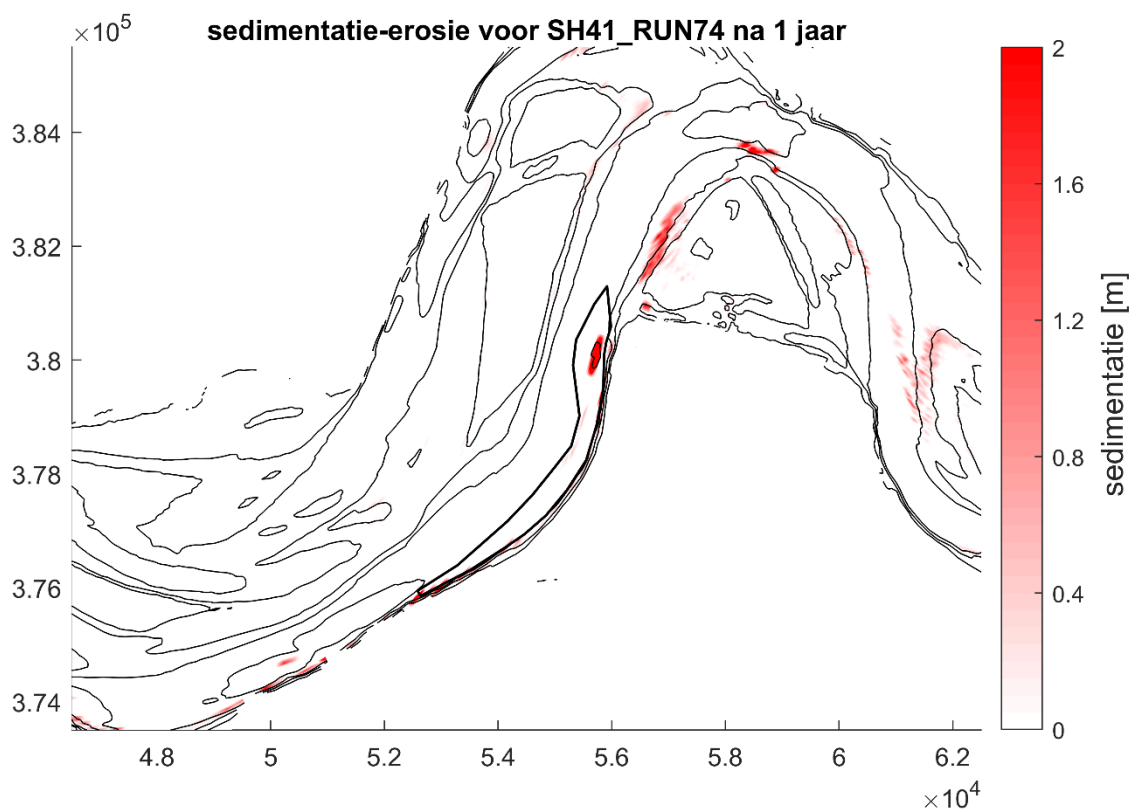
4.4.2 Storting SH41 zonder autonome morfologische ontwikkeling

Het effect van een 3.0 Mm^3 storting in stortvak SH41 in een simulatie zonder autonome morfologische ontwikkeling wordt getoond in Figuur 32. De stortstabiliteit van deze storting is zeer laag. Van het gestort sedimentvolume blijft slechts 13% na één jaar binnen de stortpolygoon aanwezig (Figuur 33). Dit percentage is dus gelijkaardig aan de absolute stortstabiliteit in de morfologisch actieve run met een storting in SH41. Het sediment verspreidt zich naar verschillende gebieden opwaarts en afwaarts van de stortlocatie. Opvallend is dat bij een storting in stortvak SH41 op een vaste bodem een aanzienlijk deel van het sediment relatief ver opwaarts bij de Plaat van Walsoorden terecht komt. Dit sedimentatiegebied komt overeen met de invloed van een storting in de Diepe put van Hansweert. Ook zijn sedimentatiegebieden zichtbaar langs de westrand van de Platen van Ossensisse en afwaarts van de stortzone in de vaargeul.

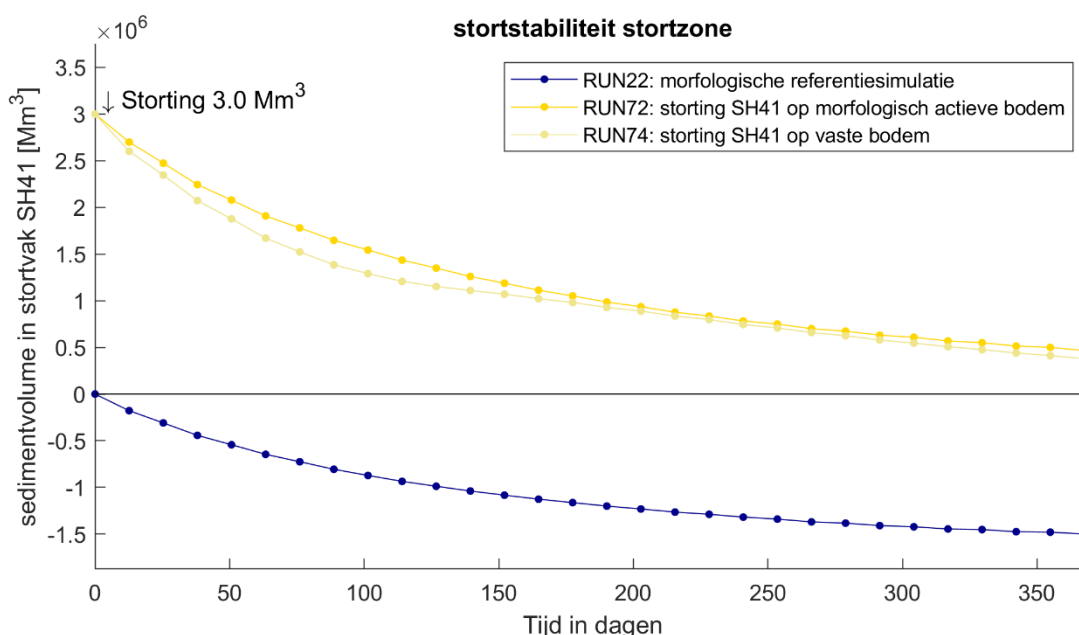
Figuur 31 – Verskil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties SH41_RUN72 (storting van 3.0 Mm3 in stortvak SH41) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).



Figuur 32 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie SH41_RUN74 (storting van 3.0 Mm3 stortvak SH41) zonder autonome morfologische ontwikkeling.



Figuur 33 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon SH41 voor simulaties SH41_RUN72 en SH41_RUN74.



4.5 Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in stortzone SH51

De geschematiseerde stortingen in deze paragraaf worden uitgevoerd binnen de stortzone SH51 en bedragen eveneens 3.0 Mm^3 .

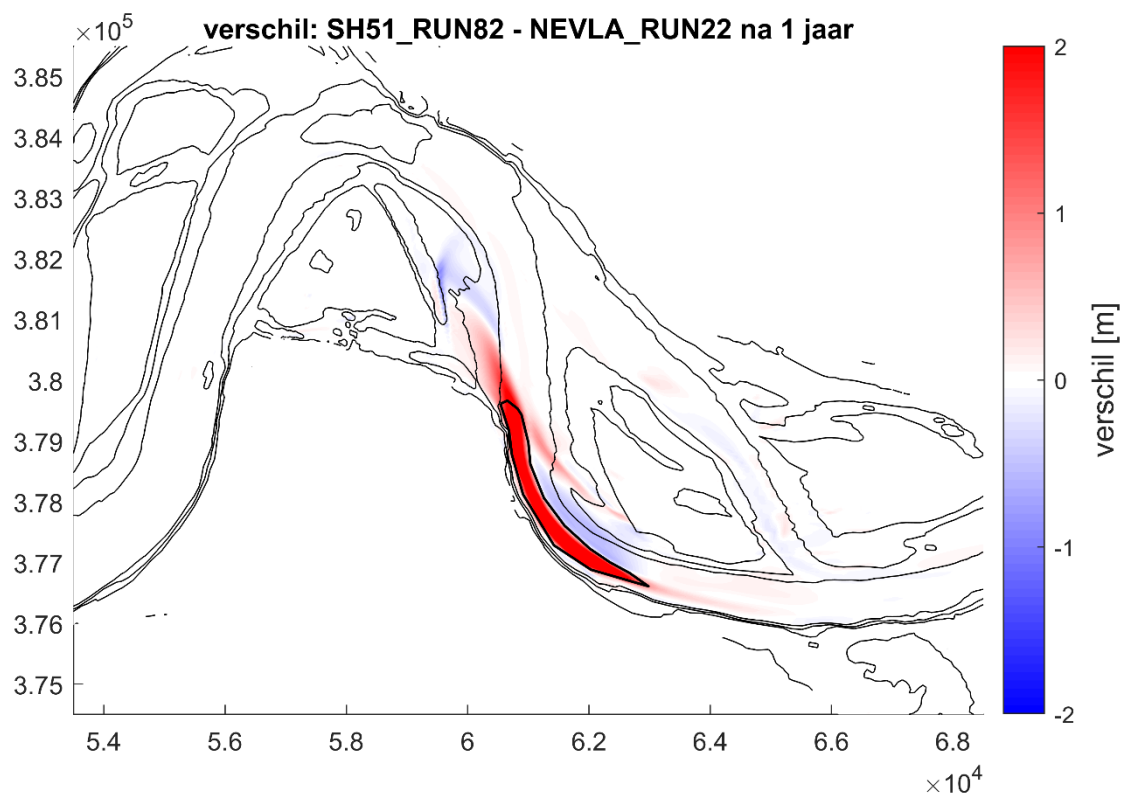
4.5.1 Storting SH51 met morfologische ontwikkeling

Het effect van een storting van 3.0 Mm^3 in stortvak SH51 aan het begin van de simulatie op de morfologische ontwikkeling is zichtbaar in Figuur 34. Deze storting in SH51 leidt na één jaar morfologische simulatie tot sedimentatie binnen de stortpolygoon zelf en direct afwaarts van de stortpolygoon in het Zuidergat. De invloed afwaarts van de stortpolygoon is kleiner. Ook leidt de storting weer tot een verdieping van het deel van de vaargeul naast het stortgebied. Opvallend is dat de morfologische impact van een storting in SH51 hierdoor omgekeerd is aan de impact van een storting in het stortvak Plaat van Walsoorden aan de noordkant van de vaargeul (zie §4.6.1). Ten opzichte van de referentierun bedraagt de stortstabiliteit na één jaar 80% voor de storting van 3.0 Mm^3 in SH51 (Figuur 36). De absolute stortstabiliteit (i.e., zonder de autonome morfologische ontwikkeling in rekening te brengen) is echter slechts 46%.

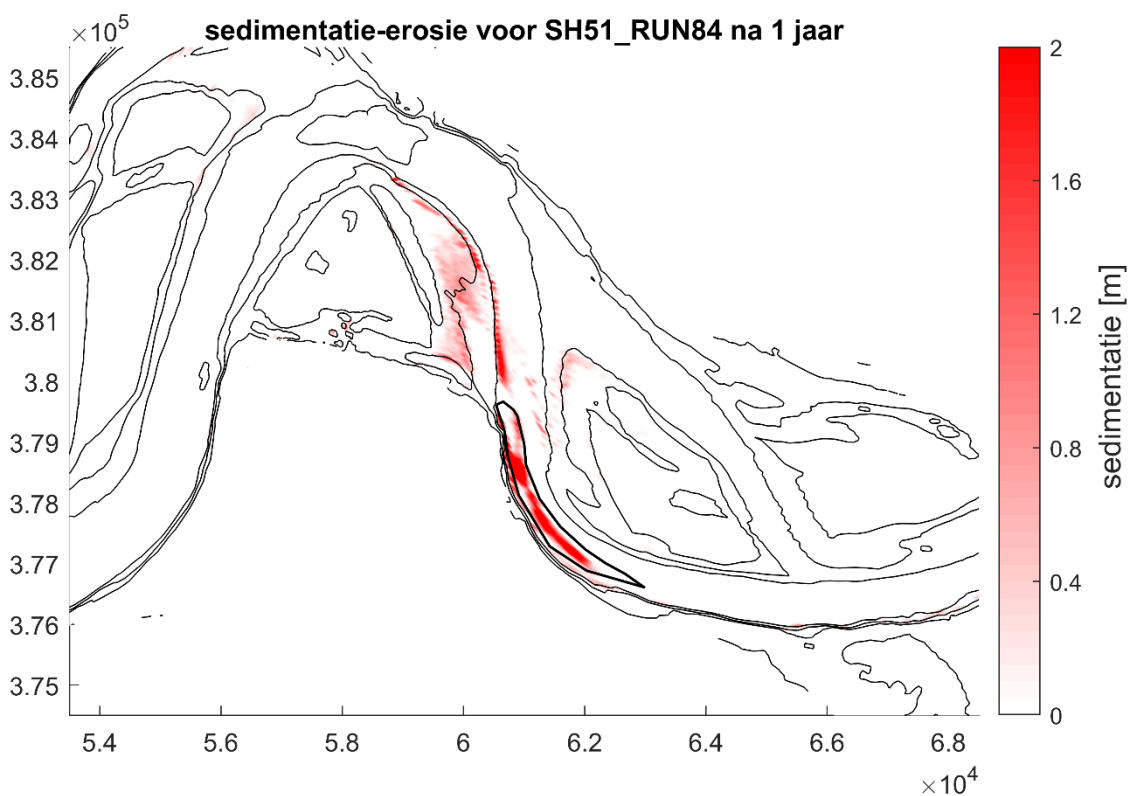
4.5.2 Storting SH51 zonder autonome morfologische ontwikkeling

Het effect van een storting van 3.0 Mm^3 in stortvak SH51 in een simulatie zonder autonome morfologische ontwikkeling wordt getoond in Figuur 35. De verspreiding van het gestorte sediment is enkel afwaarts richting de Drempel van Hansweert en het ondiepe plateau aan de oostkant van de Platen van Ossensisse. Na één jaar is nog slechts 31% van het gestorte sedimentvolume binnen de stortpolygoon aanwezig. De stortstabiliteit van deze simulatie zonder morfologisch actieve sedimentbodem is dus wederom lager dan bij een simulatie met autonome morfologische ontwikkeling.

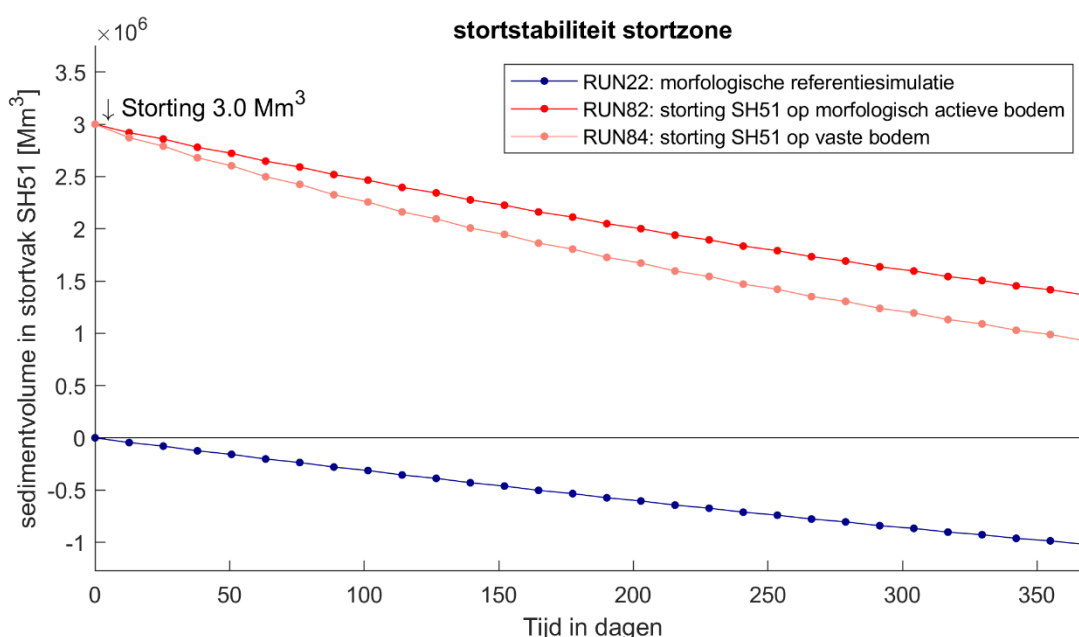
Figuur 34 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties SH51_RUN82 (storting van 3.0 Mm3 in stortvak SH51) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).



Figuur 35 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie SH51_RUN84 (storting van 3.0 Mm3 stortvak SH51) zonder autonome morfologische ontwikkeling.



Figuur 36 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon SH51 voor simulaties SH51_RUN82 en SH51_RUN84.



4.6 Invloed autonome morfologische ontwikkeling op effect stortingen in stortzone Plaat van Walsoorden

De geschematiseerde stortingen worden uitgevoerd aan de afwaartse kant van de Plaat van Walsoorden en bedragen 3.0 Mm^3 . Eerst worden de diepste delen binnen de stortpolygoon opgevuld. Hierdoor bevindt het gestorte sediment zich vooral aan de westrand van de polygoon, langs het Zuidergat.

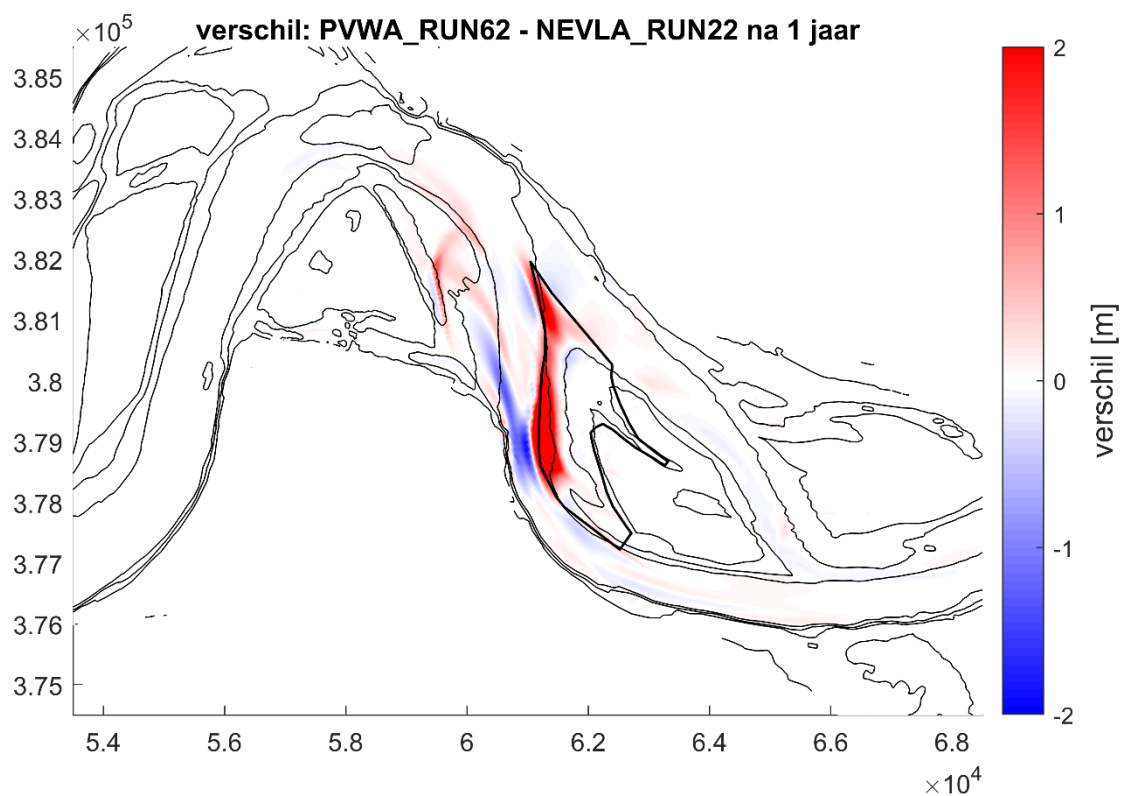
4.6.1 Storting langs Plaat van Walsoorden met morfologische ontwikkeling

Het effect van een storting van 3.0 Mm^3 in het stortvak Plaat van Walsoorden aan het begin van de autonome morfologische run zoals omschreven in §4.1 op de gesimuleerde morfologische ontwikkeling wordt getoond in Figuur 37. De gesimuleerde morfologische ontwikkeling van het Zuidergat en de westrand van de Plaat van Walsoorden met deze storting verschilt van de referentiesimulatie in Figuur 14. Hier is als gevolg van de storting van 3.0 Mm^3 sprake van een versmalling die leidt tot een uitdieping van de vaargeul. Er zijn in de verschilplot geen duidelijke sedimentatiegebieden aanwezig buiten de stortpolygoon. Wel is er sprake van lokale lichte sedimentatie aan de afwaartse kant van de uitdieping in het Zuidergat. Na één morfologisch jaar bevindt 81% van het gestorte materiaal zich namelijk nog binnen de stortpolygoon als de stabiliteit wordt bepaald aan de hand van de verschilplot met de referentierun. Als de stortstabiliteit echter wordt bepaald aan de hand van de absolute volumeverandering binnen de stortpolygoon in de individuele simulatie met storting zou de stabiliteit 143% bedragen, wat betekent dat er sprake is van netto sedimentatie binnen het polygoon (Figuur 39).

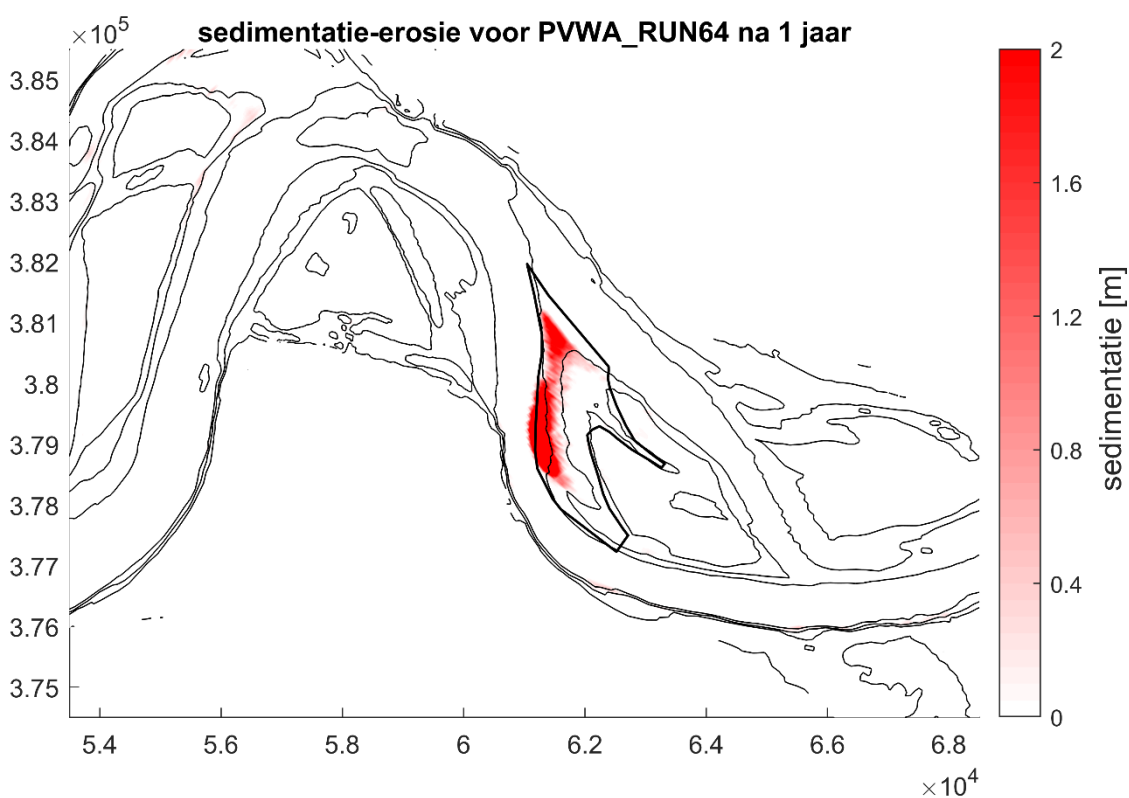
4.6.2 Storting langs Plaat van Walsoorden zonder autonome morfologische ontwikkeling

Het effect van een storting langs de afwaartse plaatrand van de Plaat van Walsoorden kan ook gemodelleerd worden door een identieke storting van 3.0 Mm^3 uit te voeren in een simulatie zonder autonome morfologische ontwikkeling. Figuur 38 toont de verspreiding van het sediment na één jaar. Het gestorte sediment verspreidt zich nauwelijks. Net als in de morfologisch actieve run is de storting zeer stabiel: 78% is na één morfologisch jaar nog binnen de stortpolygoon aanwezig (Figuur 39).

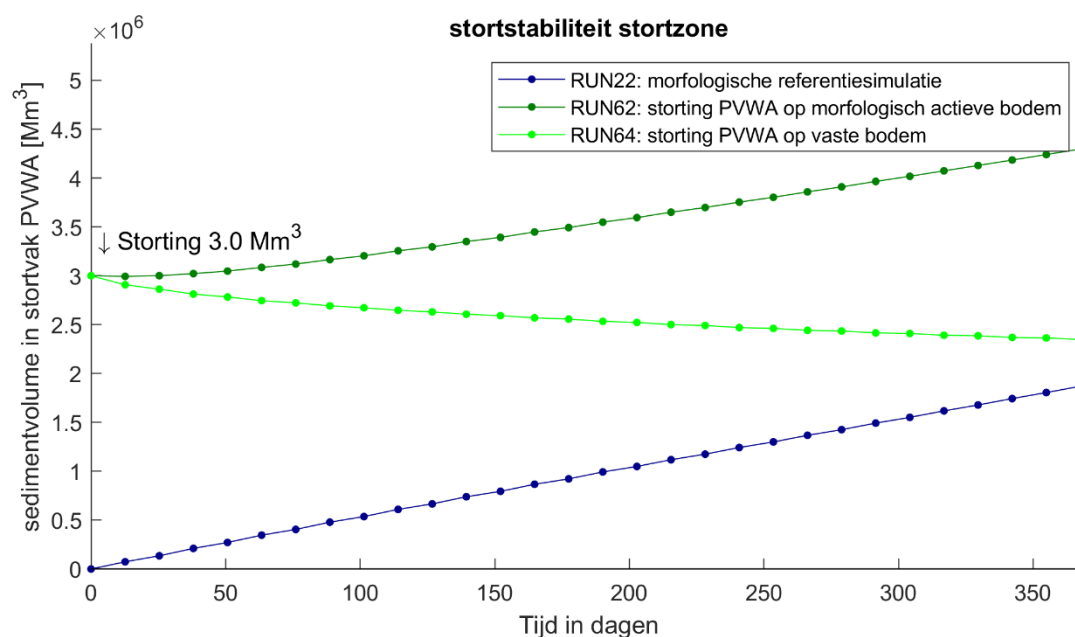
Figuur 37 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulaties PVWA_RUN62 (storting van 3.0 Mm3 langs Plaat van Walsoorden) en NEVLA_RUN22 (referentiesimulatie).



Figuur 38 – Gemodelleerde verspreiding na één jaar met simulatie PVWA_RUN64 (storting van 3.0 Mm3 langs Plaat van Walsoorden) zonder autonome morfologische ontwikkeling.



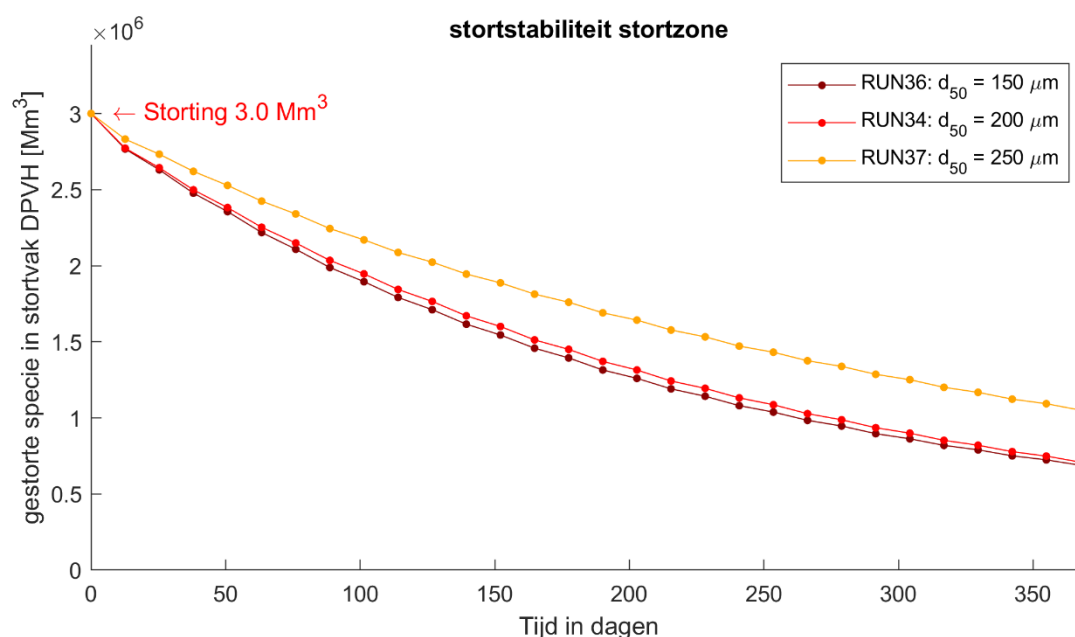
Figuur 39 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Plaat van Walsoorden voor simulaties PVWA_RUN62 en PVWA_RUN64.



4.7 Invloed sedimentdiameter

In het kader van deze gevoeligheidsanalyse is ook beknopt onderzocht wat de invloed is van de sedimentdiameter op de gemodelleerde stortstabiliteit (Figuur 40). Hiervoor zijn twee simulaties uitgevoerd waarin de storting van 3.0 Mm³ in de Diepe put van Hansweert is geschematiseerd met sediment met een korrelgrootte van $d_{50} = 150 \mu\text{m}$ (DPVH_RUN36) en $d_{50} = 250 \mu\text{m}$ (DPVH_RUN37). Beide simulaties zijn uitgevoerd zonder autonome morfologische ontwikkeling (i.e., geen initiële sedimentlaag). De resultaten van de simulaties zijn vervolgens vergeleken met die van simulatie DPVH_RUN34, waarin de sedimentdiameter van de storting $200 \mu\text{m}$ is.

Figuur 40 – Stortstabiliteit binnen de stortpolygoon Diepe put van Hansweert voor stortingen met variërende sedimentdiameters.



Voor wat betreft verspreiding van het gestorte sediment zijn geen duidelijke verschillen waarneembaar tussen simulaties met stortingen met verschillende korrelgroottes. Wel is de sedimentverspreiding kleiner voor de grovere fractie van $d_{50} = 250 \mu\text{m}$. Dit valt direct op te maken uit de stortstabiliteit (Figuur 40). Een storting met grover sediment van $d_{50} = 250 \mu\text{m}$ leidt na één jaar tot een stortstabiliteit van 35%. Bij een kleinere sedimentdiameter neemt de stortstabiliteit echter maar weinig af (i.e., 23% bij $d_{50} = 150 \mu\text{m}$ t.o.v. 24% bij $d_{50} = 200 \mu\text{m}$). Opvallend is dus dat het toepassen van een fijnere sedimentfractie niet leidt tot een lagere stortstabiliteit. In alle gevallen lijkt de uiteindelijke stabiliteit na een langere periode lager te liggen aangezien de hoeveelheid gestorte specie ook aan het einde van de simulatie nog afneemt.

4.8 Vergelijking met geobserveerde stabiliteit stortingen

Voor de proefstortzones Diepe put van Hansweert en Inloop van Ossensisse, alsmede voor de stortzones SH41, SH51 en Plaat van Walsoorden werd in §3.2 de geobserveerde stortstabiliteit bepaald aan de hand van geobserveerde volumeveranderingen in IMDC et al. (2019) en Plancke et al. (2016). Hieronder wordt per stortlocatie de geobserveerde stortstabiliteit vergeleken met de stortstabiliteit die werd verkregen op basis van de modelresultaten. Tabel 5 geeft een overzicht van de gemodelleerde en geobserveerde stabiliteit van sedimentstortingen voor de verschillende locaties. Hierbij dient vermeld te worden dat de hoeveelheid gestort sediment verschilt tussen de modelsimulaties en de werkelijke sedimentstortingen en dat het geobserveerde initieel verlies niet in rekening werd gebracht bij de bepaling van de geobserveerde stabiliteit. Vanwege het verschil in sedimenthoeveelheid waarvoor de stabiliteit werd bepaald kan de gemodelleerde stortstabiliteit niet één-op-één gevalideerd worden aan de observaties. Bovendien kon niet voor elke stortlocatie een adequate inschatting van de stabiliteit van een specifieke storting gemaakt worden vanwege het ontbreken van bodempeilingen tijdens langdurige stortvrije periodes.

Tabel 5 – Gemodelleerde en geobserveerde stabiliteit van sedimentstortingen (omgerekend naar % per jaar).

Stortlocatie	Morfologische actieve run		Run met harde bodem	Geobserveerde stabiliteit
	Absolute stabiliteit	Stabiliteit t.o.v. referentierun	Stabiliteit	
Diepe put van Hansweert	67-88%	65%-77%	24-55%	38-86 %
Inloop Ossensisse	70%	76%	19%	65-79%
SH41	16%	66%	13%	~0-5% ¹
SH51	46%	80%	31%	~0-20% ¹
Plaat van Walsoorden	143%	81%	78%	~88%

Diepe put van Hansweert

Voor de twee proefstortingen in de Diepe put van Hansweert in 2016 en 2017 werd, uitgezonderd een direct verlies van respectievelijk omstreeks de helft van de gestorte specie kort na de proefstortingen, een stabiliteit van omgerekend 86% en 38% per jaar geobserveerd (Tabel 5).

Voor de Diepe put van Hansweert geldt dat het geïmplementeerde stortvolume in de modelsimulaties groter is dan tijdens de daadwerkelijke proefstortingen (i.e., 3.0 Mm^3 zand in de simulaties om 1.0 Mm^3 in werkelijkheid). Het gesimuleerde effect van de stortingen is naar verwachting dus ook sterker dan wat werd

¹ Gedurende de laatste jaren nam het volume binnen de stortpolygoon af, ondanks voortdurende sedimentstortingen.

geobserveerd. In de gemodelleerde stortingen wordt de hoogste stortstabiliteit na één jaar bereikt in de morfologisch actieve simulaties (i.e., 67% voor een storting in jaar 1 en 77% voor een storting in jaar 2). Beide percentages zijn lager dan de geobserveerde stabiliteit per jaar voor de eerste storting, maar hoger dan de geobserveerde stabiliteit na de tweede storting. De absolute en relatieve (i.e., ten opzichte van een morfologische referentierun zonder storting) stortstabiliteit zijn voor de stortingen in de Diepe put van Hansweert gelijkaardig. Bij een storting op een vaste (i.e., morfologisch inactieve) bodem is de gemodelleerde stabiliteit van de storting met 24% veel lager. Als de storting pas na één jaar morfologische inspeeltijd wordt uitgevoerd is het verschil met de morfologisch actieve run echter wel kleiner (i.e., stabiliteit van 55%).

Inloop van Ossensisse

De geobserveerde stabiliteit van gestort sediment in de stortzone Inloop van Ossensisse in 2016 en 2017 bedroeg respectievelijk 79% en 65% voor de eerste en tweede proefstorting van ongeveer 1 Mm³ (Tabel 5). Deze percentages zijn wederom bepaald over de periode na afloop van een initieel volumeverlies van 15-20% van het stortvolume in de eerste weken na de proefstortingen (zie: IMDC et al., 2019).

Ook voor de modelsimulaties met stortingen in stortvak Inloop van Ossensisse geldt dat de stortvolumes die zijn geïmplementeerd (3.0 Mm³) significant groter zijn dan het volume van de proefstortingen (1 Mm³). In de morfologisch actieve modelsimulatie wordt bij een storting van 3.0 Mm³ in wel een vergelijkbare stortstabiliteit van 76% gesimuleerd (Tabel 5). De gemodelleerde stabiliteit komt in de morfologisch actieve run dus goed overeen met de geobserveerde stabiliteit op langere termijn. Bij een schematisering van de storting op een vaste bodem is de gemodelleerde stortstabiliteit met 19% wederom veel lager.

SH41

Stortzone SH41 kent een lage stabiliteit van gestorte specie. Van het totale volume van ca. 18 Mm³ gestort materiaal tussen 2010 en 2016 werd in stortvak SH41 nog slechts 5% gemeten als toegenomen sedimentvolume in de bodempeilingen, terwijl in 2016 zelfs meer sediment de stortzone verliet dan er daadwerkelijk in gestort werd (zie: Plancke et al., 2016).

De geïmplementeerde éénmalige storting van 3 Mm³ komt voor stortvak SH41 goed overeen met de gemiddelde jaarlijkse stortvolumes over de afgelopen jaren (Plancke et al., 2016; Figuur 11). In de morfologische modelsimulatie met actieve sedimentlaag wordt voor stortvak SH41 eveneens een lage absolute stortstabiliteit gesimuleerd: 16% na één jaar voor SH41 (Tabel 5). In vergelijking met de referentiesimulatie is de stabiliteit echter hoger (i.e., 66%), wat wil zeggen dat het verlies aan sedimentvolume binnen dit polygoon grotendeels verklaard wordt door een natuurlijk uitruimingsproces.

SH51

In stortvak SH51 werd met 20% van de gestorte 4 Mm³ een iets hogere stabiliteit gemeten (Plancke et al., 2016). Ook voor dit stortvak geldt dat gedurende het laatste jaar meer sediment uit het vak verdween dan erin gestort werd.

Voor stortvak SH51 wordt een hogere absolute stabiliteit van 46% gemodelleerd (Tabel 5). De stabiliteit van deze stortzone wordt dus overschat door het model. Hier geldt wederom dat het geïmplementeerde stortvolume van 3.0 Mm³ in het model de gemiddelde stortvolumes van ongeveer 0.7 Mm³ per jaar over de laatste jaren (Plancke et al., 2016; Figuur 12) ruimschoots overschat. Een overschatting van de geobserveerde stabiliteit kon dus worden verwacht.

Plaat van Walsoorden

De geobserveerde stortstabiliteit voor de stortzone Plaat van Walsoorden bedroeg na gespreide sedimentstortingen in 2018 ongeveer 88% in januari 2019 (Tabel 5). Dit percentage werd echter niet over een stortvrije periode na een specifieke storting bepaald. Gedurende de laatste periode zonder storting (i.e., in 2016 en 2017) nam het sedimentvolume binnen de stortpolygoon Plaat van Walsoorden overigens met bijna 1.0 Mm³ toe, wat duidt op een natuurlijke sedimentatietrend (zie IMDC et al., 2019).

Deze natuurlijke sedimentatie binnen de stortzone (i.e., aan de afwaartse kant van de Plaat van Walsoorden) wordt ook door de morfologische modelsimulatie gereproduceerd. De gemodelleerde stortstabiliteit in de stortzone Plaat van Walsoorden komt eveneens goed overeen met de observaties. Ongeacht de schematisering van de storting (i.e., morfologisch actieve bodem of vaste bodem) wordt een stabiliteit van 78-81% na één jaar gemodelleerd ten opzichte van de referentiesimulatie zonder storting (Tabel 5). De gemodelleerde absolute stortstabiliteit voor stortzone Plaat van Walsoorden bedraagt echter 143% in de morfologisch actieve run, wat inhoudt dat er na de storting sprake is van sedimentatie binnen de stortpolygoon. Voor de simulatie met een storting op de Plaat van Walsoorden geldt eveneens dat het geïmplementeerd stortvolume van 3 Mm³ significant hoger is dan de volumes die in werkelijkheid worden gestort binnen dit polygoon (i.e., ~1 Mm³; zie Figuur 13).

5 Discussie & Conclusies

5.1 Algemene conclusies scenario-analyse morfologisch model

In dit rapport werden morfologische modelsimulaties met én zonder geschematiseerde sedimentstortingen in een aantal diepe putten in de Westerschelde besproken. De beoogde doelstelling van de simulaties is het analyseren van de morfologische ontwikkeling van de stortingen en de omgeving. Modelsimulaties met geschematiseerde stortingen van 3.0 Mm³ in de stortzones Diepe put van Hansweert, Inloop van Ossensisse, SH41, SH51 en Plaat van Walsoorden suggereren dat stortingen van dergelijke omvang in de diepe stortzones na éénjarige simulaties niet leiden tot significant verschillende morfologische ontwikkelingen op grote ruimtelijke schaal. Direct opwaarts en afwaarts van de diepe stortvakken, evenals binnen de stortpolygoon zelf, wordt wel steeds een relatieve bodemverhoging gesimuleerd. Ten gevolge van de abrupte verondieping die de storting zelf veroorzaakt is veelal ook sprake van een relatieve verbreding of verdieping van de geulsectie evenwijdig aan de stortzone. Dergelijke ruimtelijke trends kunnen wellicht aan de hand van data-analyse onderzocht worden door de morfologische ontwikkelingen in periodes met en zonder stortingen in detail te analyseren en te kwantificeren.

Uit de modelresultaten in deze studie volgt dat de relatief hoge stabiliteit voor sedimentstortingen in de Inloop van Ossensisse en op de Plaat van Walsoorden goed worden gerepresenteerd. Hetzelfde geldt voor de zeer lage stortstabiliteit in stortvak SH41. De eveneens lage stortstabiliteit in stortvak SH51 wordt door het model juist overschat. De geobserveerde stabiliteit voor proefstortingen in de Diepe put van Hansweert kent een dusdanig hoge spreiding dat de gemodelleerde stabiliteit er niet in detail mee vergeleken kon worden.

Met oog op de analyse van de morfologische modelresultaten dienen de tekortkomingen van het model uiteraard in beschouwing te worden genomen. Zo zijn er in het studiegebied tussen Terneuzen en Walsoorden nog enkele grote afwijkingen (zowel kwalitatief als kwantitatief) tussen de gemodelleerde en geobserveerde sedimentatie- en erosiepatronen. Deze afwijkingen kunnen niet enkel verklaard worden door het ontbreken van het vaargeulonderhoud en de bijbehorende sedimentstortingen in de morfologische modelsimulaties. Vanwege deze tekortkomingen worden de resultaten van modelsimulaties met sedimentstortingen voornamelijk relatief ten opzichte van een referentiesimulatie geanalyseerd.

5.2 Schematisering sedimentstortingen

De gesimuleerde verspreiding of morfologische invloed van sedimentstortingen is steeds afhankelijk van de schematisering van de storting en het morfologisch model zelf. Als de storting op een vaste bodem (i.e., zonder actieve sedimentlaag) wordt uitgevoerd is de gesimuleerde morfologische impact ervan significant anders dan wanneer de storting op een morfologisch actieve sedimentlaag wordt uitgevoerd.

De gemodelleerde stortstabiliteit is in alle simulaties hoger als de storting in een actief morfologisch model wordt uitgevoerd dan wanneer er gebruik wordt gemaakt van een vaste bodem. Een uitzondering is de stortzone Plaat van Walsoorden, waar voor beide schematiseringen een gelijkaardige stabiliteit wordt gesimuleerd. Met betrekking tot de berekende stabiliteit van de stortingen wordt opgemerkt dat deze in de morfologisch actieve runs werd bepaald op basis van de verschilplot tussen een simulatie met en zonder storting om de invloed van de autonome morfologische ontwikkeling te filteren. Hoewel de beschikbare datasets omtrent stabiliteit van sedimentstortingen niet allemaal duidelijkheid verschaffen (i.e., de stortstabiliteit kan veelal niet adequaat worden bepaald vanwege het ontbreken van observaties direct na de stortingen), volgt uit een vergelijking met de modelscenario's wel dat de stortstabiliteit voor de stortlocatie Inloop van Ossensisse goed wordt gerepresenteerd.

In een morfologisch actieve run (i.e., met actieve sedimentlaag) is de invloed van de stortingen in de diepe delen vooral lokaal. De invloed van een storting werd voor deze simulaties bepaald aan de hand van een relatieve bodemverandering ten opzichte van een morfologische run zonder stortingen. Deze relatieve bodemverandering laat niet de verspreiding van het gestorte sediment zien, maar geeft wel de morfologische impact van een storting weer. Door in de morfologisch actieve runs een aparte sedimentfractie voor stortingen in combinatie met een bodemlagenmodel te gebruiken kan eveneens de verspreiding van het gestorte sediment geanalyseerd worden.

In de simulaties met vaste bodem komt het gestort sediment grotendeels terecht op 'natuurlijke' sedimentatiegebieden in en rondom de stortpolygonen. Hierbij wordt opgemerkt dat deze gebieden in de modelsimulatie niet noodzakelijkerwijs overeenkomen met de werkelijke sedimentatiezones. Bovendien is in werkelijkheid ook sprake van bagger- en stortactiviteiten waardoor sediment slechts gelimiteerd kan accumuleren op sedimentatiezones in of voorbij een vaargeul.

Verder is ook de timing van de storting in de morfologische simulatie van belang voor de uiteindelijke impact van de storting. Als de storting later in de simulatie wordt geïmplementeerd, nadat de initiële morfologische respons van het model heeft plaatsgevonden, is de gesimuleerde stabiliteit van de storting anders (i.e., hogere stabiliteit in het geval van de Diepe put van Hansweert).

Tot slot laten simulaties met stortingen in de Diepe put van Hansweert met verschillende korrelgroottes een lichte gevoeligheid zien voor de sedimentdiameter van het gestorte materiaal. Het implementeren van een meer gedetailleerde schematisering van de sedimentdiameters in en rondom de stortzones, bijvoorbeeld door het gebruiken van meerdere sedimentfracties, zou dus kunnen leiden tot een verbetering van de gemodelleerde stortstabiliteit en morfologische impact. Ook een kalibratie is in dit opzicht mogelijk.

Bovendien verschilt de omvang van de sedimentstortingen in het model van de omvang van de werkelijke (proef)stortingen. De schematisering van de éénmalige stortingen in het model verschilt ook van de werkelijke praktijk waarbij stortingen verspreid over het jaar plaatsvinden. De berekende stortstabiliteit kan daarom niet één op één gevalideerd worden aan de gemeten stortstabiliteit. Bovendien kan bij een grotere en instantaan uitgevoerde storting zoals in de modelscenario's de impact op lokale stromingspatronen, en dus op de sedimentatie en erosie in de omgeving, groter zijn dan temporeel gespreide stortingen. Voor de Diepe put van Hansweert liet een simulatie met een temporeel gespreide storting zien dat de stabiliteit hierdoor hoger ligt dan bij een éénmalige grote storting. De sedimentatie- en erosiepatronen in en rondom het stortvak werden echter nauwelijks beïnvloedt.

5.3 Aanbevelingen

In algemene zin kan geconcludeerd worden dat de interactie van de stortingen met de autonome morfologische ontwikkeling in het gebied rond de stortzones invloed heeft op de uiteindelijke morfologische impact die de stortingen hebben. Derhalve lijkt het aangewezen de stortstrategieën door te rekenen met een morfologisch actieve sedimentbodem, aangezien dit meer realistische resultaten oplevert. Door voorafgaand aan de storting een morfologische inspeeltijd te implementeren kan de invloed van de sterke initiële respons op de modelresultaten vermeden worden (Roelvink et al., 2011).

In dat kader is het ook van belang over adequate datasets van morfologische veranderingen zo kort als mogelijk na sedimentstortingen te beschikken. Daarmee kan de geobserveerde stortstabiliteit nauwkeuriger worden bepaald en kan de morfologische impact op basis van verschilkaarten worden geanalyseerd. Bovendien kunnen de morfologische modelresultaten hieraan getoetst worden. Datasets van frequente peilingen kort na een storting laten ook een modelverbetering door middel van kalibratie toe.

6 Referenties

- Cornet, E.; Mostaert, F.** (2010). Hydrologisch jaarboek 2009: HIC meetstations. Versie 1.0. WL Rapporten, 709_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 244 pp.
- Deltares** (2011). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.
- IMDC** (2019). Vaarwegbeheer 2016-2021. Bestelopdracht 6: Flexibel Storten 2018-2019. Maandrapport februari 2019. I/RA/11498/19.035/EKR/.
- IMDC** (2015). Monitoringprogramma Flexibel Storten. Deelopdracht 5: Analyse van de stortingen in de diepe delen van de hoofdgeul - jaarrapport 2014. I/RA/11353/15.031/THL/.
- Lesser, G. R.** (2009). An approach to medium-term coastal morphological modelling. UNESCO-IHE, Institute for Water Education. Doctoral thesis.
- Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2009). LTV O&M thema Veiligheid - Deelproject 1: Verbetering hydrodynamisch NeVla model ten behoeve van scenario-analyse. WL Rapporten, 756_05. Flanders Hydraulics Research & Deltares: Antwerp, Belgium.
- Meire, D.; Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Agenda voor de Toekomst: Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 2 – Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties in de Westerschelde. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Plancke, Y.; Wouters, K.; Meire, D.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Agenda voor de toekomst – Stroming en sedimenttransport op de mesoschaal in het Schelde-estuarium: Deelrapport 5 – Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van stortingen. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Roelvink, J. A.; Reniers, A. J. H. M. Eds.** (2011). A guide to modeling coastal morphology. Advances in Coastal and Ocean Engineering - Vol. 12, World Scientific.
- Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Integraal Plan Bovenzeeschelde: Subreport 1 – Scaldis: a 3D Hydrodynamic Model for the Scheldt Estuary. Version 5.0. WL Rapporten, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- Stark, J.; De Maerschalk, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 7 – Resultaten lange termijn morfologische simulaties. Versie 1.0. WL Rapporten, 17_088_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Stark, J.; De Maerschalk, B. Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 3 – Modelleren van hydro- en morfodynamische processen in de Westerschelde met Telemac: Scenario's in het kader van gevoeligheidsanalyse numeriek model. Versie 1.0. WL Rapporten, 17_088_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschalk, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2019). Morfologie mesoschaal – numerieke modellering drempels: Deelrapport 7 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model. Versie 3.0. WL Rapporten, 14_024_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Van Dijk, W. M.; Mastbergen, D. R.; van den Ham, G. A.; Leuven, J. R. F. W.; Kleinhans, M. G.** (2018). Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43: 2342–2357. doi:10.1002/esp.4395.
- Vandebroek, E.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Hydrodynamics and Sediment Dynamics at the mouth of the Schelde Estuary: Factual data report for frame- measurements at Drempel van Hansweert in May/June 2016. Version 1.0. WL Rapporten, 00_128. Flanders Hydraulics Research, Antea Group & VUB: Antwerp, Belgium.

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