



Vlaanderen
is wetenschap



17_088_24
WL rapporten

Agenda v/d Toekomst **Sedimenttransport op verschillende tijdschalen**

Deelrapport 24
Stortscenario's met Delft3D slibmodel

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Deelrapport 24 – Stortscenario's met Delft3D slibmodel

Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y.

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 2022
D/2022/3241/128

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y. (2022). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 24 – Stortscenario's met Delft3D slibmodel. Versie 3.0. WL Rapporten, 17_088_24. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2022R17_088_24
Trefwoorden (3-5):	Numerieke modellering, Delft3D, slib, ETM, Schelde-estuarium		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en Sediment > Sediment > Cohesief sediment > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	29	Bijlagen (p.):	3
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	
	☐ Ja	Vrijgegeven vanaf:	-
		Uitzondering:	☐ Vlaamse overheid

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Smolders, S.	Getekend door: Sven Smolders (Signature) Getekend op: 2022-06-27 13:39:27 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Sven Smolders</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2022-06-28 09:31:33 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2022-06-26 19:21:33 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	---------------	---



Abstract

Het onderzoeksproject 'Sedimenttransport op verschillende tijdschalen' tracht de inzichten in de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op verschillende ruimtelijke- en tijdsschalen te verbeteren. Het onderzoek kadert binnen thema 7 uit de Agenda van de Toekomst (AvdT): "Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie". Deze studie voorziet onder andere in de complexe modellering van de seizoenale variatie van sedimentconcentraties in het Schelde-estuarium. Hiervoor werd in Deelrapport 23 een slibtransportmodel in Delft3D-NeVla gepresenteerd. Ter aanvulling op het gevoeligheidsonderzoek in Deelrapport 23 wordt binnen dit rapport het effect van sedimentstortingen in het gebied tussen Bath en Oosterweel op de ruimtelijke verdeling van slibconcentraties in het estuarium onderzocht middels een scenario-analyse. Hierbij ligt de focus op het verschil in impact van slibstortingen op afwaartse en opwaartse stortlocaties en op de interactie tussen de slibstortingen, het estuarien turbiditeitsmaximum (ETM) en de bovenafvoer. De periodieke slibstortingen worden als puntbron van slibhoudend water in de vaargeul geïmplementeerd. Uit de scenario-analyse volgt dat slibstortingen in de meer opwaarts gelegen stortlocaties Oosterweel en Punt van Melsele tot veel hogere sedimentconcentraties in de Beneden-Zeeschelde leiden dan sedimentstortingen in de afwaarts gelegen stortlocaties in de Bocht van Bath. Hetzelfde geldt voor de accumulatie van slib in de luwe zones zoals toegangsgeulen naar sluizen of het Deurganckdok. In de Westerschelde zijn de sedimentconcentraties en accumulatie van gestort slib juist lager voor de scenario's met de opwaartse stortlocaties. Voor de simulatieduur van enkele springtij-doodtij-cycli hebben slibstortingen tussen Bath en Oosterweel geen invloed op de ligging of sterkte van het ETM in de Boven-Zeeschelde. De invloed van de bovenafvoer op de sedimentconcentraties en de verspreiding van slib in het estuarium is gelijkaardig voor modelsimulaties mét en zonder stortingen. Dat betekent dat er bij een toename van de bovenafvoer een afwaartse verschuiving en afvlakking van het ETM in de Boven-Zeeschelde plaatsvinden die gepaard gaan met een toename van slibconcentraties in de Beneden-Zeeschelde en in de Westerschelde.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Doelstelling.....	1
1.3 Bestaand onderzoek.....	2
2 Data analyse	3
2.1 Halftij-eb vaarten.....	3
2.2 Bagger- en stortactiviteiten in de Beneden-Zeeschelde	4
3 Modelbeschrijving	6
3.1 Het Delft3D-Nevla model	6
3.2 Modelrooster.....	6
3.3 Randvoorwaarden	7
3.4 Bathymetrische gegevens.....	8
3.5 Sedimenttransport	9
3.6 Beschrijving modelscenario's	11
4 Modelresultaten	13
4.1 Referentiesimulatie met basisinstellingen	13
4.2 Simulaties met sedimentstortingen	15
4.3 Invloed bovenafvoer Zeeschelde.....	21
5 Conclusies	26
5.1 Aanbevelingen	27
Referenties	28
Bijlage A – Figuren sedimentverspreiding	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).	8
Tabel 2 – Basisinstellingen sedimenteigenschappen.	10
Tabel 3 – Overzicht modelscenario's.....	11
Tabel 4 – Toename depositie in TDS voor specifieke sedimentatiezones als gevolg van stortscenario's.	21

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht SSC nabij wateroppervlak langsheen estuarium HTE-vaart	3
Figuur 2 – Overzicht jaarlijkse baggerhoeveelheden per baggerlocatie	4
Figuur 3 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per locatie voor slibstortingen	5
Figuur 4 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per locatie voor zandstortingen	5
Figuur 5 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster	7
Figuur 6 – Opgelegd getij aan de afwaartse rand	7
Figuur 7 – Dikte initiële sedimentlaag in Zeeschelde	10
Figuur 8 – Stortlocaties in scenario-analyse	12
Figuur 9 – Ontwikkeling in getij-gemiddelde SSC gedurende de 45 dagen van de basissimulatie.	14
Figuur 10 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor de basissimulatie.	14
Figuur 11 – Sedimentverspreiding Zeeschelde in referentiesimulatie (SC501).	15
Figuur 12 – Getij-gemiddelde ruimtelijke SSC-verdeling langsheen het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus na afloop van de stortperiode (Dag 45) voor de vier stortscenario's (SC502-505) en de referentierun (SC501).	17
Figuur 13 – Procentuele verandering in getij-gemiddelde SSC-verdeling langsheen het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus na afloop van de stortperiode (Dag 45) voor de vier stortscenario's (SC502-505) ten opzichte van de referentierun (SC501)	17
Figuur 14 – Temporele SSC-ontwikkeling gedurende de 45-dagen durende simulatie voor de verschillende stortscenario's (SC502-505) en de referentierun (SC501) ter hoogte van Bath, Boei 84, Boei 97, Oosterweel en Driegoten.	18
Figuur 15 – Temporele SSC-variatie voor één tij-cyclus op Dag 30 (laatste stortperiode) voor de verschillende stortscenario's (SC502-505) en de referentierun (SC501) ter hoogte van Bath, Boei 84, Boei 97, Oosterweel en Driegoten.	19
Figuur 16 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus voor simulaties met een lage afvoer van 7,4 m ³ /s (SC501) en met hoge afvoer van 100 m ³ /s (SC511).	22
Figuur 17 – Procentuele verandering in getij-gemiddelde SSC langsheen het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (Dag 45) voor scenario SC511 (hoge bovenafvoer) ten opzichte van SC501 (lage bovenafvoer).	22
Figuur 18 – Getij-gemiddelde SSC-verdeling voor modelscenario's met stortingen in Oosterweel (SC502/512) of SH61 (SC503/513) direct na de stortperiode (dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (dag 45) bij lage bovenafvoer (SC502/503) en hoge bovenafvoer (SC512/513).	23
Figuur 19 – Procentuele verandering in getij-gemiddelde SSC langsheen het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (Dag 45) voor stortscenario's SC512 en SC513 ten opzichte van run SC511 zonder stortingen.	24
Figuur 20 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in Oosterweel (SC502) t.o.v. referentiesimulatie (SC501)	B1

Figuur 21 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in SH61 (SC503) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).....	B1
Figuur 22 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in Punt van Melsele (SC504) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).....	B2
Figuur 23 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in Nauw van Bath / Appelzak (SC505) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).	B2
Figuur 24 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van toename bovendebiet bij stortscenario Oosterweel (SC512 t.o.v. SC502).....	B3
Figuur 25 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van toename bovendebiet bij stortscenario SH61 (SC513 t.o.v. SC503).	B3

1 Inleiding

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 geïdealiseerde en complexe numerieke modellen ingezet om de seizoenale variatie van sedimentconcentraties in het Schelde-estuarium te onderzoeken. Naast het Telemac-3D model Scadis, dat door Smolders *et al.* (in voorbereiding) wordt toegepast, kan eveneens gebruik worden gemaakt van het Delft3D-NeVla model om slibtransport te simuleren (Stark *et al.*, 2022). Voor beide modellen werd daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Een sedimenttransportmodel van het Schelde-estuarium moet in de eerste plaats de grootschalige transportprocessen in een estuarium kunnen reproduceren. Zo moet een slibtransportmodel in staat zijn om het estuarien turbiditeitsmaximum (ETM) dat in het Schelde estuarium wordt geobserveerd en de seizoenale verschuivingen die dit ETM ondergaat, te reproduceren. Het Delft3D slibtransportmodel is daar deels toe in staat (Stark *et al.*, 2022). De invloed van variaties in bovenafvoer op de locatie van het ETM wordt kwalitatief gereproduceerd. Er is tot nu toe echter nog geen sprake van een stabiel ETM omdat er door het netto afwaarts gerichte residueel transport in de modelsimulaties sprake is van een geleidelijk afnemend sedimentvolume in de Zeeschelde. Ook accumuleert het sediment in luwe zones zoals getijdendokken en sluizen. In de dagelijkse praktijk wordt dit sediment gebaggerd en teruggestort op verschillende stortlocaties in de Beneden-Zeeschelde.

Naast de variatie op middellange schaal (seizoenen), is er ook sprake van variaties op korte tijdschalen (individuele getijcyclus tot enkele springtij-doodtij-cycli). Deze variaties worden tevens beïnvloed door het terugstorten van gebaggerde specie. De effecten van dergelijke slibstortingen op de ruimtelijke verdeling van sedimentconcentraties en verspreiding van sediment worden binnen dit rapport onderzocht met behulp van het in dit project verder ontwikkelde slibtransportmodel in Delft3D-NeVla.

1.2 Doelstelling

In dit rapport wordt onderzocht wat het effect is van slibstortingen op de ruimtelijke variatie van sedimentconcentraties in het estuarium. Hiervoor worden enkele stortscenario's uitgevoerd waarin slibstortingen op een aantal opwaartse stortlocaties (in de Beneden-Zeeschelde) en afwaartse stortlocaties (in de Westerschelde) worden geïmplementeerd. Het effect van een stortperiode op de spatio-temporele evolutie van sedimentconcentraties, waaronder de ligging en sterkte van het ETM in de Boven-Zeeschelde, wordt vervolgens geanalyseerd. Ook wordt de additionele accumulatie van slib op verschillende luwe zones gekwantificeerd. Hierbij ligt de focus op het verschil in impact van slibstortingen op afwaartse en opwaartse stortlocaties.

1.3 Bestaand onderzoek

Eerder werd door Coen *et al.* (2016) in het kader van de AvdT-studie “*Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde*” al een gelijkaardig scenario-onderzoek uitgevoerd naar het effect van slibstortingen op sedimentconcentraties in de Beneden-Zeeschelde. Hierbij werd echter gebruik gemaakt van een uitgeknipt en verfijnd modelrooster (i.e., rooster van Hansweert tot Tielrode), waardoor de interactie van slibstortingen met het ETM buiten beschouwing werd gelaten. De stortingen werden bijvoorbeeld geïmplementeerd in een initiële situatie zonder aanwezigheid van dat ETM. De focus lag daarom op het lokale effect van de stortingen op de korte termijn (uren tot enkele dagen), dat redelijk door het model werd gereproduceerd. In het kader van dit onderzoek werd het NeVla-detailmodel eerst uitvoerig gekalibreerd op basis van verschillende beschikbare SSC-metingen. Uiteindelijk werden enkele realistische stortscenario's doorgerekend, waarin o.a. rekening werd gehouden met vaartijden tussen de bagger- en stortlocaties of met de fasering van het getij (i.e., opwaarts storten tijdens vloed en afwaarts storten tijdens eb). Uit de scenario-analyse door Coen *et al.* (2016) bleek dat meer afwaarts storten zorgt voor een verhoging van de sedimentconcentraties in het afwaartse deel en een verlaging in het opwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde. Hierbij was de absolute toename in sedimentconcentraties afwaarts kleiner dan de absolute afname opwaarts. Relatief gezien is dit echter omgekeerd: de relatieve toename in sedimentconcentraties is afwaarts groter dan de relatieve afname opwaarts. Dit kan verklaard worden door de hogere autonome concentraties in het opwaartse deel.

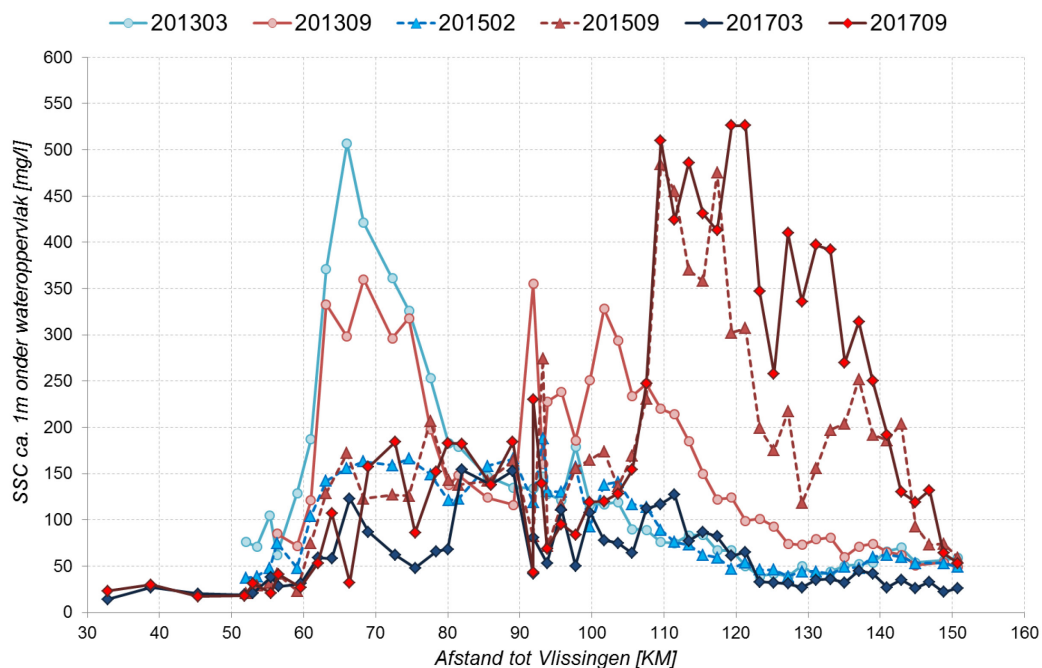
2 Data analyse

De sedimentconcentratie in het Schelde-estuarium varieert op verschillende tijd- en ruimteschalen. In Deelrapport 1 van deze studie wordt een overzicht gegeven van de bekende ruimtelijke en temporele variaties in gesuspendeerd sedimentconcentraties (SSC) langsheen het Schelde estuarium (Plancke *et al.*, in voorbereiding).

2.1 Halftij-eb vaarten

Figuur 1 geeft de ruimtelijke verdeling in SSC weer zoals tijdens verschillende halftij-eb (HTE) vaarten werd geobserveerd. Tijdens de zomerse HTE-vaarten worden pieken in sedimentconcentraties waargenomen tussen KM-100 en KM-140 van Vlissingen, afhankelijk van het jaar. De geobserveerde maximale sedimentconcentraties variëren daar tussen 350 mg/L en 550 mg/L. Tijdens de winterse HTE-vaarten is geen sprake van een dergelijke piek. De maximale SSC-waarden van 150-200 mg/L worden dan geobserveerd tussen KM-60 en KM-100. In de twee vaarten van 2013 is daarnaast ook sprake van een duidelijke SSC-piek rond KM-70 met SSC-waarden van resp. 350 mg/L en 500 mg/L voor de zomerse en winterse meting, wat mogelijks kan toegeschreven aan de stortingen van onderhoudsbaggerspecie (slib) op deze locatie.

Verschillen in omgevingscondities tussen een zomer- en wintertoestand zijn bijvoorbeeld variaties in bovenafvoer (i.e., hoger in winter dan in zomer) en biologische factoren waaronder algengroei. In het kader van dit AvdT-project “*Sedimenttransport op verschillende tijdschalen*” wordt onder andere de invloed van bovenafvoer op SSC-waarden in het estuarium modelmatig onderzocht.

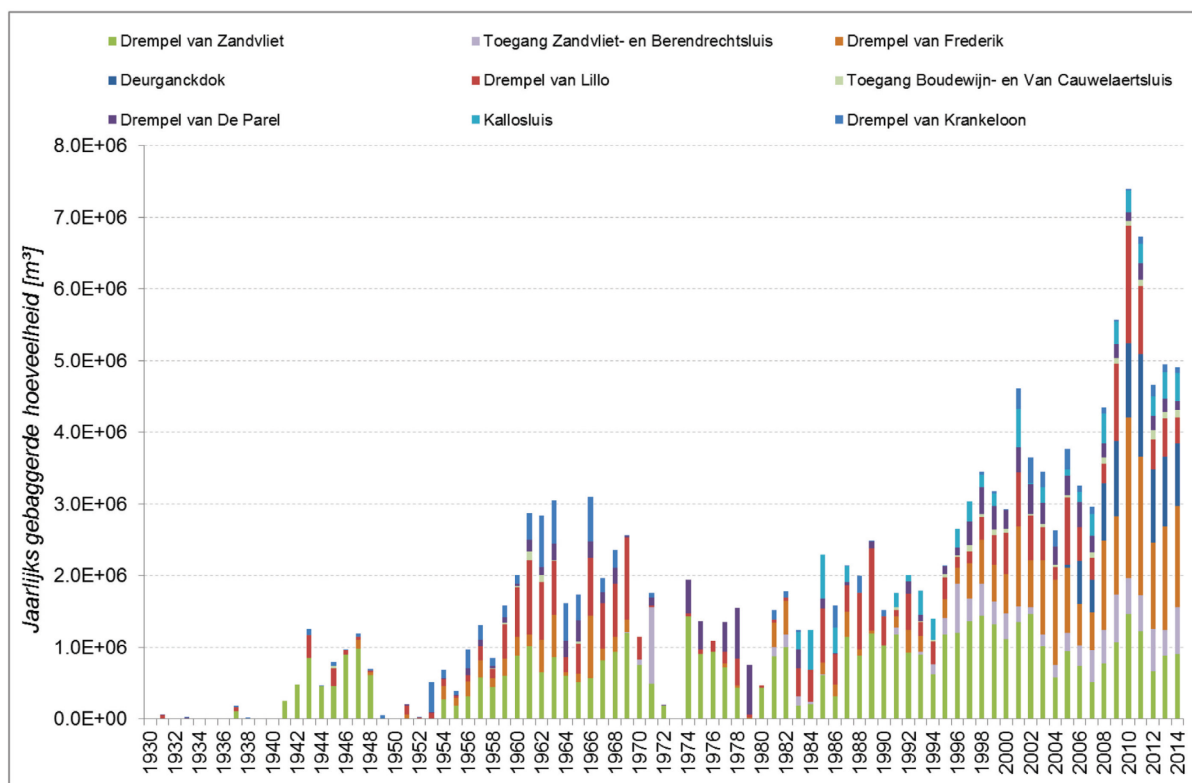


Figuur 1 – Overzicht SSC nabij wateroppervlak langsheen estuarium HTE-vaart

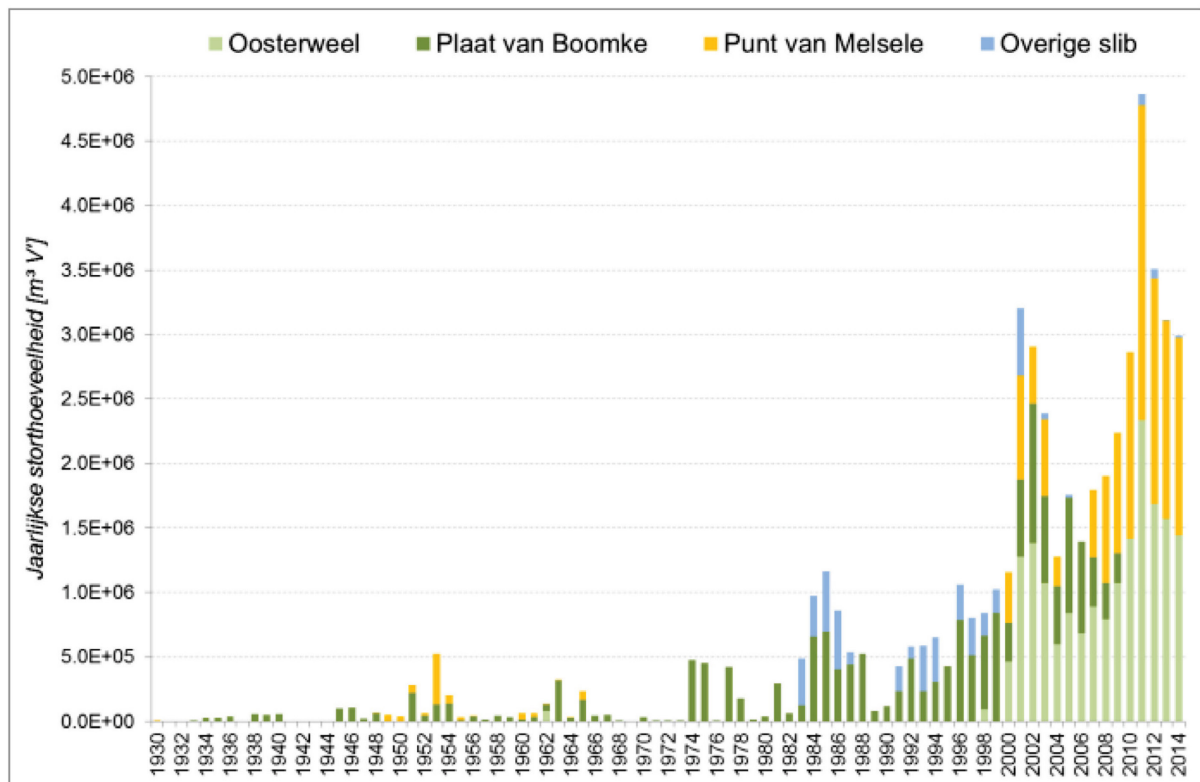
2.2 Bagger- en stortactiviteiten in de Beneden-Zeeschelde

In de Beneden-Zeeschelde wordt zowel zanderige als slibrijke specie gebaggerd om de toegankelijkheid tot de haven van Antwerpen te kunnen garanderen. Deze baggerspecie wordt zowel in de vaargeul, in het Deurganckdok als in de verschillende toegangsgeulen tot de sluizen gebaggerd. Het gebaggerde sediment wordt weer teruggestort in de Beneden-Zeeschelde. De stortlocaties kunnen onderverdeeld worden volgens type sediment dat er teruggestort wordt: in de Schaar van Ouden Doel wordt zanderige specie teruggestort, terwijl meer opwaarts ter hoogte van Punt van Melsele en Oosterweel slibrijke specie wordt teruggestort. Sinds het ingaan van de vigerende stortvergunning zijn er daarnaast ook stortzones aanwezig ter hoogte van de diepe delen in de vaargeul ter hoogte van Kallosluis (zanderige specie) en Boudewijn en Van Cauwelaertsluis (i.e., Ketelputten, slibrijke specie).

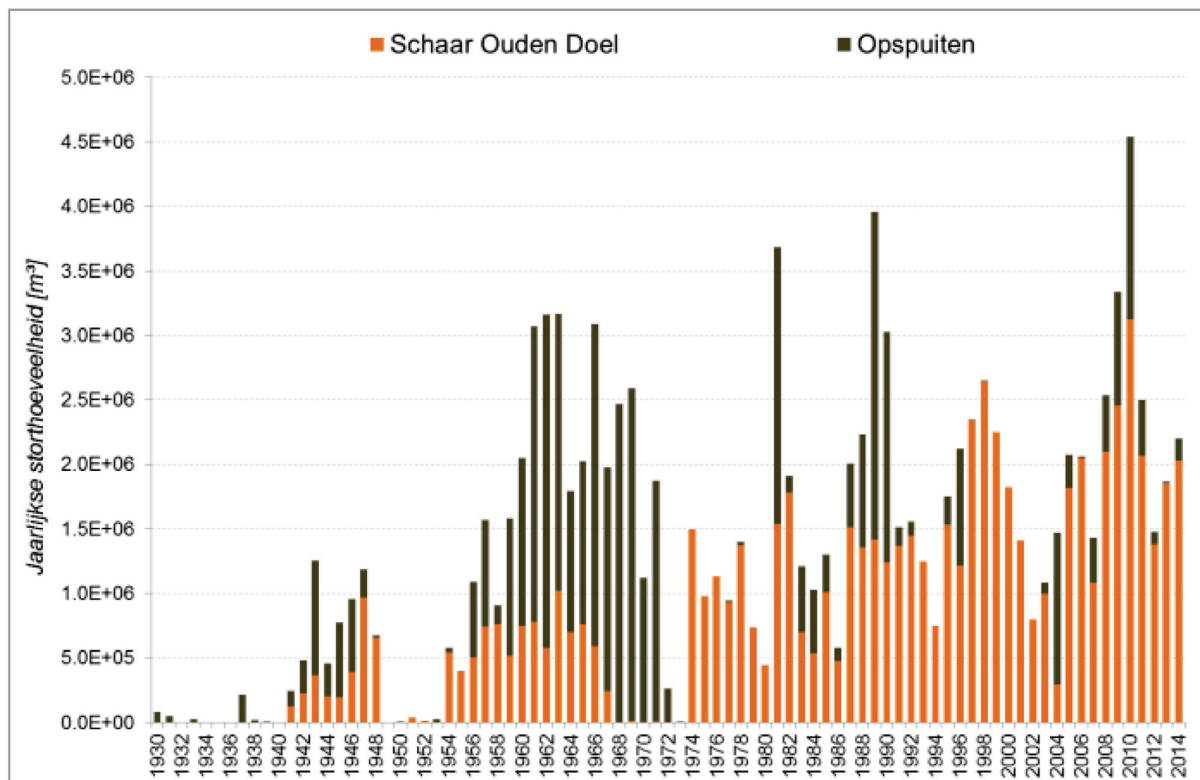
In het kader van de AvdT-studie "*Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde*" werd door Coen *et al.* (2016) een analyse van de bagger- en stortactiviteiten in de Beneden-Zeeschelde over de periode 1930-2014 gepresenteerd. Figuur 2 geeft de jaarlijkse baggerhoeveelheden per baggerlocatie weer, terwijl Figuur 3 de jaarlijkse storthoeveelheden (i.e., gereduceerde volumes) voor de slibstortingen weergeeft (bron: "baggerstatistiek"). Ter volledigheid worden in Figuur 4 de jaarlijkse storthoeveelheden voor zand getoond. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de commerciële sedimentonttrekking die plaatsvindt in de Schaar van Ouden Doel niet in de analyse door Coen *et al.* (2016) is meegenomen. Voor 1950 bleef de jaarlijkse baggerhoeveelheid beperkt (maximaal 1 Mm³ beunvolume zand per jaar). Na de eerste verruiming in de jaren 1960 nam het onderhoudsvolume op Vlaams grondgebied toe tot 1,0-1,5 Mm³ beun-volume zand per jaar en 0,5-1,0 Mm³ slib per jaar. Na de tweede verruiming eind jaren 1990 steeg het onderhoudsvolume verder met een piek in 2011 die toe te schrijven is aan de derde verruiming van de vaargeul en het op diepte brengen van het Deurganckdok. Na die periode was het de jaarlijkse baggerhoeveelheid ongeveer 1,5-2,5 Mm³ zand per jaar en 3,0-3,5 Mm³ slib per jaar.



Figuur 2 – Overzicht jaarlijkse baggerhoeveelheden per baggerlocatie (uit: Coen et al., 2016).



Figuur 3 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per locatie voor slibstortingen (uit: Coen *et al.*, 2016).



Figuur 4 – Overzicht jaarlijkse storthoeveelheden per locatie voor zandstortingen (uit: Coen *et al.*, 2016).

3 Modelbeschrijving

3.1 Het Delft3D-Nevla model

Een van de modellen van het Schelde-estuarium die beschikbaar zijn voor dit onderzoek is het tweedimensionale 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. Gedetailleerde informatie over de Delft3D software is beschikbaar in de Delft3D-FLOW user manual (Deltares, 2016a).

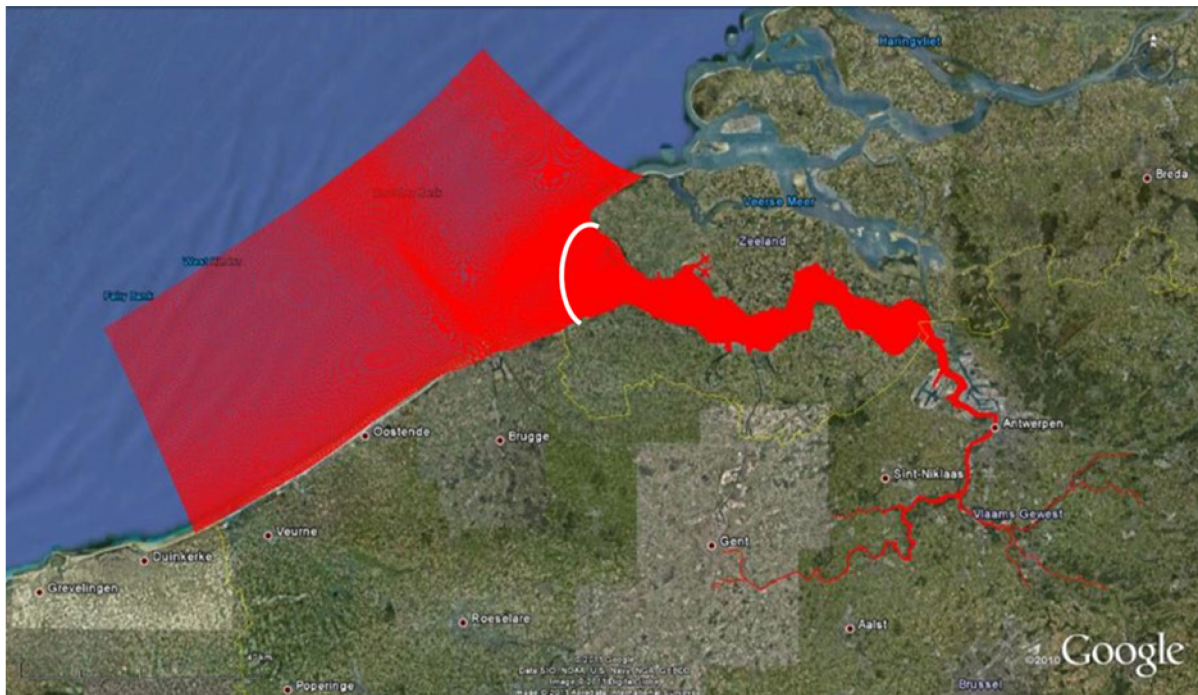
In Deelrapport 23 (Stark *et al.*, 2022) werd een gevoeligheidsanalyse met dit model uitgevoerd naar de invloed van sedimentkarakteristieken, simulatieperiode, bovenafvoer, golfeffecten en saliniteit op de ruimtelijke verdeling van sedimentconcentraties en de stabiliteit van het gemodelleerde ETM. Bovendien werden door Coen *et al.* (2016) in een studie in het kader van de sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde eerder modeloefeningen uitgevoerd waarin slibstoringen in een verkorte versie (Hansweert tot Durmemonding) van het Delft3D-NeVla model werden geïmplementeerd.

In het huidige rapport worden met het originele Delft3D-NeVla model wederom stortscenario's uitgevoerd, waarbij de nadruk in de analyse zal liggen op effecten voor de ruimtelijke en temporele variatie van sedimentconcentraties in de Beneden-Zeeschelde.

De volgende paragrafen geven een beknopt overzicht van de modelopzet en enkele modelinstellingen gerelateerd aan het sedimenttransportmodel. Een meer gedetailleerd overzicht van de algemene modelinstellingen, o.a. met betrekking tot bodemruwheid, saliniteit, is beschikbaar in Deelrapport 23 (Stark *et al.*, 2022).

3.2 Modelrooster

Het NeVla-rooster omvat het volledige Schelde-estuarium van de Noordzee, de Vlakte van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de tijgebonden zijrivieren (Figuur 5). De afwaartse rand van het NeVla-model is gelegen in de Noordzee, de opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied. De resolutie van het rekenrooster varieert van ongeveer 400 m op de Noordzee en neemt geleidelijk af tot ongeveer 30 meter in de buurt van Schelle. Voor de huidige analyse wordt het model beperkt tot het estuarium door het rooster af te knippen ter hoogte van Westkapelle - Cadzand (zie Figuur 5).

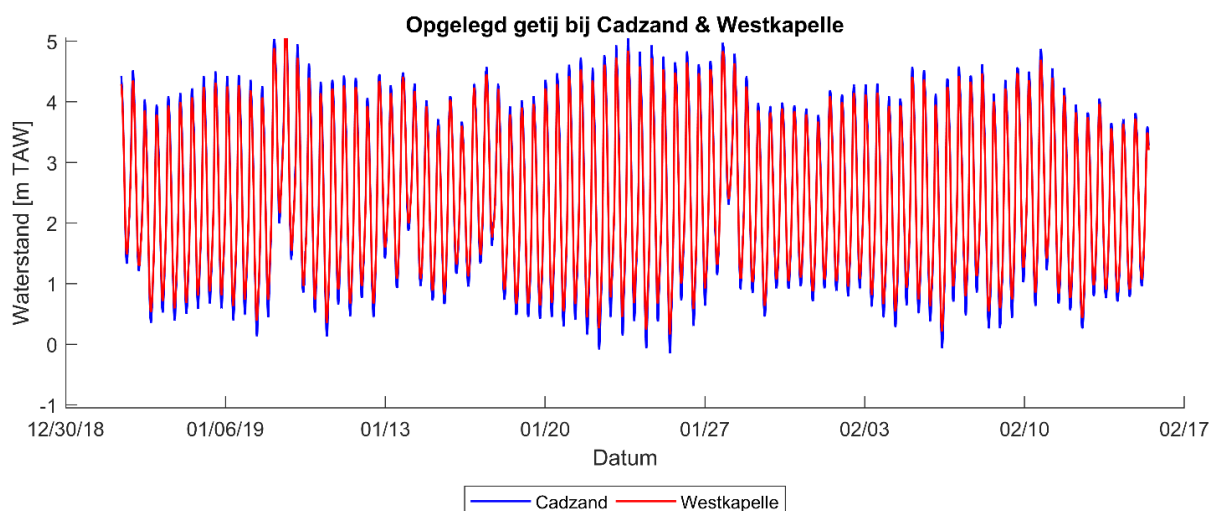


Figuur 5 – Illustratie van het Delft3D-Nevla rooster

3.3 Randvoorwaarden

Afwaartse randvoorwaarden

Aan de afwaartse rand worden gemeten waterstanden van Westkapelle en Cadzand opgelegd voor de periode 1-1-2019 tot 15-2-2019 (Figuur 6). De simulatieperiode bedraagt 45 dagen.



Figuur 6 – Opgelegd getij aan de afwaartse rand.

In overeenstemming met bevindingen van Vanlede *et al.* (2009) en Maximova *et al.* (2009) wordt een faseverschuiving van +10 minuten toegepast op de gemeten waterstanden te Cadzand. Deze correctie is noodzakelijk in verband met een locatieverschil van ongeveer 5200 m tussen het werkelijke meetpunt Cadzand en de afwaartse rand van de modellen waar de in Cadzand gemeten waterstanden worden opgelegd.

Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse randen (i.e., Boven-Zeeschelde en getij-gebonden zijrivieren) worden onderstaande debieten opgelegd (Tabel 1). De gekozen waarden kunnen als illustratief voor een zomerconditie (i.e., relatief droog seizoen) worden beschouwd. In enkele simulaties wordt het bovendebiet van de Boven-Zeeschelde significant verhoogd om het gecombineerde invloed van bovenafvoer en sedimentstortingen op de ruimtelijke verdeling van SSC te onderzoeken.

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).

Locatie	Debiet [m ³ /s]	SSC [kg/m ³]
Boven-Zeeschelde	7,4	0,05
Dender	6,1	0,05
Zenne	6,5	0,05
Dijle	7,4	0,05
Grote Nete	4,6	0,02
Kleine Nete	3,6	0,02
Kanaal Gent-Terneuzen	31,1	0,0

Randvoorwaarden sedimenttransport

In het Delft3D-NeVla model is het sedimenttransportmodel aan de afwaartse rand tussen Cadzand en Westkapelle open voor sediment. Er is aan de afwaartse rand een referentieconcentratie van 0,03 kg/m³ opgelegd.

Aan de opwaartse debietranden zijn verschillende sedimentconcentraties opgelegd (zie Tabel 1).

3.4 Bathymetrische gegevens

De bathymetrische data in het studiegebied is identiek aan de bathymetrische data die is gebruikt voor het eerder gekalibreerde Delft3D-NeVla model in het kader van de afregeling van het 2D NeVla randvoorwaardenmodel (Vanlede *et al.*, 2009). Dit houdt meer specifiek in dat bathymetrische gegevens uit het jaar 2011 zijn gebruikt.

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

3.5 Sedimenttransport

Voor de berekening van het slibtransport wordt gebruik gemaakt van de Partheniades-Krone formuleringen (Partheniades, 1965) om de erosie en depositie van sediment [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] te berekenen. De erosieflux wordt berekend als:

$$E = M_E S_{ero}(\tau, \tau_{kr,e})$$

waarin:

- E de erosieflux [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- M_E een erosie-parameter die als modelinvoer ingegeven wordt [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- $S_{ero}(\tau, \tau_{kr,e})$ een sprongfunctie die als volgt is gedefinieerd:

$$S_{ero}(\tau, \tau_{kr,e}) = \begin{cases} 0 & \text{als } \tau \leq \tau_{kr,e} \\ \left(\frac{\tau}{\tau_{kr,e}} - 1\right) & \text{als } \tau > \tau_{kr,e} \end{cases}$$

- τ de door het model berekende bodemschuifspanning door stroming (en golven) [N m^{-2}]
- $\tau_{kr,e}$ de kritische bodemschuifspanning voor erosie die als modelinvoer ingegeven wordt [N m^{-2}]

Voor de depositie van cohesief sediment is de formulering gelijkaardig:

$$D = \omega_s c_b S_{dep}(\tau, \tau_{kr,d})$$

waarin:

- D de depositieflux [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- ω_s de valsnelheid van het sediment [m s^{-1}]
- c_b een referentie sedimentconcentratie nabij de bodem [kg m^{-3}]
- $S_{dep}(\tau, \tau_{kr,d})$ een sprongfunctie die als volgt is gedefinieerd:

$$S_{dep}(\tau, \tau_{kr,d}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{kr,d}}\right) & \text{als } \tau < \tau_{kr,d} \\ 0 & \text{als } \tau \geq \tau_{kr,d} \end{cases}$$

- τ de door het model berekende bodemschuifspanning door stroming (en/of golven) [N m^{-2}]
- $\tau_{kr,d}$ de kritische bodemschuifspanning voor depositie die als modelinvoer ingegeven wordt [N m^{-2}]

Sedimenteigenschappen

De invoerwaarden en modelconfiguratie voor de sedimenteigenschappen worden in Tabel 2 opgesomd. In het kader van de door Stark *et al.* (2022) uitgevoerde gevoeligheidsanalyse werden de sedimenteigenschappen gevarieerd en werd de invloed van variaties ervan geanalyseerd. Voor de huidige set aan modelscenario's worden de sedimenteigenschappen constant gehouden.

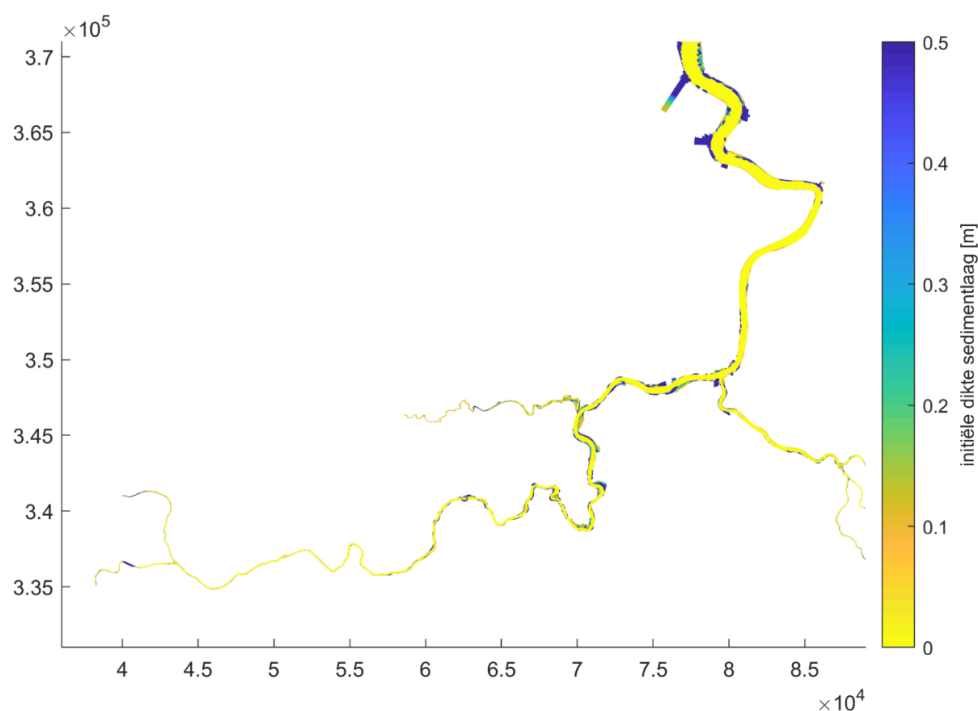
Tabel 2 – Basisinstellingen sedimenteigenschappen.

Parameter	Waarde
Reference density for hindered settling calculations	$c_{ref} = 1600 \text{ kg/m}^3$
Option for determining suspended sediment diameter	$lop_{Sus} = 0$ (i.e., Van Rijn, 1993 method)
Sediment type	Mud
Specific density of sediment fraction	$P_{sol} = 2650 \text{ kg/m}^3$
Settling velocity	$\omega_s = 0,2 \text{ mm/s}$
Critical bed shear stress for sedimentation	$\tau_{kr,d} = 1000 \text{ N/m}^2$
Critical bed shear stress for erosion	$\tau_{kr,e} = 0,2 \text{ N/m}^2$
Erosion Parameter	$M_E = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$
Dry bed density	$CDryB = 550 \text{ kg/m}^3$

Beschikbaarheid sediment op de bodem

Er wordt in de modelsimulaties gebruik gemaakt van een harde laag en gelimiteerde hoeveelheid beschikbaar sediment (i.e., variabele initiële dikte van de sedimentlaag). De ruimtelijke verdeling van de sedimentlaag wordt verkregen door een simulatie van 45 dagen met de basisinstellingen uit te voeren (i.e., zoals in Deelrapport 23 beschreven wordt). Bij deze initiële sedimentverdeling is het meeste sediment aanwezig in luwe zones zoals intergetijdengebieden en getijdendokken. Er is daarentegen nauwelijks sediment in de geulen aanwezig.

De initiële dikte van de sedimentlaag in de Westerschelde is op 0 m gesteld, i.e. de bodem in de Westerschelde ligt vast. Uit testsimulaties voor de gevoeligheidsanalyse door Stark *et al.* (2022) blijkt namelijk dat nabij de afwaartse rand onrealistische resultaten worden verkregen als ook in het afwaartse deel van de Westerschelde een initiële sliblaag wordt opgelegd.



Figuur 7 – Dikte initiële sedimentlaag in Zeeschelde.

3.6 Beschrijving modelscenario's

Tabel 3 geeft een overzicht van de stortscenario's die zijn uitgevoerd. Simulatie SC501 zonder stortingen wordt als referentierun gebruikt. In runs SC502-SC505 worden stortingen geïmplementeerd op vier verschillende stortlocaties: Oosterweel, SH61, Punt van Melsele en Vaarwater boven Bath. De stortlocaties worden weergegeven in Figuur 8. Per scenario wordt telkens op één locatie gestort, wat afwijkt van de realiteit waar in functie van het moment in de getijcyclus op een bepaalde locatie wordt gestort.

In runs SC511-SC515 worden de voorgaande modelscenario's herhaald met een hoge bovenafvoer in Merelbeke (i.e., 100 m³/s in plaats van 7,4 m³/s).

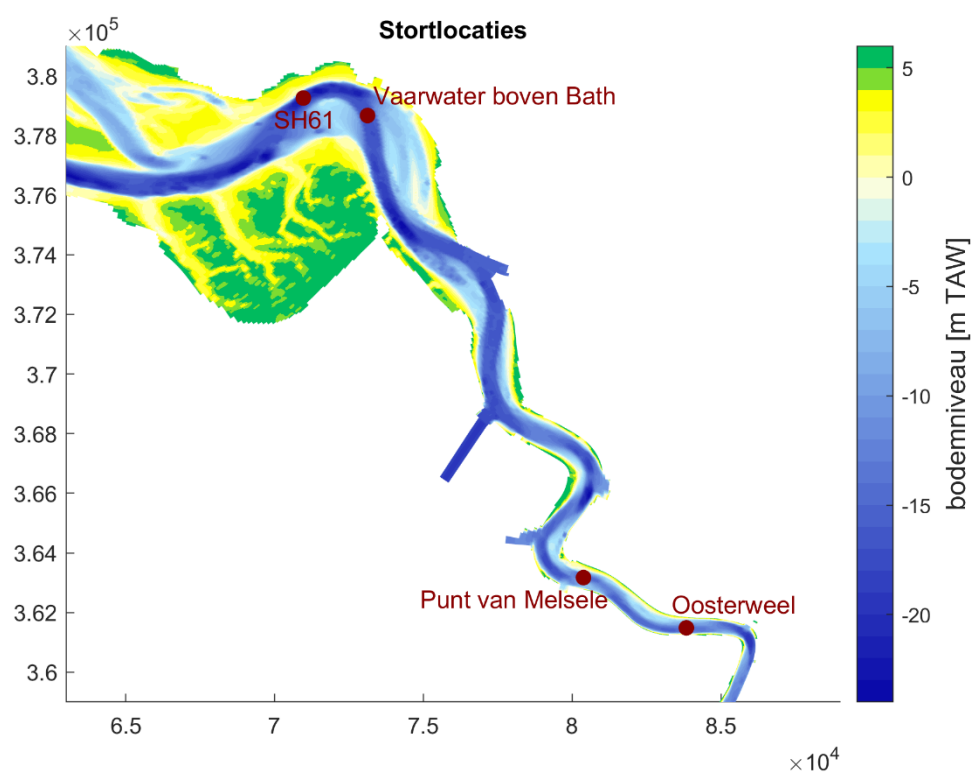
Implementatie sedimentstortingen

De slibstortingen worden op eenzelfde manier geïmplementeerd als in een voorgaande modelstudie naar stortstrategieën in de Beneden-Zeeschelde door Coen *et al.* (2016). Er wordt gebruikt gemaakt van de module 'Operations & Discharges' in de Delft3D software. Hiermee wordt een puntbron van slib-houdend water in de vaargeul aan de modelsimulatie toegevoegd. Omdat er geen sediment gebaggerd wordt in de simulaties heeft deze aanpak als implicatie dat er modelmatig sediment aan het systeem wordt toegevoegd. Enerzijds wordt voor elk scenario evenveel sediment gestort/toegevoegd en anderzijds wordt er aangenomen dat de gekozen simulatieduur kort genoeg is opdat dit geen significant effect op de totale sedimentbalans heeft.

De stortscenario's hebben allemaal een simulatieperiode van 45 dagen en omvatten steeds een inspeelperiode van 15 dagen zonder stortingen, een periode van 15 dagen met stortingen van slib, wederom gevolgd door een periode van 15 dagen zonder stortingen. De stortperiode bestaat steeds uit een opeenvolging van 180 stortingen met een interval van 120 minuten tussen 2 opeenvolgende stortingen, ongeacht de fasering binnen het getij. Bij elke individuele storting wordt eenzelfde hoeveelheid slib gestort: 1216 TDS slib per storting, steeds in een tijdsspanne van 6 minuten. De sedimentflux bij de stortingen bedraagt dus 3,37 TDS/s. Na afloop van de volledige stortperiode bestaande uit 180 stortingen is er een totaal van bijna 220.000 TDS slib gestort. Uitgaande van een $\rho_{\text{slib;droog}}$ van 550 kg/m³ (i.e., *CDryB* in Delft3D) betekent dit een (droog) sedimentvolume van ongeveer 400.000 m³ slib dat wordt toegevoegd in de stortscenario's. Aangezien de geanalyseerde periode eigenlijk 30 dagen bedraagt (15 dagen storten gevolgd door 15 dagen zonder storting) kan deze hoeveelheid als een geschematiseerde maandelijkse storthoeveelheid worden beschouwd (uit Coen *et al.* (2016) kwam voor de periode 2012-2013 een gemiddelde wekelijks storthoeveelheid van ca. 78000 TDS als resultaat); echter, doordat dit op 2 weken gestort wordt, ligt de stortintensiteit ietwat hoger dan het gemiddelde in de realiteit.

Tabel 3 – Overzicht modelscenario's.

Run-id	Stortlocatie	$Q_{\text{Merelbeke}}$
SC501	-	7,4 m ³ /s
SC502	Oosterweel	7,4 m ³ /s
SC503	SH61 / Nauw van Bath	7,4 m ³ /s
SC504	Punt van Melsele	7,4 m ³ /s
SC505	Vaarwater boven Bath / Nauw van Bath	7,4 m ³ /s
SC511	-	100 m ³ /s
SC512	Oosterweel	100 m ³ /s
SC513	SH61 / Nauw van Bath	100 m ³ /s
SC514	Punt van Melsele	100 m ³ /s
SC515	Vaarwater boven Bath / Nauw van Bath	100 m ³ /s



Figuur 8 – Stortlocaties in scenario-analyse.

4 Modelresultaten

4.1 Referentiesimulatie met basisinstellingen

Sedimentconcentraties

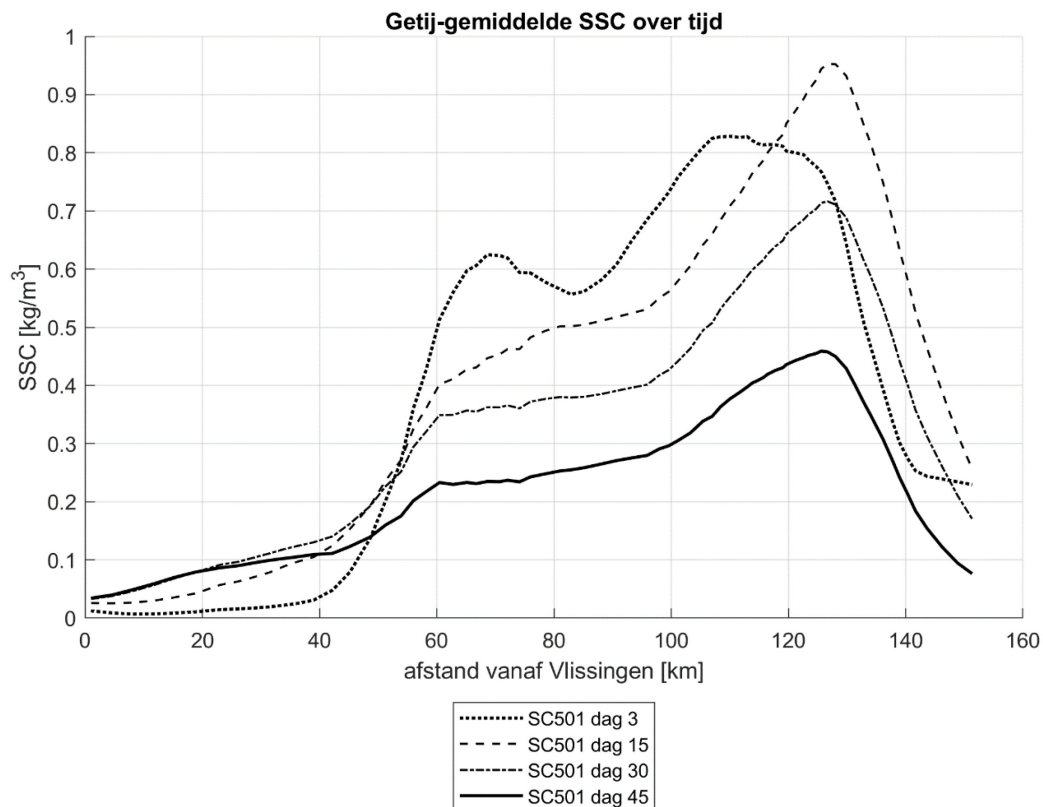
Zoals uit de in Deelrapport 23 (Stark *et al.*, 2022) gepresenteerde gevoeligheidsanalyse bleek, laat de ontwikkeling van de sedimentconcentraties langsheen het estuarium over de 45 dagen durende simulatie een dalende trend zien (Figuur 9). Enkel in de initiële fase van de simulatie (tot dag 15) is er sprake van een lichte toename. Om een vergelijking van de ruimtelijke SSC-verdeling te kunnen maken voor de verschillende scenario's wordt voor de overige scenario's steeds een getij-gemiddelde SSC-verdeling bepaald op dag 30 (i.e., direct na afloop van de stortingen in de scenario's) en op dag 45 (i.e., 14,5 dagen na afloop van de stortingen). De uiteindelijke SSC-verdeling in referentierun SC501 met de basisinstellingen zoals opgesomd in Hoofdstuk 3 vertoont een piek bij KM-130 vanaf Vlissingen (i.e., rond Dendermonde). De locatie van deze piek komt overeen met de geobserveerde piek in SSC-waarden (Figuur 1). Kwantitatief is de gemodelleerde SSC-waarde van ongeveer $0,45 \text{ kg/m}^3$ op dag 45 echter een momentopname. De voorgaande springtij-doodtij-cyclus geeft hogere concentraties (e.g. een piek van $0,70 \text{ kg/m}^3$ op dag 30) en een langere simulatie zou lagere SSC-waarden opleveren, getuige de dalende trend in Figuur 9. Daarom mag een gedetailleerde kwantitatieve vergelijking met de geobserveerde waarden niet gemaakt worden. De gemodelleerde sedimentconcentraties na afloop van de simulatie vormen immers nog geen (dynamische) evenwichtstoestand.

Residueel transport

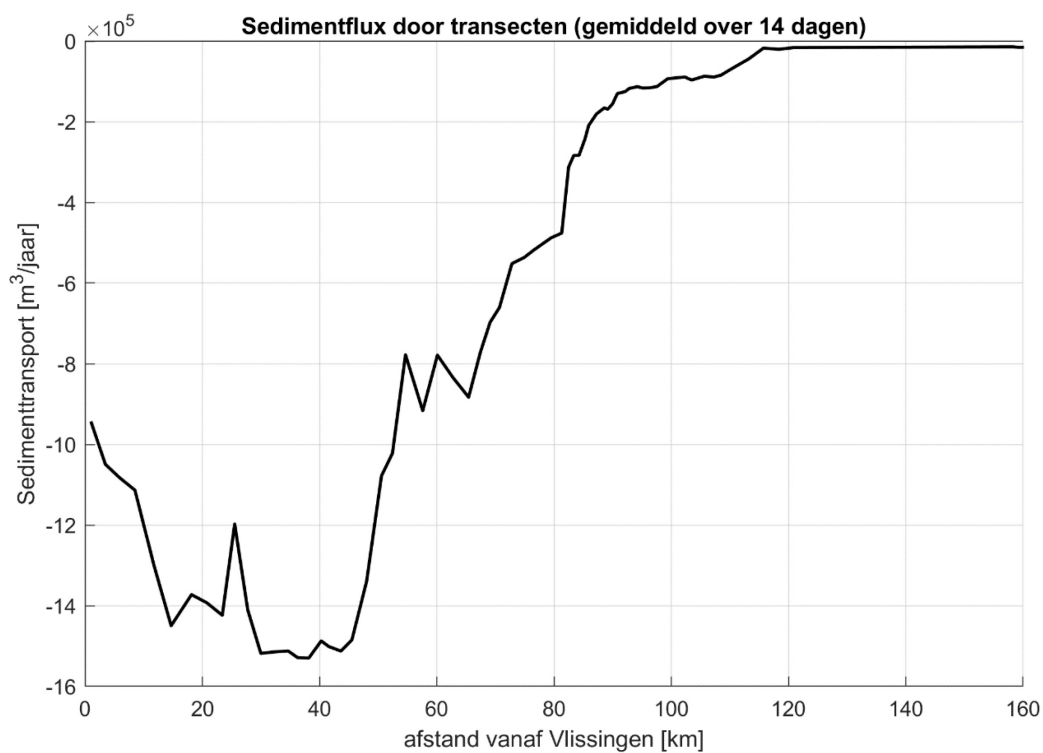
De piek in SSC kan verklaard worden aan de hand van Figuur 10 met netto sedimenttransporten. In het gehele estuarium is sprake van een netto afwaarts transport. Rond KM-130 is een zone zichtbaar waarbij de afwaarts gerichte transporten tussen KM-120 en KM-130 lager zijn dan verder bovenstrooms. Dit heeft een lokale verhoging van de slibconcentraties tot gevolg. De gradiënten in slibtransportprocessen die in dat gebied tot een SSC-piek leiden lijken dus te worden gerepresenteerd in de modelsimulatie. De afwaartse transporten in combinatie met slibdeposities in luwe zones (e.g. intergetijdengebieden, sluizen en getijdendokken) zijn echter hoger dan de aanvoer van slib, waardoor de SSC-waarden in deze piek en elders in het estuarium blijven dalen en geen evenwichtstoestand bereiken. Naast de hoge piek in het bovenstroomse deel van de Zeeschelde is er ook sprake van een minder sterke piek in SSC-waarden nabij KM-50. Deze piek bevindt zich in een gebied waar initieel geen sliblaag wordt opgelegd en is dus het gevolg van het netto afwaartse transport van sediment tijdens de simulatie. Als de netto sedimenttransporten in Figuur 10 worden beschouwd blijkt dat ook deze piek samenvalt met een piek in het netto afwaartse transport. Benedenstrooms van KM-50 is het netto afwaartse transport minder sterk dan bovenstrooms, wat in dit gebied tot hogere SSC-waarden leidt.

Sedimentverspreiding

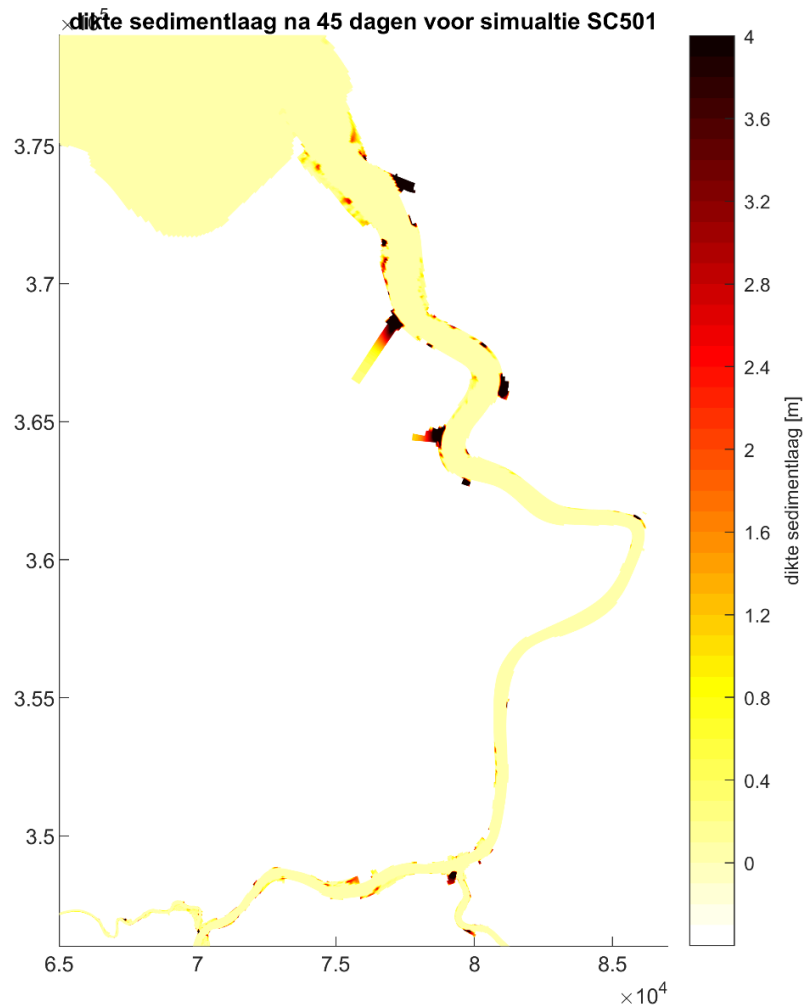
Figuur 11 toont de slibverspreiding na afloop van de referentierun. Het meeste slib accumuleert in luwe zones, zoals toegangskanalen van sluizen of getijdendokken. De sedimentatiehoogte bereikt bijvoorbeeld een dikte van enkele meters het Deurganckdok en in de toegang van de Zandvliet- en Berendrechtssluizen, Boudewijn- en Van Cauwelaertssluizen en de Kallossluis. In het Deurganckdok bezinkt het meeste sediment aan de estuariumzijde van het dok. Tot slot is er ook sprake van aanslibbing op ondiepe en intertidale zones aan weerszijden van de vaargeul in de Zeeschelde.



Figuur 9 – Ontwikkeling in getij-gemiddelde SSC gedurende de 45 dagen van de basissimulatie.



Figuur 10 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor de basissimulatie.



Figuur 11 – Sedimentverspreiding Zeeschelde in referentiesimulatie (SC501).

4.2 Simulaties met sedimentstortingen

Invloed op sedimentconcentraties

De invloed van sedimentstortingen in de Beneden-Zeeschelde op de sedimentconcentraties in het estuarium is duidelijk zichtbaar, maar vooral van tijdelijke aard. Figuur 12 en Figuur 13 tonen het effect van de verschillende stortscenario's voor twee momenten in de simulatie: direct na afloop van de stortingen (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (Dag 45). Direct na afloop van de stortperiode is de invloed van de sedimentstortingen het grootst. Voor de stortscenario's met slibstortingen bij Oosterweel (SC502) en Punt van Melsele (SC504) ontstaat een SSC-piek rond KM-75 vanaf Vlissingen die met concentraties van ongeveer $0,7 \text{ kg/m}^3$ even hoog is als het reguliere ETM rond KM-130 dat ook in de referentierun (SC501) al aanwezig was. Tussen KM-40 en KM-100 is er op dat moment sprake van een duidelijke SSC-toename van maximaal 80-90% ten opzichte van de referentierun. De scenario's met slibstortingen in stortvak SH61 (SC503) of ter hoogte van het Vaarwater boven Bath (SC505) geven een minder sterke SSC-piek rond KM-60 vanaf Vlissingen. Er is in deze scenario's sprake van een SSC-toename in de gehele Westerschelde en tot KM-80 in de Zeeschelde (i.e., met een maximum van +55% tussen KM-50 en KM-60 in SC503 en SC505).

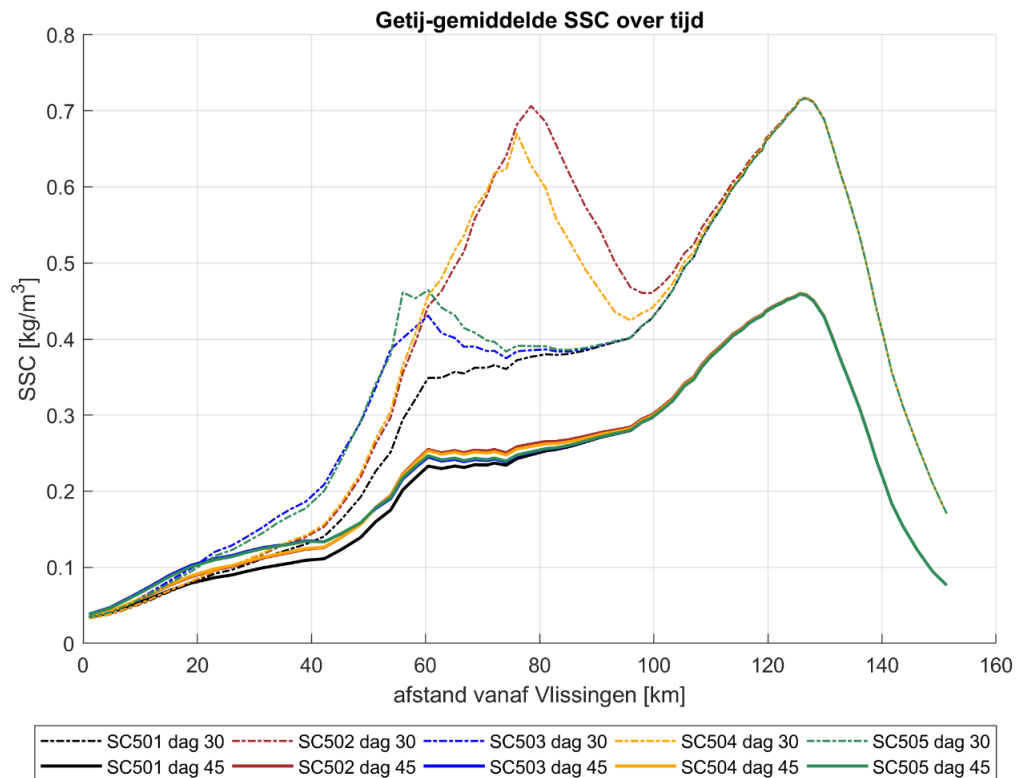
Vanwege de grotere getijvolumes in de Westerschelde ten opzichte van de Zeeschelde is de absolute toename in SSC als gevolg van de stortingen op SSC in het afwaartse deel vrij klein. De relatieve toename van de sedimentconcentraties is in de Westerschelde wel groot vanwege de lagere achtergrondconcentratie in

de modelsimulaties. Voor alle vier de stortscenario's geldt dat er op de beschouwde tijdschaal van 2 springtij-doodtij-cycli geen invloed is op de sedimentconcentraties ter hoogte van het ETM in de Boven-Zeeschelde rond Dendermonde.

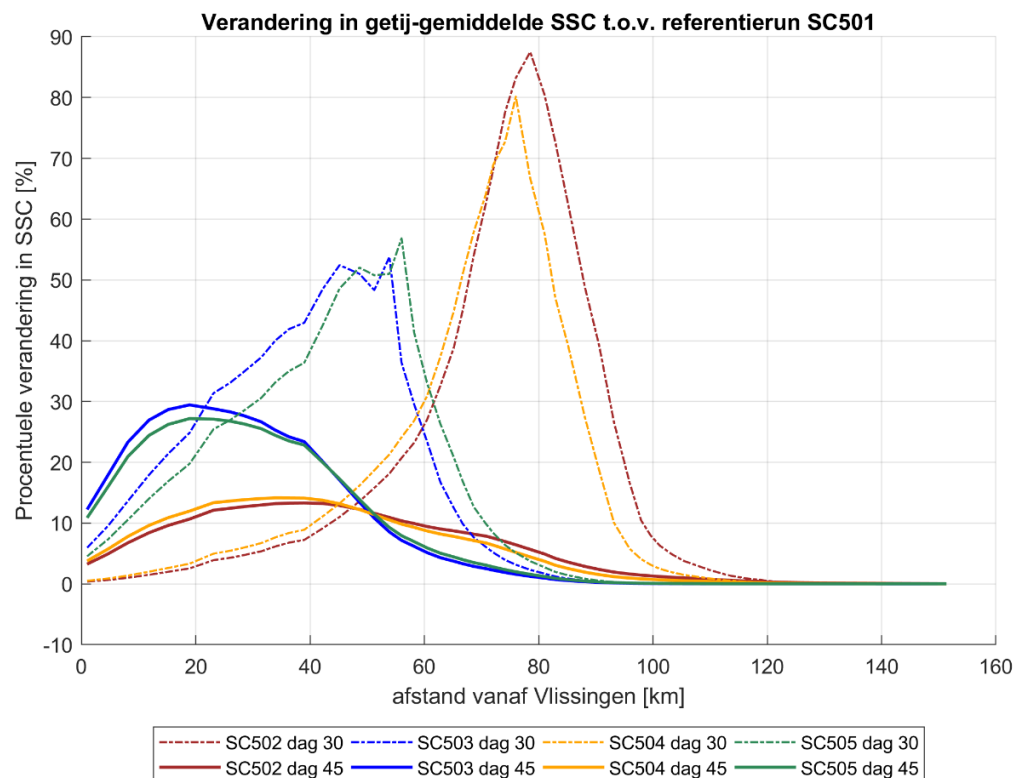
Na afloop van de stortperiode neemt de impact van de sedimentstortingen op de sedimentconcentraties weer af. In Figuur 12 is te zien dat het effect van de stortingen op SSC-waarden na 45 dagen (i.e., één springtij-doodtij-cyclus later) zeer beperkt is. Enkel in de Westerschelde is sprake van een lichte toename in sedimentconcentraties die verklaard kan worden door het afwaarts gerichte residueel transport in de modelsimulaties (Figuur 10). Hierbij dient opgemerkt te worden dat het residuele transport in de referentiesimulatie ook afwaarts gericht is;

In Figuur 14 en Figuur 15 wordt het temporele SSC-verloop over de simulaties getoond voor enkele observatiepunten: Bath, Boei 84, Boei 97, Oosterweel in de omgeving van de stortlocaties en Driegoten ter hoogte van het ETM in de Boven-Zeeschelde. In het algemeen vertoont het SSC-verloop over tijd, los van de invloed van de stortingen en de tij-gerelateerde variatie, een dalende trend op alle locaties. De gemodelleerde springtij-doodtij-variatie van de SSC-waarden is sterker dan de variatie binnen één getij die in Figuur 15 te zien is. De variatie binnen één getij is sterker in Bath (en Driegoten) dan voor de meetposten in de Beneden-Zeeschelde. Uit de gevoeligheidsanalyse in Deelrapport 23 (Stark *et al.*, 2022) blijkt echter dat de getij-variatie in sedimentconcentraties sterk afhankelijk is van de modelschematisering.

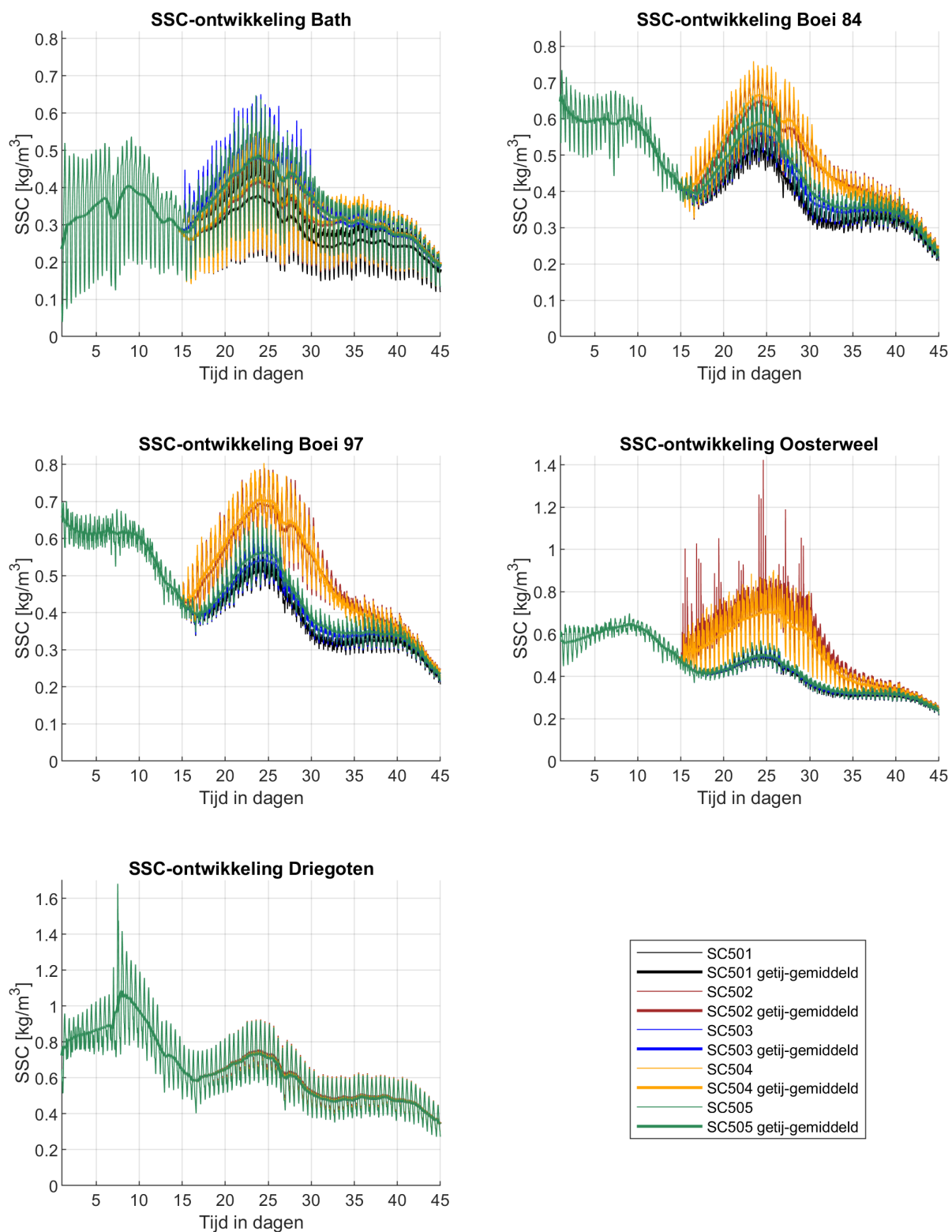
Het verloop op de uitvoerlocaties in de Beneden-Zeeschelde laat zien dat de sedimentconcentraties in de stortscenario's lokaal beginnen toe te nemen ten opzichte van de referentierun vanaf het moment van de eerste storting (Dag 15) tot het einde van de stortperiode (Dag 30), waarna de invloed van de slibstortingen in een paar dagen tijd weer teniet wordt gedaan. Tien dagen na afloop van de stortingen (rond Dag 40) zijn de sedimentconcentraties op de verschillende uitvoerpunten weer genormaliseerd. Enkel ter hoogte van Bath is ook aan het einde van de simulaties nog een verhoging van de sedimentconcentraties zichtbaar. Voor simulatie SC502 met slibstortingen in Oosterweel zijn op het meetpunt Oosterweel meerdere hoge pieken van $>1,0 \text{ kg/m}^3$ in SSC zichtbaar. Deze kunnen gerelateerd worden aan de sedimentstortingen op die locatie. Op het meest opwaartse uitvoerpunt Driegoten is zoals verwacht geen invloed van de slibstortingen waarneembaar.



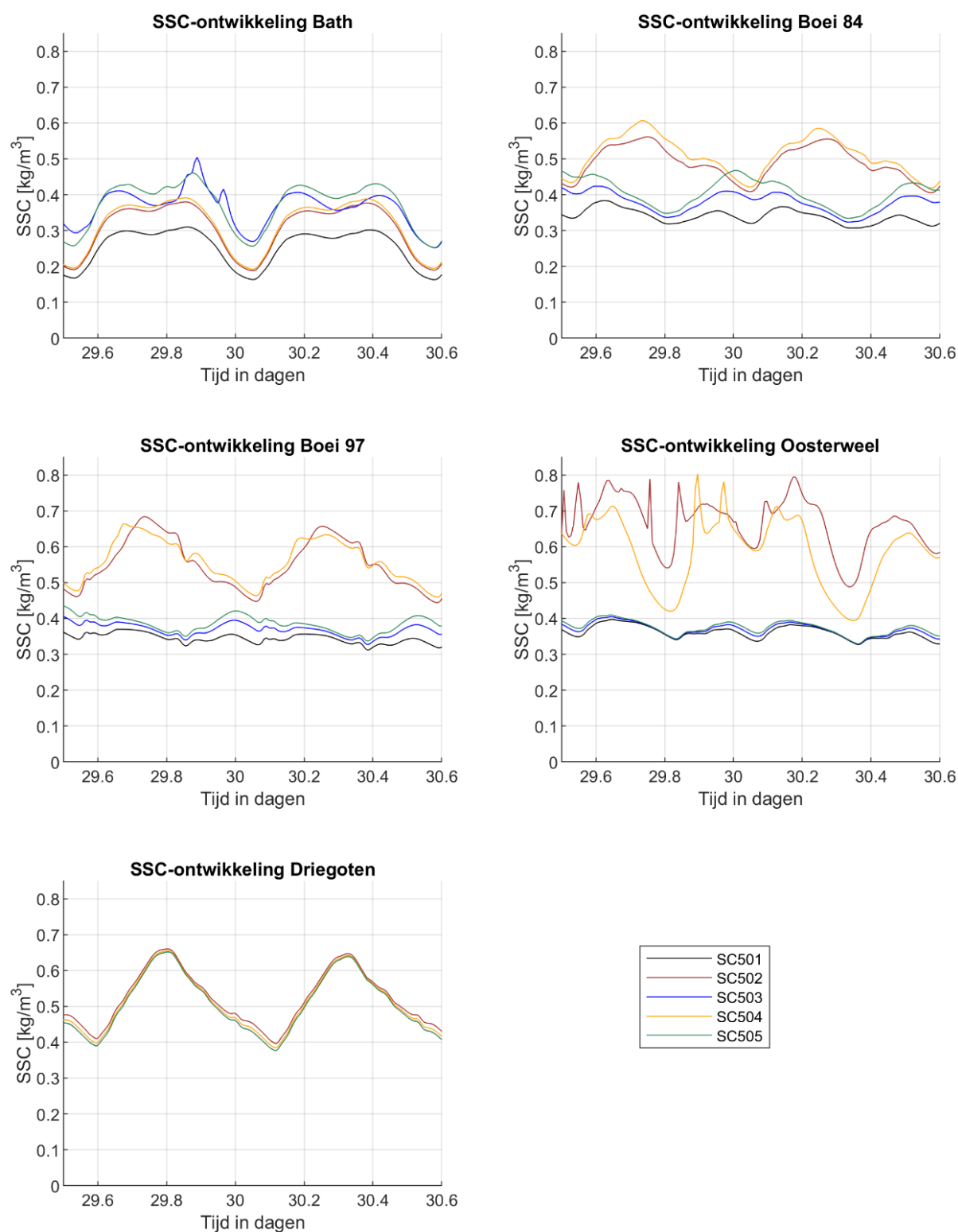
Figuur 12 – Getij-gemiddelde ruimtelijke SSC-verdeling langs het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus na afloop van de stortperiode (Dag 45) voor de vier stortscenario's (SC502-505) en de referentierun (SC501).



Figuur 13 – Procentuele verandering in getij-gemiddelde SSC-verdeling langs het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus na afloop van de stortperiode (Dag 45) voor de vier stortscenario's (SC502-505) ten opzichte van de referentierun (SC501).



Figuur 14 – Temporele SSC-ontwikkeling gedurende de 45-dagen durende simulatie voor de verschillende stortscenario's (SC502-505) en de referentierun (SC501) ter hoogte van Bath, Boei 84, Boei 97, Oosterweel en Driegoten.



Figuur 15 – Temporele SSC-variatie voor één tij-cyclus op Dag 30 (laatste stortperiode) voor de verschillende stortscenario's (SC502-505) en de referentierun (SC501) ter hoogte van Bath, Boei 84, Boei 97, Oosterweel en Driegoten.

Invloed op sedimentverspreiding

Naast een impact op de sedimentconcentraties hebben de stortscenario's ook invloed op de verspreiding en sedimentatie van slib, met name in luwe zones zoals toegangskanalen naar sluizen of getijdedokken. Daarom wordt voor elk scenario een verschilplot gemaakt van de (extra) sedimentatiehoogte in het studiegebied na 45 dagen ten opzichte van de referentierun (Figuur 20 – Figuur 23 in Bijlage A – Figuren sedimentverspreiding). Aanvullend worden in Tabel 4 de verschillen in slibdepositie gekwantificeerd voor de belangrijkste sedimentatiezones in de Zeeschelde en de Westerschelde. In dit kader dient vermeld te worden dat deze sedimentatiesnelheden niet werden gevalideerd aan de hand van metingen. De gepresenteerde slibhoeveelheden zijn eerder indicatief van aard en dienen om het verschil in sedimentverspreiding te illustreren tussen scenario's met opwaartse en afwaartse stortlocaties.

Uit de modelresultaten blijkt dat slibstortingen in Oosterweel (SC502) en de Punt van Melsele (SC504) vooral leiden tot een toename van de sedimentatie in enkele luwe zones in de Beneden-Zeeschelde. In totaal is er na afloop van deze twee simulaties met opwaartse sedimentstortingen nog ongeveer 140'000 TDS van de initiële ~220'000 TDS in de Beneden-Zeeschelde aanwezig (i.e., 63% van de totale gestorte hoeveelheid), terwijl er ±40'000 TDS (i.e., 17-20% van de totale gestorte hoeveelheid) in de Westerschelde is afgezet. De belangrijkste depositiegebieden in deze scenario's zijn de toegangseuvel tot de Kallosluis en het Deurganckdok waar respectievelijk ±31'000-35'000 TDS en ±27'000-29'000 TDS slib extra accumuleert. In deze scenario's is ook sprake van additionele sedimentatie van 13'000-17'000 TDS in de toegangskanalen naar de Boudewijn- en Van Cauwelaertsluizen en de Zandvliet- en Berendrechtssluizen. Ten opzichte van de referentierun zonder slibstortingen betreft dit een toename van 2 á 3 procent extra slibdepositie in de Beneden-Zeeschelde. Hoewel dit ten opzichte van de referentierun zonder stortingen slechts een toename is van enkele procenten vertegenwoordigen de depositievolumes voor het Deurganckdok tot wel 16% van de totale hoeveelheid gestort slib in de modelsimulaties. Procentueel is de toename van slibdepositie in de Westerschelde groter dan in de Beneden-Zeeschelde (i.e., ongeveer +6% in de Westerschelde t.o.v. +2% in de Beneden-Zeeschelde). Dit komt overeen met de relatieve toename in sedimentconcentraties aan het einde van de simulatie (Figuur 13). Hierbij dient te worden opgemerkt dat er in de referentierun al weinig slib in de Westerschelde aanwezig was vanwege de schematisering zonder initiële sliblaag in dit deel van het estuarium. De afzetting van gestort slib in de Westerschelde is het grootst in specifieke zones zoals het Verdrongen Land van Saeftinghe.

In de modelscenario's met de meer afwaarts gesitueerde stortlocaties in de Bocht van Bath (i.e., SC503 en SC505) is de depositie van slib in de Beneden-Zeeschelde significant lager. Na afloop van de simulatie is in deze simulaties slechts 30'000-45'000 TDS slib in de Beneden-Zeeschelde aanwezig (i.e., 13-20% van de totale gestorte hoeveelheid). Het toegangskanaal naar de Zandvliet- en Berendrechtssluizen is in deze simulaties de belangrijkste depositiezone in de Beneden-Zeeschelde. De extra sedimentafzetting in de Westerschelde is voor de scenario's met stortingen in de Bocht van Bath meer dan verdubbeld ten opzichte van de scenario's met opwaartse stortlocaties. De toename van de depositie in de Westerschelde bedraagt ±100'000 TDS (i.e., ongeveer 45% van de totale gestorte hoeveelheid). Het Verdrongen Land van Saeftinghe en het Groot-Buitenschor en Rilland, allemaal in de directe omgeving van de stortlocaties gelegen, zijn in deze simulaties de belangrijkste depositiezones in de Westerschelde. Dat de afzetting van gestort slib grotendeels afwaarts gesitueerd is kan verklaard worden door het netto of residueel transport in de Beneden-Zeeschelde en Westerschelde afwaarts gericht is in de modelsimulaties.

Tabel 4 – Toename depositie in TDS voor specifieke sedimentatiezones als gevolg van stortscenario's.

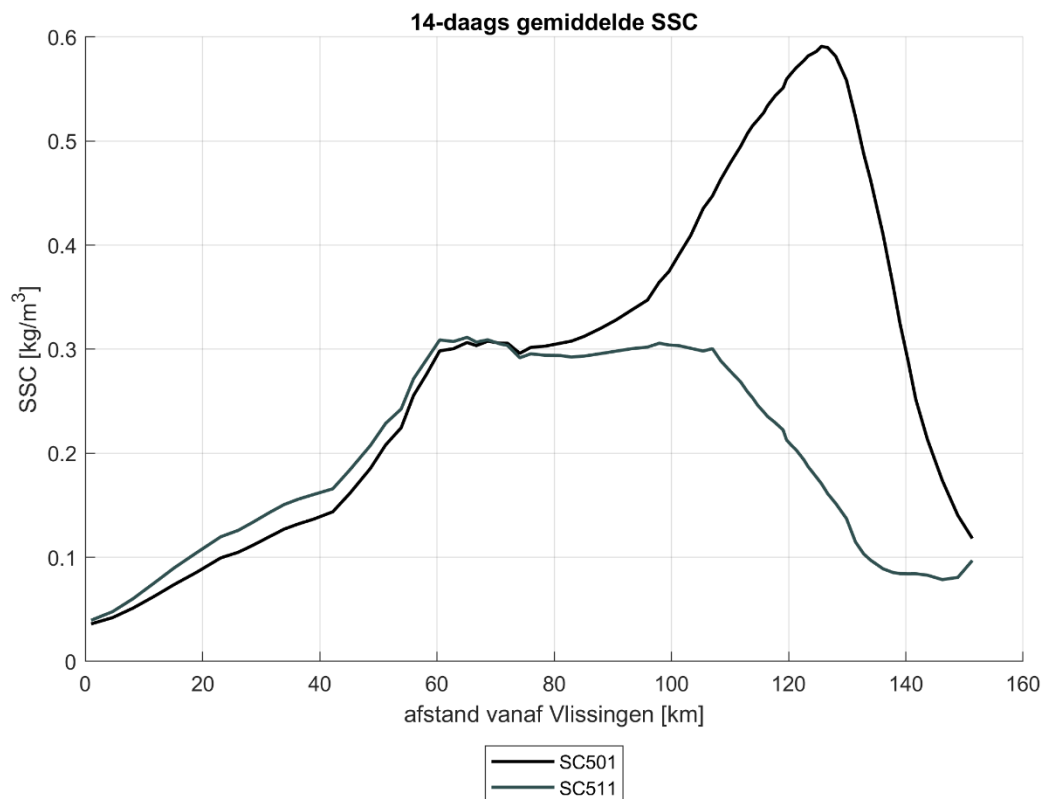
Scenario	SC502	SC503	SC504	SC505
<i>stortlocatie</i>	<i>Oosterweel</i>	<i>SH61</i>	<i>Punt van Melsele</i>	<i>Vaarwater boven Bath</i>
Toename slibdepositie Beneden-Zeeschelde	+140'180	+29'993	+137'306	+44'996
○ <i>Toegang Kallosluis</i>	+34'141	+2'346	+31'604	+3'678
○ <i>Toegang Boudewijn- & Van Cauwelaertsluizen</i>	+16'761	+2'008	+16'920	+3'151
○ <i>Deurganckdok</i>	+27'014	+7'709	+28'763	+9'175
○ <i>Toegang Zandvliet- & Berendrechtluizen</i>	+13'823	+7'582	+15'528	+10'952
Toename slibdepositie Westerschelde	+38'509	+101'840	+42'781	+95'403
○ <i>Groot Buitenschor + Rilland</i>	+11'027	+15'177	+9'764	+15'176
○ <i>Verdrongen Land van Saeftinghe</i>	+8'455	+19'345	+9'332	+20'102
○ <i>Plaat van Walsoorden</i>	+2'430	+6'263	+2'668	+5'796

4.3 Invloed bovenafvoer Zeeschelde

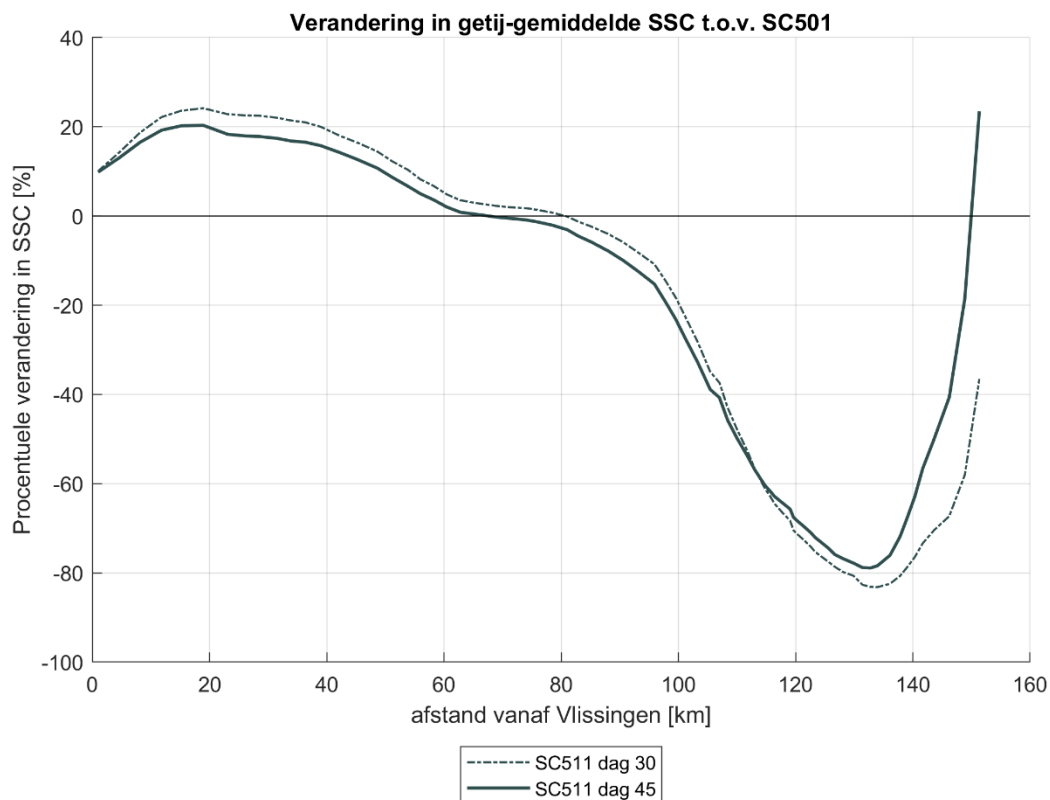
In deze paragraaf wordt de invloed van de bovenafvoer van de Boven-Zeeschelde (opgelegd in Merelbeke) onderzocht door de stortscenario's te herhalen met een sterk verhoogde bovenafvoer in Merelbeke (100 m³/s in plaats van 7,4 m³/s). Het debiet van andere zijrivieren blijft gelijk aan de eerdere scenario's. In deze extra simulaties wordt steeds dezelfde initiële sedimentverdeling toegepast. Vanwege de grote gelijkenis tussen de resultaten van scenario's SC502 en SC504 met opwaartse stortlocaties, en tussen scenario's SC503 en SC505 met afwaartse stortlocaties, worden met betrekking tot de invloed van de bovenafvoer enkel de resultaten van scenario's SC502 (stortingen te Oosterweel) en SC503 (stortingen te SH61) behandeld.

Effect bovenafvoer op ETM

In Deelrapport 23 (Stark *et al.*, 2022) werd de invloed van een verhoging van de bovenafvoer al onderzocht. Uit deze gevoeligheidsstudie bleek dat bij een significante toename van het bovendebiet een verschuiving en afvlakking van het ETM plaatsvindt. Figuur 16 en Figuur 17 tonen de invloed van een verhoogde bovenafvoer op de ruimtelijke variatie in sedimentconcentraties voor scenario's SC501 (lage afvoer) en SC511 (hoge afvoer). Als gevolg van de verhoogde bovenafvoer verdwijnt het ETM rond KM-130 inderdaad. Door een toename van het netto afwaarts gerichte transport nemen de concentraties in de Westerschelde juist licht toe. Uit Figuur 17 volgt duidelijk een relatieve verlaging van de concentraties in de Beneden-Zeeschelde (i.e., opwaarts van KM-80) en een relatieve verhoging van de concentraties afwaarts (i.e., afwaarts van KM-60). De afname is het sterkst ter hoogte van het autonome ETM (i.e., -80% rond KM-130). De relatieve toename in SSC is het sterkst in het afwaartse deel (i.e., +20% rond KM-20).



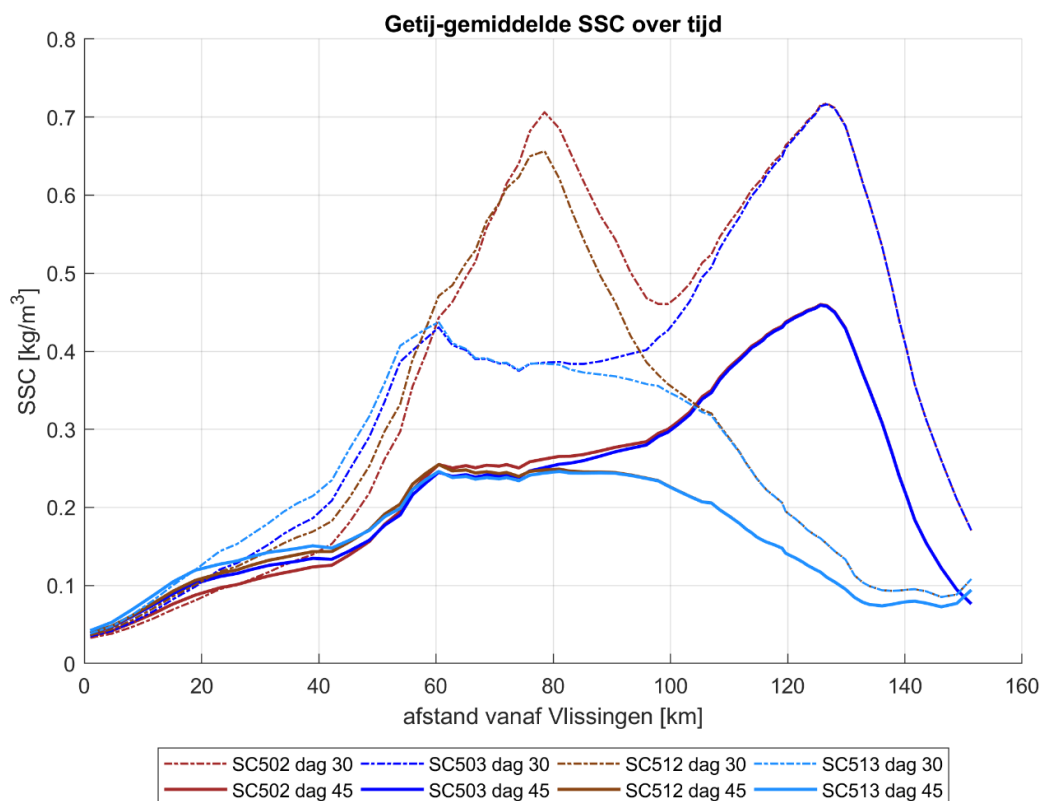
Figuur 16 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus voor simulaties met een lage afvoer van 7,4 m³/s (SC501) en met hoge afvoer van 100 m³/s (SC511).



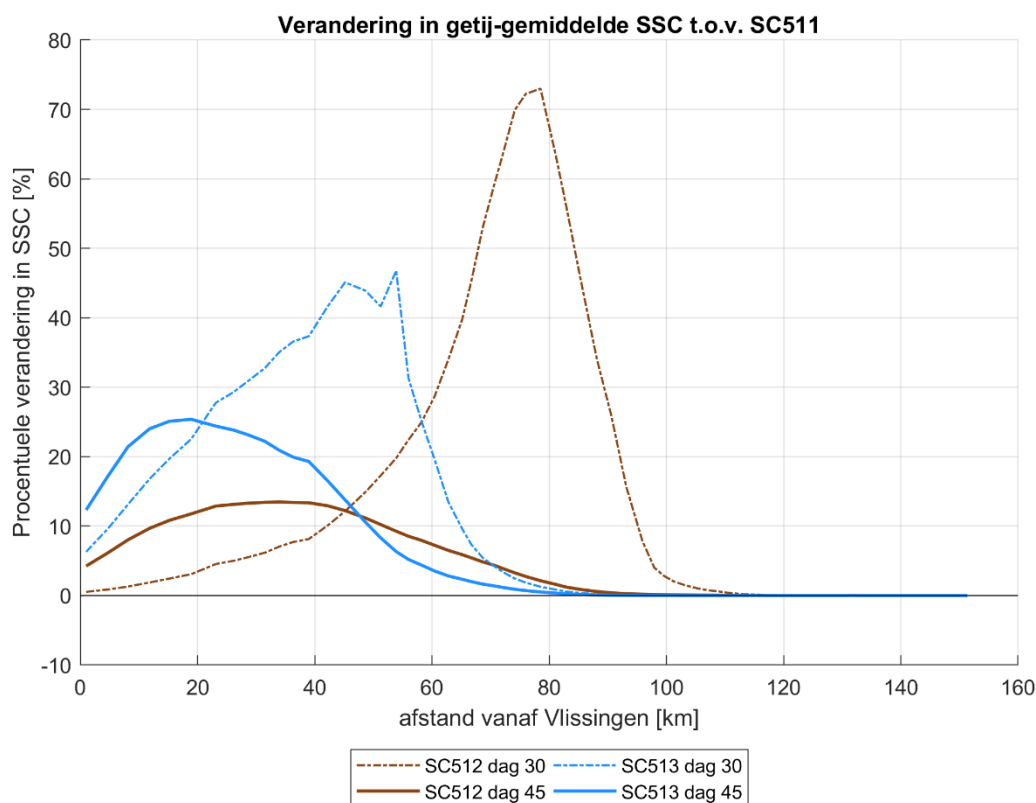
Figuur 17 – Procentuele verandering in getij-gemiddelde SSC langsheen het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (Dag 45) voor scenario SC511 (hoge bovenafvoer) ten opzichte van SC501 (lage bovenafvoer).

Interactie bovenafvoer met stortingen

Bij een verhoogde bovenafvoer (Figuur 18 en Figuur 19) is het effect van de stortingen op de ruimtelijke verdeling van sedimentconcentraties gelijkaardig als bij een lagere bovenafvoer (Figuur 12 en Figuur 13). Hoewel de autonome SSC-piek rond KM-130 niet meer aanwezig is in simulaties met een verhoogde bovenafvoer is er ter hoogte van de stortlocaties bij Oosterweel of Bath nog steeds sprake van een piek in sedimentconcentraties na afloop van de stortperiode (i.e., Dag 30 in Figuur 18). De SSC-piek bij KM-75 is voor SC512 (met hoge bovenafvoer) wel iets lager dan voor SC502 (met lage bovenafvoer), maar verder afwaarts zijn de concentraties juist weer iets hoger. De maximum sedimentconcentraties voor SC503 (lage bovenafvoer) en SC513 (hoge bovenafvoer) met stortingen bij Bath zijn eveneens gelijkaardig. Ook voor dit stortscenario is sprake van een lichte verschuiving richting afwaarts van het gesuspendeerd sediment en daarmee hogere SSC-waarden in de Westerschelde. Net als in de simulaties met lagere bovenafvoer is het effect van de stortingen na 45 dagen (één springtij-doodtij-cyclus later) alweer nagenoeg teniet gedaan. Door de hogere afvoer is er op het eind van de simulaties wederom wel sprake van een toename in SSC in de Westerschelde. Aangezien de SSC-toename in het benedenstroomse deel van het estuarium wordt veroorzaakt door de uitspoeling van slib van bovenstrooms kan bij een langere duur van hoge rivierafvoeren ook in het afwaartse deel een afname van SSC verwacht worden. Om dit nader te onderzoeken zijn lange termijn simulaties nodig.



Figuur 18 – Getij-gemiddelde SSC-verdeling voor modelscenario's met stortingen in Oosterweel (SC502/512) of SH61 (SC503/513) direct na de stortperiode (dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (dag 45) bij lage bovenafvoer (SC502/503) en hoge bovenafvoer (SC512/513).



Figuur 19 – Procentuele verandering in getij-gemiddelde SSC langsheen het estuarium direct na de stortperiode (Dag 30) en één springtij-doodtij-cyclus later (Dag 45) voor stortscenario's SC512 en SC513 ten opzichte van run SC511 zonder stortingen.

Sedimentverspreiding

Het effect van een verhoogde bovenafvoer op de sedimentverspreiding en op de sedimentatie in luwe zones wordt geïllustreerd in Figuur 24 en Figuur 25 in Bijlage A – Figuren sedimentverspreiding. Deze stellen het verschil in sedimentatiehoogte voor tussen de simulaties met hoge en lage bovenafvoer voor stortscenario Oosterweel (Figuur 24) en stortscenario SH61 (Figuur 25).

Door het verhoogd bovendebiet is er sprake van uitspoeling van het gesuspendeerd sediment uit de zone rondom het ETM in de Boven-Zeeschelde. Daardoor neemt het sedimentvolume toe in de Westerschelde en in het afwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde. Ook het sediment van de stortingen komt daardoor relatief meer afwaarts terecht. In totaal neemt het slibvolume in de Westerschelde met +60'000 tot +75'000 TDS (i.e., 25-35% van de totale gestorte hoeveelheid) toe in de scenario's met hoge bovenafvoer ten opzichte van de stortscenario's met lage afvoer. Een dergelijke toename van +55'000 TDS is ook aanwezig in de simulaties zonder slibstortingen. Dit suggereert dat de toegenomen slibdepositie slechts gedeeltelijk een gevolg is van het afwaarts transport van gestorte specie. Het grootste deel wordt veroorzaakt door de afwaartse verschuiving van de autonome sedimentwolk.

In de modelsimulaties accumuleert het slib afwaarts in intergetijdengebieden zoals het Verdrongen Land van Saeftinghe en andere luwe zones zoals de haven van Terneuzen of de Zuidvoorhaven bij Hansweert. In de Beneden-Zeeschelde is juist sprake van een kleine afname van het totale sedimentvolume als gevolg van een hogere bovenafvoer (i.e., <3'000 TDS voor beide scenario's). Desalniettemin is er in het afwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde wel sprake van een toename in accumulatie van slib in luwe zones zoals het Deurganckdok, de toegang naar de Boudewijn- en Van Cauwelaertsluizen en de toegang naar de Zandvliet- en Berendrechtluizen. Op die laatste locatie neemt de slibaccumulatie met 4'500 TDS (SC513) tot 5'800 TDS (SC512) het sterkst toe als gevolg van de verhoogde bovenafvoer. Meer opwaarts gesitueerde luwe zones zoals de toegangsgeul naar de Kallosluis of naar de sluizen bij Wintam worden wel gekenmerkt door een

lagere slibaccumulatie in de simulaties met verhoogde bovenafvoer. Hetzelfde geldt voor de luwe zones in de Boven-Zeeschelde. Die zones worden in de huidige scenario-analyse echter buiten beschouwing gelaten, temeer omdat de invloed van slibstortingen tussen Bath en Oosterweel binnen de simulatie duur van één maand zeer beperkt blijkt te zijn.

5 Conclusies

Op basis van de met het Delft3D-NeVla model gesimuleerde stortscenario's kunnen enkele algemene conclusies worden getrokken over de invloed van sedimentstortingen op de ruimtelijke verdeling van gesuspendeerd sediment en de accumulatie van slib in verschillende luwe zones:

Sedimentstortingen in de meer opwaarts gelegen stortlocaties Oosterweel en Punt van Melsele leiden tot veel hogere sedimentconcentraties in de Beneden-Zeeschelde dan sedimentstortingen in de afwaarts gelegen stortlocaties in de Bocht van Bath. Dit kan verklaard worden door een kleinere dispersie en verdunning vanwege het lagere getijvolume en de kleinere rivierbreedte ter hoogte van de twee opwaartse locaties. Direct na afloop van de stortperiode in Oosterweel of Punt van Melsele zijn de gemodelleerde sedimentconcentraties in de Beneden-Zeeschelde met ongeveer 700 mg/L zelfs van eenzelfde grootteorde als de SSC-waarden in het ETM in de Boven-Zeeschelde.

De accumulatie van gestort slib in luwe zones in de Beneden-Zeeschelde is ook veel groter als de opwaarts gesitueerde stortlocaties worden gebruikt. Het gaat hierbij om een factor 3-5 verschil ten opzichte van de stortscenario's met de afwaartse stortlocaties. In de luwe zones van de Westerschelde is de accumulatie van gestort slib juist lager (factor 2-3) voor de scenario's met de opwaartse stortlocaties. In kwalitatief opzicht komen deze resultaten overeen met eerdere bevindingen door Coen *et al.* (2016). Voor een meer gedetailleerde analyse van de kwantitatieve invloed van slibstortingen op sedimentaccumulatie in verschillende luwe zones dient het model eerst verder gevalideerd te worden tegen gemeten sedimentatiesnelheden.

De invloed van slibstortingen op sedimentconcentraties in het estuarium is het sterkst direct na afloop van een aaneengesloten stortperiode en neemt daarna af. Na ongeveer tien dagen zonder sedimentstortingen is de gemodelleerde invloed weer nihil. Enkel in de Westerschelde blijft de invloed van slibstortingen langer merkbaar vanwege het afwaarts gerichte residueel transport.

Uit de scenario-analyse volgt dat slibstortingen in de zone tussen Bath en Oosterweel op een termijn van één á twee springtij-doodtij-cycli geen invloed hebben op de ligging of sterkte van het ETM in de Boven-Zeeschelde. Dit kan deels worden verklaard aan de hand van het afwaarts gerichte residueel transport in de modelsimulaties. Deze transportrichting wordt echter gezien als één van de beperkingen van het model met betrekking tot de representatie van een stabiel ETM in de Boven-Zeeschelde (Stark *et al.*, 2022; Smolders *et al.*, in voorbereiding). In dit verband dient ook opgemerkt te worden dat met het model een relatief korte periode doorgerekend wordt. Effecten op lange termijn door onder andere herverdeling van het sediment in het estuarium kunnen in de toekomst met lange termijn simulaties geanalyseerd worden.

De invloed van de bovenafvoer op de sedimentconcentraties en de verspreiding van slib in het estuarium is gelijkaardig voor modelsimulaties mét en zonder stortingen. Bij een significante toename van de bovenafvoer vindt een duidelijke verschuiving en afvlakking van de SSC-piek in de Boven-Zeeschelde plaats. Het gesuspendeerd sediment wordt uitgespoeld. De accumulatie van slib neemt daardoor af in de Boven-Zeeschelde en het opwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde (i.e., tot Kallo). In het afwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde en in de Westerschelde nemen de sedimentconcentraties en de accumulatie van slib juist toe bij een verhoogde bovenafvoer.

5.1 Aanbevelingen

Enkele algemene aanbevelingen ter verbetering van het slibtransportmodel worden in Deelrapport 23 (Stark *et al.*, 2022) gegeven. Zo wordt bijvoorbeeld aangeraden om voor toekomstige scenario-berekeningen het slibtransportmodel met toevoeging van de golfmodule Delft3D-WAVE te gebruiken. De additionele bodemschuifspanning door golven kan de resuspensie van sediment op ondiepe gebieden vergroten en leidt tot een opwaarts gericht residueel transport in een deel van de Zeeschelde welke het ontstaan van een (stabiel) ETM mogelijk maakt. Dit leidt bovendien tot een sterke overschatting van de sedimentafzetting op de intertidale zones. Bij het opstarten van de huidige scenario-analyse was deze invloed op de resultaten van het slibtransportmodel echter nog niet onderzocht.

Als het model in staat blijkt een evenwichtssituatie met een turbiditeitsmaximum te modelleren kan ook een analyse van de invloed van de sedimentstortingen op lange termijn uitgevoerd worden. Hierbij zou in meer detail gekeken kunnen worden naar de interactie tussen het ETM, de bovenafvoer en variaties in sedimentconcentraties door sedimentstortingen.

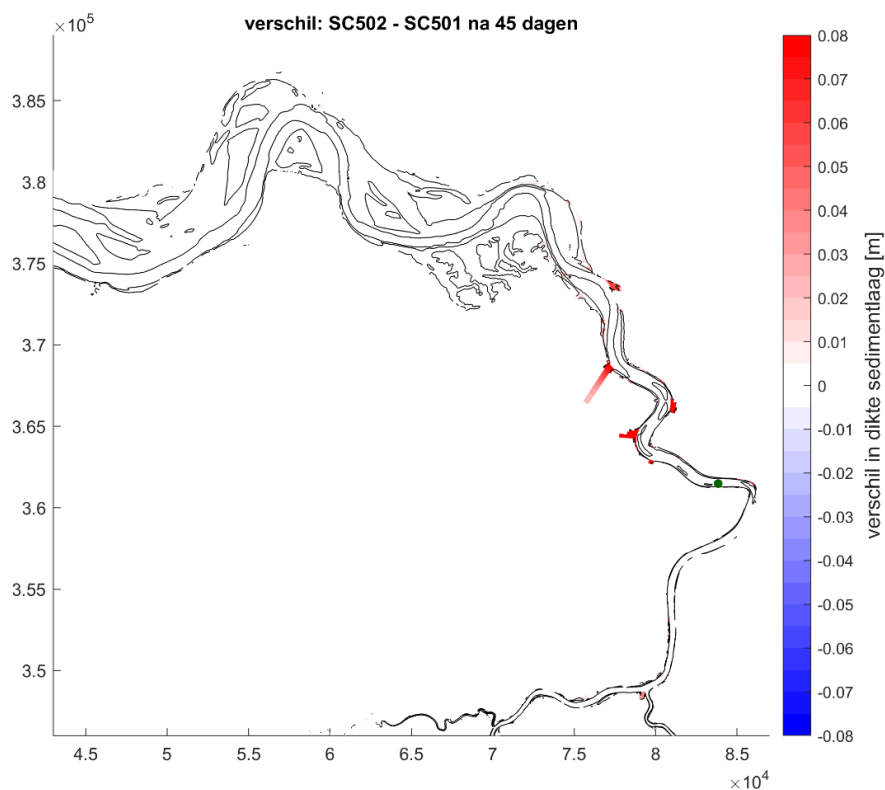
Referenties

- Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 1 – Opzet en validatie van het numerieke model voor het modelleren van slib. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Deltares** (2016a). Delft3D-FLOW - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments - User Manual. Version 3.15, Revision 49020. Delft, Nederland.
- 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: Antwerpen, België.
- 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. Waterbouwkundig Laboratorium Antwerpen, België.
- Partheniades, E.** (1965). Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 91 (HY 1): 105-139.
- Plancke, Y.; Mostaert, F.** (in voorbereiding). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 1 – Slibtransport in het Schelde-estuarium. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 17_088_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Schramkowski, G.P.; Smolders, S.; Mostaert, F.** (in voorbereiding). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Gesimuleerde seizoenseffecten met iFlow. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 17_088_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Smolders, S.; Stark, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (in voorbereiding). Slibmodellering Schelde-estuarium: Deelrapport 5 – Effecten bovenafvoer op ETM vorming en locatie. Versie 0.1. *WL Rapporten*, 17_088_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2022). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 23 – Gevoeligheidsanalyse Delft3D slibmodel. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 17_088_23. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschalck, 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, België.
- Temmerman, S.; Govers, G.; Wartel, S., & Meire, P.** (2004). Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: response to changing sea level and suspended sediment concentrations. *Marine Geology*, 212(1-4), 1-19.
- Van Rijn, L.** (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, 386 pp.

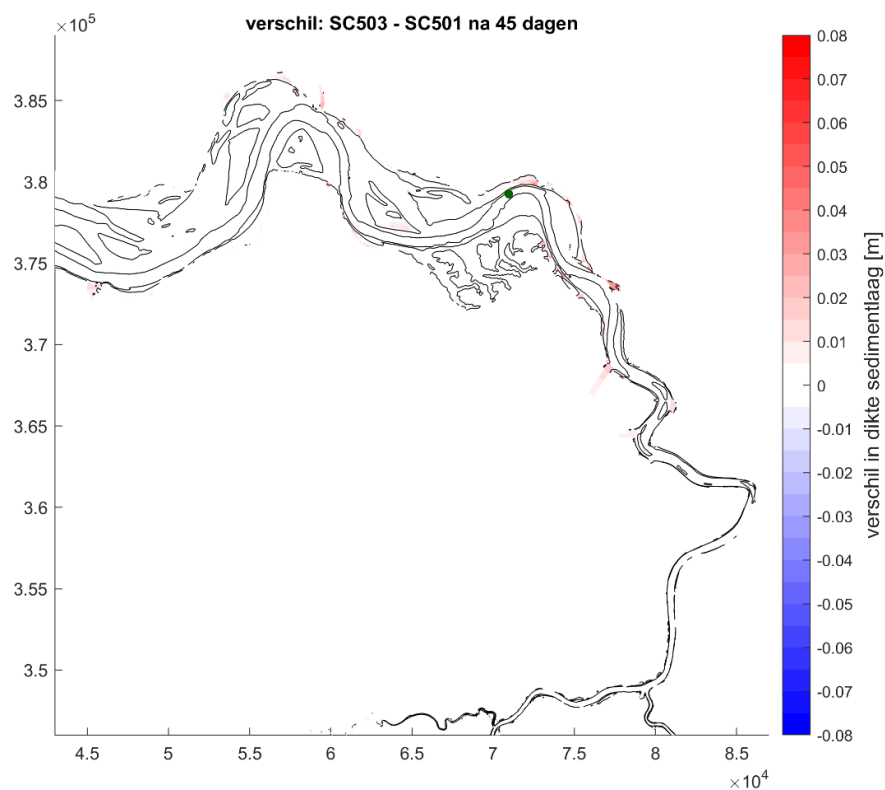
Vandenbruwaene, W.; Beullens, J.; Meire, D.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda voor de Toekomst – Historische evolutie getij en morfologie Schelde estuarium: Analyse morfologie en getij – data analyse. Versie 2.4. *WL Rapporten*, 14_147. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Vanlede, J.; De Clercq, B.; Decrop, B.; Ides, S.; van Holland, G.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009) Permanente verbetering modelinstrumentarium. Verbetering Randvoorwaardenmodel. Deelrapport 2: Afregeling van het 2D Scheldemodel. Waterbouwkundig Laboratorium en IMDC (I/RA/11313/09.012/BOB), Antwerpen, België.

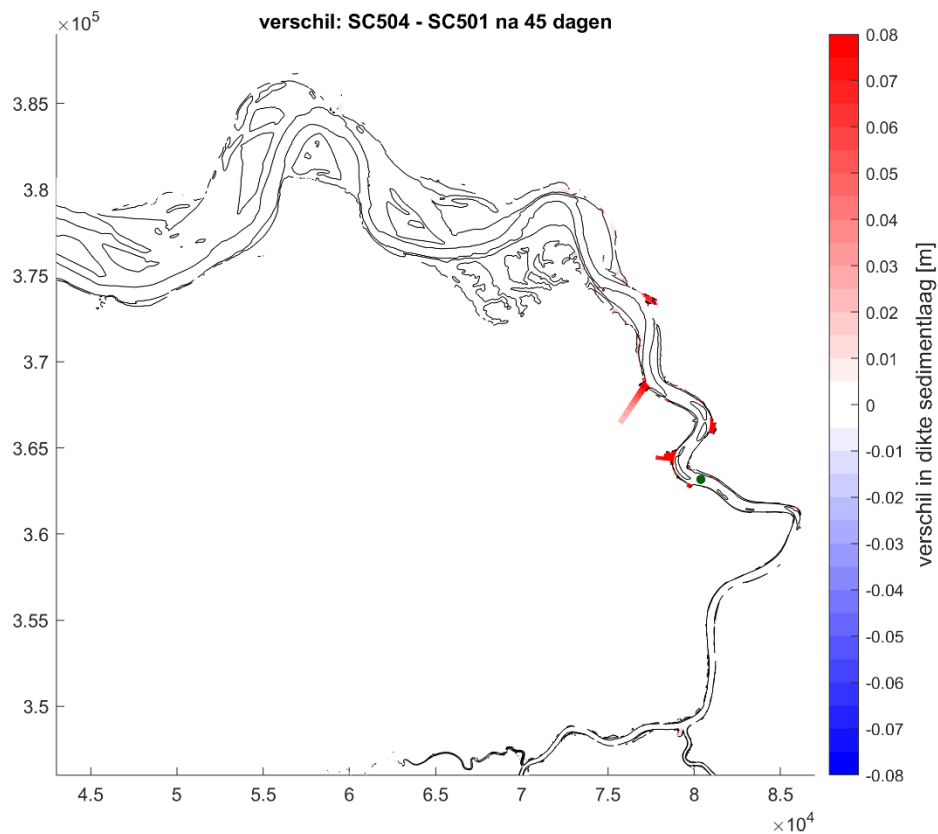
Bijlage A – Figuren sedimentverspreiding



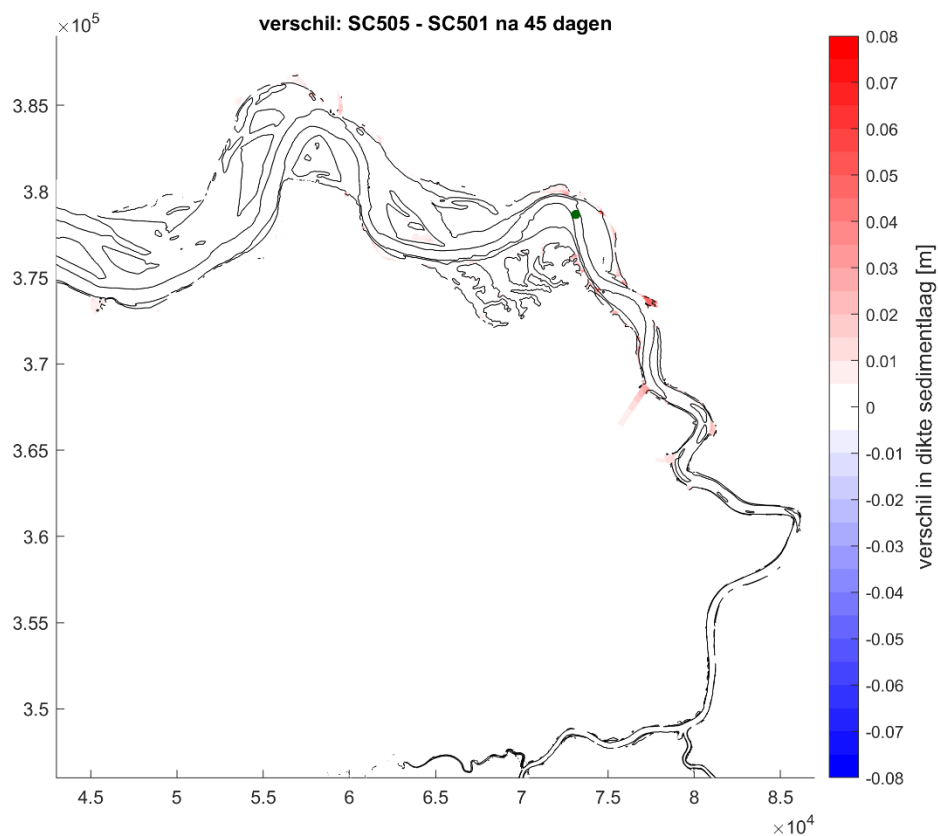
Figuur 20 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in Oosterweel (SC502) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).



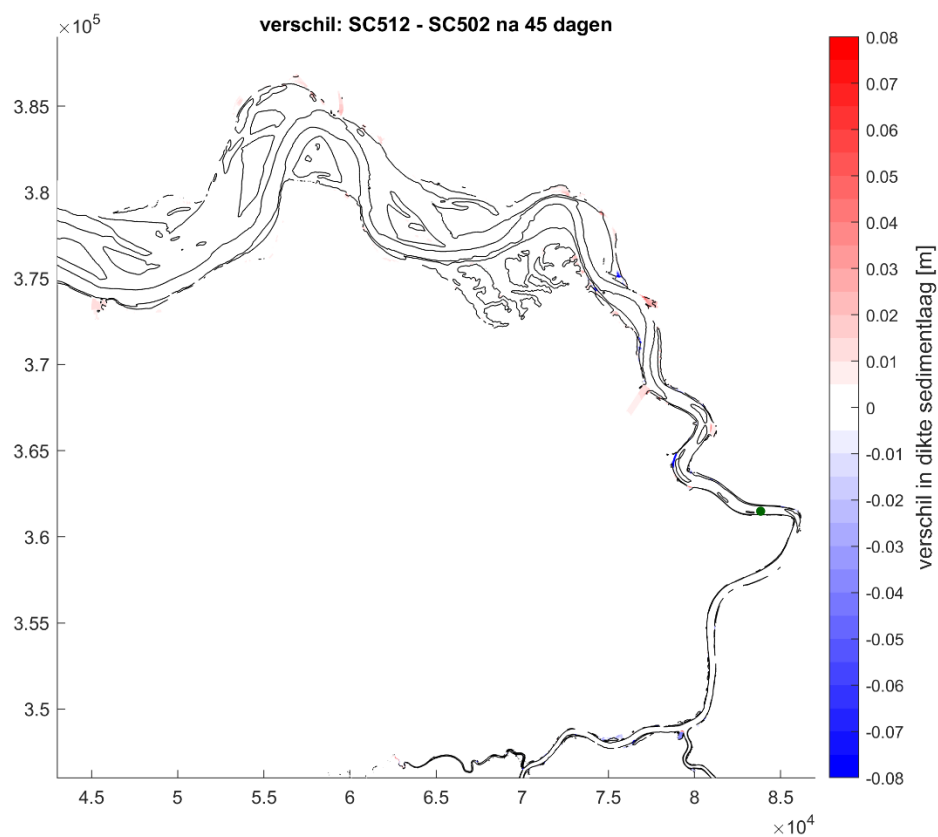
Figuur 21 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in SH61 (SC503) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).



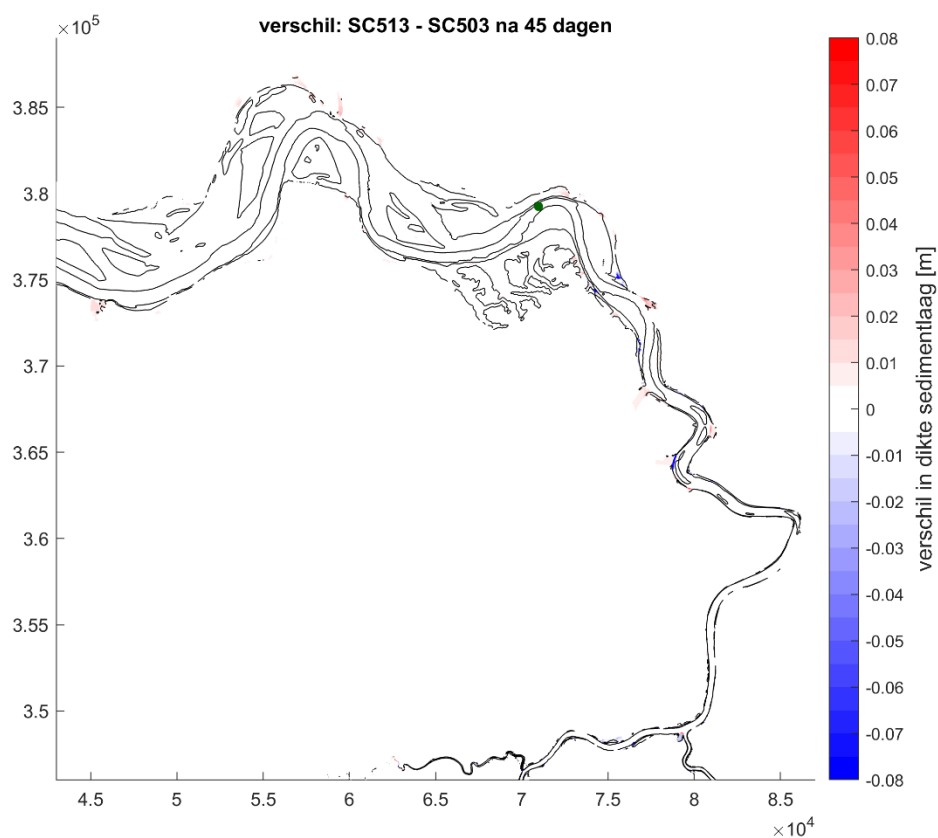
Figuur 22 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in Punt van Melsele (SC504) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).



Figuur 23 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van storting in Nauw van Bath / Appenzak (SC505) t.o.v. referentiesimulatie (SC501).



Figuur 24 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van toename bovendebiet bij stortscenario Oosterweel (SC512 t.o.v. SC502).



Figuur 25 – Verschil in sedimentverspreiding als gevolg van toename bovendebiet bij stortscenario SH61 (SC513 t.o.v. SC503).

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