



Vlaanderen
is wetenschap



17_088_23
WL rapporten

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

Deelrapport 23
Gevoeligheidsanalyse Delft3D slibmodel

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Deelrapport 23 – Gevoeligheidsanalyse 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/2022/3241/127

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y. (2022). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 23 – Gevoeligheidsanalyse Delft3D slibmodel. Versie 3.0. WL Rapporten, 17_088_23. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2022R17_088_23
Trefwoorden (3-5):	Numerieke modellering, Delft3D, slib, ETM, Schelde-estuarium		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en Sediment > Sediment > Cohesief sediment > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	36	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Smolders, S.	Getekend door: Sven Smolders (Signature) Getekend op: 2022-06-27 13:38:18 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Sven Smolders</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2022-06-28 09:32:01 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkannm Bellafkih (Sign) Getekend op: 2022-06-26 19:22:07 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Abdelkannm 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. In dat kader presenteert dit rapport een modeloefening met Delft3D waarin de gevoeligheid van het slibtransportmodel voor variaties in invoerparameters en modelinstellingen wordt getest. Deze gevoeligheidsanalyse wordt analoog aan een gelijkaardige modeloefening met Telemac-3D uitgevoerd.

Na een totale simulatieduur van ongeveer drie maanden geven de simulaties in de huidige modeloefening nog geen evenwichtssituatie met een stabiel estuarien turbiditeitsmaximum. Er is in alle simulaties sprake van een blijvend dalende trend in sedimentconcentraties. De ruimtelijke verdeling van SSC over het estuarium laat wel hogere waarden zien in of nabij de gebieden waar die ook geobserveerd worden (i.e., van KM-110 tot KM-130 van de monding). Daarnaast volgt uit de analyse dat variaties in parameters die gerelateerd zijn aan slibeigenschappen zoals de valsnelheid of de erosieconstante vooral een kwantitatieve invloed hebben, terwijl het ruimtelijk patroon van de SSC-verdeling in het estuarium gelijkaardig blijft. Bij een significante toename van de bovenafvoer vindt wel een duidelijke verschuiving en afvlakking van de SSC-piek plaats. Het netto slibtransport is in nagenoeg alle configuraties eb-gedomineerd langs het estuarium, uitgezonderd een kleine zone nabij de opwaartse rand. Dit netto afwaarts gericht transport duidt op een geleidelijke uitspoeling van sediment. Simulaties met lokaal gegenereerde windgolven vormen hierop een uitzondering en geven wel een vloed-gedomineerd slibtransport in de zone afwaarts van het turbiditeitsmaximum.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Doelstelling.....	1
2 Geobserveerde sedimentconcentraties	2
3 Modelbeschrijving	3
3.1 Het Delft3D-Nevla model	3
3.2 Modelrooster.....	3
3.3 Bathymetrische gegevens.....	3
3.4 Afwaartse randvoorwaarden.....	4
3.5 Opwaartse randvoorwaarden	5
3.6 Bodemruwheid	5
3.7 Saliniteit.....	5
3.8 Sedimenttransport	7
3.8.1 Instellingen sedimenttransport	7
3.9 Overige modelinstellingen.....	10
4 Gevoeligheidsanalyse	11
4.1 Overzicht simulaties	11
4.2 Modelresultaten	12
4.2.1 Simulatie met basisinstellingen	12
4.2.2 Invloed sedimenteigenschappen: valsnelheid	15
4.2.3 Invloed sedimenteigenschappen: erosieconstante.....	17
4.2.4 Invloed sedimenteigenschappen: kritische bodemschuifspanning voor erosie	18
4.2.5 Invloed sedimenteigenschappen: kritische bodemschuifspanning voor depositie	20
4.2.6 Invloed simulatieperiode.....	21
4.2.7 Invloed saliniteit	24
4.2.8 Invloed bovenafvoer Boven-Zeeschelde	26
4.2.9 Invloed windgolven	29

5	Conclusies	33
5.1	Invloed hydrodynamica	33
5.2	Invloed sedimentkarakteristieken	34
5.3	Aanbevelingen	34
	Referenties	35

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet)	5
Tabel 2 – Basisinstellingen sedimenteigenschappen	8
Tabel 3 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model	10
Tabel 4 – Overzicht van gewijzigde modelinstellingen voor gevoeligheidsanalyse.	11
Tabel 5 – Variatie in valsnelheid.....	15
Tabel 6 – Variatie in erosieconstante	17
Tabel 7 – Variatie in kritische bodemschuifspanning voor erosie.....	18
Tabel 8 – Variatie in kritische bodemschuifspanning voor depositie.....	20
Tabel 9 – Tij-parameters voor simulaties TFS316 en TFS317 met verschillende simulatieperiodes.	23
Tabel 10 – Tij-parameters voor simulaties met (TFS318) en zonder saliniteit (TFS316).....	25
Tabel 11 – Tij-parameters voor simulaties met verschillende bovenafvoer te Merelbeke.	27

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht SSC nabij wateroppervlak langsheen estuarium HTE-vaart	2
Figuur 2 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster.....	4
Figuur 3 – Opgelegd getij aan de afwaartse rand.....	4
Figuur 4 – Manning’s ruwheidsveld voor Westerschelde Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd bij afregeling van het 2D NeVla model door Vanlede <i>et al.</i> (2009).....	6
Figuur 5 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.....	6
Figuur 6 – Dikte initiële sedimentlaag in Zeeschelde.....	9
Figuur 7 – Temporele SSC-ontwikkeling gedurende de 45-dagen durende simulatie ter hoogte van Bath, Oosterweel en Driegoten.	13
Figuur 8 – Ontwikkeling in getij-gemiddelde SSC gedurende de 45 dagen van de basissimulatie.	14
Figuur 9 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor de basissimulatie (TFS318).	14
Figuur 10 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor de basissimulatie (TFS318).	15
Figuur 11 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met variërende valsnelheden ω_s (TFS318-322).....	16
Figuur 12 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met variërende valsnelheden ω_s (TFS318-322).....	16
Figuur 13 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met variërende waarden voor de erosieconstante M_E (TFS318 en TFS324-327).	17
Figuur 14 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met variërende waarden voor de erosieconstante M_E (TFS318 en TFS324-327).	18
Figuur 15 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met variërende waarden voor de kritische schuifspanning voor erosie $\tau_{kr,e}$ (TFS318 en TFS329-330).....	19
Figuur 16 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met variërende waarden voor de kritische schuifspanning voor erosie $\tau_{kr,e}$ (TFS318 en TFS329-330).....	19
Figuur 17 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met $\tau_{kr,d}$ aangepast van 1,0 N/m ² in TFS318 naar 1000 N/m ² in TFS328.....	20
Figuur 18 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties $\tau_{kr,d}$ aangepast van 1,0 N/m ² in TFS318 naar 1000 N/m ² in TFS328.	21
Figuur 19 – Gesimuleerd waterstandsverloop met verschillende simulatieperiodes (TFS316 en TFS317)....	22
Figuur 20 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met verschillende simulatieperiodes (TFS316 en TFS317).....	23
Figuur 21 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met verschillende simulatieperiodes (TFS316 en TFS317).....	24
Figuur 22 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met (TFS318) en zonder saliniteit (TFS316).....	25

Figuur 23 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met (TFS318) en zonder saliniteit (TFS316).....	26
Figuur 24 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties zonder bovenafvoer in Merelbeke (TFS331), met een lage bovenafvoer in Merelbeke (TFS318) en met hoge bovenafvoer te Merelbeke (TFS337-338).....	28
Figuur 25 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties zonder bovenafvoer in Merelbeke (TFS331), met een lage bovenafvoer in Merelbeke (TFS331) en met hoge bovenafvoer te Merelbeke (TFS337-338).....	28
Figuur 26 – Gemodelleerde golfhoogtes in de Zeeschelde voor simulatie TFS340 (met D3D-Wave en windsnelheden van 7,0 m/s).	29
Figuur 27 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties zonder golfmodule (TFS318) en met de invloed van windgolven bij windsnelheden van 7,0 m/s en 14,0 m/s (TFS340 en TFS341).	30
Figuur 28 – Ontwikkeling in getij-gemiddelde SSC in de basissimulatie (TFS318) en met windgolven (TFS340).	31
Figuur 29 – Temporele SSC-ontwikkeling gedurende de 45-dagen durende simulatie ter hoogte van Driegoten voor de basissimulatie (TFS318) en een simulatie met windgolven (TFS340).	31
Figuur 30 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties zonder golfmodule (TFS318) en met de invloed van windgolven bij windsnelheden van 7,0 m/s en 14,0 m/s (TFS340 en TFS341).	32

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 (Schramkowski *et al.*, in voorbereiding) en complexe (Smolders *et al.*, in voorbereiding) numerieke modellen ingezet om de seizoenale variatie van sedimentconcentraties in het Schelde-estuarium te onderzoeken. Naast het Telemac-3D model Scaldis, dat door Smolders *et al.* (in voorbereiding) wordt toegepast, kan eveneens gebruik worden gemaakt van het Delft3D-NeVla model om slibtransport te simuleren.

1.2 Doelstelling

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. Dit is tot op heden niet het geval voor de complexe modellering in Telemac-3D.

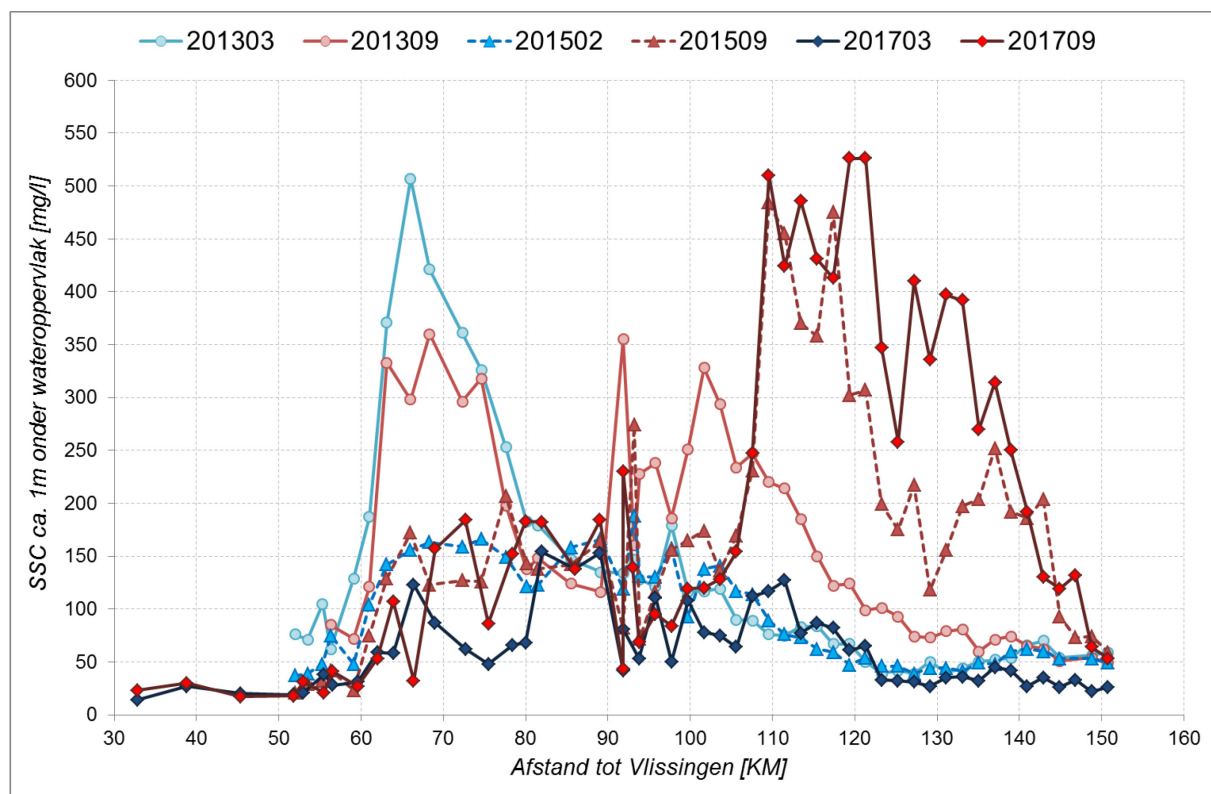
Dit rapport beschrijft een gevoeligheidsanalyse die met het Delft3D-NeVla model is uitgevoerd om de mogelijkheden tot het representeren van de ruimtelijke verdeling van gesuspendeerd sediment in het Schelde-estuarium te verkennen. De gevoeligheidsanalyse wordt analoog aan een modeloefening met Telemac-3D uitgevoerd (i.e., Deelrapport 5 door Smolders *et al.*, in voorbereiding).

2 Geobserveerde sedimentconcentraties

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).

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 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 derhalve de invloed van bovenafvoer op SSC-waarden in het estuarium modelmatig onderzocht.



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

3 Modelbeschrijving

3.1 Het Delft3D-NeVla model

Een van de modellen van het Schelde-estuarium die voor dit onderzoek beschikbaar zijn 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. 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 dit rapport wordt de sedimenttransportmodule gebruikt voor het modelleren van slibtransport. Slibmodellering met het Delft3D-NeVla model werd eerder uitgevoerd door Coen *et al.* (2016) in een studie in het kader van de sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde. Hierbij werd echter met een verkort (Hansweert tot Durmemonding) model gewerkt. In het huidige rapport wordt met het volledige NeVla model een nieuwe gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met het oog op toekomstige modelverbetering.

Gedetailleerde informatie over de Delft3D software is beschikbaar in de Delft3D-FLOW user manual (Deltares, 2016a).

3.2 Modelrooster

Het NeVla-rooster omvat het volledige Schelde-estuarium van de Noordzee, de Vlake van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de tijgebonden 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 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 2).

3.3 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.



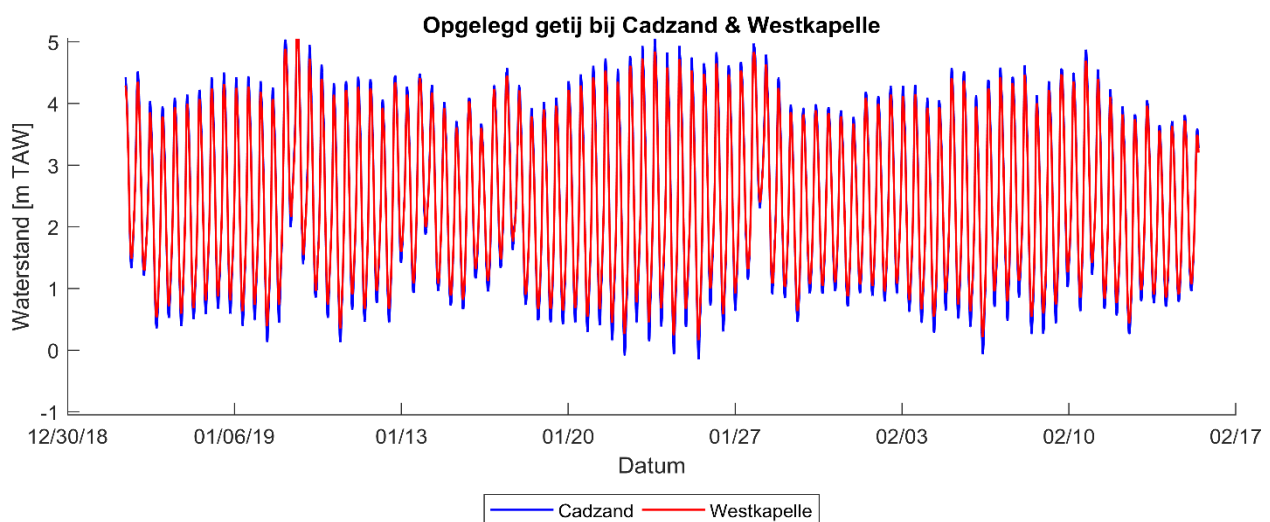
Figuur 2 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster

3.4 Afwaartse randvoorwaarden

Afwaartse randvoorwaarden voor morfologische simulaties in Delft3D

Aan de afwaartse rand worden gemeten waterstanden van Westkapelle en Cadzand opgelegd voor de periode 1-1-2019 tot 15-2-2019 (Figuur 3). De simulatieperiode bedraagt 45 dagen, waarbij de laatste 14,5 dagen van iedere simulatie worden gebruikt om springtij-doodtij-gemiddelde transporten en concentraties te bepalen.

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.



Figuur 3 – Opgelegd getij aan de afwaartse rand.

3.5 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 een representatieve zomerconditie worden beschouwd. Uiteindelijk zal de invloed van seizoenale variatie in de bovenafvoer op de ruimtelijke verdeling van gesuspendeerd sediment in het estuarium met een slibmodel onderzocht worden.

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).

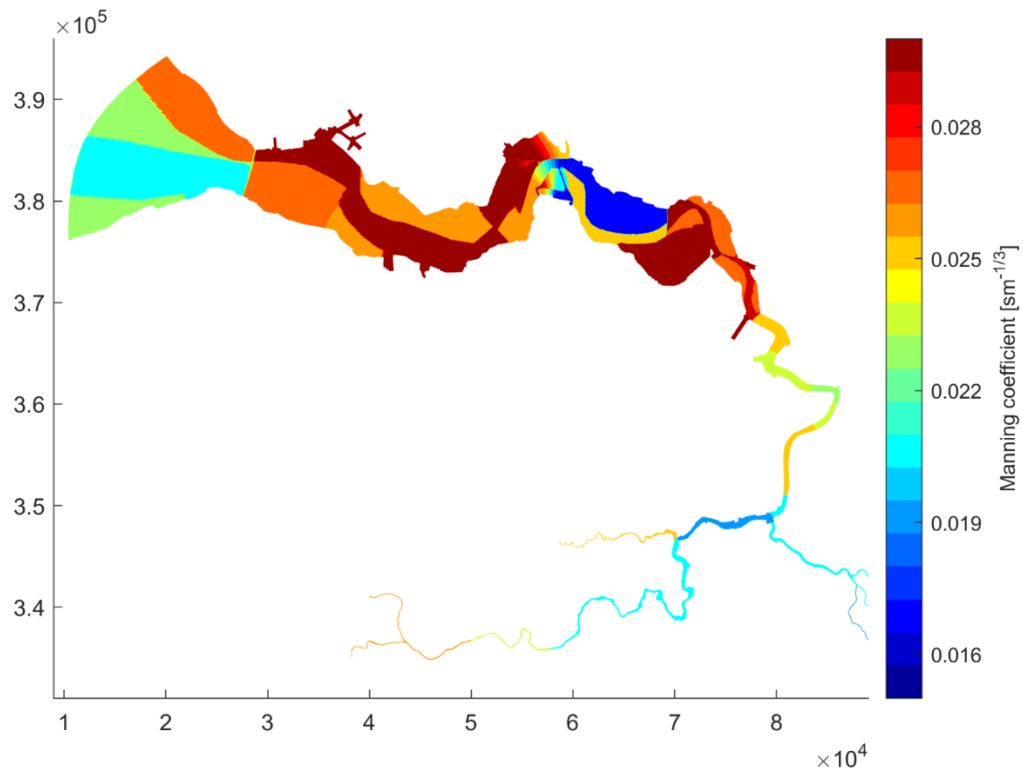
Locatie	Debiet [m ³ /s]	SSC [kg/m ³]
Boven-Zeeschelde	7,4	0,05
Dender	6,1	0,05
Zenne	6,5	0,05
Dijle	7,4	0,05
Grote Nete	4,6	0,02
Kleine Nete	3,6	0,02
Kanaal Gent-Terneuzen	31,1	0,0

3.6 Bodemruwheid

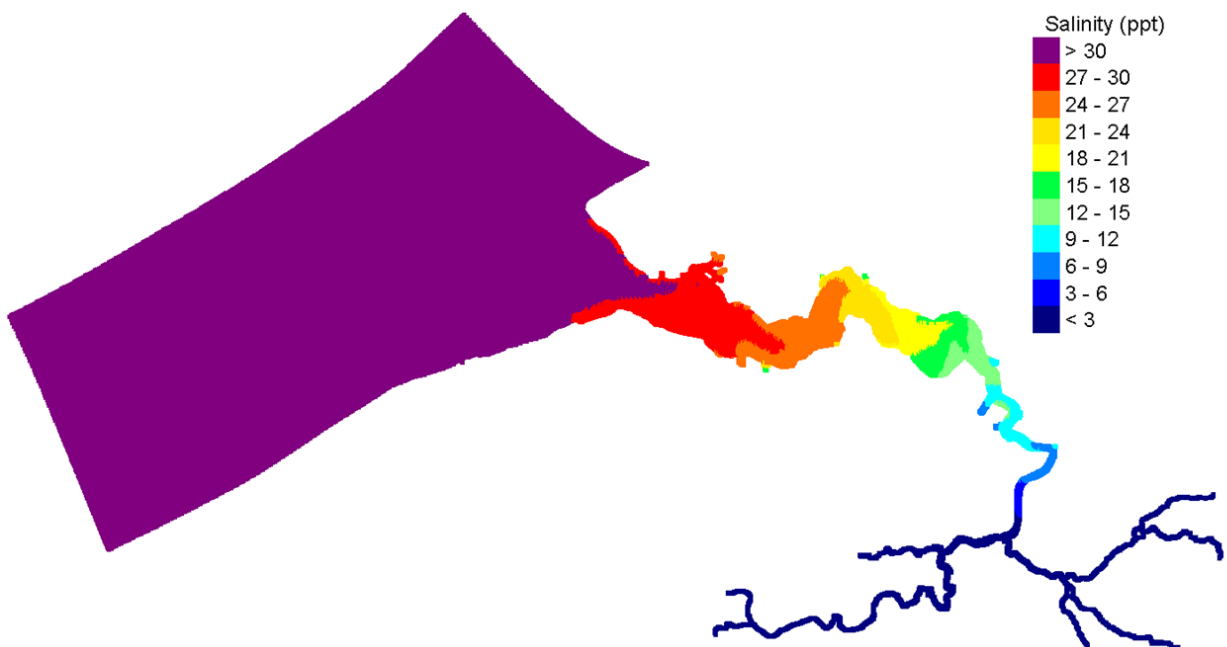
In deze gevoeligheidsanalyse is het ruwheidsveld gebruikt zoals door Vanlede *et al.* (2009) gekalibreerd in het kader van de afregeling van het 2D NeVla randvoorwaardenmodel (i.e., in SIMONA) (zie Figuur 4).

3.7 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. Bovendien wordt het initiële zoutveld geadopteerd uit de eerdere AvdT modelstudie door Stark *et al.* (2019). Dit zoutveld wordt weergegeven in Figuur 5. In de gevoeligheidsanalyse wordt de invloed van saliniteit op de modelresultaten onderzocht (§3.7).



Figuur 4 – Manning's ruwheidsveld voor Westerschelde Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd bij afregeling van het 2D NeVla model door Vanlede *et al.* (2009).



Figuur 5 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.

3.8 Sedimenttransport

In het geval van slib of cohesief sediment wordt 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}]

3.8.1 Instellingen sedimenttransport

De invoerwaarden en modelconfiguratie voor de sedimenteigenschappen worden in Tabel 2 opgesomd. In het kader van de huidige gevoeligheidsanalyse worden de sedimenteigenschappen uiteraard gevarieerd. Er is geen sprake van morfologische updating van de bathymetrie.

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 $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd.

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

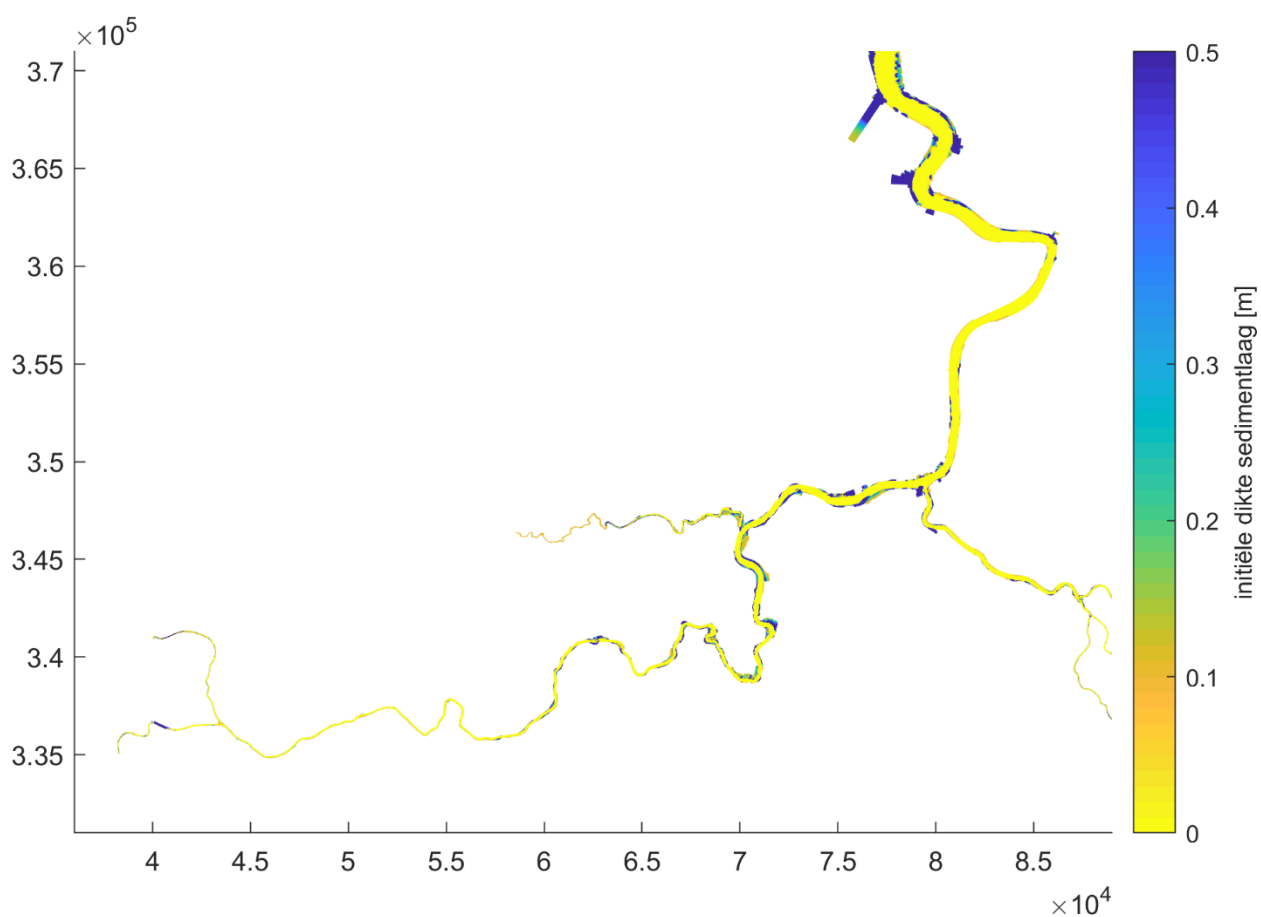
Tabel 2 – Basisinstellingen sedimenteigenschappen.

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

Beschikbaarheid sediment op de bodem

De ruimtelijke verdeling van de sedimentlaag wordt verkregen door een simulatie van 45 dagen met de basisinstellingen uit te voeren (i.e., zoals in dit hoofdstuk beschreven wordt). Hierbij wordt een ruimtelijk constante laagdikte van 0,10 m toegepast. De uiteindelijke sedimentverdeling die na afloop van deze basissimulatie verkregen wordt, zal bij de gevoeligheidsanalyse vervolgens als initiële conditie gebruikt worden. Figuur 6 geeft de initiële dikte van de sedimentlaag in de Zeeschelde weer. 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. Dit vermindert de sterke initiële respons van het model.

De initiële dikte van de sedimentlaag in de Westerschelde is op 0 m gesteld, i.e. de bodem in de Westerschelde ligt vast, dit om te voorkomen dat de hydrodynamica en het sedimenttransport in dit gebied sterk worden beïnvloed door de initiële condities. Uit (test)simulaties 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 6 – Dikte initiële sedimentlaag in Zeeschelde.

3.9 Overige modelinstellingen

De overige modelinstellingen voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model zijn opgesomd in Tabel 3.

Tabel 3 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model

Parameter	Waarde
Time step	0.125 min
Salinity	True
Sediment	True
Secondary Flow	False
Morphological Updating	False
Gravity	9.813 m/s ²
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
History output interval	10 min

4 Gevoeligheidsanalyse

4.1 Overzicht simulaties

Tabel 4 geeft een overzicht van de simulaties die zijn uitgevoerd in het kader van deze gevoeligheidsanalyse met het Delft3D-NeVla model. Simulatie TFS318 (groen gemarkeerd) wordt als referentie gebruikt. De wijzigingen in de instellingen ten opzichte van deze referentierun worden voor elke simulatie gemarkeerd (dikgedrukt) weergegeven in Tabel 4.

In de volgende paragrafen wordt per gewijzigde parameter of modelinstelling besproken wat de invloed ervan is op de gesimuleerde SSC-variatie langsheen het estuarium en wat de invloed is op de netto sedimentfluxen. Voor enkele modelinstellingen wordt ook de invloed op de getijvoortplanting en de getij-asymmetrie summier geanalyseerd.

Tabel 4 – Overzicht van gewijzigde modelinstellingen voor gevoeligheidsanalyse.

Run-id	simulatieperiode	saliniteit	golven	wind	ω_s mm/s	M_E kg/m ² /s	$\tau_{kr,e}$ N/m ²	$\tau_{kr,d}$ N/m ²	$Q_{Merelbeke}$ m ³ /s
TFS316	1-1-19-15/2/19	uit	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS317	1-3-19-15/4/19	uit	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS318	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS319	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	0,2	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS320	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	0,6	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS321	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	1,2	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS322	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	3,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS324	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻⁴	0,2	1,0	7,4
TFS325	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	5,0·10 ⁻⁴	0,2	1,0	7,4
TFS326	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	2,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS327	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻²	0,2	1,0	7,4
TFS328	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1000	7,4
TFS329	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,4	1,0	7,4
TFS330	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,6	1,0	7,4
TFS331	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	0
TFS337	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	100
TFS338	1-1-19-15/2/19	aan	uit	uit	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	200
TFS340	1-1-19-15/2/19	aan	aan	7,0 m/s	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4
TFS341	1-1-19-15/2/19	aan	aan	14,0 m/s	2,0	1,0·10 ⁻³	0,2	1,0	7,4

4.2 Modelresultaten

4.2.1 Simulatie met basisinstellingen

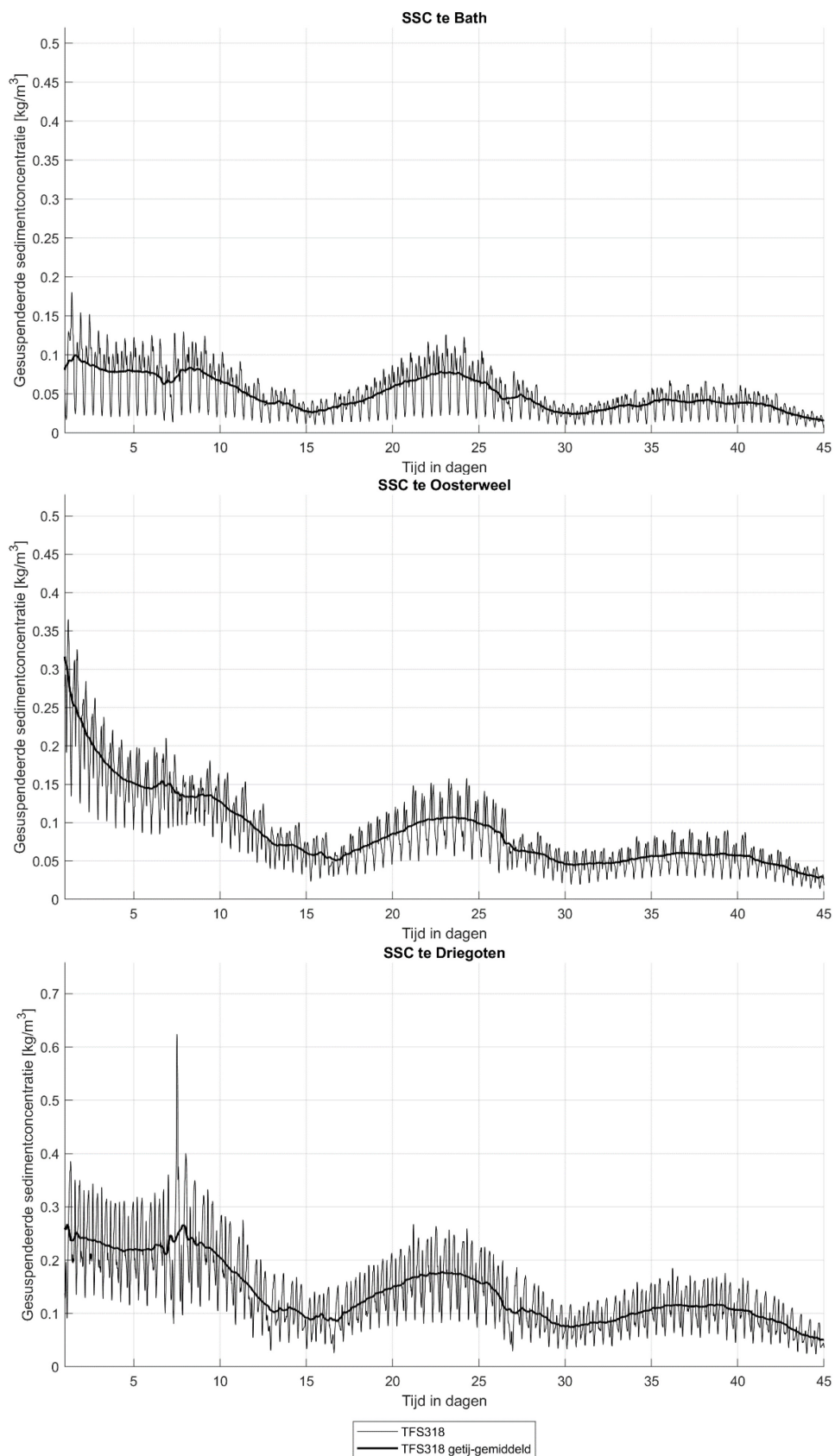
Sedimenttransport en SSC

De ontwikkeling van de sedimentconcentraties langsheen het estuarium over de 45 dagen durende simulatie laat een neerwaartse trend zien (Figuur 7 en Figuur 8). In het eerste deel van de simulatie nemen de concentraties nog toe tot dag 3, waarschijnlijk een gevolg van de initiële respons van het model, maar na verloop van tijd zakken de SSC-waarden voortdurend. Uiteraard is er ook een invloed van de fase binnen de springtij-doodtij-cyclus (zie Figuur 3 voor het waterstandsverloop aan de afwaartse rand) zoals blijkt uit het temporele verloop van de sedimentconcentraties op verschillende locaties in het estuarium (zie Figuur 7 voor het SSC-verloop te Bath, Oosterweel en Driegoten). Daarom wordt voor de SSC-verdeling over het estuarium een gemiddelde over de laatste 14,5 dagen van de simulatie bepaald (Figuur 9). Dit springtij-doodtij-gemiddelde wordt ook gebruikt in de vergelijking met andere simulaties in deze gevoeligheidsanalyse. Tot slot toont Figuur 10 de netto sedimentflux over een springtij-doodtij-cyclus (i.e., geschaald naar m³ per jaar).

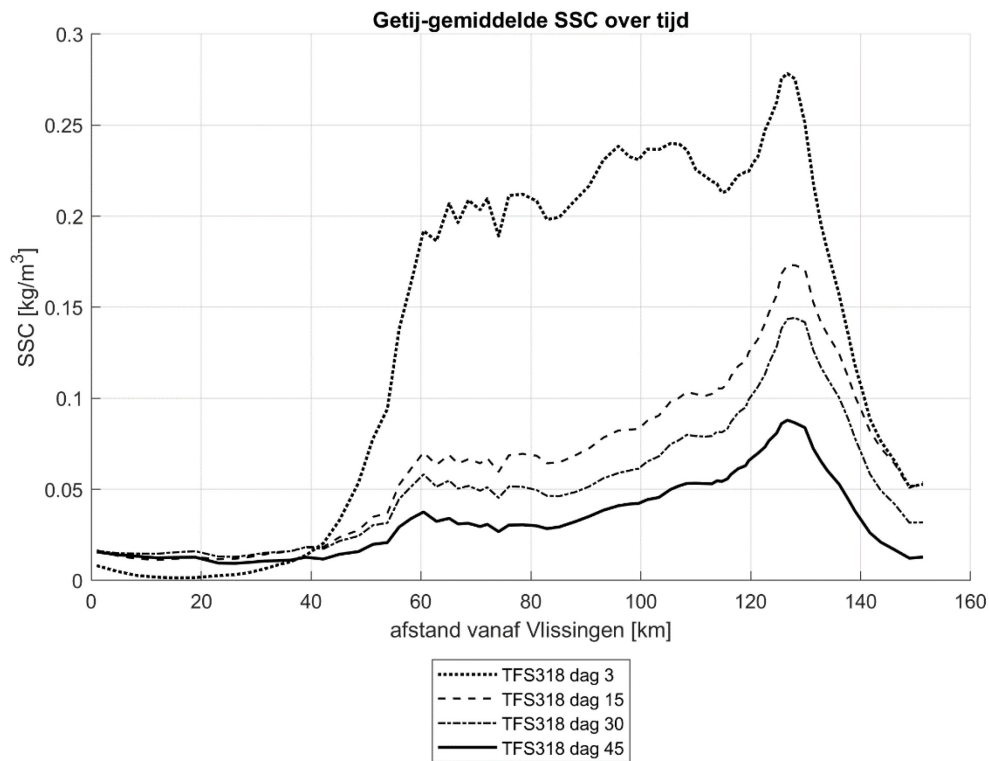
De uiteindelijke SSC-verdeling in simulatie TFS318 met de basisinstellingen zoals opgesomd in Hoofdstuk 3 vertoont een duidelijke piek rond KM-130 vanaf Vlissingen. De locatie van deze piek komt overeen met de geobserveerde piek in SSC-waarden (Figuur 1). Kwantitatief is de gemodelleerde SSC-waarde van ongeveer 0,15 kg/m³ echter een momentopname. De voorgaande springtij-doodtij-cyclus geeft hogere concentraties en een langere simulatie zou lagere SSC-waarden opleveren, getuige de dalende trend in Figuur 8. Daarom mag een kwantitatieve vergelijking met de geobserveerde waarden niet gemaakt worden. De gemodelleerde concentraties vormen immers geen (dynamische) evenwichtstoestand.

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) 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. Welke processen ontbreken of foutief worden gemodelleerd (e.g. boven- of benedenstroomse aanvoer van slib, representatie van het opwoelen en de depositie van slib in luwe zones, etc.) zal nader moeten worden onderzocht.

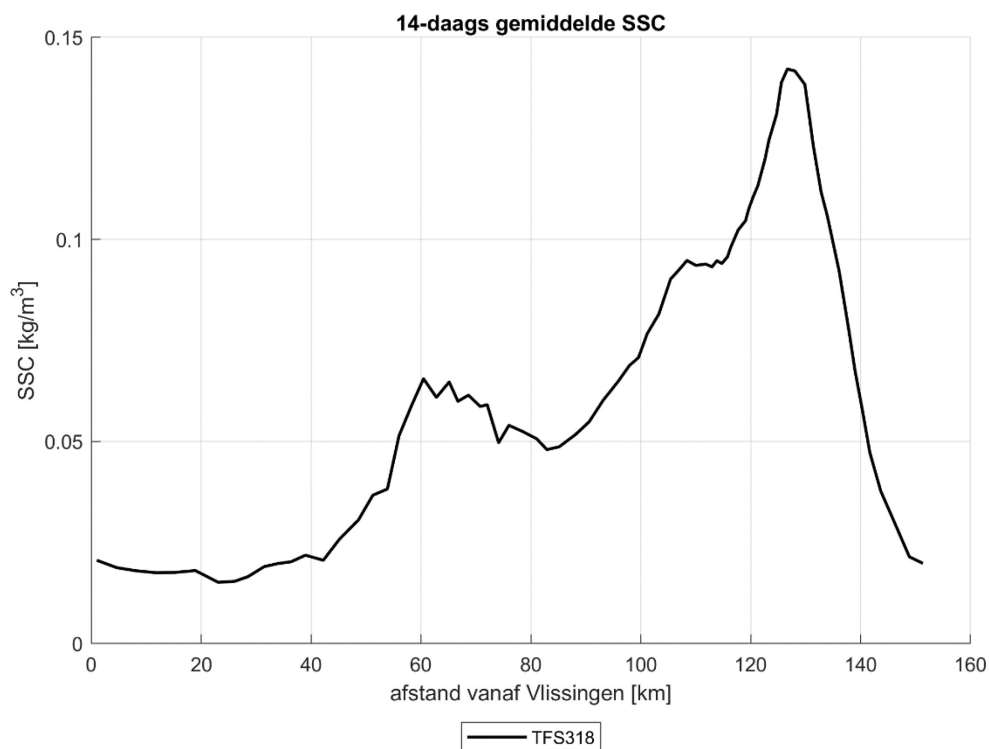
Naast de hoge piek in het bovenstroomse deel van de Zeeschelde is er ook sprake van een minder sterke piek in SSC-waarden nabij KM-50. Deze piek bevindt zich in een gebied waar initieel geen sliblaag wordt opgelegd en is dus het gevolg van het netto afwaartse transport van sediment tijdens de simulatie. 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.



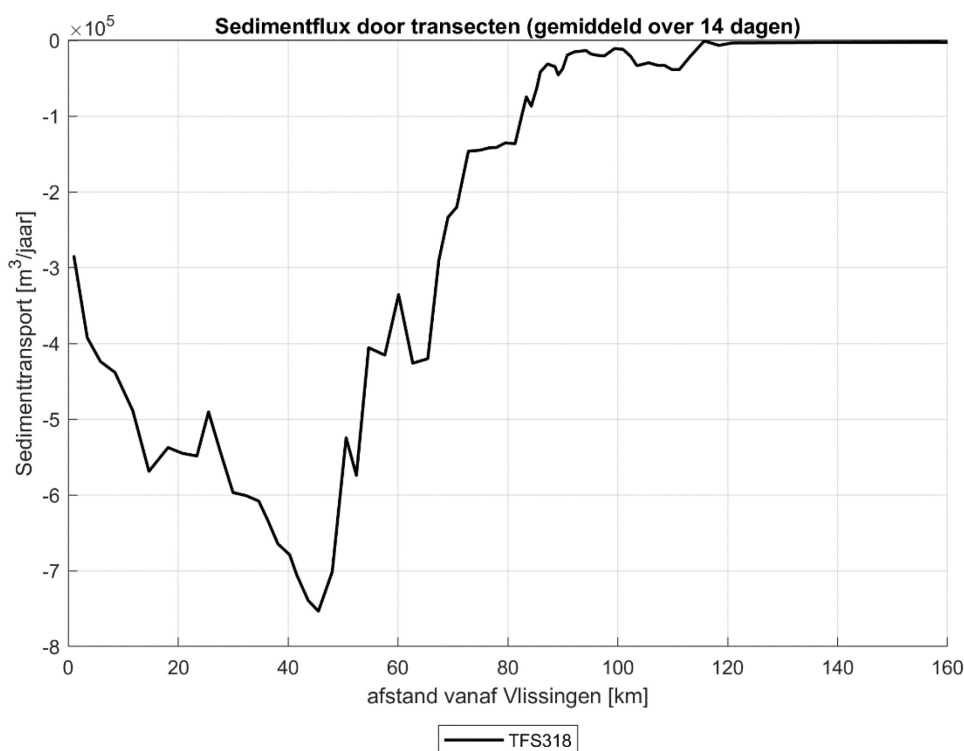
Figuur 7 – Temporele SSC-ontwikkeling gedurende de 45-dagen durende simulatie ter hoogte van Bath, Oosterweel en Driegoten.



Figuur 8 – Ontwikkeling in getij-gemiddelde SSC gedurende de 45 dagen van de basissimulatie.



Figuur 9 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor de basissimulatie (TFS318).



Figuur 10 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor de basissimulatie (TFS318).

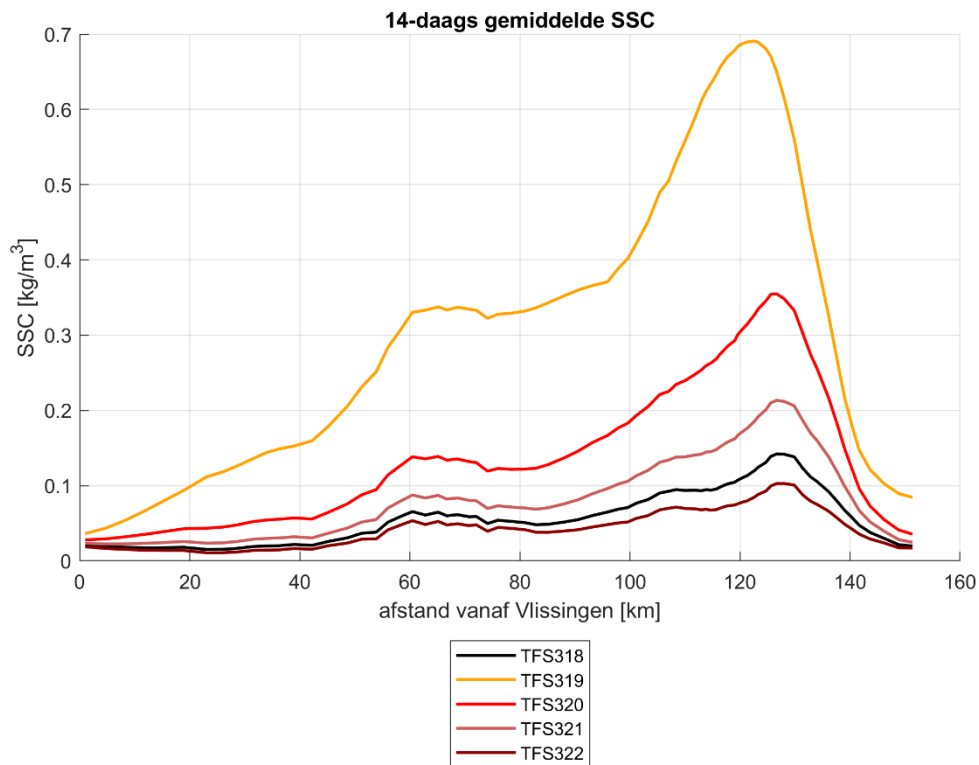
4.2.2 Invloed sedimenteigenschappen: valsnelheid

In deze paragraaf wordt het effect van variaties in de valsnelheid ω_s geanalyseerd. Deze wordt gevarieerd tussen $\omega_s = 0,2$ mm/s en $\omega_s = 3,0$ mm/s (Tabel 5).

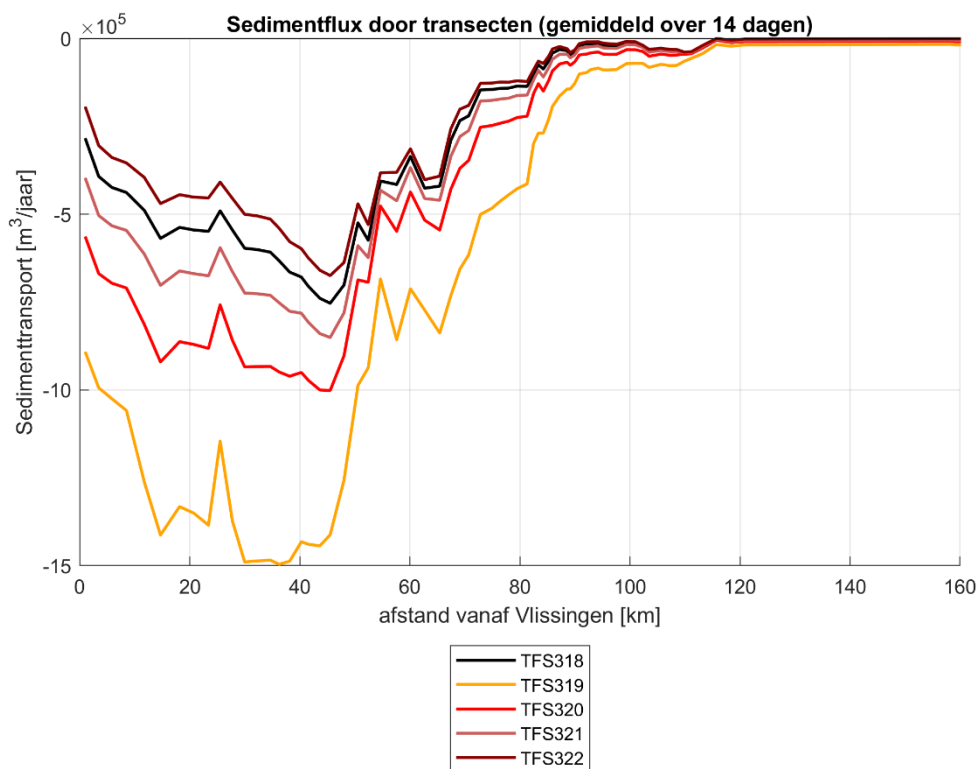
De gebruikte valsnelheid in de modelsimulatie heeft een sterke invloed op de SSC-waarden (Figuur 11) en het netto sedimenttransport (Figuur 12) langsheen het estuarium. Hogere valsnelheden, zoals in simulatie TFS322 leiden tot lagere slibtransporten en lagere concentraties aan het einde van de 45 dagen durende simulatie. Lage valsnelheden, zoals in simulaties TFS319, TFS320 en TFS321 leiden juist tot hogere slibtransporten en SSC-waarden. Ook de SSC-piek van bijna 700 mg/L in simulatie TFS319, die kwantitatief gelijkaardig is aan de geobserveerde SSC-piek tijdens zomercondities, vormt weer een momentopname in de dalende trend van sedimentconcentraties. De ruimtelijke verdeling van de slibconcentraties is steeds gelijkend voor simulaties met variërende valsnelheden. De piek in SSC-waarden blijft gesitueerd rond KM-130, al is er een lichte afwaartse verschuiving voor simulatie TFS319 met de laagste valsnelheid van $\omega_s = 0,2$ mm/s. De netto sedimenttransporten blijven in alle simulaties ook afwaarts gericht, zelfs in TFS322 met een hogere valsnelheid. Op basis van de 45 dagen durende simulaties met variërende waarden voor ω_s kan vanwege de continu dalende trend niet worden vastgesteld of er een evenwichtstoestand ontstaat.

Tabel 5 – Variatie in valsnelheid.

Simulatie	ω_s
TFS318	$\omega_s = 2,0$ mm/s
TFS319	$\omega_s = 0,2$ mm/s
TFS320	$\omega_s = 0,6$ mm/s
TFS321	$\omega_s = 1,2$ mm/s
TFS322	$\omega_s = 3,0$ mm/s



Figuur 11 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met variërende valsnelheden ω_s (TFS318-322).



Figuur 12 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met variërende valsnelheden ω_s (TFS318-322).

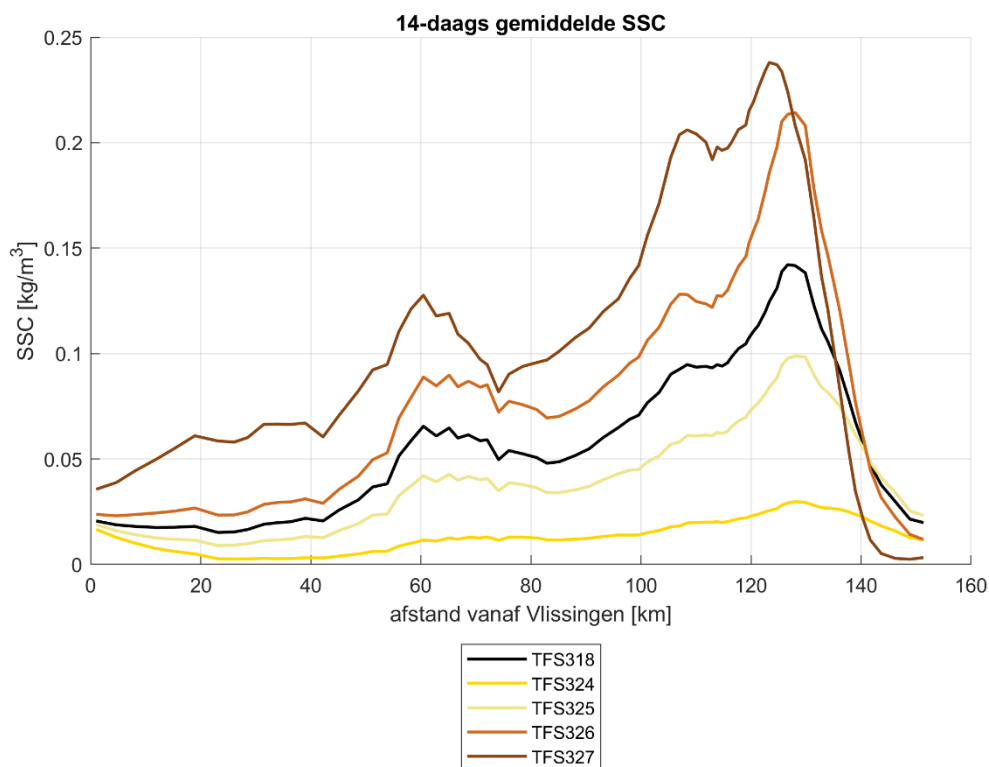
4.2.3 Invloed sedimenteigenschappen: erosieconstante

In deze paragraaf wordt het effect van variaties in de erosieconstante M_E geanalyseerd. Waarden voor M_E worden gevarieerd van $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ tot $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ (Tabel 6).

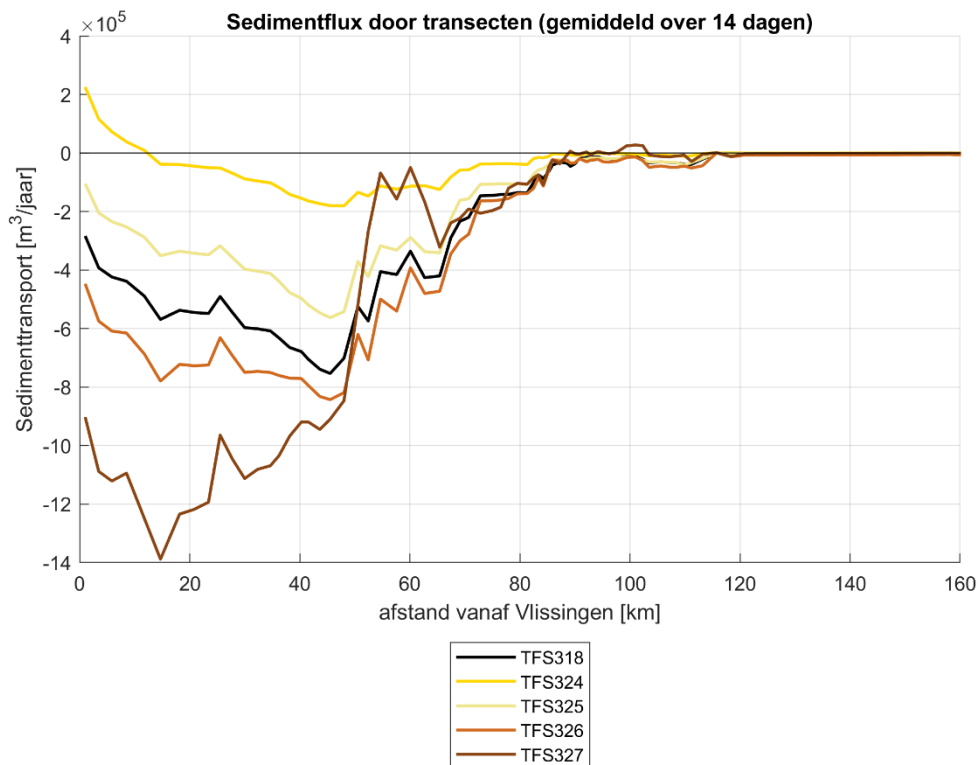
Ook de invloed van de erosieconstante M_E is vooral kwantitatief, maar de verschillen in SSC-waarden zijn minder groot dan bij variaties in ω_s . Een lagere waarde voor M_E zoals in simulaties TFS324 en TFS325 leidt tot lagere sedimentconcentraties (Figuur 13) en sedimenttransporten (Figuur 14). Een hogere erosieconstante zoals in simulaties TFS326 en TFS327 leidt andersom tot hogere afwaartse sedimenttransporten en hogere SSC-waarden. Hoewel de concentraties in deze simulaties hoger zijn is er nog steeds sprake van een dalende trend gedurende de simulatie. Op basis van de 45 dagen durende simulatie kan daarom niet worden vastgesteld of er een evenwichtstoestand ontstaat. In simulatie TFS327 met de hoogste erosieconstante van $M_E = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ is wel een opmerkelijke afwijking in de netto sedimenttransporten waarneembaar. Nabij KM-60 is het afwaarts transport in deze simulatie lokaal veel lager dan in de andere simulaties. Deze afwijking verklaart ook de meer afgetekende piek in SSC die voor deze simulatie in Figuur 13 zichtbaar is.

Tabel 6 – Variatie in erosieconstante.

Simulatie	M_E
TFS318	$M_E = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$
TFS324	$M_E = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$
TFS325	$M_E = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$
TFS326	$M_E = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$
TFS327	$M_E = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2/\text{s}$



Figuur 13 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met variërende waarden voor de erosieconstante M_E (TFS318 en TFS324-327).



Figuur 14 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met variërende waarden voor de erosieconstante M_E (TFS318 en TFS324-327).

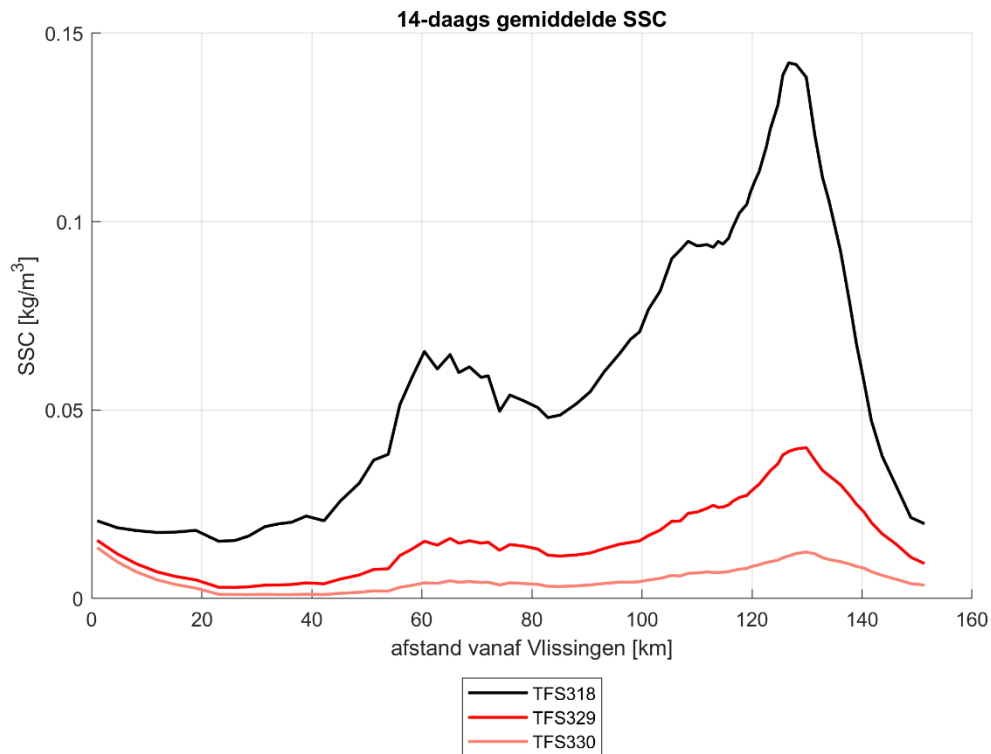
4.2.4 Invloed sedimenteigenschappen: kritische bodemschuifspanning voor erosie

In deze paragraaf wordt de kritische bodemschuifspanning voor erosie van sediment $\tau_{kr,e}$ aangepast van $0,2 \text{ N/m}^2$ in TFS318 naar $0,4 \text{ N/m}^2$ in TFS329 en $0,6 \text{ N/m}^2$ in TFS330 (Tabel 7). Er wordt dus enkel gekeken naar het verhogen van $\tau_{kr,e}$.

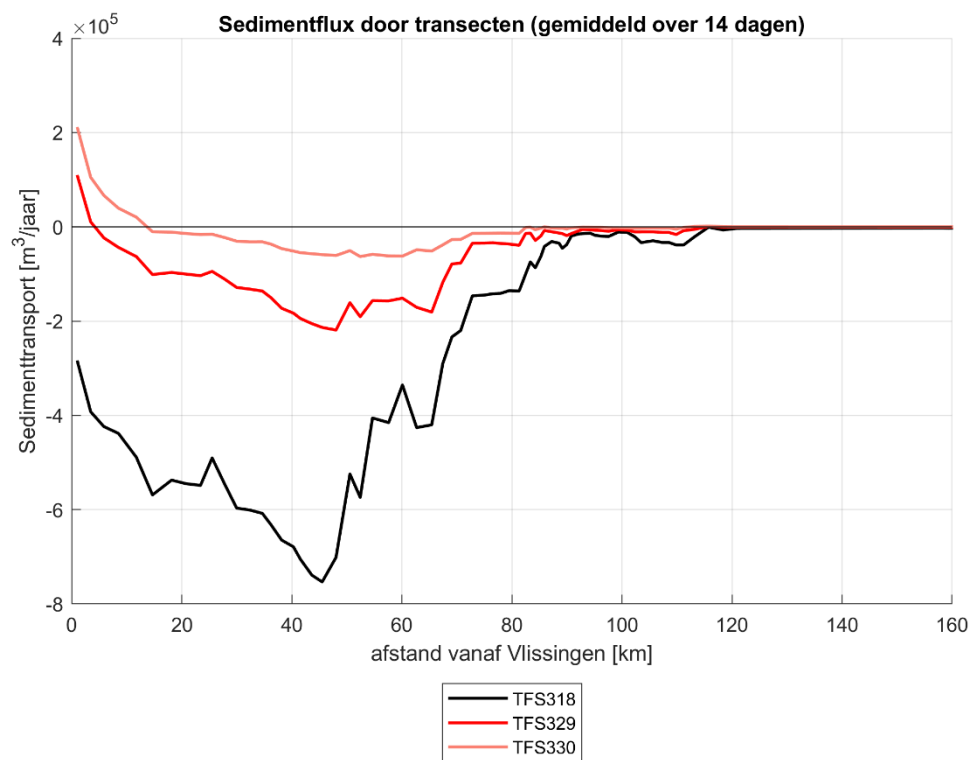
Een hogere kritische bodemschuifspanning voor erosie leidt tot lagere sedimentconcentraties in het gehele estuarium (Figuur 15). Door de hogere drempelwaarde zal er immers minder sediment op worden gewoeld en in suspensie komen. De netto sedimenttransporten nemen eveneens af als $\tau_{kr,e}$ wordt verhoogd (Figuur 16). Opvallend is dat in het meest afwaartse deel van het transect langsheen het estuarium (i.e., tot KM-20 vanaf Vlissingen) een opwaarts transport wordt gemodelleerd in de simulaties met hogere waarden voor $\tau_{kr,e}$. Er is in Figuur 15 ook sprake van een lage piek in SSC aan het begin van het transect. De bijbehorende concentraties zijn echter zeer laag, vanwege het weinige sediment dat in suspensie komt in deze simulatie. Ook voor deze piek geldt dat de trend in de simulatie dalend is en er geen sprake is van een evenwicht dat zich instelt na de simulatieduur van 45 dagen.

Tabel 7 – Variatie in kritische bodemschuifspanning voor erosie.

Simulatie	$\tau_{kr,e}$
TFS318	$\tau_{kr,e} = 0,2 \text{ N/m}^2$
TFS329	$\tau_{kr,e} = 0,4 \text{ N/m}^2$
TFS330	$\tau_{kr,e} = 0,6 \text{ N/m}^2$



Figuur 15 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met variërende waarden voor de kritische schuifspanning voor erosie $\tau_{kr,e}$ (TFS318 en TFS329-330).



Figuur 16 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met variërende waarden voor de kritische schuifspanning voor erosie $\tau_{kr,e}$ (TFS318 en TFS329-330).

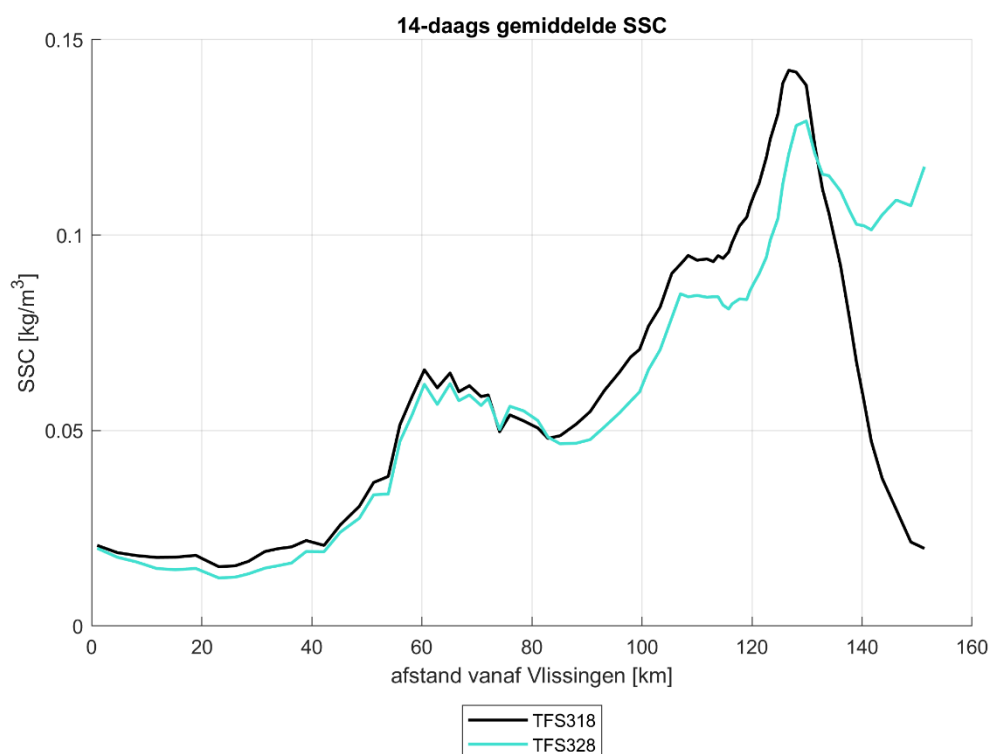
4.2.5 Invloed sedimenteigenschappen: kritische bodemschuifspanning voor depositie

In deze paragraaf wordt de kritische bodemschuifspanning voor depositie van sediment $\tau_{kr,d}$ aangepast van 1,0 N/m² in TFS318 naar 1000 N/m² in TFS328 (Tabel 8). In die laatste simulatie is daardoor altijd sprake van depositie, terwijl er in de simulatie met de basisinstellingen enkel sprake is van depositie als de stroomsnelheden en bijbehorende bodemschuifspanningen niet te hoog zijn.

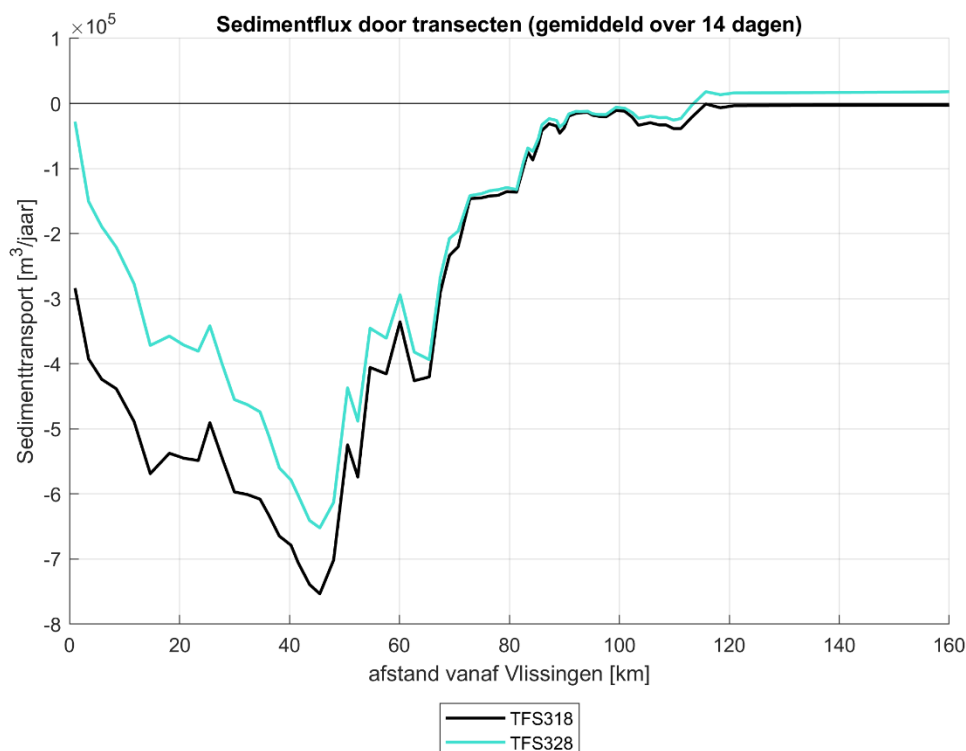
Het verhogen van $\tau_{kr,d}$ heeft slechts een beperkte invloed op de SSC-verdeling langsheen het estuarium (Figuur 17). Als er altijd depositie is (TFS328) zijn de SSC-waarden iets lager dan wanneer depositie gelimiteerd wordt bij hogere stroomsnelheden. Er blijft dan logischerwijs meer sediment in suspensie. Ook de netto slibtransporten langsheen het estuarium zijn iets lager als er altijd sprake is van depositie (Figuur 18). In het meest bovenstroomse deel is in dat geval sprake van een netto opwaarts transport, wat leidt tot hogere concentraties in het bovenstroomse deel van het estuarium (i.e., opwaarts van de SSC-piek bij KM-130). De temporele ontwikkeling van de SSC-waarden is ook in dit geval dalend, wat wil zeggen dat er na afloop van de simulatie nog geen evenwichtsconcentratie is bereikt. Door de netto opwaartse sedimentflux is er wel sprake van een toename van het totale sedimentvolume in het meest bovenstroomse deel.

Tabel 8 – Variatie in kritische bodemschuifspanning voor depositie.

Simulatie	$\tau_{kr,d}$
TFS318	$\tau_{kr,d} = 1,0 \text{ N/m}^2$
TFS328	$\tau_{kr,d} = 1000 \text{ N/m}^2$



Figuur 17 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met $\tau_{kr,d}$ aangepast van 1,0 N/m² in TFS318 naar 1000 N/m² in TFS328.



Figuur 18 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties $\tau_{kr,d}$ aangepast van 1,0 N/m² in TFS318 naar 1000 N/m² in TFS328.

4.2.6 Invloed simulatieperiode

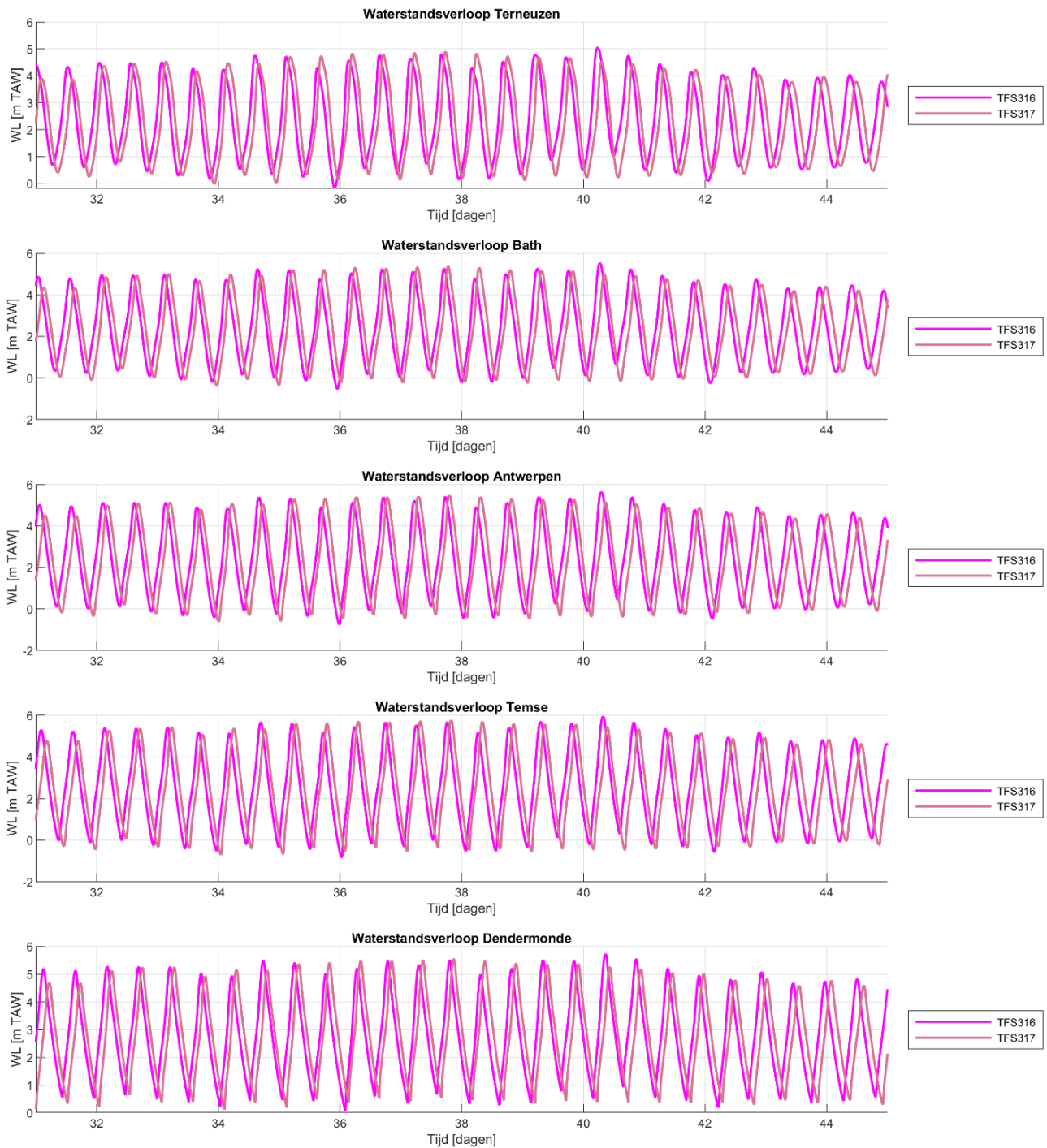
In deze paragraaf worden simulaties waarin enkel de simulatieperiode verschillend is vergeleken: TFS316 (i.e., 1/1/19-15/2/19) en TFS317 (i.e., 1/3/19-15/4/19). Eerst worden de verschillen in waterstandsverloop en asymmetrie kort besproken. Vervolgens wordt de invloed op slibtransport en SSC getoond. In simulaties TFS316 en TFS317 werd het effect van saliniteit uitgeschakeld. De invloed van saliniteit op de grootschalige getijbeweging en het slibtransport wordt in §4.2.7 besproken.

Vergelijking waterstanden

Figuur 19 toont het waterstandsverloop op verschillende locaties langsheen het estuarium voor de twee simulaties met verschillende simulatieperiodes. In Tabel 9 wordt voor dezelfde locaties de gemodelleerde getijslag en getij-asymmetrie op basis van de ratio tussen de stijgingsduur en de dalingsduur weergegeven. Uit deze vergelijking volgt dat de getijkaracteristieken erg gelijkend zijn voor de twee simulatieperiodes. In TFS317 (1/3/19-15/4/19) is de getijslag in de Boven-Zeeschelde iets lager dan in TFS316 (1/1/19-15/2/19). De ratio tussen stijgings- en dalingsduur is echter identiek.

Sedimenttransport en SSC

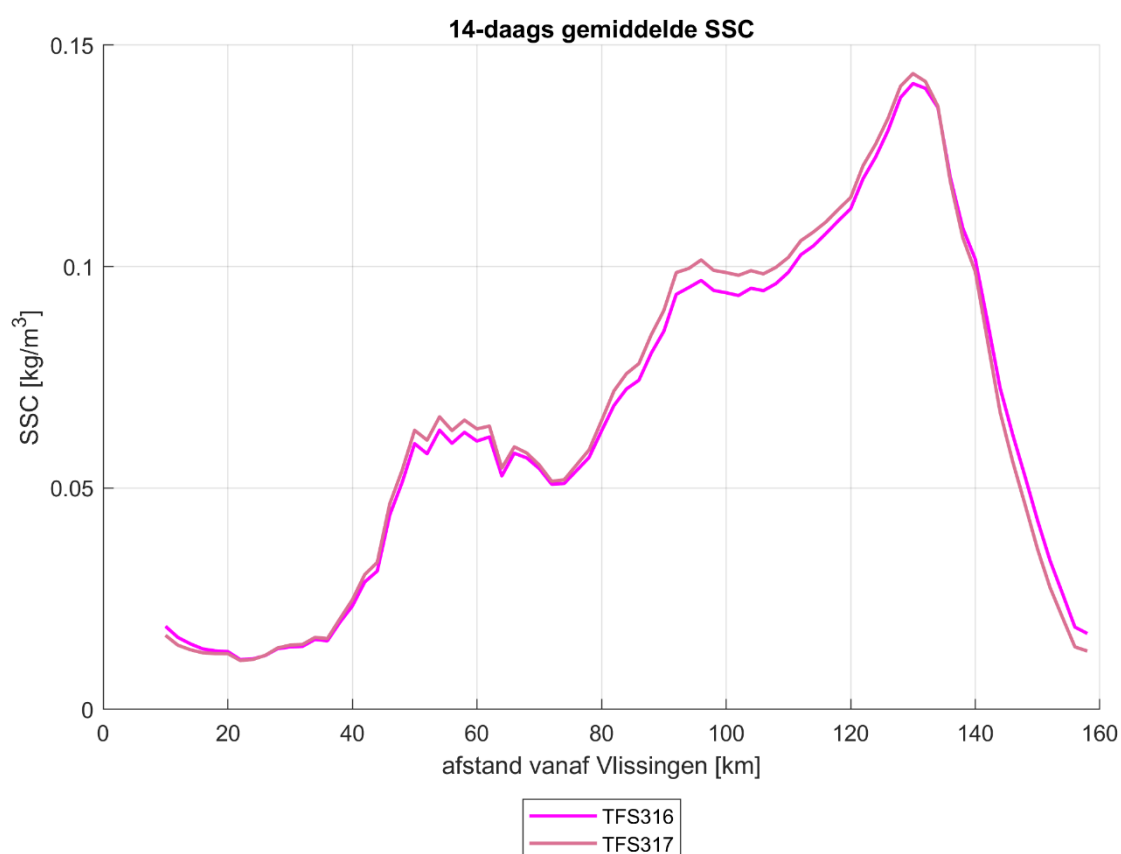
Het effect van de simulatieperiode op de springtij-doodtij-gemiddelde SSC-verdeling en de springtij-doodtij-gemiddelde slibtransporten is ook verwaarloosbaar (Figuur 20 en Figuur 21).



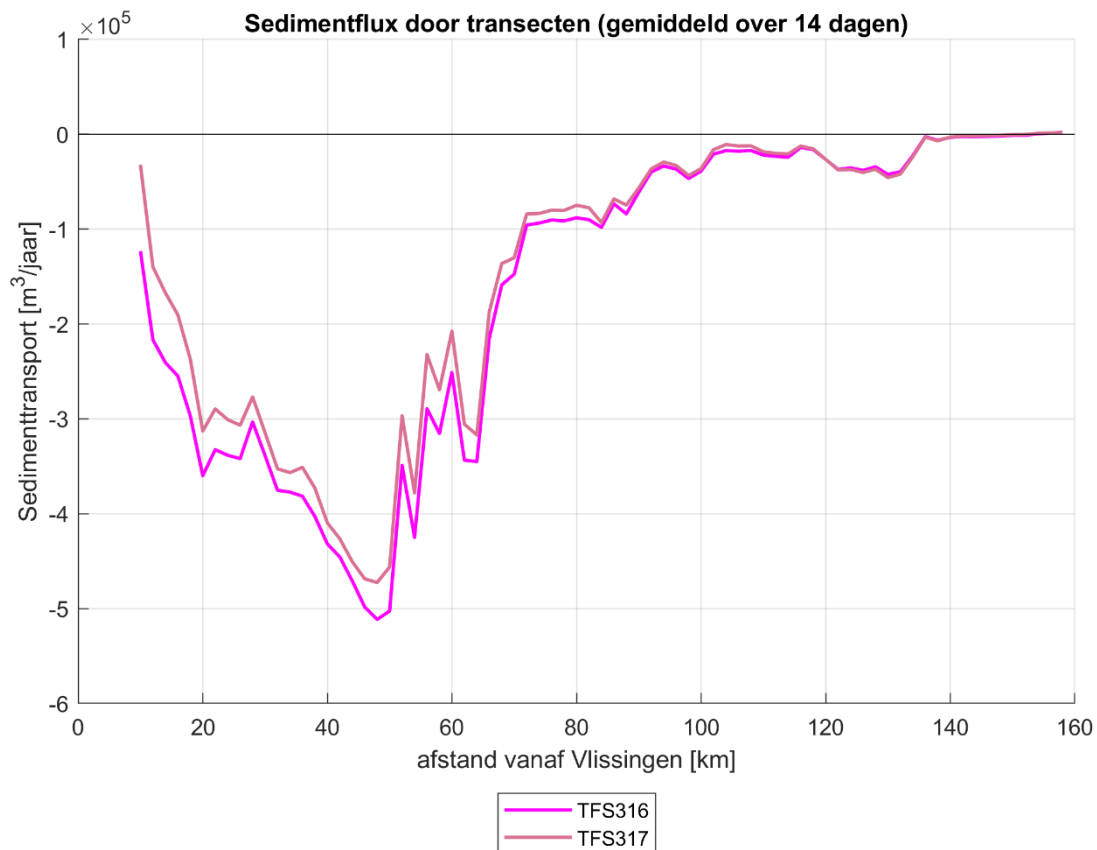
Figuur 19 – Gesimuleerd waterstandsverloop met verschillende simulatieperiodes (TFS316 en TFS317).

Tabel 9 – Tij-parameters voor simulaties TFS316 en TFS317 met verschillende simulatieperiodes.

Tij-parameters	Locatie	TFS316	TFS317
Getijslag	<i>Terneuzen</i>	4,16 m	4,17 m
	<i>Bath</i>	4,97 m	4,98 m
	<i>Antwerpen</i>	5,32 m	5,33 m
	<i>Temse</i>	5,70 m	5,70 m
	<i>Dendermonde</i>	4,80 m	4,74 m
	<i>Melle</i>	3,46 m	3,39 m
Ratio: stijgingsduur / dalingsduur	<i>Terneuzen</i>	0,88	0,88
	<i>Bath</i>	0,89	0,89
	<i>Antwerpen</i>	0,81	0,81
	<i>Temse</i>	0,79	0,79
	<i>Dendermonde</i>	0,67	0,67
	<i>Melle</i>	0,64	0,64



Figuur 20 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met verschillende simulatieperiodes (TFS316 en TFS317).



Figuur 21 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met verschillende simulatieperiodes (TFS316 en TFS317).

4.2.7 Invloed saliniteit

In deze paragraaf wordt de invloed van saliniteit op de modelresultaten onderzocht door de basissimulatie (TFS318) te vergelijken met een simulatie waarin saliniteitseffecten werden uitgeschakeld door met een constante densiteit van 1023 kg/m^3 te rekenen (TFS316).

Vergelijking waterstanden

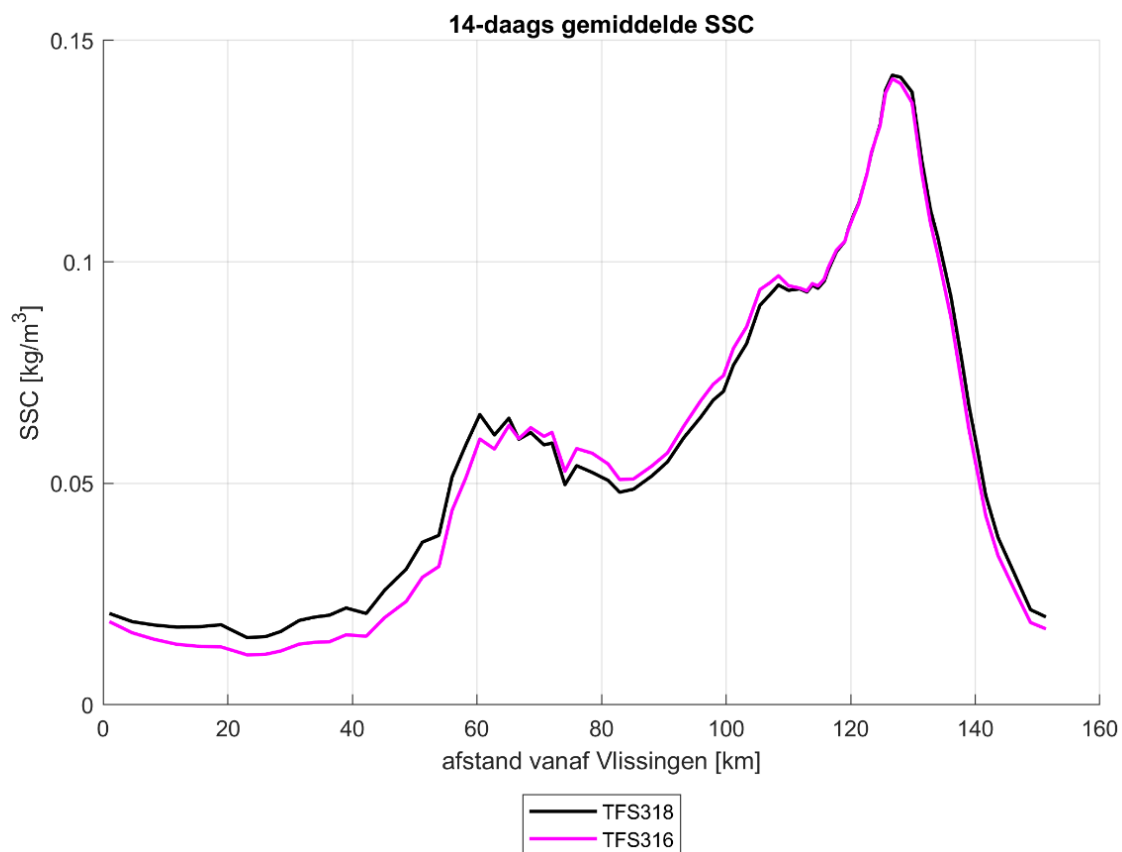
Er is een lichte invloed van saliniteit op de getijslag in het estuarium (Tabel 10). In de simulatie zonder saliniteit (TFS317) is de getijslag in de Westerschelde sterker en in de Zeeschelde zwakker dan in de simulatie met saliniteit (TFS318). Het gaat hierbij om verschillen van enkele centimeters. De amplificatie van het getij is dus sterker in de simulatie met saliniteit. Er is ook sprake van een kleine invloed op de getij-asymmetrie, die in Tabel 10 wordt weergegeven als ratio tussen de stijgingsduur en de dalingsduur. In de simulatie zonder saliniteit is deze ratio iets hoger, wat duidt op een iets zwakkere ebdominantie van het verticaal getij. De verschillen zijn echter klein.

Sedimenttransport en SSC

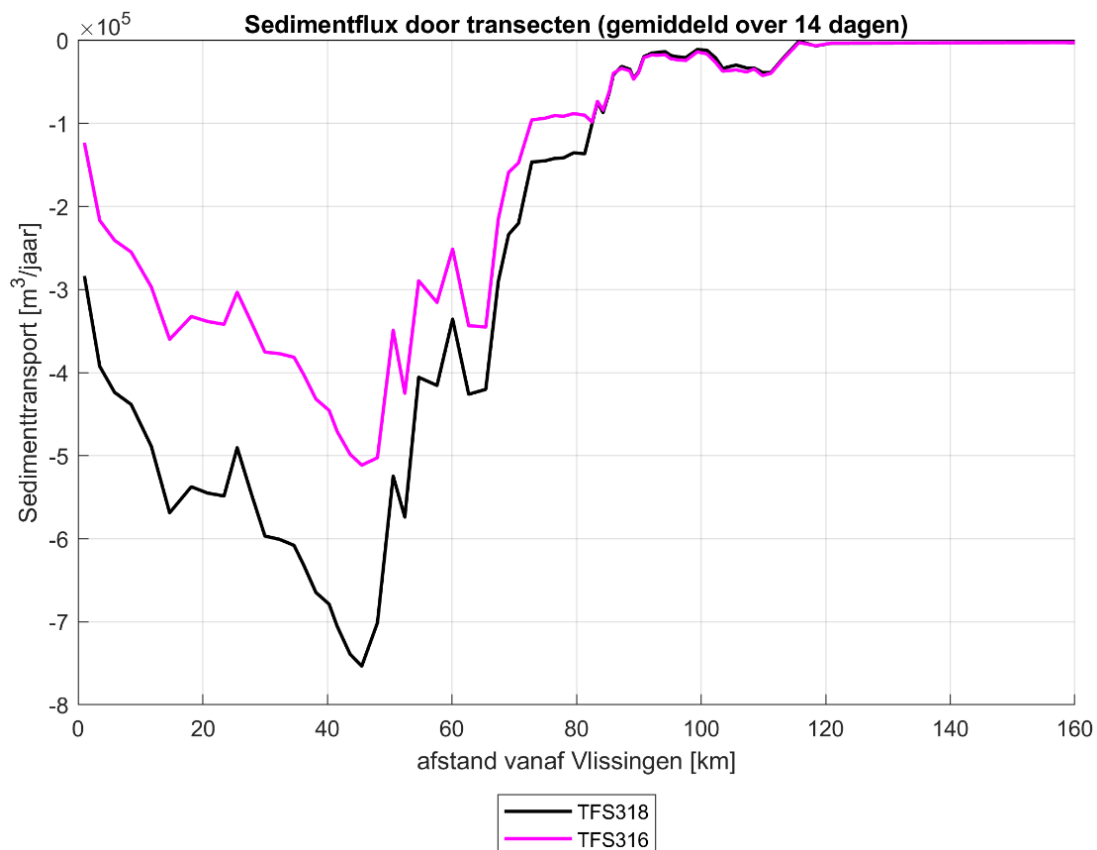
Het effect van saliniteit op de SSC-waarden langsheen het estuarium is klein (Figuur 22). In Figuur 23 met de netto slibtransporten gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus is wel sprake van een waarneembare invloed in het benedenstroomse deel van het estuarium. Daar zijn de netto afwaartse sedimentfluxen hoger in de simulatie met saliniteit. Dit kan wellicht verklaard worden door de subtiele verschillen in getij-asymmetrie.

Tabel 10 – Tij-parameters voor simulaties met (TFS318) en zonder saliniteit (TFS316).

Tij-parameters	Locatie	TFS318	TFS316
Getijslag	<i>Terneuzen</i>	4,13 m	4,17 m
	<i>Bath</i>	4,95 m	4,98 m
	<i>Antwerpen</i>	5,31 m	5,32 m
	<i>Temse</i>	5,73 m	5,70 m
	<i>Dendermonde</i>	4,86 m	4,80 m
	<i>Melle</i>	3,55 m	3,46 m
Ratio: stijgingsduur / dalingsduur	<i>Terneuzen</i>	0,86	0,88
	<i>Bath</i>	0,87	0,89
	<i>Antwerpen</i>	0,80	0,81
	<i>Temse</i>	0,78	0,79
	<i>Dendermonde</i>	0,68	0,67
	<i>Melle</i>	0,64	0,64



Figuur 22 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties met (TFS318) en zonder saliniteit (TFS316).



Figuur 23 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties met (TFS318) en zonder saliniteit (TFS316).

4.2.8 Invloed bovenafvoer Boven-Zeeschelde

In deze paragraaf wordt de invloed van de bovenafvoer van de Boven-Zeeschelde (opgelegd in Merelbeke) op de modelresultaten onderzocht door de basissimulatie (TFS318) te vergelijken met een simulatie zonder bovenafvoer (TFS331) en twee simulaties met een sterk verhoogde bovenafvoer in Merelbeke ($100 \text{ m}^3/\text{s}$ in TFS337 en $200 \text{ m}^3/\text{s}$ in TFS338). In TFS331 zijn ook de bovenafvoeren aan alle zijrivieren uitgeschakeld, terwijl deze in TFS337 en TFS338 identiek zijn aan de situatie in de referentierun zoals weergegeven in Tabel 1. In deze simulaties wordt steeds dezelfde initiële sedimentverdeling toegepast. Feitelijk stellen de resultaten dus een situatie voor waarbij de bovenafvoer eerst 45 dagen volgens Tabel 1 is (i.e., $7,4 \text{ m}^3/\text{s}$), gevolgd door 45 dagen met het aangepaste bovendebiet.

Vergelijking waterstanden

Op basis van de gemiddelde getijslag in Tabel 11 blijkt de invloed van de bovenafvoer op het verticaal getij beperkt tot maximaal 5 centimeter op de getijslag in Antwerpen. De hoog- en laagwaterniveaus in Temse nemen wel tot $+0,13 \text{ m}$ toe bij de hogere afvoer in simulatie TFS338. Verder opwaarts in de Boven-Zeeschelde is de invloed op de waterstanden veel groter. De getijslag neemt in Melle bijvoorbeeld met meer dan één meter af bij een bovenafvoer van $200 \text{ m}^3/\text{s}$, waarbij de laagwaters sterker toenemen ($+2,09 \text{ m}$) dan de hoogwaters ($+0,96 \text{ m}$).

De invloed op de getij-asymmetrie, die in Tabel 11 wordt weergegeven als de (springtij-doodtij-gemiddelde) ratio tussen de stijgingsduur en de dalingsduur, is beperkt. Bij een hogere bovenafvoer neemt die ratio iets af, wat duidt op een toename in ebdominantie van het verticaal getij. Enkel in het meest bovenstroomse deel bij Melle is er een duidelijke toename in ebdominantie voor een hogere bovenafvoer.

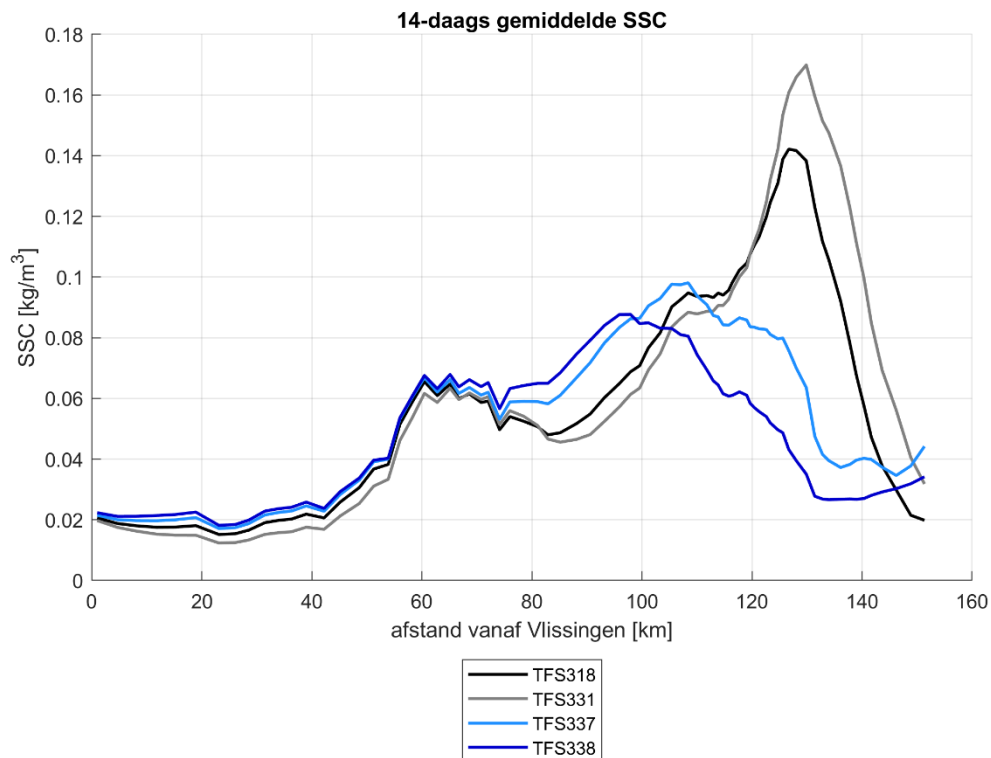
Tabel 11 – Tij-parameters voor simulaties met verschillende bovenafvoer te Merelbeke.

Tij-parameters	Locatie	TFS318	TFS331	TFS337	TFS338
Bovenafvoer	<i>Merelbeke</i>	7,4 m ³ /s	0,0 m ³ /s	100 m ³ /s	200 m ³ /s
Getijslag	<i>Terneuzen</i>	4,13 m	4,14 m	4,13 m	4,13 m
	<i>Bath</i>	4,95 m	4,96 m	4,95 m	4,95 m
	<i>Antwerpen</i>	5,31 m	5,29 m	5,33 m	5,34 m
	<i>Temse</i>	5,73 m	5,73 m	5,72 m	5,71 m
	<i>Dendermonde</i>	4,86 m	4,87 m	4,74 m	4,62 m
	<i>Melle</i>	3,55 m	3,58 m	2,99 m	2,41 m
Gemiddeld hoogwater	<i>Terneuzen</i>	4,62 m	4,59 m	4,63 m	4,64 m
	<i>Bath</i>	5,13 m	5,09 m	5,15 m	5,19 m
	<i>Antwerpen</i>	5,32 m	5,25 m	5,35 m	5,37 m
	<i>Temse</i>	5,64 m	5,58 m	5,67 m	5,70 m
	<i>Dendermonde</i>	5,47 m	5,41 m	5,59 m	5,73 m
	<i>Melle</i>	5,16 m	4,99 m	5,72 m	6,12 m
Gemiddeld laagwater	<i>Terneuzen</i>	0,49 m	0,46 m	0,50 m	0,51 m
	<i>Bath</i>	0,19 m	0,15 m	0,22 m	0,25 m
	<i>Antwerpen</i>	0,02 m	-0,03 m	0,03 m	0,05 m
	<i>Temse</i>	-0,08 m	-0,13 m	-0,04 m	0,00 m
	<i>Dendermonde</i>	0,62 m	0,54 m	0,87 m	1,12 m
	<i>Melle</i>	1,62 m	1,42 m	2,74 m	3,71 m
Ratio: stijgingsduur / dalingsduur	<i>Terneuzen</i>	0,86	0,86	0,86	0,86
	<i>Bath</i>	0,87	0,87	0,87	0,87
	<i>Antwerpen</i>	0,80	0,80	0,80	0,80
	<i>Temse</i>	0,78	0,78	0,77	0,76
	<i>Dendermonde</i>	0,68	0,68	0,66	0,64
	<i>Melle</i>	0,64	0,66	0,55	0,48

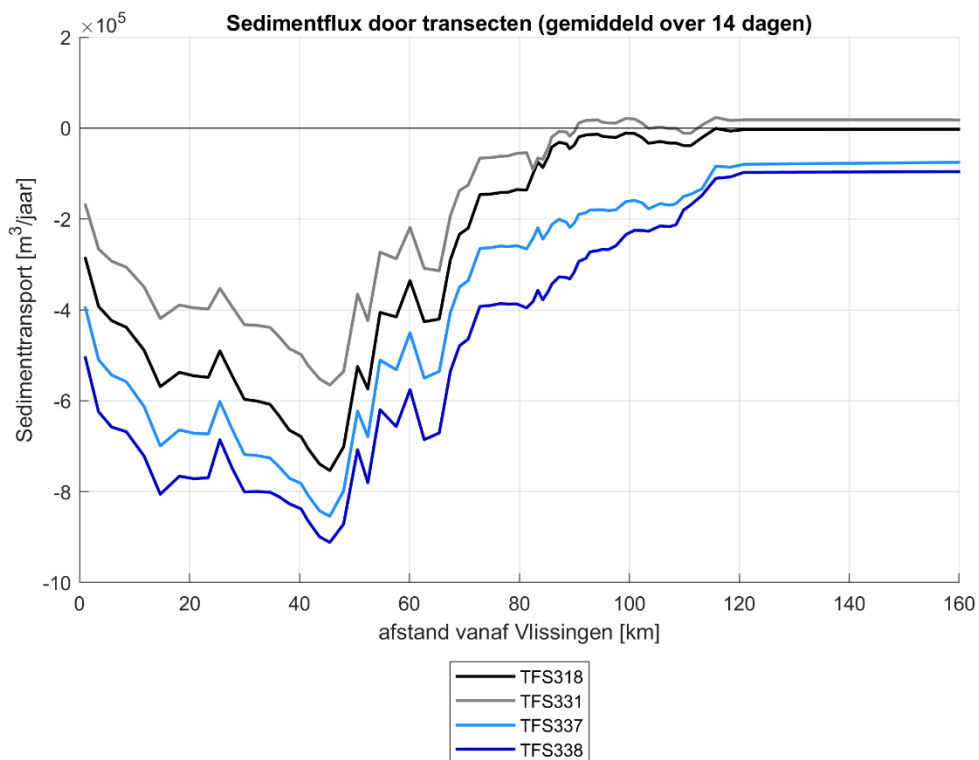
Sedimenttransport en SSC

De bovenafvoer (in Merelbeke) heeft een duidelijke invloed op de SSC-verdeling in het estuarium (Figuur 24). Bij een hogere bovenafvoer wordt de SSC-piek bij KM-130 afgevlakt (i.e., het sediment wordt uitgespoeld) en verschuift de maximale sedimentconcentratie stroomafwaarts naar KM-80 tot KM-100. De maximale concentraties zijn voor simulaties TFS337 en TFS338 nauwelijks verschillend (i.e., ongeveer 0,10 kg/m³), terwijl de referentierun met een relatief laag bovendebiet een SSC-piek van 0,17 kg/m³ kent. In de simulatie zonder bovenafvoer (TFS331) is de SSC-piek juist iets hoger dan in de referentierun en ook iets verder opwaarts gesitueerd. Zoals reeds eerder vermeldt vormen deze SSC-waarden een momentopname. De voorgaande springtij-doodtij-cyclus geeft hogere concentraties en een langere simulatie zou lagere SSC-waarden opleveren, waardoor een kwalitatieve vergelijking meer van toepassing is.

De netto (springtij-doodtij-gemiddelde) sedimenttransporten zijn in het algemeen groter bij een hogere bovenafvoer en lager bij een laag bovendebiet (Figuur 25). Bij een bovenafvoer van 200 m³/s is het netto afwaarts transport ongeveer dubbel zo groot als in de simulatie zonder bovenafvoer. In de simulatie zonder bovenafvoer zijn de afwaartse transporten juist kleiner en is in het meest bovenstroomse deel zelfs sprake van een netto opwaarts gerichte flux die aanleiding kan geven tot een ophoping van sediment. In de twee simulaties met hoge bovenafvoer is de netto transportrichting tot de bovenstroomse rand juist duidelijk afwaarts gericht.



Figuur 24 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen simulaties zonder bovenafvoer in Merelbeke (TFS331), met een lage bovenafvoer in Merelbeke (TFS318) en met hoge bovenafvoer te Merelbeke (TFS337-338).



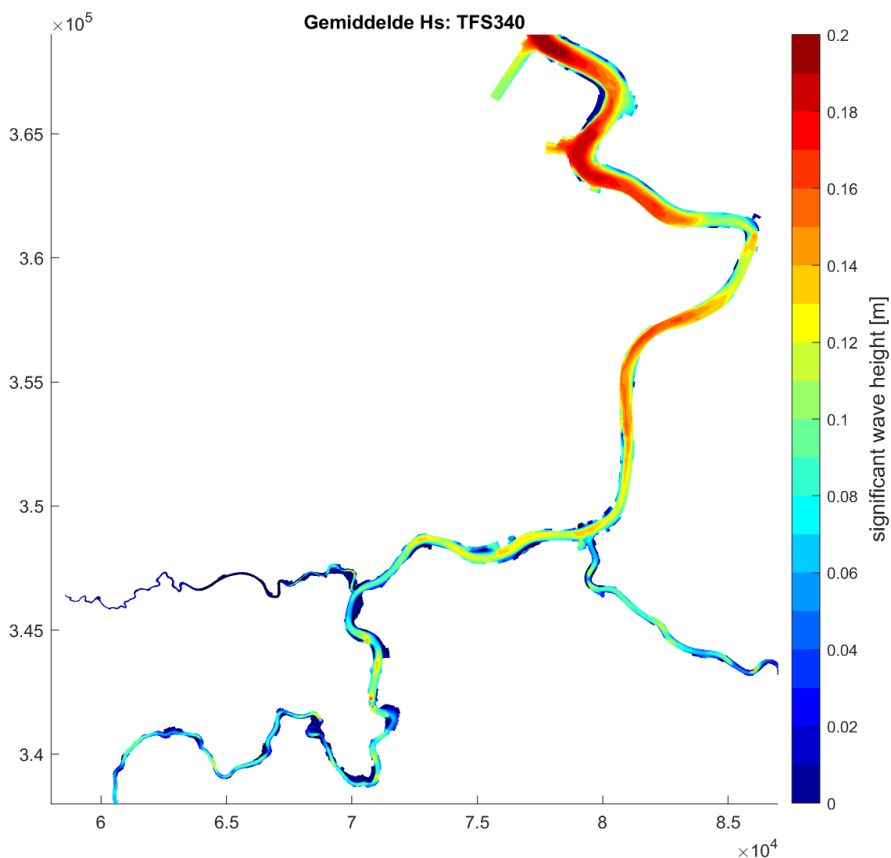
Figuur 25 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties zonder bovenafvoer in Merelbeke (TFS331), met een lage bovenafvoer in Merelbeke (TFS331) en met hoge bovenafvoer te Merelbeke (TFS337-338).

4.2.9 Invloed windgolven

In deze paragraaf wordt de invloed van windgolven op de modelresultaten onderzocht door de basissimulatie (TFS318) te vergelijken met twee simulaties waarin de golfmodule Delft3D-WAVE werd aangezet. In deze golfmodule wordt het golfveld in het modeldomein berekend met een 3^e-generatie SWAN-model (Deltares, 2016b; Booij *et al.*, 1999). De resultaten van deze Delft3D-WAVE simulatie (e.g. golfhoogte, golfperiode, massatransporten, bodemschuifspanningen) worden online als additionele forcering in de Delft3D-FLOW simulatie meegerekend. De golfberekening wordt enkel geforceerd door een windveld van 7,0 m/s (TFS340) of 14,0 m/s (TFS341). Deze windsnelheden komen overeen met respectievelijk 4 bft (matige wind) en 7 bft (harde wind). De opgelegde windsnelheden vertegenwoordigen ongeveer het P80-percentiel en het P99-percentiel (i.e., onderschrijdingskans) van de windsnelheid in Hansweert over de periode 2000-2019 (i.e., op basis van door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut gemeten daggemiddelde winddata op 10 m hoogte). De gemiddelde windsnelheid voor dit station over dezelfde periode is 4,8 m/s, terwijl de P50-waarde 4,4 m/s bedraagt (3 Bft). De opgelegde windrichting is wisselend per getij, waardoor alle windrichtingen (i.e., noord, oost, zuid en west) tijdens de simulatie voorkomen. Er wordt in deze simulaties geen golfveld opgelegd aan de afwaartse rand aangezien het interessegebied vooral de Zeeschelde betreft. Alle golven worden dus intern gegenereerd. Het effect van golven op slibtransport en sedimentconcentraties betreft vooral een toename in bodemschuifspanning. De additionele bodemschuifspanning door golven is relatief het grootst in ondiepe zones.

Golfhoogtes

De gemodelleerde significante golfhoogtes H_s in de Zeeschelde worden geïllustreerd in Figuur 26. De gemiddelde golfhoogtes over een springtij-doodtij-cyclus zijn tot maximaal 0,20 m nabij Liefkenshoek. In de Boven-Zeeschelde zijn de golfhoogtes lager met H_s tot ongeveer 0,12 m bij Temse en nog lagere waarden verder opwaarts. Op de intertidale gebieden en in de ondiepe zones zijn de golfhoogtes beduidend lager.

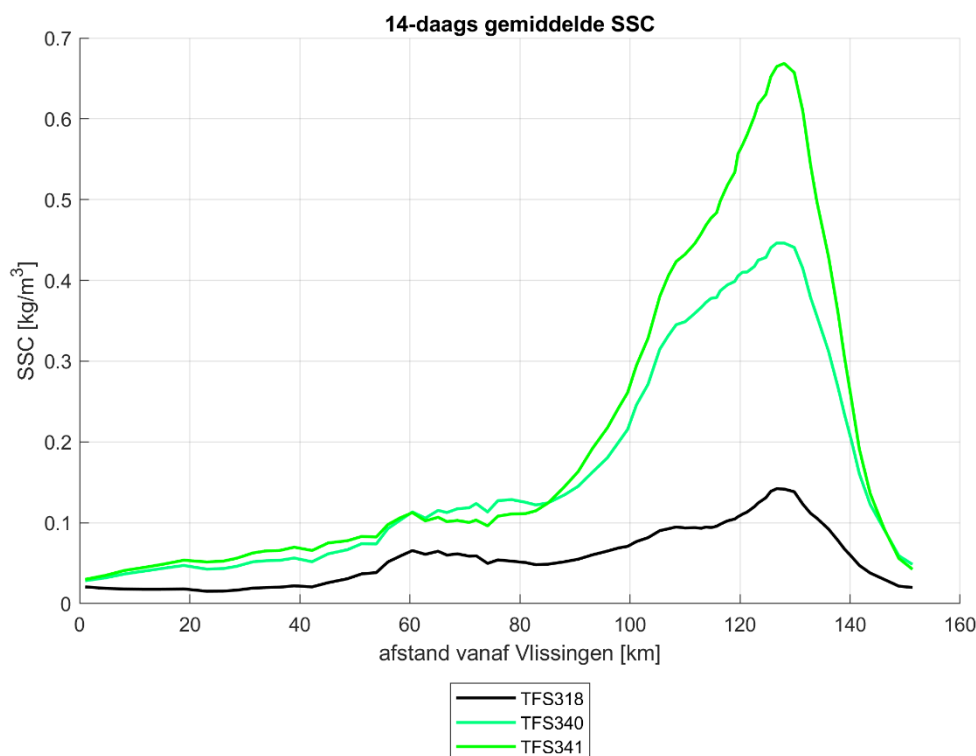


Figuur 26 – Gemodelleerde golfhoogtes in de Zeeschelde voor simulatie TFS340 (met D3D-Wave en windsnelheden van 7,0 m/s).

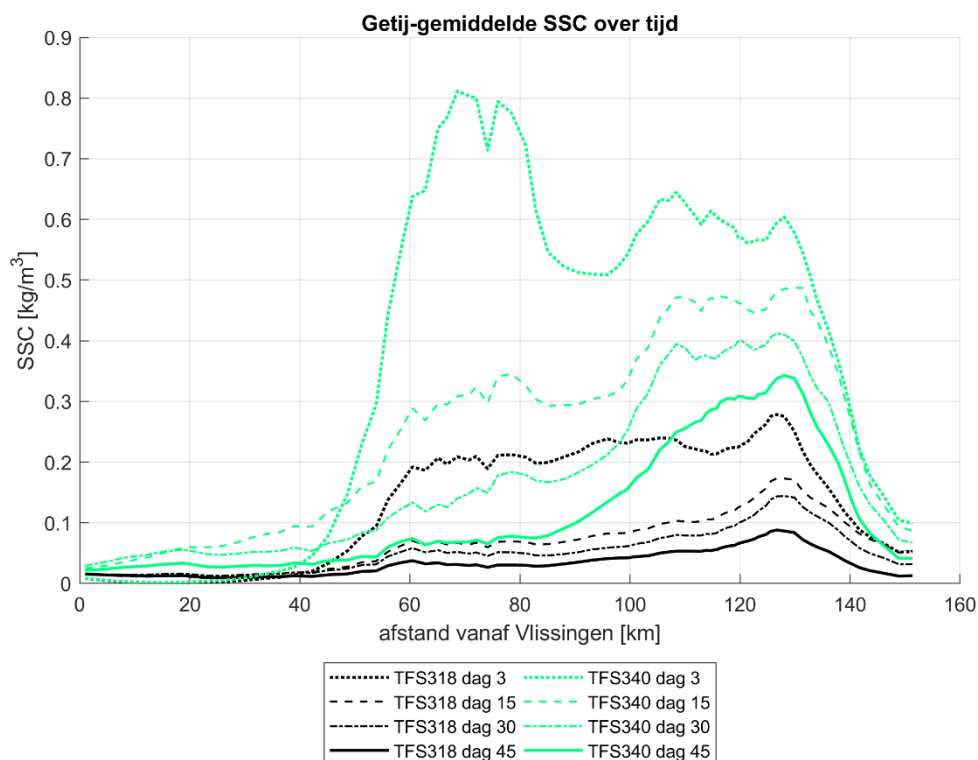
Sedimenttransport en SSC

Het effect van windgolven op de SSC-waarden langsheen het estuarium is significant (Figuur 27). De maximale springtij-doodtij gemiddelde SSC-waarden nemen in simulaties TFS340 en TFS341 met een factor 3-4 toe afhankelijk van de windsnelheid. Opvallend is dat deze toename enkel geldt voor de SSC-waarden in de Zeeschelde. De lagere piek rond KM-50 neemt slechts mindere mate toe als gevolg van golfeffecten. De temporele evolutie van de sedimentconcentraties in deze SSC-piek laat echter een afname over tijd zien tot in het laatste deel van de simulatie. Deze afname van 19% tussen dag 30 en dag 45 in TFS340 is wel minder sterk dan de afname van 43% in de basissimulatie (Figuur 28). Een langere simulatieduur zou uitsluitsel kunnen geven over de stabiliteit van de SSC-piek rond KM-130. Figuur 29 weergeeft het temporele verloop van de sedimentconcentraties te Driegoten, i.e., ter hoogte van het turbiditeitsmaximum. Ook in deze figuur is de geleidelijke afname van sedimentconcentraties waarneembaar. Verder blijkt uit het temporeel verloop dat zowel de springtij-doodtij-variatie als de SSC-variatie binnen één getij groter zijn als windgolven worden geïmplementeerd.

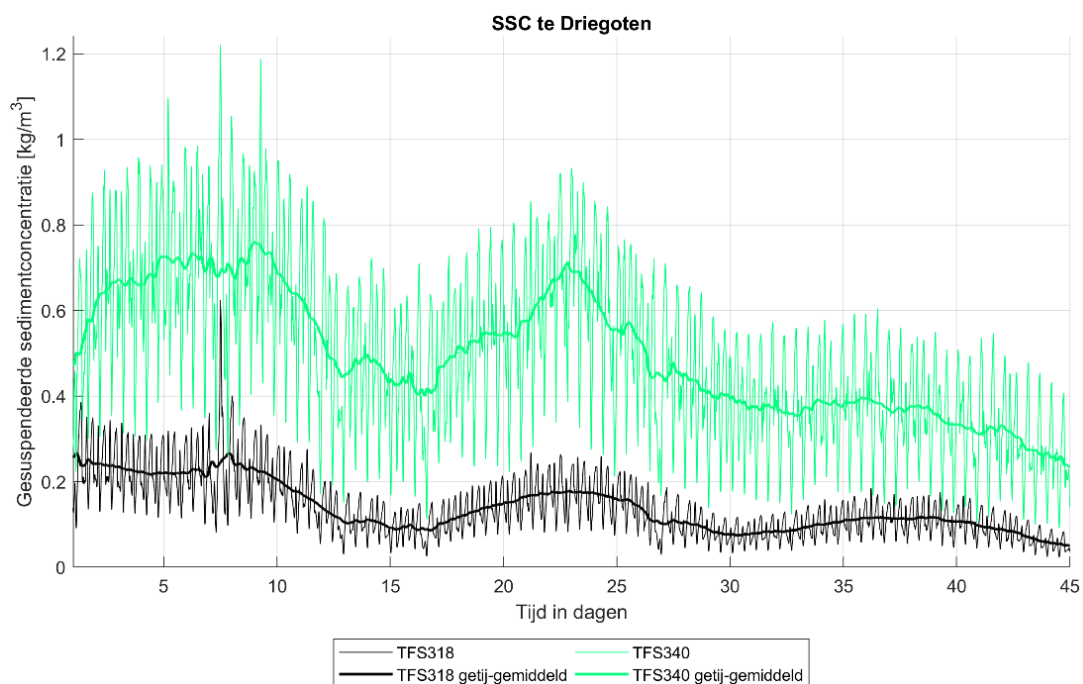
In Figuur 30 met de netto slibtransporten gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus is eveneens een duidelijke invloed zichtbaar. In de Zeeschelde is tussen KM-90 en KM-130 sprake van een netto opwaarts gerichte sedimentflux als gevolg van het implementeren van de golfmodule. Deze zone met opwaarts gericht transport kan aanleiding geven tot de vorming van een estuarien turbiditeitsmaximum (ETM). Opwaarts van KM-130 is het effect van de golfmodule op het netto sedimenttransport nihil. Daarnaast neemt de eb-gedomineerde sedimentflux in het meest afwaartse deel van de Westerschelde sterk toe.



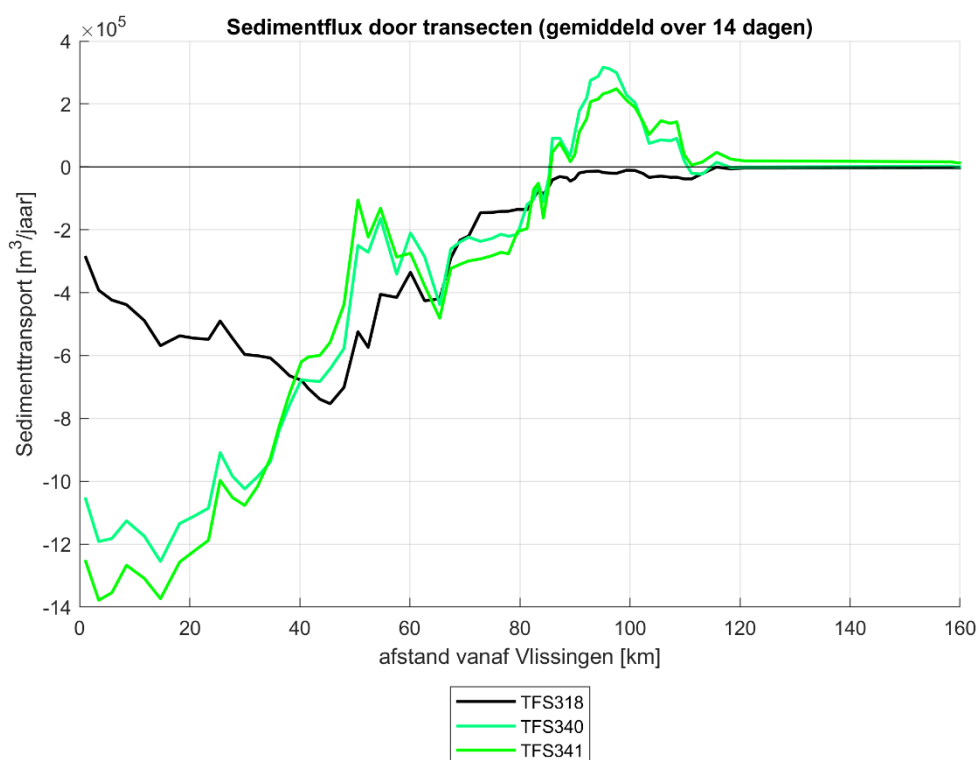
Figuur 27 – Ruimtelijke SSC-verdeling gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties zonder golfmodule (TFS318) en met de invloed van windgolven bij windsnelheden van 7,0 m/s en 14,0 m/s (TFS340 en TFS341).



Figuur 28 – Ontwikkeling in getij-gemiddelde SSC in de basissimulatie (TFS318) en met windgolven (TFS340).



Figuur 29 – Temporele SSC-ontwikkeling gedurende de 45-dagen durende simulatie ter hoogte van Driegoten voor de basissimulatie (TFS318) en een simulatie met windgolven (TFS340).



Figuur 30 – Netto sedimentflux gemiddeld over een springtij-doodtij-cyclus van 14,5 dagen voor simulaties zonder golfmodule (TFS318) en met de invloed van windgolven bij windsnelheden van 7,0 m/s en 14,0 m/s (TFS340 en TFS341).

5 Conclusies

Op basis van de gevoeligheidsanalyse kunnen enkele algemene conclusies worden getrokken over de modelresultaten (i.e., ruimtelijke SSC-verdeling) en invloed van de geanalyseerde invoerparameters.

5.1 Invloed hydrodynamica

De gemodelleerde ruimtelijke verdeling van SSC kent een dalende trend over de huidige simulatieduur (45 dagen inspeeltijd + 45 dagen simulatie) die niet tot een evenwicht in sedimentconcentraties leidt. De ruimtelijke verdeling van SSC over het estuarium laat wel hogere waarden zien in of nabij de gebieden waar die ook geobserveerd worden (i.e., KM-110 tot KM-130 van de monding). De netto transportflux is echter afwaarts gericht in het gehele estuarium, wat duidt op geleidelijke uitspoeling van het sediment. Enkel in simulaties met windgolven is sprake van een opwaarts gericht netto transport in een deel van de Zeeschelde.

Simulatieperiode

De gemodelleerde springtij-doodtij-gemiddelden van slibtransporten en de SSC-verdeling zijn nauwelijks gevoelig voor de gekozen simulatieperiode.

Bovenafvoer

Bij een significante toename van het bovendebiet vindt wel een duidelijke verschuiving en afvlakking van de SSC-piek plaats. Deze verschuift dan van KM-130 vanaf de monding naar KM-80 a KM-100 vanaf de monding, terwijl de maximale SSC-waarden ten opzichte van een gemiddelde zomerafvoer bijna halveren bij een bovenafvoer van 100 m³/s in Merelbeke. Als het model in staat blijkt een evenwichtssituatie met een turbiditeitsmaximum te modelleren kan ook een gedetailleerde kwantitatieve analyse van de invloed van de bovenafvoer op de sedimentconcentraties uitgevoerd worden.

Saliniteit

Het al dan niet implementeren van saliniteit heeft slechts een klein effect, al leidt het implementeren van saliniteit in de modelsimulaties vooral in de Westerschelde tot een groter afwaarts slibtransport. Saliniteit heeft echter ook een (beperkte) invloed op de getijhydrodynamica in het estuarium en daarom wordt in het algemeen aanbevolen om saliniteitseffecten mee te nemen in modelberekeningen.

Golven

Het effect van (lokaal gegenereerde) windgolven op slibtransport en sedimentconcentraties betreft vooral een toename van de bodemschuifspanning in ondiepe zones. Door het implementeren van windgolven is tussen KM-90 en KM-130 sprake van een opwaarts gerichte netto sedimentflux die aanleiding kan geven tot een estuarien turbiditeitsmaximum. In de modelsimulaties met windgolven is de SSC-piek rond KM-130 weliswaar sterker, deze piek neemt echter nog steeds geleidelijk in intensiteit af naarmate de simulatie vordert. Een langere simulatieduur kan uitsluitsel geven over de stabiliteit van dit turbiditeitsmaximum op langere termijn. De eerste simulaties met de golfmodule geven al een dusdanige verbetering dat wordt aangeraden om in het vervolg gebruik te maken van een schematisering met windgolven voor modelberekeningen van slibtransport in de Zeeschelde. Hierbij dient wel rekening te worden gehouden met een langere rekentijd.

5.2 Invloed sedimentkarakteristieken

Variaties in parameters die gerelateerd zijn aan slibeigenschappen hebben vooral een kwantitatieve invloed, terwijl het ruimtelijk patroon van SSC-verdeling langs het estuarium gelijkaardig blijft. Meer specifiek leiden een hogere erosieconstante (M_E), een lagere kritische bodemschuifspanning voor erosie ($\tau_{kr,e}$) en een lagere valsnelheid (ω_s) tot hogere SSC-waarden in het estuarium. Bij dergelijke parameterinstellingen komt en blijft er meer sediment in de waterkolom. Andersom leiden een lagere erosieconstante en een hogere valsnelheid of kritische bodemschuifspanning voor erosie tot lagere sedimentconcentraties. Op basis van de gekozen variatie in parameterwaarden binnen deze gevoeligheidsanalyse heeft de valsnelheid hierbij de grootste kwantitatieve invloed op de sedimentconcentraties. De invloed van de kritische bodemschuifspanning ($\tau_{kr,d}$) voor depositie is gering. Enkel bij een zeer hoge waarde voor $\tau_{kr,d}$ (i.e., representatief voor een situatie waarin altijd sprake is van depositie) is er sprake van hogere sedimentconcentraties in het meest opwaartse deel van het estuarium.

Aangezien er in de uitgevoerde simulaties met het Delft3D-NeVla model nog geen sprake is van een (dynamische) evenwichtstoestand met betrekking tot de slibconcentraties konden de modelinstellingen voor sedimentkarakteristieken niet worden gekalibreerd op basis van gemeten SSC-waarden langsheen het estuarium. Vooralsnog wordt aangeraden om voor gelijkaardige modeloefeningen of scenario-analyses een combinatie van sedimentinstellingen te gebruiken die op een termijn van enkele springtij-doodtij-cycli realistische SSC-waarden langs het estuarium geeft. Op basis van de huidige gevoeligheidsanalyse betekent dit: $0,2 < \omega_s < 0,6 \text{ mm/s}$; $1 \cdot 10^{-3} < M_E < 1 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$; en $\tau_{kr,e} \approx 0,2 \text{ N/m}^2$. Bij het gebruik van meerdere sedimentfracties kunnen de optimale instellingen uiteraard wijzigen.

5.3 Aanbevelingen

De huidige gevoeligheidsanalyse zou nog uitgebreid kunnen worden met modelsimulaties met meerdere sedimentfracties (e.g. twee slibfracties of een extra zandfractie). Zo kan onderscheid worden gemaakt tussen de primaire slibdeeltjes en slibvlokken. Dergelijke simulaties werden eerder met dit model uitgevoerd door Coen *et al.* (2016), al lag de focus in dat onderzoek op het nabootsen van variaties in SSC ten gevolge van bagger- en stortactiviteiten en niet specifiek op het vormen van een evenwichtssituatie op middellange- tot lange termijn. De invloed van het gebruik van meerdere fracties op het representeren van een ETM is nog niet in detail onderzocht.

Het verdient ook de aanbeveling om de modelconfiguratie met windgolven nader te onderzoeken. De invloed van windgolven dient bijvoorbeeld nog voor de lagere jaargemiddelde windsnelheden onderzocht te worden. De additionele bodemschuifspanning door (wind)golven kan de resuspensie van sediment op met name ondiepe gebieden vergroten. Daarnaast is in een modelconfiguratie met windgolven sprake van een opwaarts gericht sedimenttransport in een deel van de Zeeschelde die het ontstaan van een (stabiel) turbiditeitsmaximum mogelijk maakt.

Een analyse van de laterale verdeling van het slibtransport wordt ook aangeraden om de rol van ondiepe en intertidale gebieden op de netto sedimenttransporten te onderzoeken. Ondiepe zones kunnen een belangrijke rol spelen in het netto sedimenttransport vanwege laterale variaties in getij-asymmetrie. Veelal zijn diepe geulen namelijk eb-dominant of exporterend terwijl ondiepe zones of platen door vloed-dominantie en sedimentimport worden gekenmerkt (e.g. Van Veen, 1950; Kjerfve, 1978; Dronkers, 1986). Uit modelonderzoek met Telemac-3D blijkt tevens dat veel slib in deze gebieden terecht komt in de modelsimulaties (Smolders *et al.*, in voorbereiding). Ook in werkelijkheid functioneren dergelijke luwe gebieden als 'sink' voor fijn sediment (e.g. Temmerman *et al.*, 2004; Vandenbruwaene *et al.*, 2020). Overschatting van de sedimentatie en een onderschatting van de resuspensie in deze gebieden kunnen echter oorzaken zijn van de dalende trend in sedimentconcentraties in de geulen zoals die in de huidige set modelsimulaties wordt waargenomen.

Referenties

- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H.** (1999). A third-generation wave model for coastal regions. Part 1: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666.
- 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.
- Deltares** (2016b). Delft3D-Wave – Simulation of short-crested waves with SWAN - User Manual. Version 3.05, Revision 49030. Delft, Nederland.
- Dronkers, J.** (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3), 117-131.
- Kjerfve, B.** (1978). Bathymetry as an indicator of net circulation in well mixed estuaries 1. *Limnology and Oceanography*, 23(4), 816-821.
- 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). Slibmodeller 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.; 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.

Van Veen, J. (1950). Eb-en vloedstelselsystemen in de Nederlandse getijwateren. *Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap*, 67, 303-325.

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.

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