



Vlaanderen
is wetenschap



14_025_1
WL rapporten

Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 1 – Opzet en validatie slibmodel

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be



Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 1 – Opzet en validatie slibmodel

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Maart 2016

WL2016R14_025_1

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 1 – Opzet en validatie slibmodel. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.



DEPARTEMENT **MOBILITEIT EN 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

mow.vlaanderen.be

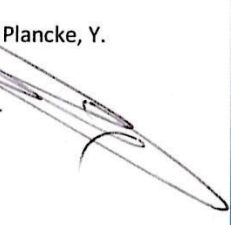
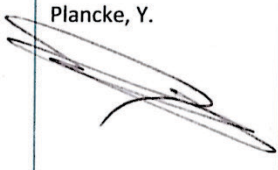
waterbouwkundiglaboratorium.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welk andere wijze ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Documentidentificatie

Titel:	Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 1 – Opzet en validatie slibmodel		
Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2016R14_025_1
Keywords (3-5):	Sediment transport, slib, numeriek model, Schelde-estuarium		
Tekst (p.):	56	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Uitzondering:	☒ Opdrachtgever
			☐ Intern
			☐ Vlaamse overheid
	☐ Nee	☐ Online beschikbaar	

Goedkeuring

Auteur	Revisor	Projectleider	Coördinator Studie & Advies	Afdelingshoofd
Coen, L. 	De Maerschalck, B. 	Plancke, Y. 	Verwaest, T. 	Mostaert, F. 
Plancke, Y. 				

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur(s)
1.0	24/02/2015	Conceptversie	Plancke, Y.; Coen, L.
2.0	24/02/2015	Inhoudelijke revisie	De Maerschalck, B.
3.0	08/06/2015	Revisie opdrachtgever	Beirinckx, K., Roose, F.
3.1	22/09/2015	Aanvulling modelberekeningen	Coen, L.; Plancke Y.
3.2	23/10/2015	2 ^{de} revisie opdrachtgever	Roose, F.; Ides, S.
4.0	08/03/2016	Definitieve versie	Coen, L.

Abstract

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te kunnen garanderen dienen quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd te worden. Om deze werken uit te voeren zijn vergunningen nodig. Voor het Vlaamse deel van het estuarium, de Beneden-Zeeschelde, lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Ten behoeve van een nieuwe vergunning (mogelijks een zogeheten omgevingsvergunning) dient er onderzoek te gebeuren om de stortstrategie zo optimaal mogelijk in te vullen, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen zoals zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel en risico op regime shift.

Voorliggend rapport bespreekt de modelopzet, gevoeligheidsanalyse en validatie van een 2D-model met sedimenttransportmodellering ten behoeve van scenarioberekeningen voor het terugstorten van sediment in de Beneden-Zeeschelde.

INHOUDSTAFEL

Inhoudstafel.....	I
Lijst van de tabellen.....	III
lijst van de figuren	IV
1 Inleiding	1
1.1 Doelstelling	1
1.2 Opzet van het rapport	1
1.3 Overige rapporten	2
2 Voorgaande studies.....	3
2.1 Onderhoudswerken Deurganckdok [IMDC, 2004]	3
2.2 Studie densiteitsstromingen [IMDC, 2007]	3
2.3 Ontwikkelingszone Saeftinghe [IMDC & Deltares, 2011]	4
2.4 LTV O&M slibmodel [Deltares & WL, 2006-2008]	4
2.5 Instandhouding vaarpassen [IMDC <i>et al.</i> , 2013]	5
3 Modelopzet	7
3.1 NEVLA-model.....	7
3.2 Basismodel.....	7
3.2.1 Modelgrid	7
3.2.2 Topo-bathymetrie.....	10
3.2.3 Randvoorwaarden	10
3.2.4 Tijdstap	11
3.2.5 Hydrodynamische modelparameters	11
3.2.6 Simulatieperiode	11
3.3 Sedimenttransportmodellering	11
3.3.1 Sedimentfracties.....	12
3.3.2 Randvoorwaarden	12
3.3.3 Dikte bodemsedimentlaag	12
3.4 Stortingen van slib	14
4 Data-analyse t.b.v. modelvalidatie	17
4.1 Beschikbare data	17
4.2 Methodologie	21
4.2.1 Half-dagelijkse getijcyclus.....	21
4.2.2 Springtij-doodtij-cyclus.....	22
4.2.3 Bovenafvoer.....	23
4.2.4 Stortingen onderhoudsbaggerwerk	23

4.3	Resultaten.....	24
4.3.1	Boei 84.....	24
4.3.2	Oosterweel	26
4.3.3	Driegoten	27
5	Modelvalidatie.....	28
5.1	Gevoeligheidsonderzoek	28
5.1.1	Valsnelheid	28
5.1.2	Erosie	30
5.1.3	Sedimentatie.....	32
5.1.4	Initiële sedimentconcentratie	34
5.1.5	Effect toevoegen zandfractie.....	35
5.1.6	Effect saliniteit.....	36
5.1.7	Effect 3D-2D.....	37
5.1.8	Effect toevoegen 2 ^{de} slibfractie	38
5.1.9	Valsnelheid 2 ^{de} slibfractie	39
5.2	Modelvalidatie.....	40
5.2.1	Parameterwaarden.....	40
5.2.2	Vergelijking met data.....	41
6	Modelvalidatie stortingen	50
7	Conclusies en aanbevelingen	53
7.1	Conclusies.....	53
7.2	Aanbevelingen	53
8	Referenties	55

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1 – Overzicht toegepaste modellen in voorgaande studies	6
Tabel 2 – Overzicht modelparameters	11
Tabel 3 – Percentage cohesief en niet-cohesief sediment per lithologische klasse	13
Tabel 4 – Karakteristieke waarden getijverschil Antwerpen-Loodsgebouw	22
Tabel 5 – Aantal weerhouden getijden per deelperiode	23
Tabel 6 – Gemiddelde storthoeveelheden per dag voor geselecteerde deelperiodes “stortrijk” en “stortarm”	24
Tabel 7 – Initiële waarden modelparameters	28
Tabel 8 – Waarden modelparameters na kalibratie.....	41

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1 – Modelgrid van het Delft3D NEVLA-model (groen) en het studiemodel (rood).....	7
Figuur 2 – Situering studiegebied, met afwaartse rand t.h.v. Raai 6 en opwaartse randen te Tielrode en Terhagen.....	8
Figuur 3 – Modelgrid ter hoogte van Schaar van Ouden Doel en sluistoegang Zandvliet- en Berendrechtssluisen	9
Figuur 4 – Modelgrid ter hoogte van Deurganckdok	9
Figuur 5 – Modelgrid ter hoogte van Kallosluis en Boudewijn- en Van Cauwelaertssluisen, en Ketelputten.....	10
Figuur 6 – Initieel opgelegde dikte niet-cohesieve laag	15
Figuur 7 – Initieel opgelegde dikte cohesieve laag.....	16
Figuur 8 - Overzicht meetlocaties turbiditeit langs de Beneden-Zeeschelde	18
Figuur 9 – Sedimentconcentratie (oranje) te Driegoten en bovenafvoer te Melle (blauw) (<i>rode lijnen geven begin en einde weer van periodes zonder stortingen</i>)	19
Figuur 10 – Sedimentconcentratie te Oosterweel (bovenste sensor - oranje) en bovenafvoer te Melle (blauw) (<i>rode lijnen geven begin en einde weer van periodes zonder stortingen</i>).....	19
Figuur 11 – Sedimentconcentratie te Boei 84 (bovenste sensor- oranje) en bovenafvoer te Melle (blauw) (<i>rode lijnen geven begin en einde weer van periodes zonder stortingen</i>)	20
Figuur 12 – Daggemiddelde debiet te Melle	20
Figuur 13 – Overzicht gestorte hoeveelheden slib [V] per week	21
Figuur 14 – Representatief verloop van de sedimentconcentratie ter hoogte van Boei 84 (bovenste sensor) (boven: doottij midden: gemiddeld getij onder: springtij)	25
Figuur 15 – Representatief verloop van de sedimentconcentratie ter hoogte van Oosterweel (bovenste sensor) (boven: doottij midden: gemiddeld getij onder: springtij)	26
Figuur 16 – Representatief verloop van de sedimentconcentratie ter hoogte van Driegoten (boven: doottij midden: gemiddeld getij onder: springtij).....	27
Figuur 17 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor valsnelheid	29
Figuur 18 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor kritische erosieschuifspanning.....	31
Figuur 19 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor erosieparameter	32
Figuur 20 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor kritische sedimentatieschuifspanning	33
Figuur 21 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor initiële sedimentconcentratie.....	34
Figuur 22 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening met enkel fractie slib, en met fractie slib + fractie zand	35
Figuur 23 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening zonder en met saliniteit.....	36
Figuur 24 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening in 2D of 3D	37

Figuur 25 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening met 1 of 2 slibfracties	38
Figuur 26 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden valsnelheid voor 2 ^{de} slibfractie	39
Figuur 27 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij doottij te Oosterweel (grijs: alle metingen bij doottij groen: P10, P50, P90 rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))	45
Figuur 28 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij gemiddeld getij te Oosterweel (grijs: alle metingen bij gemiddeld getij groen: P10, P50, P90 rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))	45
Figuur 29 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij springtij te Oosterweel (grijs: alle metingen bij springtij groen: P10, P50, P90 rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))	46
Figuur 30 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij doottij te Boei84 (grijs: alle metingen bij doottij groen: P10, P50, P90 rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))	46
Figuur 31 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij gemiddeld getij te Boei84 (grijs: alle metingen bij gemiddeld getij groen: P10, P50, P90 rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))	47
Figuur 32 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij springtij te Boei84 (grijs: alle metingen bij springtij groen: P10, P50, P90 rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))	47
Figuur 33 – Lengteprofiel Westerschelde – Zeeschelde met 5 ^{de} , 50 ^{ste} en 95 ^{ste} percentiel sedimentconcentratie voor gemeten sedimentconcentratie in de waterkolom (WSSC) versus gesimuleerde sedimentconcentratie scenario zonder storten (S200 of S425) en scenario met huidige stortstrategie (S201 of S421), met één slibfractie (S200/S201) of met twee slibfracties (S425/S421)	49
Figuur 34 – Waterpeil in de Zeeschelde thv Antwerpen tijdens de stortperiode, december 2012-januari 2013 (oranje) en tijdens de simulatieperiode (september-november 2009)	51
Figuur 35 – Verloop gemeten (oranje) en gesimuleerde (blauw) sedimentconcentratie tijdens een periode met intensieve stortingen, te Oosterweel (boven) en Boei84 (onder). De dikke vloeiende lijn geeft de getijgemiddelde sedimentconcentratie weer.	52

1 INLEIDING

1.1 Doelstelling

Om de toegankelijkheid naar de Scheldehavens te kunnen garanderen dienen quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd te worden. Om deze werken uit te voeren zijn vergunningen nodig. Voor de Westerschelde werd in 2013 een verlenging van de stortvergunning aangevraagd, dewelke in 2014 werd toegekend. Hierdoor zijn de bagger- en stortactiviteiten in het Nederlandse deel van het Schelde-estuarium vergund tot februari 2022.

Voor het Vlaamse deel van het estuarium, de Beneden-Zeeschelde, lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Momenteel wordt zandige specie teruggestort in de Schaar van Ouden Doel (waar ook zandwinning plaatsvindt) en slibrijke specie ter hoogte van de Punt van Melsele (linkeroever) en Plaat van Boomke, Oosterweel en Vlake van Hoboken (rechteroever). Ten behoeve van een nieuwe vergunning (mogelijks een zogeheten omgevingsvergunning) dient er onderzoek te gebeuren om de stortstrategie zo optimaal mogelijk in te vullen, rekening houdend met toekomstige ontwikkelingen zoals zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel en risico op regime shift.

Voorliggend rapport beschrijft de opzet en validatie van een sedimenttransportmodel. Dit model zal dienen voor het doorrekenen van scenario's inzake het terugstorten van slibrijke specie. Hiertoe werd tevens een modelvalidatie uitgevoerd voor een reële periode met stortingen (hoofdstuk 6). De scenarioberekeningen worden beschreven in deelrapport 3 [Coen *et al.*, 2016]. Deze zullen worden gebruikt om uiteindelijk (volgende fase) tot de optimale invulling te komen van de toekomstige stortstrategie in de Beneden-Zeeschelde. De strategie voor het terugstorten van zandige specie wordt in een apart rapport beschreven [Vos *et al.*, 2016].

1.2 Opzet van het rapport

Voorliggend rapport bespreekt de modelopzet, gevoeligheidsanalyse en validatie van een 2D-model met sedimenttransportmodellering ten behoeve van scenarioberekeningen voor het terugstorten van sediment in de Beneden-Zeeschelde.

In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van voorgaande studies waarin bagger- en stortscenario's in de Beneden-Zeeschelde onderzocht werden, of waarin parameters met betrekking tot sedimenttransport worden beschreven.

Hoofdstuk 3 bespreekt de opbouw van het 2D-model gebruikt voor deze studie.

Ten behoeve van de modelvalidatie werd een data-analyse uitgevoerd op de beschikbare data van sedimentconcentratie in de Beneden-Zeeschelde. Deze wordt beschreven in hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 5 bespreekt de modelvalidatie. In hoofdstuk 6 worden de resultaten van een modelvalidatie voor een reële stortperiode besproken.

Hoofdstuk 7 besluit met conclusies en aanbevelingen.

1.3 Overige rapporten

De studie “Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde” werd in het kader van de Agenda voor de Toekomst¹ uitgevoerd door het Waterbouwkundig laboratorium in samenwerking met Antea Group, Instituut voor Natuur en Bosonderzoek en de Universiteit Antwerpen. De resultaten van de studie worden beschreven in 8 deelrapporten:

- DR 1. Opzet en validatie slibmodel
- DR 2. Opzet en validatie zandmodel
- DR 3. Slibscenario's.
- DR 4. Zandscenario's
- DR 5. Wijziging sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en slikken en schorren
- DR 6. Effecten op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib
- DR 7. Ecologische effect inschatting van de verschillende zandstortscenario's
- DR 8. Samenvatting

¹ De Agenda voor de Toekomst is een Vlaams-Nederlands onderzoeksprogramma binnen de Werkgroep Onderzoek en Monitoring van de VNSC waarbinnen de prioritaire onderzoeksthema's onderzocht worden, volgend uit de evaluatie van het verdrag Beleid & Beheer (<http://www.vnsc.eu/agenda-voor-de-toekomst/>).

2 VOORGAANDE STUDIES

In onderstaande paragrafen wordt een korte samenvatting gegeven van voorgaande studies. Tabel 1 geeft een overzicht van de toegepaste modellen in deze studies.

2.1 Onderhoudswerken Deurganckdok [IMDC, 2004]

In het kader van de voorbereiding van de onderhoudsbaggerwerken in het nieuw aan te leggen Deurganckdok werd door IMDC in 2004 een studie uitgevoerd naar de optimalisering van de onderhoudsbaggerwerken [IMDC, 2004]. Hierbij werd enerzijds gezocht naar een zo optimaal mogelijke invulling van het bagger- en stortproces, en anderzijds werden alle factoren gewogen om tot de meest milieuvriendelijke oplossing te komen. In het kader van deze studie werd door IMDC een 3D hydrodynamisch slibtransportmodel opgebouwd, dat ingezet werd bij de studie naar de mogelijke bagger- en stortscenario's en bij het inschatten van de mogelijke effecten op het milieu van deze bagger- en stortscenario's. Voor wat betreft de stortscenario's werd een aantal scenario's doorgerekend waarbij het sediment op verschillende locaties in het Schelde-estuarium geklept werd, ter hoogte van Plaat van Boomke, Noord Ballast, Boei 84, Punt van Melsele en Plaat van de Parel. Enerzijds werd gekeken naar enkelvoudige scenario's, waarbij tijdens één getij geklept werd. Anderzijds werden ook alternatieve scenario's en gecombineerde effecten van het storten van baggerspecie uit het Deurganckdok en de Schelde bestudeerd. De verschillende scenario's werden geëvalueerd op basis van hun effect op de turbiditeit, effectiviteit van het baggerproces en invloed op de sedimentatiesnelheid. De invloed op de turbiditeit werd begroot op basis van de door de stortingen veroorzaakte verhoging van de turbiditeit, onder de vorm van concentratie gesuspenseerd sediment. Bij het inschatten van de effectiviteit van het baggerproces werd gekeken naar de locatie van hersedimentatie van het gebaggerde sediment. De sedimentatiesnelheid is de toename van de dikte (cm) van de sliblaag na 1 tij ter hoogte van de bodemoppervlakte waar er effectief sedimentatie plaats heeft. Het besluit van deze studie is dat de gebruikte stortstrategie, nl. het storten op de Plaat van Boomke en de Punt van Melsele over het algemeen de betere resultaten geeft. De invloed op de sedimentatie blijft beperkt, de effectiviteit van de baggerwerken is goed en de verhoging in de turbiditeit blijft beperkt.

2.2 Studie densiteitsstromingen [IMDC, 2007]

In maart en september 2006 werden twee monitoringscampagnes uitgevoerd op de Beneden-Zeeschelde in het kader van de studie van de densiteitsstromingen in de Beneden-Zeeschelde, als onderdeel van de LangeTermijn Visie voor het Schelde-estuarium. Deze campagnes werden uitgevoerd door IMDC (2007) i.s.m. WL/Delft Hydraulics, R. Kirby en GEMS. Verschillende laboratoriumtesten werden uitgevoerd om de eigenschappen van cohesief sediment, de consolidatie-eigenschappen en de erodeerbaarheid en kritische schuifspanning voor erosie te bepalen. Uit de resultaten van deze studie werden parameters afgeleid om toe te passen bij de numerieke modellering [IMDC, 2007a en IMDC, 2007b].

2.3 Ontwikkelingszone Saeftinghe [IMDC & Deltares, 2011]

Ter voorbereiding van een project-MER voor de aanleg van een nieuw getijdendok op de linkeroever van de Schelde, werd onderzoek uitgevoerd om inzicht te krijgen in de mogelijke effecten ten gevolge van de aanleg, het onderhoud en het gebruik van dit dok. Door IMDC werd, in samenwerking met Deltares, de studie 'Ontwikkelingszone Saeftinghe – Hydraulisch, sedimentologisch en morfologisch onderzoek' uitgevoerd, in opdracht van het Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen, in 2011 [IMDC, 2011]. De analyse van de effecten van aanleg en onderhoud van het Deurganckdok vormt een belangrijke basis voor deze studie. Ten behoeve van de toekomstige project-MER dient deze voorstudie de gegevens aan te leveren met betrekking tot de (abiotische-) aspecten die noodzakelijk zijn voor het uitvoeren van de ecologische beoordeling. De numerieke modellering van de verschillende scenario's in deze studie is gebaseerd op het Zeescheldemodel zoals dat voor de Deurganckdokstudie werd ontwikkeld. Er wordt gebruik gemaakt van de Slib3D-module binnen Delft3D waarin nieuwe functionaliteiten (oa. nieuwe parametrisatie van bodemschuifspanning, erosie en valsnelheid) zijn geïmplementeerd om de specifieke hydro-sedimentologische processen die optreden in het Deurganckdok en in de Zeeschelde goed te kunnen beschrijven.

2.4 LTV O&M slibmodel [Deltares & WL, 2006-2008]

In opdracht van RWS-RIKZ en de Vlaamse Overheid werd door WL Delft Hydraulics en het Waterbouwkundig Laboratorium een hydrodynamisch en slibtransportmodel van het Schelde-estuarium ontwikkeld, in het kader van LTV (Lange Termijn Visie), luik toegankelijkheid [van Kessel *et al.*, 2006]. Het doel van de studie omvat 2 luiken: enerzijds de behoefte aan kennis van de huidige slibdynamiek en –balans en de bepaling van de autonome ontwikkeling ervan, en anderzijds de vraag naar het effect van diverse ingrepen op de slibdynamiek en –balans in verhouding tot de autonome ontwikkeling. Het doel van het model is het gebruik als ondersteuning bij mogelijke beheersvragen omtrent bevaarbaarheid en (Europese) milieuregelgeving. Het studiegebied omvat het estuarium van de Zeeschelde en de Westerschelde, en de monding van de Westerschelde. De focus van de studie ligt op de fysische processen. Het model beschrijft het transport, erosie en sedimentatie van cohesief sediment. Bodemtransport wordt niet in beschouwing genomen. In eerste instantie werd een 3D-hydrodynamisch model opgebouwd en gekalibreerd. Dit model werd opgebouwd door het Waterbouwkundig Laboratorium, gebaseerd op reeds bestaande 2D-modellen. Het hydrodynamisch model werd opgebouwd in SIMONA software van RIKZ. Met dit hydrodynamisch model als basis werd een slibtransportmodel opgezet en gekalibreerd.

In de tweede fase van de studie, in 2007, werden het hydrodynamisch model en het slibtransportmodel verder verbeterd [van Kessel *et al.*, 2007]. Hierna werd het model toegepast voor een eerste beheersvraag, met name voor modellering van de storting van fijn sediment, gebaggerd in Sloehaven, te Vlissingen.

In 2008 werden met het opgebouwde hydrodynamisch en slibmodel jaarsimulaties uitgevoerd en werd gestart met een detailstudie [van Kessel *et al.*, 2008]. Deze omvatte de ontwikkeling van een gedetailleerd model van Zeebrugge, nodig om de lokale bagger- en stortstrategieën te optimaliseren. Verder werden ook de impact van de tweede Scheldeverdieping op sedimentconcentratie, sedimentfluxen en bezinking in de haven in beschouwing genomen. Op basis van remote sensing gegevens werd informatie afgeleid over het zwevend stof gehalte (SPM) in de bovenste laag van de waterkolom, en over het slibgehalte in de bovenste laag van de bodem op platen. Uit de modelvalidatie blijkt dat de slibdynamiek redelijk goed door het model wordt gereproduceerd. De sterkte van de seizoensdynamiek en van de estuariene circulatie worden echter nog onvoldoende door het model gereproduceerd.

2.5 Instandhouding vaarpassen [IMDC *et al.*, 2013]

In het kader van de studie ‘Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie’, in het kader van LTV-Veiligheid en Toegankelijk, werd door IMDC (2013a) i.s.m. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland, een analyse uitgevoerd van de stortvakken in de Beneden-Zeeschelde. Het betreft een analyse van de huidige stortlocaties in de Zeeschelde die in gebruik zijn ten behoeve van onderhoudsbaggerwerken. Er wordt gezocht naar een optimale stortstrategie voor slib in de Zeeschelde. Hierbij wordt getracht antwoord te geven op de volgende specifieke beheersvraag voor de Beneden-Zeeschelde: *Hoe zouden de slibconcentraties rondom de Antwerpse haven veranderen als de slibrijke baggerspecie langdurig meer zeewaarts zou worden gestort?*

Uit een analyse van de bestaande bodem- en baggergegevens blijkt dat de grootste stortlocaties voor slib momenteel gevormd worden door Oosterweel en Punt van Melsele. De grootste onderhoudslocatie wordt gevormd door het Deurganckdok. De stortvakken Oosterweel en Punt van Melsele vertonen, ondanks de stortingen, in overeenstemming met de algemene trend in de Beneden-Zeeschelde een verdieping. Er werd een numerieke modellering uitgevoerd van de verspreiding van slib van de huidige en mogelijk alternatieve locaties. Het gaat hierbij om slib dat vrijkomt door onderhoudsbaggerwerkzaamheden. De analyse van de huidige stortlocaties geeft aan dat de huidige situatie van afzettingen en onderhoudswerken netto een concentratieverhogend effect heeft op de Beneden-Zeeschelde. De stortlocaties Punt van Melsele, Plaat van Boomke en Oosterweel hebben een gelijkaardig gedrag qua sedimentverspreiding. De analyse van de alternatieve stortlocaties geeft aan dat de stortlocaties opwaarts een grotere impact hebben op de slibconcentraties in de Beneden-Zeeschelde. Naarmate de stortlocatie van opwaarts naar meer afwaarts verplaatst, neemt de impact op de slibconcentraties af door een grotere dispersie en verdunning omwille van een toename van getijvolume en rivierbreedte. Het afwaarts storten van specie op de grens tussen Zeeschelde en Westerschelde leidt tot een significantie reductie in slibconcentratie en onderhoud in de Beneden-Zeeschelde. Ter hoogte van de huidige stortlocaties worden de totale slibconcentraties gehalveerd. Ook het onderhoudsvolume over het gehele Schelde-estuarium neemt af.

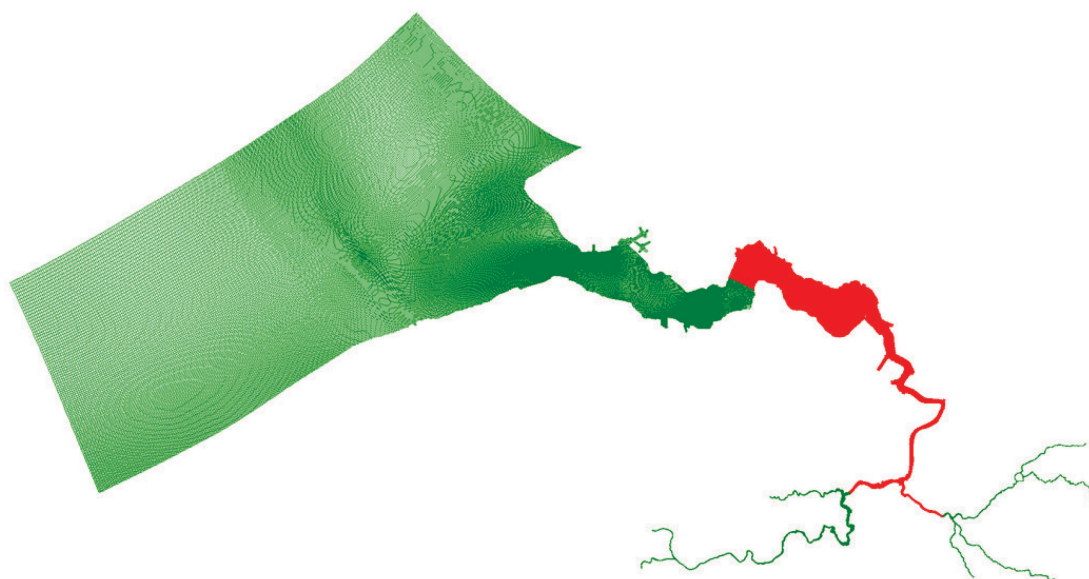
Tabel 1 – Overzicht toegepaste modellen in voorgaande studies

Studie	2D/3D	Sedimenttransport online/offline	Software	Geografisch bereik	Toepassing
Onderhoudswerken Deurganckdok [IMDC, 2004]	3D	Online sedimenttransport met SED online module	Delft3D	Beneden-Zeeschelde tussen Waarde en Schelle	Vergelijkende studie van verschillende bagger- en stortscenario's
Ontwikkelingszone Saeftinghe [IMDC & Deltares, 2011]	3D	Online sedimenttransport in Slib3D-module met bijkomende functionaliteiten (niet in commerciële versie)	Delft3D	Beneden-Zeeschelde, uitgebreid met het toekomstige Saeftinghedok	Analyse van de effecten van aanleg en onderhoud van het Saeftinghedok
LTV O&M slibmodel [Deltares & WL, 2006-2008]	3D	Offline sedimenttransport in Delwaq	SIMONA	Schelde-estuarium	Modellering van de storting van fijn sediment, jaarsimulaties en detailstudies
Instandhouding vaarpassen [IMDC <i>et al.</i> , 2013]	3D	Offline sedimenttransport in Delwaq	Delft3D	Schelde-estuarium	Modellering van de storting van fijn sediment op alternatieve locaties in de Beneden-Zeeschelde en Westerschelde
Slibbalans Zeeschelde [WL, in uitvoering]	3D	Offline sedimenttransport in Delwaq	SIMONA	Schelde-estuarium	Grootschalige slibtransport in het estuarium, met vergelijking tussen huidige toestand en historische toestand (jaren 1950)

3 MODELOPZET

3.1 NEVLA-model

Het numeriek 2D-model gebruikt in deze studie is geknipt uit het zogenaamde NEVLA-model. Het NEVLA-model is een 2D-hydrodynamisch model ontwikkeld binnen het SIMONA softwarepakket [Verheyen *et al.*, 2012 en Maximova *et al.*, 2013]. Dit model omvat het volledige Schelde-estuarium: een deel van de Noordzee, de Vlakte van de Raan, de Westerschelde, Zeeschelde en getijgebonden zijrivieren in Vlaanderen. De afwaartse rand van het NEVLA-model is gelegen in de Noordzee. De opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied (zie Figuur 1).



Figuur 1 – Modelgrid van het Delft3D NEVLA-model (groen) en het studiemodel (rood)

3.2 Basismodel

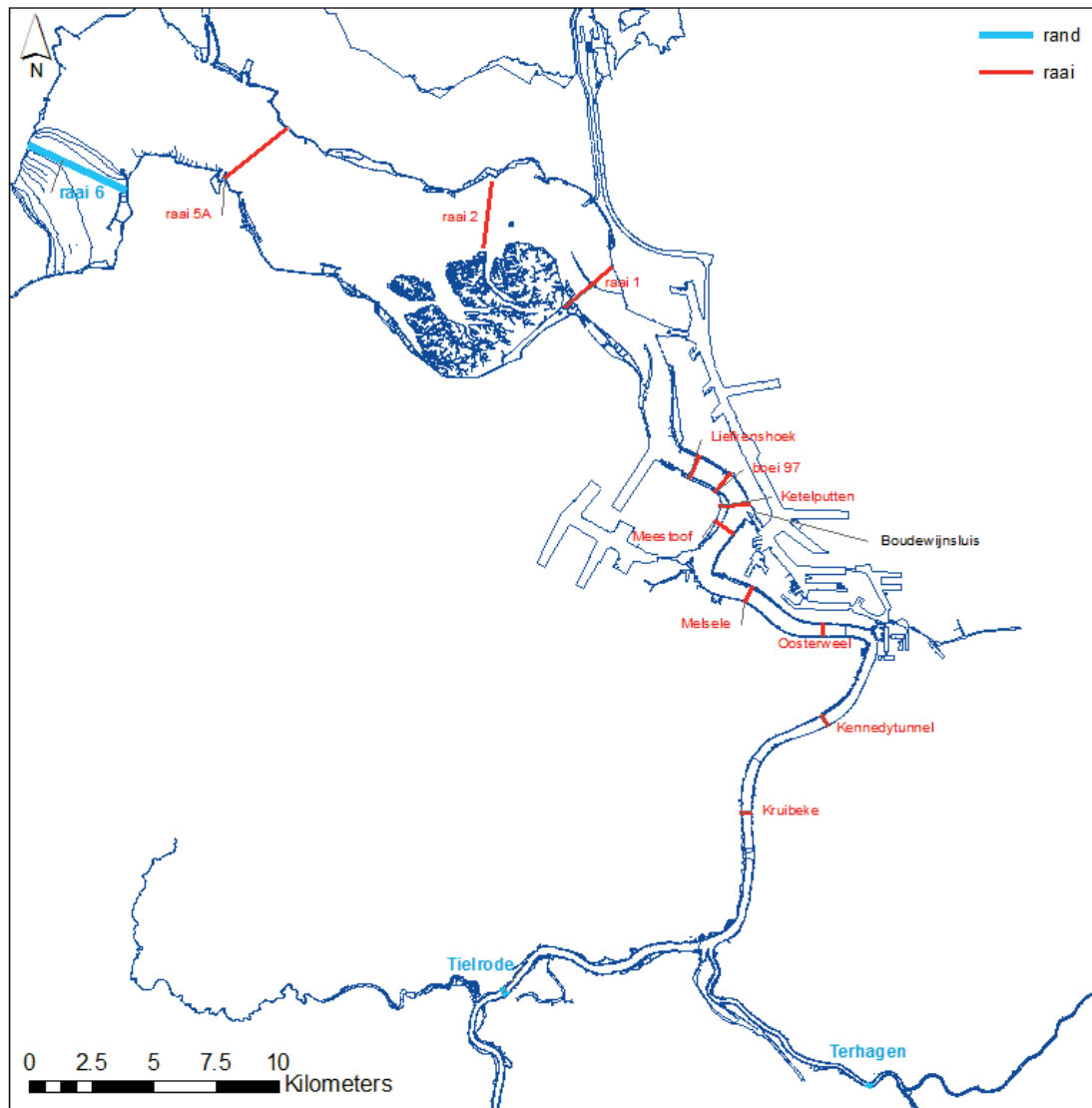
Voor deze studie is ervoor geopteerd een detailmodel op te zetten dat het studiegebied (Beneden-Zeeschelde) volledig omvat, inclusief een uitbreiding naar op- en afwaarts. Dit model heeft een afwaartse rand ter hoogte van de debietraai 6, gelegen net afwaarts van Ossenisse. De opwaartse randen zijn gelegen ter hoogte van Tielrode op de Zeeschelde en ter hoogte van Terhagen op de Rupel (Figuur 1 en Figuur 2). Deze randen zijn gelegen op circa 20 km van de uiterste stortlocaties. Hierdoor is het modelgebied ruimer dan bij de modellen gebruikt in voorgaande studies (zie hoofdstuk 2).

3.2.1 Modelgrid

Het modelgrid van het gebruikte detailmodel is 3 x 3 keer fijner dan dit van het oorspronkelijke NEVLA-model. Deze verfijning werd uitgevoerd om ter hoogte van Deurganckdok, toegangsheuvel sluisen en de zone nabij Ketelputten een voldoende fijne resolutie te bekomen [Maximova *et al.*, 2011 en 2013].

De grootte van een gridcel ter hoogte van Schaar van Ouden Doel (lengte x breedte) bedraagt circa 26 m x 18 m. Ter hoogte van het Deurganckdok bedraagt een grootte van een gridcel circa 16 m x 18 m, en ter hoogte van Kruikeke circa 30 m x 14 m.

Figuur 3 tot en met Figuur 5 geven delen van het modelgrid weer in de Beneden-Zeeschelde.



Figuur 2 – Situering studiegebied, met afwaartse rand t.h.v. Raai 6 en opwaartse randen te Tielrode en Terhagen



Figuur 3 – Modelgrid ter hoogte van Schaar van Ouden Doel en sluisoegang Zandvliet- en Berendrechtssluisen



Figuur 4 – Modelgrid ter hoogte van Deurganckdok



Figuur 5 – Modelgrid ter hoogte van Kallosluis en Boudewijn- en Van Cauwelaertsluizen, en Ketelputten

3.2.2 Topo-bathymetrie

De topo-bathymetrie van de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde zijn gebaseerd op metingen van 2011 aangeleverd door respectievelijk Rijkswaterstaat en Vlaamse Hydrografie. De bathymetrie van de intertidale gebieden is gebaseerd op LIDAR-metingen van 2011. Bij overlap tussen LIDAR en bathymetrische gegevens, is voorkeur gegeven aan bathymetrie. TAW is gebruikt als verticaal referentievlak. De bathymetrische data zijn omgezet van een 1 m bij 1 m grid naar een 5 m bij 5 m grid.

De bathymetrie van het Deurganckdok is bepaald op basis van de waarde van de oorspronkelijke diepte van het dok: TAW -19 m in het midden van het dok en TAW -17 m aan de kaaien.

Aan de afwaartse rand van het model werd een waterstandsrandoorwaarde opgelegd op een doorsnede met meerdere geulen. Het model vertoonde numerieke instabiliteiten ter hoogte van deze afwaartse rand. De bathymetrie aan de afwaartse rand van het model werd artificieel verdiept om de stabiliteit van het model te verbeteren (*WL/Delft Hydraulics*, 2007). Ook een reductie van de tijdstap werd toegepast om de instabiliteit te verhelpen (zie §3.2.4).

3.2.3 Randvoorwaarden

De opgelegde tijdreeksen aan de op- en afwaartse randen van het model zijn afkomstig uit een simulatie met het NEVLA-model. De simulatieperiode van dit model loopt van 24/09/2009 tot 24/10/2009.

Aan de afwaartse rand van het model wordt een tijdreeks van waterstanden opgelegd, afkomstig uit het NEVLA-model. Aan de opwaartse randen te Tielrode en Terhagen wordt een tijdreeks van 10-minuutelijkse debieten opgelegd, afkomstig uit het NEVLA-model.

3.2.4 Tijdstap

Voor de gevoeligheidsanalyse werd gebruik gemaakt van een tijdstap van 0,125 min (~7,5 s). Omdat tijdens de gevoeligheidsanalyse bleek dat onder bepaalde parameterinstellingen lokaal numerieke instabiliteiten optraden, is er beslist om voor de eigenlijke scenarioberekeningen de tijdstap te verkleinen 0,05 min (3 sec). Bij deze tijdstip is het Courantgetal over het volledige modelgrid kleiner dan 15, en zelfs grotendeels kleiner dan 10.

3.2.5 Hydrodynamische modelparameters

Een overzicht van de toegepaste modelparameters wordt gegeven in Tabel 2.

Tabel 2 – Overzicht modelparameters

Parameter	Waarde (gevoeligheidsanalyse / scenarioberekeningen)
Time step	7,5 s / 3 s
Secondary flow	On
Initial condition water level	TAW +1,5 m
Horizontal eddy viscosity	1 m ² /s
HLES	Off
Aantal (vertical) lagen	1 (2D model)
Version Delft3D Flow	5.00.00.1234 (Linux)
Salt transport	Off
Wind	Off
Roughness formula	Manning
Bed roughness value	0.025

3.2.6 Simulatieperiode

Voor de gevoeligheidsanalyse is een simulatieperiode gebruikt van 8 dagen, van 24/09/2009 tot 01/10/2009.

Voor de scenarioberekeningen is de tijdreeks verlengd tot meer dan 5 weken, door de eerste getijcyclus in de simulatieperiode nogmaals te herhalen aan het einde van de periode. Zodoende kan een periode gesimuleerd worden van 24/09/2009 tot 01/11/2009.

3.3 Sedimenttransportmodellering

De berekeningen van het sedimenttransport worden uitgevoerd met het Delft3D 'slibonline' model, waarbij het sedimenttransport simultaan met de hydrodynamica berekend wordt. Het sedimenttransportmodel heeft geen terugkoppeling op het hydrodynamisch model. Sedimentconcentraties en veranderingen van de bodem hebben geen invloed op de hydrodynamica.

3.3.1 Sedimentfracties

Aangezien de Beneden-Zeeschelde wordt gekarakteriseerd door sedimenttransport van zowel slib als zand, werd oorspronkelijk de keuze gemaakt om de scenario's te onderzoeken met verschillende modellen. Binnen deze modellen zou enerzijds gerekend worden met louter de cohesieve fractie ("slib"), terwijl anderzijds een model met louter de niet-cohesieve fractie ("zand") zou worden opgezet.

Echter, vanuit een aantal deskundigen (o.a. Commissie Monitoring Westerschelde) werd het belang aangehaald van beide fracties en de onderlinge interactie. Er werd gesuggereerd om dit aspect mee te nemen in het onderzoek. Daartoe werd binnen het gevoeligheidsonderzoek (5.1) een model opgezet waarbij beide fracties gezamenlijk gemodelleerd werden. Na een eerste validatieronde, en om tot betere resultaten te komen, werd in een tweede stap een extra slibfractie toegevoegd, met een lagere valsnelheid.

In het model dienen een aantal sedimentkarakteristieken opgelegd te worden. Aangezien de keuze van deze waarden onderdeel uitmaken van de kalibratie/validatie van het model, werden slechts een aantal parameters constant gehouden. Voor de zandfractie wordt een droge dichtheid van 1600 kg/m^3 genomen (specifieke dichtheid = 2650 kg/m^3) en wordt een d50 van $130 \mu\text{m}$ gekozen. Deze keuze is gebaseerd op korrelgroottes van getransporteerde sedimenten tijdens een reeks 13u-metingen in de Zeeschelde [Plancke et al., 2014]. De initiële concentratie van het zand werd ruimtelijk constant gehouden en gelijk aan $0,03 \text{ kg/m}^3$.

Voor de slibfractie wordt een droge dichtheid van 550 kg/m^3 genomen (specifieke dichtheid = 2650 kg/m^3). De initiële concentratie van het slib werd ruimtelijk constant gehouden en bedraagt $0,15 \text{ kg/m}^3$. Deze waarde is gebaseerd op gemiddelde sedimentconcentraties op basis van langjarige metingen [Vandenbruwaene et al., 2015]. De overige parameters, cfr. kritische schuifspanning voor erosie en sedimentatie (τ_{cr}^{ero} , τ_{cr}^{sed}), valsnelheid en erosieparameter, werden onderworpen aan een gevoeligheidsanalyse en op basis van de uiteindelijke kalibratie vastgelegd voor de scenarioberekeningen.

3.3.2 Randvoorwaarden

Aan de op- en afwaartse randen van het model wordt een constante sedimentconcentratie opgelegd, afgeleid op basis van metingen [Vandenbruwaene et al., 2015].

Aan de afwaartse rand wordt een waarde van $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd, voor zowel zand als slib. Aan de opwaartse rand te Terhagen wordt een waarde van $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd voor zand, en $0,1 \text{ kg/m}^3$ voor slib. Aan de opwaartse rand te Tielrode wordt een waarde van $0,03 \text{ kg/m}^3$ opgelegd voor zand, en $0,3 \text{ kg/m}^3$ voor slib. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de sedimentconcentratie ter hoogte van Driegoten sterke seizoensale variaties vertoont (zie 4.3.3), waarbij de sedimentconcentratie in de winter (hoge bovenafvoer) aanzienlijk lager is dan in de zomer (lage bovenafvoer).

3.3.3 Dikte bodemsedimentlaag

De dikte van de bodemsedimentlaag ("initial sediment layer thickness at bed") is ruimtelijk variërend opgelegd. De waarden voor de zand- en slibfractie werden berekend op basis van zowel de lithologische kaart (aandeel zand en slib) en de dikte van de erodeerbare lagen, die bepaald werd op basis van het verschil tussen de bathymetrie en de diepte van de harde laag.

De diepte van de harde lagen van de Beneden-Zeeschelde werden reeds eerder bepaald in het kader van de studie 'Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie', in het kader van LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid, door IMDC (2013b) i.s.m. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland. De diepte van de harde laag in de Beneden-Zeeschelde is bepaald op basis van de basis-Quartairstaart, verschillende bathymetrieën van de Zeeschelde (tot 1950) en de lithologische kaart van de bodem van 2009.

De diepte van de harde lagen van de Westerschelde werd eveneens bepaald in het kader van LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid, door Svašek Hydraulics (2012). Hierbij werd vertrokken van een kartering van TNO uit 2003. Vervolgens werd de diepte van de historische bodems vanaf 1960 tot en met 2011 bekeken. De niet-erodeerbare laag werd verlaagd op die punten waar de bodemligging in het verleden lager is geweest.

Deze laatste actie werd niet uitgevoerd op de diepte van de harde laag voor de Beneden-Zeeschelde, wat ertoe leidde dat bij de berekening van het verschil tussen de bathymetrie en de diepte van de harde laag voor een aanzienlijk aantal punten de harde laag hoger lag dan de bathymetrie (wat leidde tot een negatieve dikte). In deze punten werd de dikte van de erodeerbare laag gelijk gesteld aan 0.

De dikte van de erodeerbare laag werd vervolgens gecombineerd met informatie uit de lithologische kaart, die opgemaakt werd door IMDC in samenwerking met de Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde van de Vrije Universiteit Brussel en waar door het Waterbouwkundig Laboratorium korrelanalyses bij werden uitgevoerd [IMDC & VUB, 2010, *Vos et al.*, 2011]. Bij deze modellering werden bepaalde sedimentfracties opgenomen. Voor elk van de lithologische klassen (1 t.e.m. 6) uit de lithologische kaart werd een gemiddelde percentage bepaald van elk van de opgenomen sedimentfracties.

Bij de opzet van het slibmodel werd er gewerkt met een slibfractie (cohesief) en een zandfractie (niet-cohesief) (zie Tabel 3).

Tabel 3 – Percentage cohesief en niet-cohesief sediment per lithologische klasse

Klasse	Naam	Percentage cohesief	Percentage niet - cohesief
1	Slib	71,4	28,6
2	Zandhoudend Slib	60,1	39,9
3	Slibhoudend Zand	28,1	71,9
4	Zand	7,5	92,5
5	Harde Bodem	7,5	92,5
6	Onbekend	38,5	61,5

De klasse ‘harde bodem’ (klasse 5) uit de lithologische kaart kwam niet overal overeen met de harde bodem die afgeleid kan worden uit de ‘diepte harde bodem’. Er werd van uitgegaan dat er enkel harde bodem aanwezig is daar waar de dikte van de erodeerbare laag 0 is. In de overige punten, waar er dus wel erodeerbaar materiaal is, wordt de klasse 5 behandeld als een zandlaag, en wordt aangenomen dat binnen de lithologische kaart geen goed onderscheid gemaakt werd tussen reflectie op een harde laag en een sterk gecompacteerd sedimentlaag. De percentages voor klasse 5 werden daarom gelijkgesteld aan die van klasse 4.

Vervolgens werd de dikte van de erodeerbare laag gecombineerd met de lithologische kaart: de samenstelling van erodeerbare laag bestaat uit twee fracties verdeeld op basis van de percentages van de voorkomende lithologische klassen (bv. bij lithologische klasse 4 bestaat 7,5 % van de erodeerbare dikte uit slib, de overige 92,5 % is zand).

Binnen Delft3D mag de dikte van de sliblaag maximaal 10 m bedragen. Het hoogste percentage slib komt voor in klasse 1 met circa 71% slib en 29% zand. Om deze verhouding te behouden wordt de dikte van het sedimentpakket, bestaande uit slib en zand, herschaald naar 14 m. Zodoende is de maximale diepte van de sliblaag gelijk aan 71% van 14 m, ofte 10 m. Het overige deel van het sedimentpakket bestaat uit zand.

Voor de Westerschelde, waar er geen lithologische kaart aanwezig is, werden alle gebieden onder laagwater toegekend aan klasse 4, en de resterende aan klasse 2. De maximale dikte van de cohesieve sliblaag in de Westerschelde werd echter vastgelegd op 0,10 m. De Boven-Zeeschelde en de Rupel werden toegekend aan klasse 3.

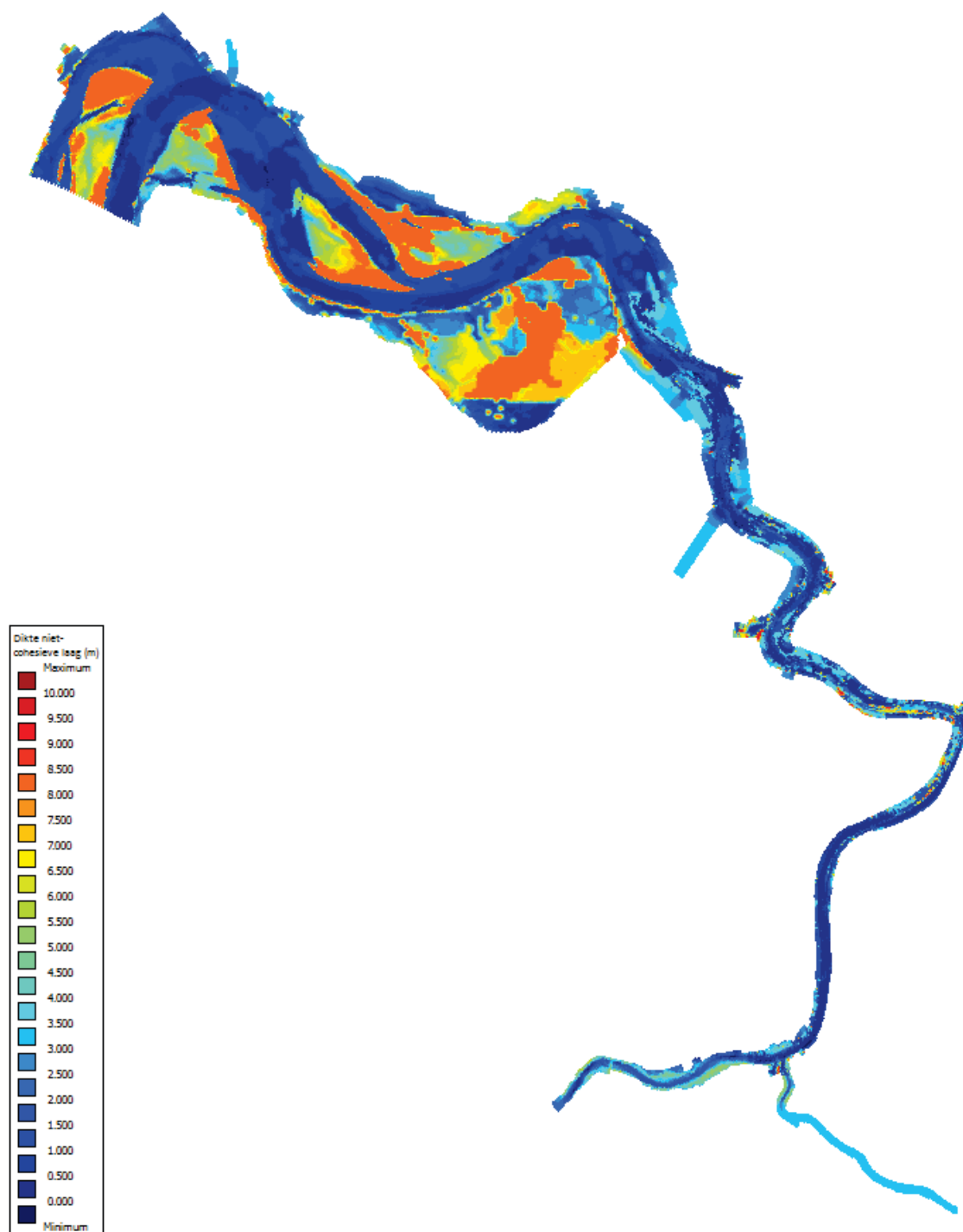
Figuur 6 en Figuur 7 geven respectievelijk de dikte weer van de niet-cohesieve zandlaag en van de cohesieve sliblaag.

3.4 Stortingen van slib

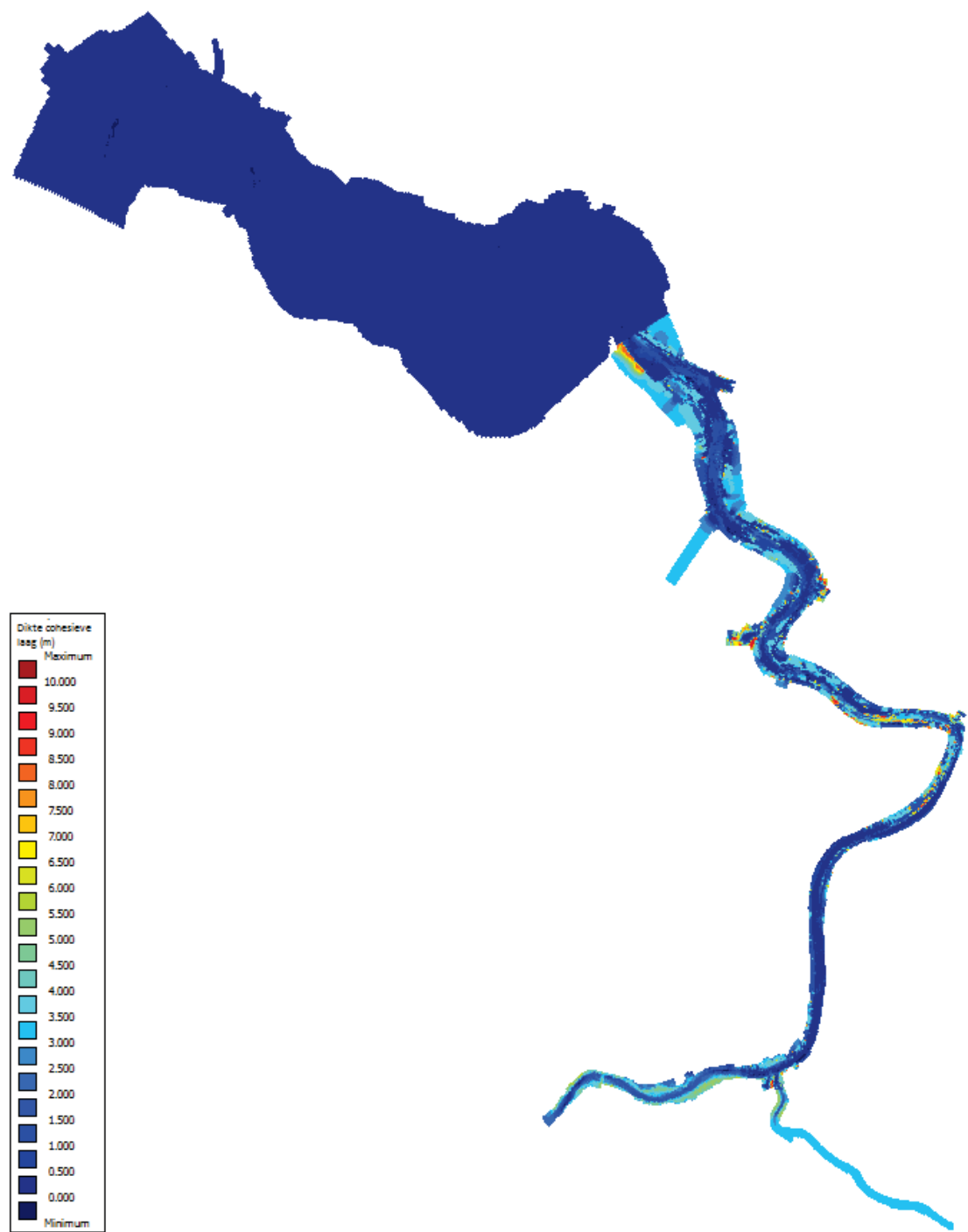
In de scenarioberekeningen werden stortingen van slib geïmplementeerd in het model. Hiervoor is gebruik gemaakt van de module 'Operations => Discharges'. Hierbij dienen voor de verschillende fracties in het model volgende gegevens opgegeven:

- Tijdstip begin en einde stortperiode
- Debiet (m^3/s)
- Concentratie (kg/m^3)

Bij elke storting wordt eenzelfde hoeveelheid slib gestort, 1212 TDS/storting, in een tijdsspanne van 6 minuten. Het debiet bij de storting bedraagt dus 3,37 TDS/s.



Figuur 6 – Initieel opgelegde dikte niet-cohesieve laag



Figuur 7 – Initieel opgelegde dikte cohesieve laag

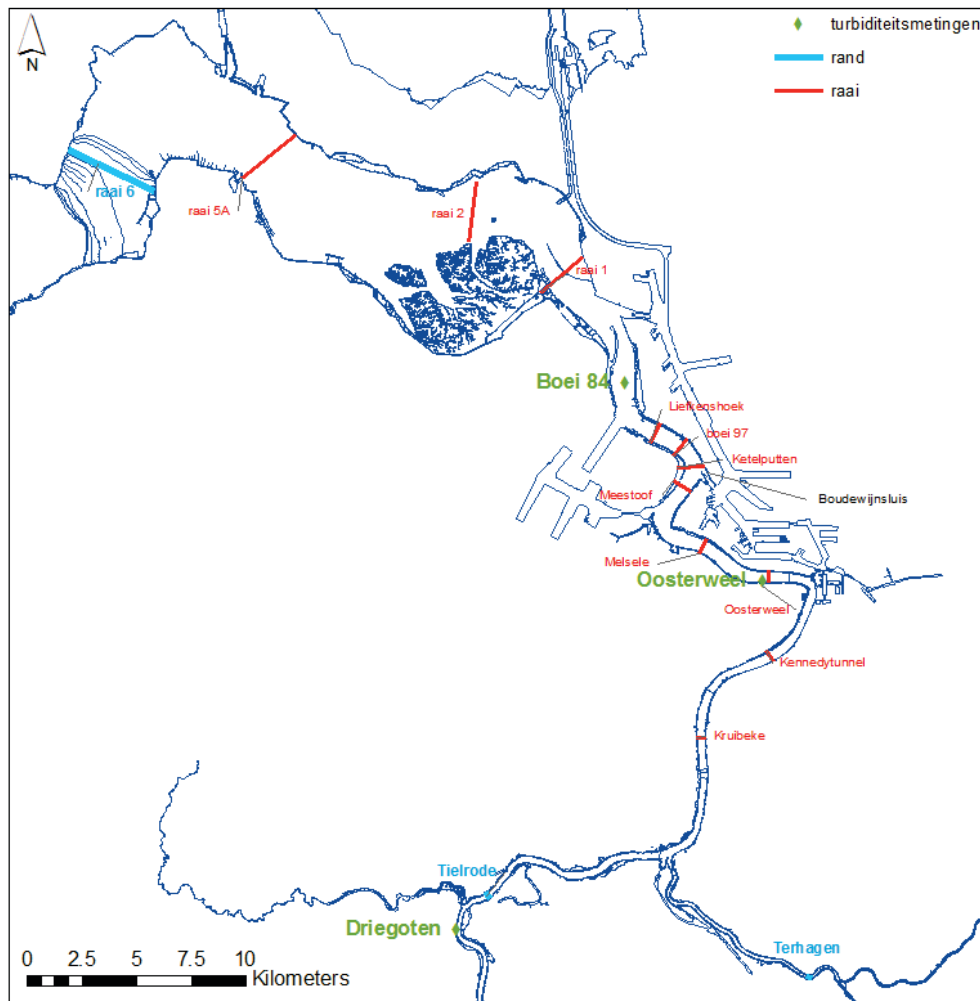
4 DATA-ANALYSE T.B.V. MODELVALIDATIE

4.1 Beschikbare data

In het kader van het gezamenlijke Vlaams-Nederlandse monitoringprogramma “MONEOS”, waarbij het estuariene systeem van het volledige Schelde-estuarium opgevolgd wordt, wordt in de Zeeschelde door het Waterbouwkundig Laboratorium op 3 locaties de turbiditeit continu gemeten. Het betreft volgende locaties (zie Figuur 8):

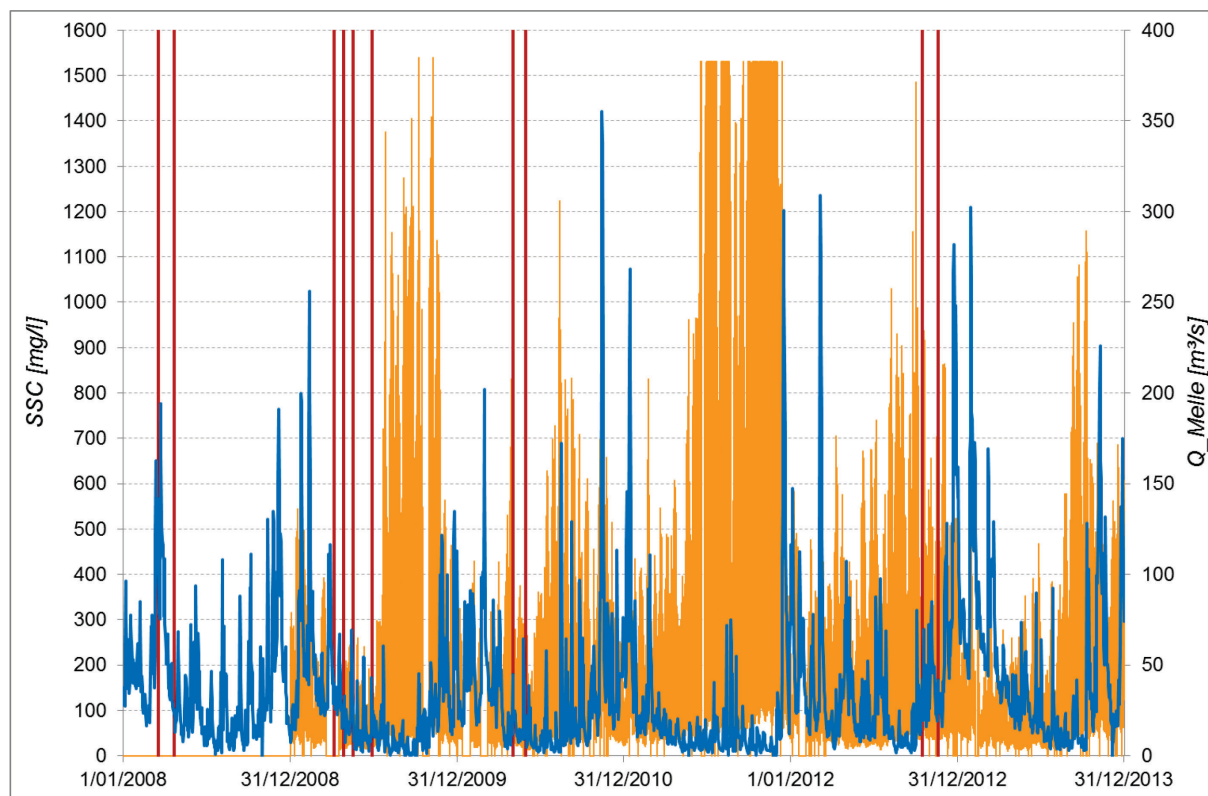
- Boei 84: 2 toestellen op resp. 0,8 m en 3,3 m boven de bodem, oftewel op ca. -8,1 m TAW en ca. -5,6 mTAW
- Oosterweel: 2 toestellen op resp. 1,0 m en 4,5 m boven de bodem, oftewel op ca. -5,8 m TAW en ca. -2,3 mTAW
- Driegoten: 1 toestel ca. 3 m onder het wateroppervlak

Deze gegevens worden sinds 2008 gerapporteerd in de jaarlijkse MONEOS-rapporten [WL, 2009-2014]. Op basis van (half-)jaarlijks kalibratiemetingen, kunnen de gemeten turbiditeiten omgerekend worden tot sedimentconcentraties. Deze worden binnen voorliggende studie gebruikt voor de modelvalidatie (Figuur 9 t.e.m. Figuur 11). Er dient opgemerkt te worden dat gedurende een aantal periodes de sensoren in saturatie gaan gedurende een deel van de getijcyclus. Deze waarden werden niet gecorrigeerd, waardoor de gepresenteerde waarden in deze periodes een (vermoedelijk beperkte) onderschatting geven van de werkelijk opgetreden waarden.

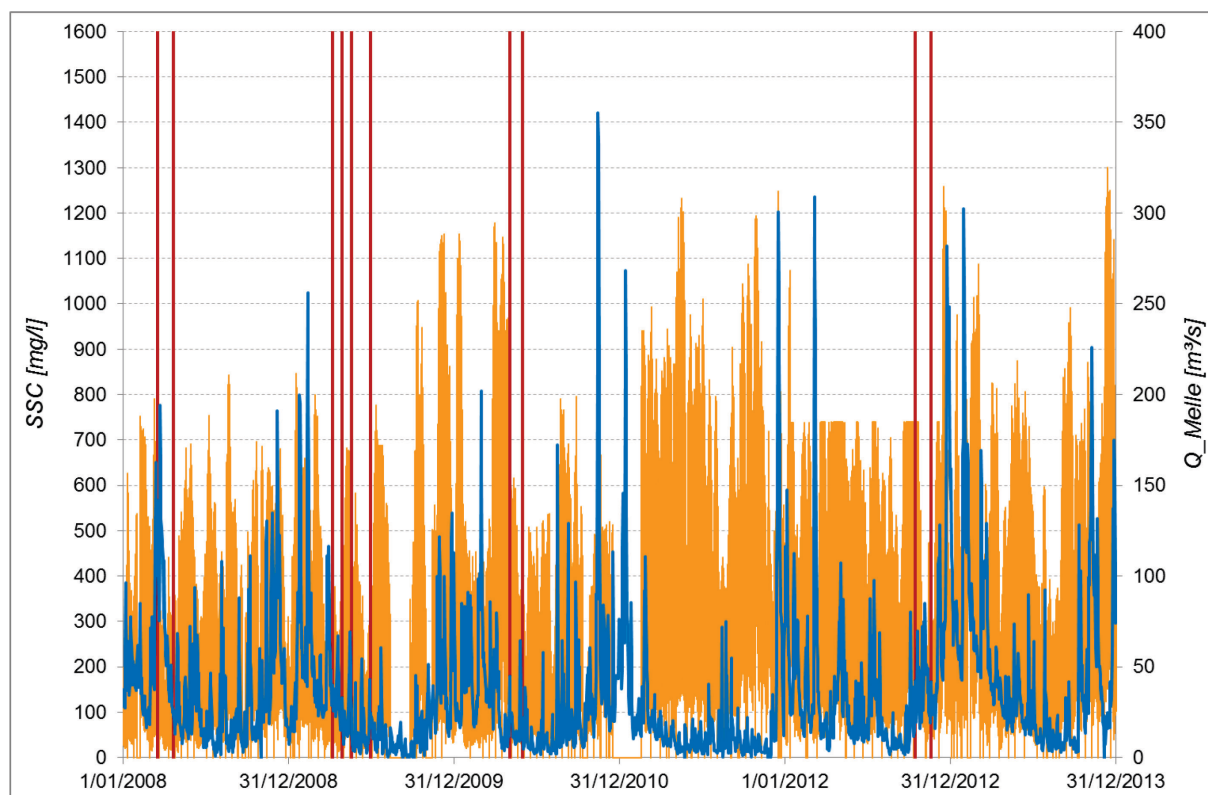


Figuur 8 - Overzicht meetlocaties turbiditeit langs de Beneden-Zeeschelde

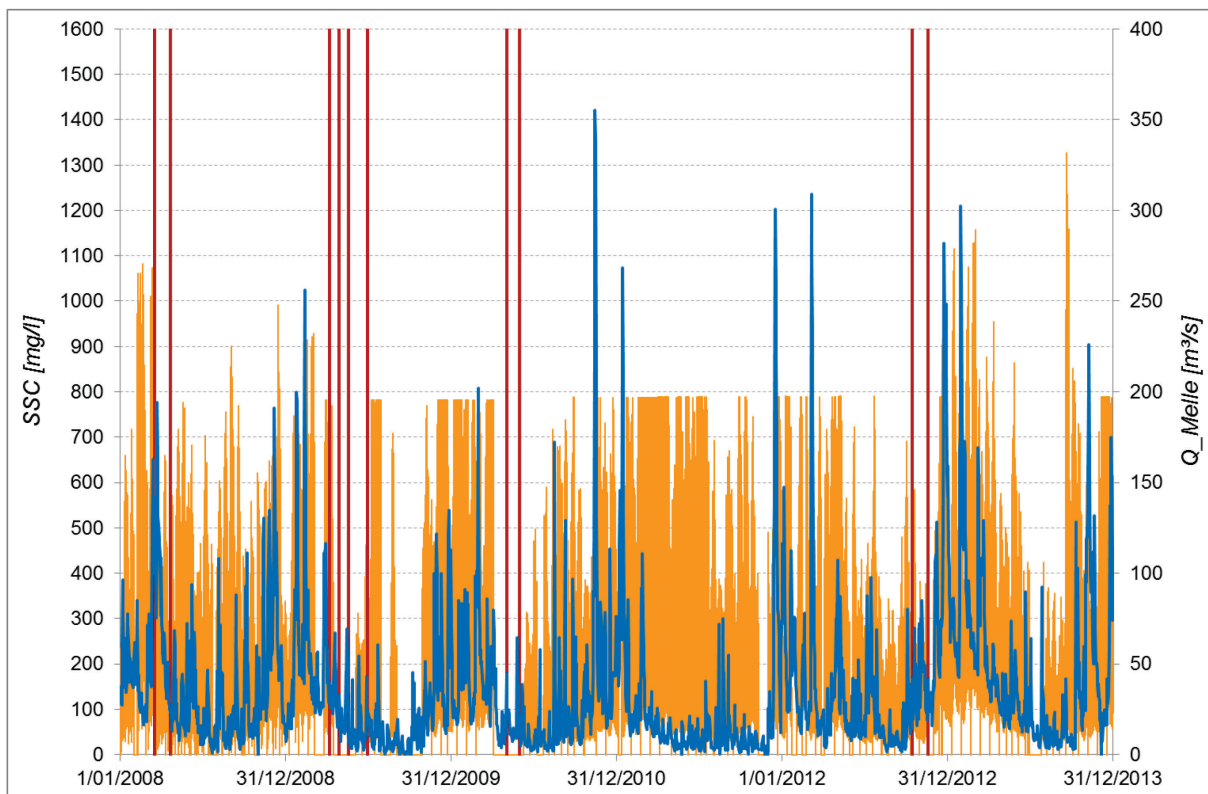
In [Vandenbruwaene *et al.*, 2015] is een analyse gebeurd van beschikbare sedimentconcentratie metingen in het Schelde-estuarium. Het betreft hier zowel de continue metingen, als maandelijkse metingen uit langsvaarten. Uit de uitgevoerde analyse blijkt dat naast het getij (zowel binnen één getijcyclus, als binnen de springtij-doodtij-cyclus), ook de bovenafvoer (Figuur 12) en de stortingen van onderhoudsbaggerspecie (Figuur 13) aanleiding kunnen geven tot variatie in de sedimentconcentratie. Om de invloed van deze factoren in beeld te brengen, werd een bijkomende analyse uitgevoerd om een optimale dataset te bekomen ten behoeve van de modelvalidatie.



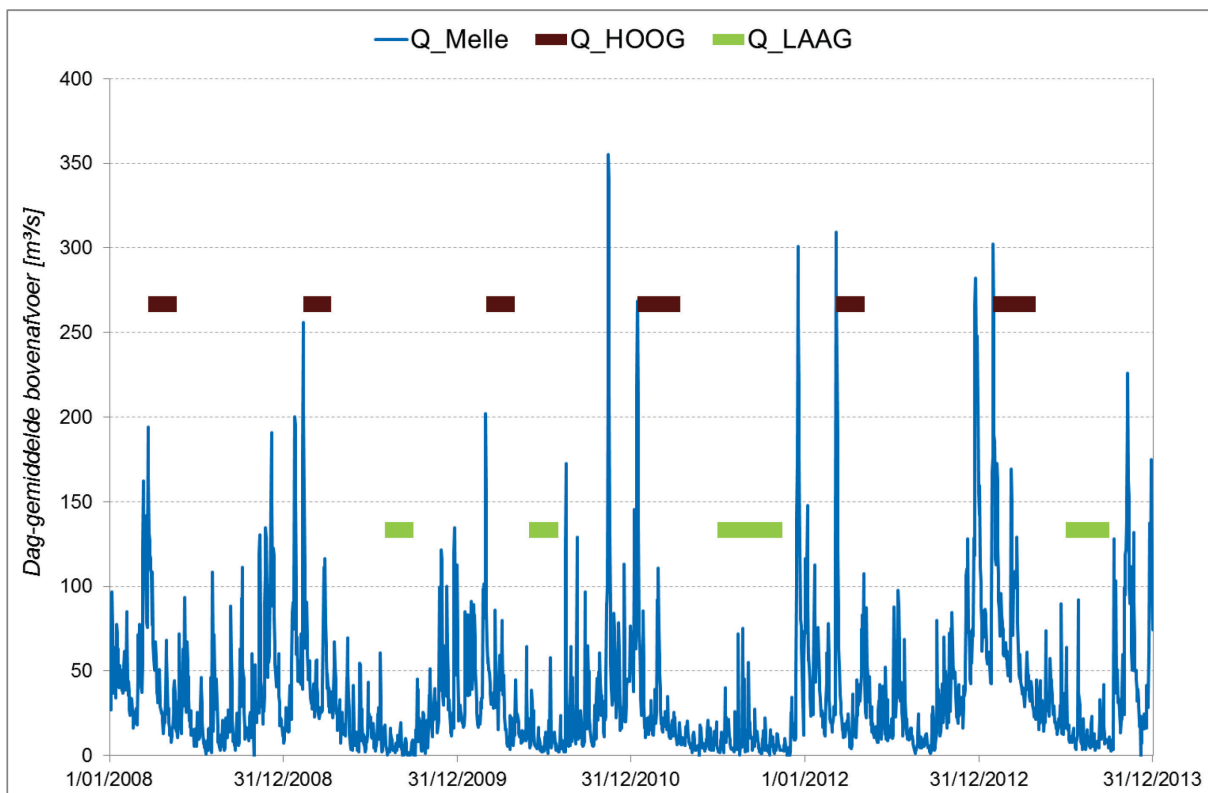
Figuur 9 – Sedimentconcentratie (oranje) te Driegoten en bovenafvoer te Melle (blauw)
(rode lijnen geven begin en einde weer van periodes zonder stortingen)



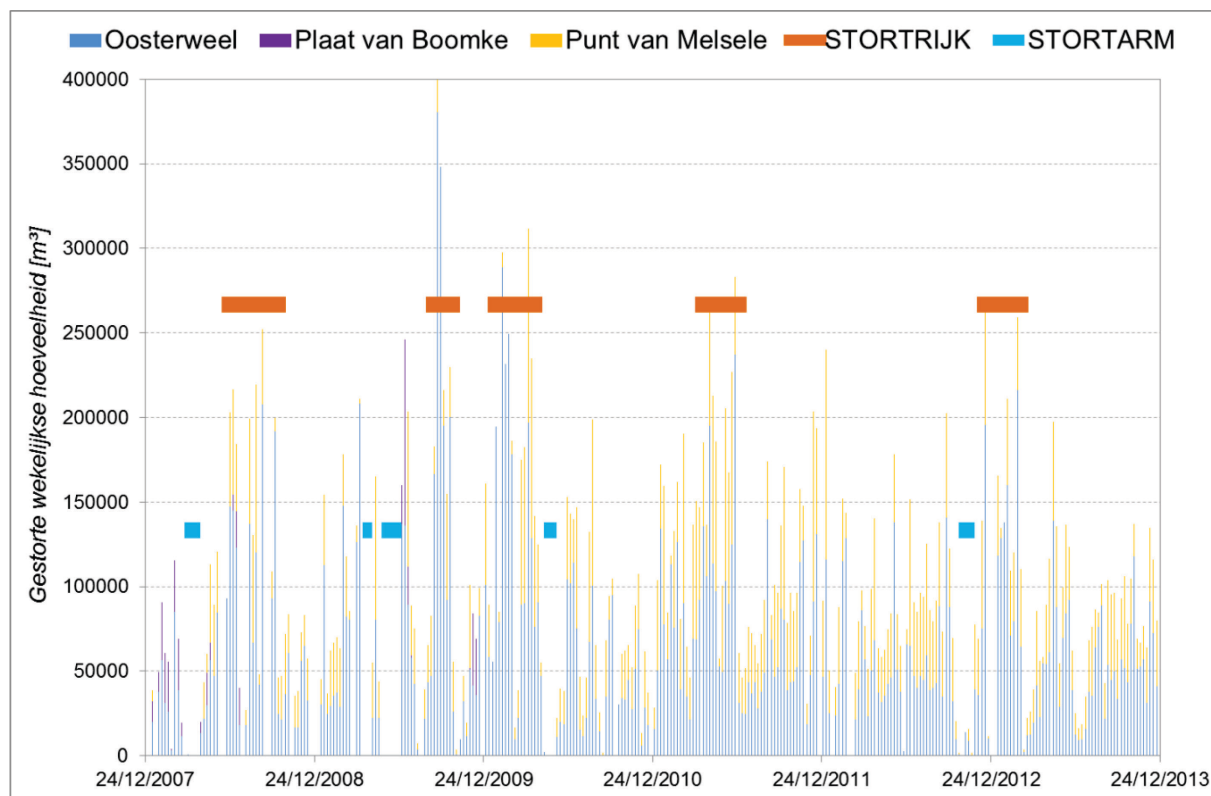
Figuur 10 – Sedimentconcentratie te Oosterweel (bovenste sensor - oranje) en bovenafvoer te Melle (blauw)
(rode lijnen geven begin en einde weer van periodes zonder stortingen)



Figuur 11 – Sedimentconcentratie te Boei 84 (bovenste sensor- oranje) en bovenafvoer te Melle (blauw)
(rode lijnen geven begin en einde weer van periodes zonder stortingen)



Figuur 12 – Daggemiddelde debiet te Melle



Figuur 13 – Overzicht gestorte hoeveelheden slib [V'] per week

4.2 Methodologie

Gelet op de invloed van de verschillende factoren, is getracht deze zoveel mogelijk te scheiden. Hierbij werden volgende aspecten beschouwd:

- Variatie binnen half-dagelijkse getijcyclus
- Variatie binnen springtij-doodtij-cyclus
- Variatie ten gevolge van bovenafvoer
- Variatie ten gevolge van stortingen onderhoudsbaggerwerk

4.2.1 Half-dagelijkse getijcyclus

Om de variatie binnen de half-dagelijkse getijcyclus in beeld te brengen, werden de geselecteerde getijperiodes (bv. gemiddeld getij bij lage bovenafvoer) gerelateerd ten opzichte van het tijdstip van hoogwater. Hierbij werd voor de 3 locaties een tijdsverschuiving gehanteerd ten opzichte van het meetstation Antwerpen-Loodsgebouw, gebaseerd op [Vandenbruwaene *et al.*, 2014]:

- Boei 84: 16 minuten eerder
- Oosterweel: 2 minuten eerder
- Driegoten: 60 minuten later

Vervolgens werd per 10 minuten een gemiddelde berekend van de geselecteerde getijperiodes (ensemble-analyse). Op deze manier kan een verloop van de sedimentconcentratie over één getijcyclus, voor de betreffende geselecteerde periodes, gemaakt worden.

4.2.2 Springtij-doodtij-cyclus

Aangezien de sedimentconcentratie sterk kan variëren binnen een springtij-doodtij-cyclus, wordt een onderscheid gemaakt tussen springtij, gemiddeld getij en doottij. Dit onderscheid gebeurt op basis van het getijverschil te Antwerpen-Loodsgebouw. Hiervoor werden een aantal karakteristieke waarden (percentielen) bepaald voor de opgetreden getijverschillen² in de periode 2001-2013.

Tabel 4 – Karakteristieke waarden getijverschil Antwerpen-Loodsgebouw

Percentiel [%]	Getijverschil [cm]
5	405
10	434
45	527
50	536
55	545
90	607
95	625

In het kader van de klassieke getijrapportages gelden specifieke definities voor springtij en doottij. Aangezien deze definitie aanleiding geeft tot slechts een beperkt aantal getijcycli per jaar (ca. 3 à 4%), is geopteerd voor een alternatieve benadering. De belangrijkste reden hiervoor is dat er een voldoende groot aantal getijcycli moet beschikbaar zijn om een representatief gemiddeld verloop van de sedimentconcentratie te kunnen bepalen. Volgende definitie is in voorliggende analyse gehanteerd:

- **Springtij:** > P90
- **Gemiddeld getij:** [P45, P55]
- **Doodtij:** < P10

Voor de geselecteerde periode werd een deelselectie gemaakt waarbij het getijverschil te Antwerpen-Loodsgebouw moet voldoen aan de hierboven gestelde eisen.

² Het getijverschil werd zowel bepaald op basis van de stijging (HW[t]-LW[t-1]) als de daling (LW[t]-HW[t-1]). Deze waarden zijn verschillend omwille van de dagelijkse ongelijkheid in het getij. Het verschil in de karakteristieke waarden bleek echter zeer gering te zijn (orde-grootte cm). Er werd in deze studie uiteindelijk gekozen voor de stijging.

Tabel 5 – Aantal weerhouden getijden per deelperiode

	TOTAAL 2008-2013	DROOG	NAT	STORTRIJK	STORTARM
Springtij	455	18	31	21	13
Gemiddeld getij	453	17	11	13	6
Doodtij	371 ³	10	17	12	5

4.2.3 Bovenafvoer

Hoewel de bovenafvoer in het Schelde-estuarium relatief beperkt is ten opzichte van andere estuaria, heeft de bovenafvoer een belangrijk effect op de ligging van het turbiditeitsmaximum (ETM). Een hoge bovenafvoer (typisch voor de winter) kan ervoor zorgen dat het ETM naar afwaarts verplaatst wordt. Dit is eerder een instantaan proces, waarbij het systeem op korte termijn reageert (verblijftijd bij hogere bovenafvoer is grootte-orde enkele dagen in de Boven-Zeeschelde). Een lage bovenafvoer (typisch voor de zomer) kan ervoor zorgen dat het ETM zich naar opwaarts verplaatst. Dit is echter een geleidelijk proces, waarbij de bovenafvoer beperkt moet blijven over verschillende maanden opdat deze verschuiving kan plaatsvinden.

Naast de bovenafvoer, zal ook de biologische activiteit een seizoenale variatie vertonen die bijdraagt aan de sedimenthuishouding in het estuarium (cfr. erodibiliteit van slikken en schorren). Hoewel deze niet perfect samenvalt met de variatie in bovenafvoer, zullen beide aspecten onderling gecorreleerd zijn. In de volgende paragrafen zal de terminologie “nat” of “droog” gehanteerd worden, dewelke in zijn brede zin dient geïnterpreteerd worden: aangezien hoge bovenafvoeren meestal voorkomen in de winter, zal ook de biologische activiteit hier anders zijn, dan in de zomer, waar meestal de periodes van lagere bovenafvoer voorkomen.

Ten behoeve van de uitgevoerde analyse werd volgende benadering gevolgd:

- Hoge bovenafvoer (“**NAT**”): gelet op de instantane reactie werd een periode van 2 à 3 maanden na het optreden van de hogere bovenafvoer geselecteerd
- Lage bovenafvoer (“**DROOG**”): gelet op de geleidelijke reactie werd een periode van 2 à 3 maanden op het einde van de periode met lager bovenafvoer geselecteerd, net voor de volgende periode met hoge bovenafvoer

De geselecteerde periodes zijn weergegeven in Figuur 12.

4.2.4 Stortingen onderhoudsbaggerwerk

Onderhoudsbaggerwerken vinden quasi continu plaats in de Beneden-Zeeschelde. Hierbij worden er zowel zanderige als slibrijke sedimenten teruggestort in het estuarium. De zanderige sedimenten worden teruggestort in de Schaar van Ouden Doel. De hoeveelheden zijn beperkt in vergelijking met deze van het slib, en zorgen voor een beperkt toename van de sedimentconcentraties in het systeem. De slibrijke sedimenten worden teruggestort ter hoogte van Punt van Melsele - Oosterweel. Deze stortingen kunnen zorgen voor een aanzienlijke toename van de sedimentconcentraties in het systeem, afhankelijk van de intensiteit en duur van het storten [IMDC, 2013c].

³ Het lagere aantal getijden dat als doottij wordt beschouwd, is te wijten aan de periode binnen de 18,6 jarige nodale cyclus. De periode 2008-2013 bevindt zich nabij de top van de 18,6 jarige cyclus, waardoor er minder zwakkere (doodtij) getijden optreden.

Ten behoeve van de uitgevoerde analyse werden een aantal periodes geselecteerd waarbij er enerzijds relatief meer sediment werd teruggestort (“stortrijk”) en anderzijds relatief weinig sediment werd teruggestort (“stortarm”). De geselecteerde periodes zijn weergegeven in Figuur 13.

Tabel 6 – Gemiddelde storthoeveelheden per dag voor geselecteerde deelperiodes “stortrijk” en “stortarm”

STORTRIJK				STORTARM		
Begin	Eind	m³/dag		Begin	Eind	m³/dag
23/06/2008	5/10/2008	17588		17/03/2008	21/04/2008	21
7/09/2009	17/10/2009	38367		6/04/2009	27/04/2009	0
18/01/2010	12/04/2010	26229		18/05/2009	29/06/2009	0
11/04/2011	27/06/2011	26287		3/05/2010	31/05/2010	80
10/12/2012	25/02/2013	18439		15/10/2012	19/11/2012	956
GEMIDDELDE		25382		GEMIDDELDE		211
GEMIDDELDE TOTALE PERIODE 2008-2013 = 12799 m³/dag						

Er dient te worden opgemerkt dat de variatie in terugstorthoeveelheden niet volledig onafhankelijk is van de seizoenale variatie in bovenafvoer en biologische activiteit. Daartoe zijn de geselecteerde deelperiodes (met name “stortrijk” die meestal ’s winters voorkomen in “natte” periodes) vaak een gecombineerd effect van stortingen en seizoenale effecten.

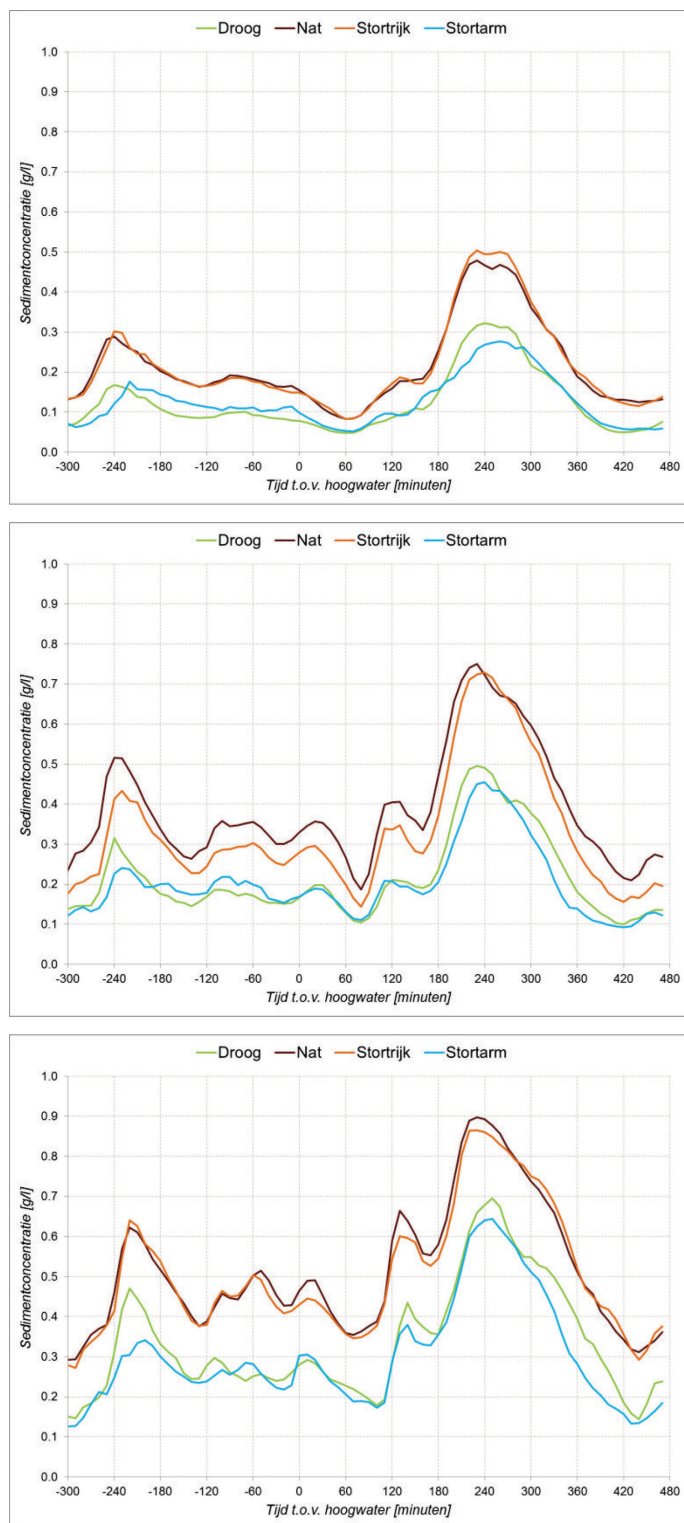
4.3 Resultaten

Volgens bovenvermelde methodologie werd een analyse uitgevoerd voor de 3 continue meetstations in de Zeeschelde. Hierbij dient opgemerkt te worden dat gedurende bepaalde periodes het meetbereik van de sensor onvoldoende was, waardoor de werkelijk opgetreden sedimentconcentratie tijdelijk onderschat wordt. De verschillende toestellen bereiken hun maximum in volgende periodes:

- Boei 84: 1^e helft 2010, 1^e helft 2011
- Oosterweel: volledig 2012
- Driegoten: 2^e helft 2011

4.3.1 Boei 84

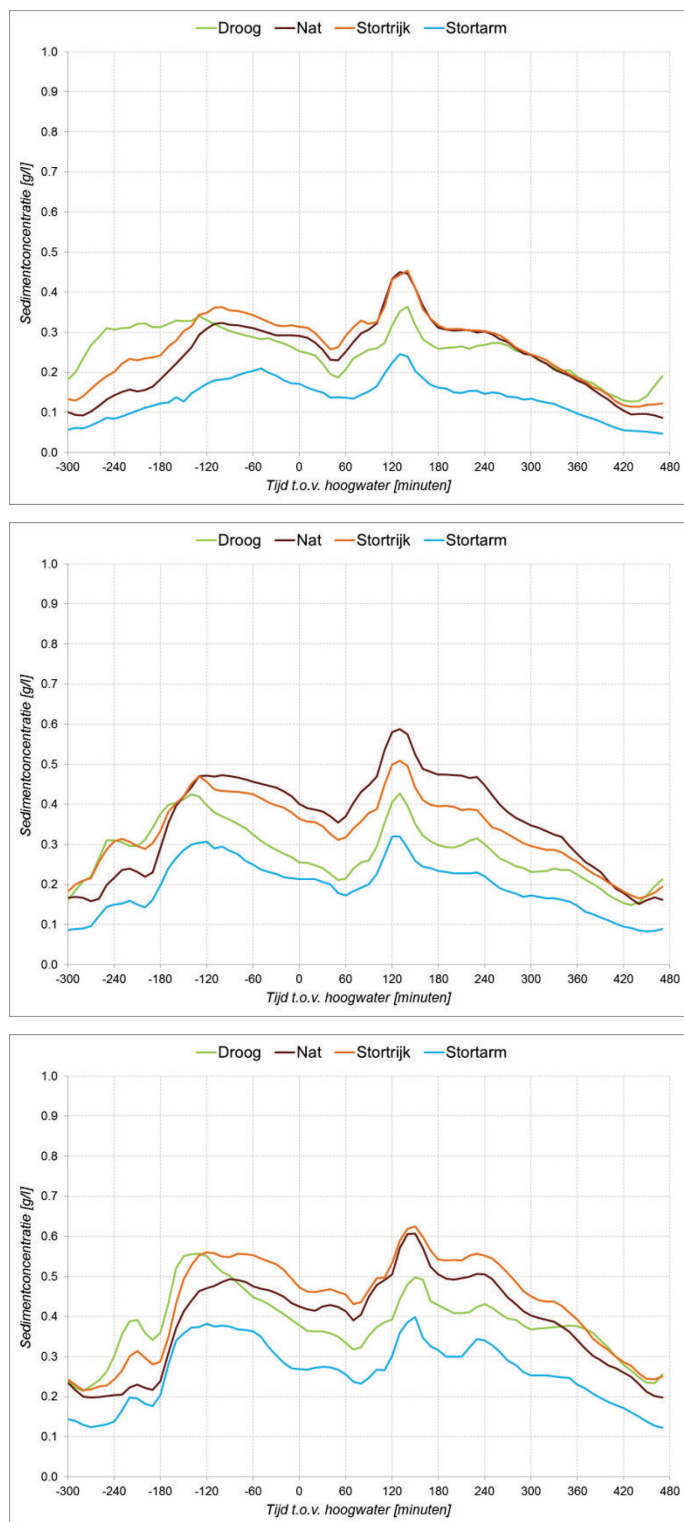
Figuur 14 geeft het verloop weer van de sedimentconcentratie ter hoogte van Boei 84 voor de geselecteerde periodes. Hieruit blijkt een duidelijk onderscheid aanwezig te zijn tussen enerzijds de natte en droge periode, en anderzijds de stortrijke en stortarme periode. Het effect treedt op bij zowel doottij, gemiddeld getij als springtij. Het effect van bovenafvoer en stortingen blijkt van eenzelfde grootte-orde te zijn. Er dient echter opgemerkt te worden dat de variatie in storthoeveelheden niet onafhankelijk is de variatie in bovenafvoer.



Figuur 14 – Representatief verloop van de sedimentconcentratie ter hoogte van Boei 84 (bovenste sensor) (boven: doottij | midden: gemiddeld getij | onder: springtij)

4.3.2 Oosterweel

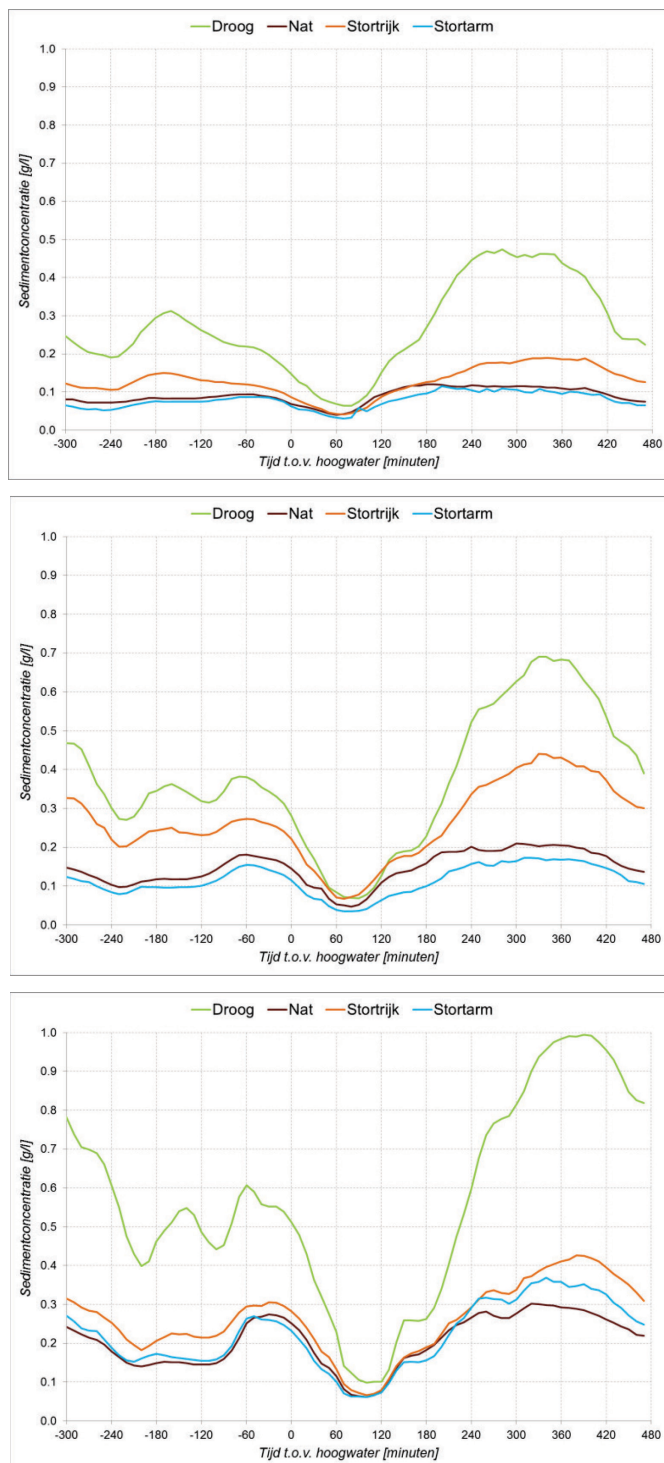
Figuur 15 geeft het verloop weer van de sedimentconcentratie ter hoogte van Oosterweel voor de geselecteerde periodes. Hieruit blijkt een duidelijk onderscheid aanwezig te zijn tussen de stortrijke en stortarme periode. Het onderscheid tussen de natte en droge periode is ook aanwezig, maar minder uitgesproken. Dit verschil is logisch aangezien de meetlocatie ter hoogte van de belangrijkste stortzones is gelegen. Het effect treedt op bij zowel doortij, gemiddeld getij als springtij.



Figuur 15 – Representatief verloop van de sedimentconcentratie ter hoogte van Oosterweel (bovenste sensor)
(boven: doortij | midden: gemiddeld getij | onder: springtij)

4.3.3 Driegoten

Figuur 16 geeft het verloop weer van de sedimentconcentratie ter hoogte van Driegoten voor de geselecteerde periodes. Hieruit blijkt een duidelijk onderscheid aanwezig te zijn tussen de natte en droge periode. Het onderscheid tussen de stortrijke en stortarme periode is ook aanwezig, maar minder uitgesproken (meest bij gemiddeld getij). Dit verschil is logisch aangezien de meetlocatie ca. 40 km opwaarts van de belangrijkste stortzones is gelegen, terwijl het effect van de bovenafvoer hier het sterkst manifesteert (variatie in verblijftijd) door het verschuiven van het turbiditeitsmaximum.



Figuur 16 – Representatief verloop van de sedimentconcentratie ter hoogte van Driegoten (boven: doottij | midden: gemiddeld getij | onder: springtij)

5 MODELVALIDATIE

5.1 Gevoeligheidsonderzoek

In de gevoeligheidsanalyse is telkens één parameter gevarieerd. Het effect op de sedimentconcentratie is geanalyseerd op 2 locaties: Boei84 en Oosterweel. Hierbij is enerzijds gekeken naar het effect op de absolute waarde van de sedimentconcentratie, en anderzijds naar het effect op het verloop van de sedimentconcentratie gedurende een periode van 8 dagen tussen springtij en doortij.

De initiële modelparameters zijn overgenomen uit het 'Saeftinghedokmodel', na kalibratie zoals besproken in [IMDC, 2011]. In dit model is slechts één fractie opgenomen (slib), terwijl het gebruik maakt van procesformuleringen (o.a. flocculatie, consolidatie afgezette sedimenten) die uitgebreider zijn dan beschikbaar in de commerciële versie van de Delft3D-software. Voor het gevoeligheidsonderzoek werd vertrokken met een initiële continue dikte van de sedimentbodemaag van 1 m.

In de eerste stap van het gevoeligheidsonderzoek werd gebruik gemaakt van slechts één slibfractie, en bijkomend 1 zandfractie. In een volgende stap werd een slibfractie met een lagere valsnelheid toegevoegd.

Tabel 7 – Initiële waarden modelparameters

Parameter	Waarde
Valsnelheid w_s (mm/s)	1,0
Kritische erosieschuifspanning $\tau_{cr,erosie}$ (N/m ²)	0,4
Kritische sedimentatieschuifspanning $\tau_{cr,sed}$ (N/m ²)	0,2
Erosieparameter M_E (kg/m ² /s)	$5 \cdot 10^{-5}$
Sedimentconcentratie afwaartse rand	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Terhagen (kg/m ³)	0,1
Sedimentconcentratie opwaartse rand Tielrode (kg/m ³)	0,1
Initiële sedimentconcentratie (kg/m ³)	0,15
Initiële dikte sedimentbodemaag (m)	1
Specifieke dichtheid (kg/m ³)	2650
Droge dichtheid (kg/m ³)	500

5.1.1 Valsnelheid

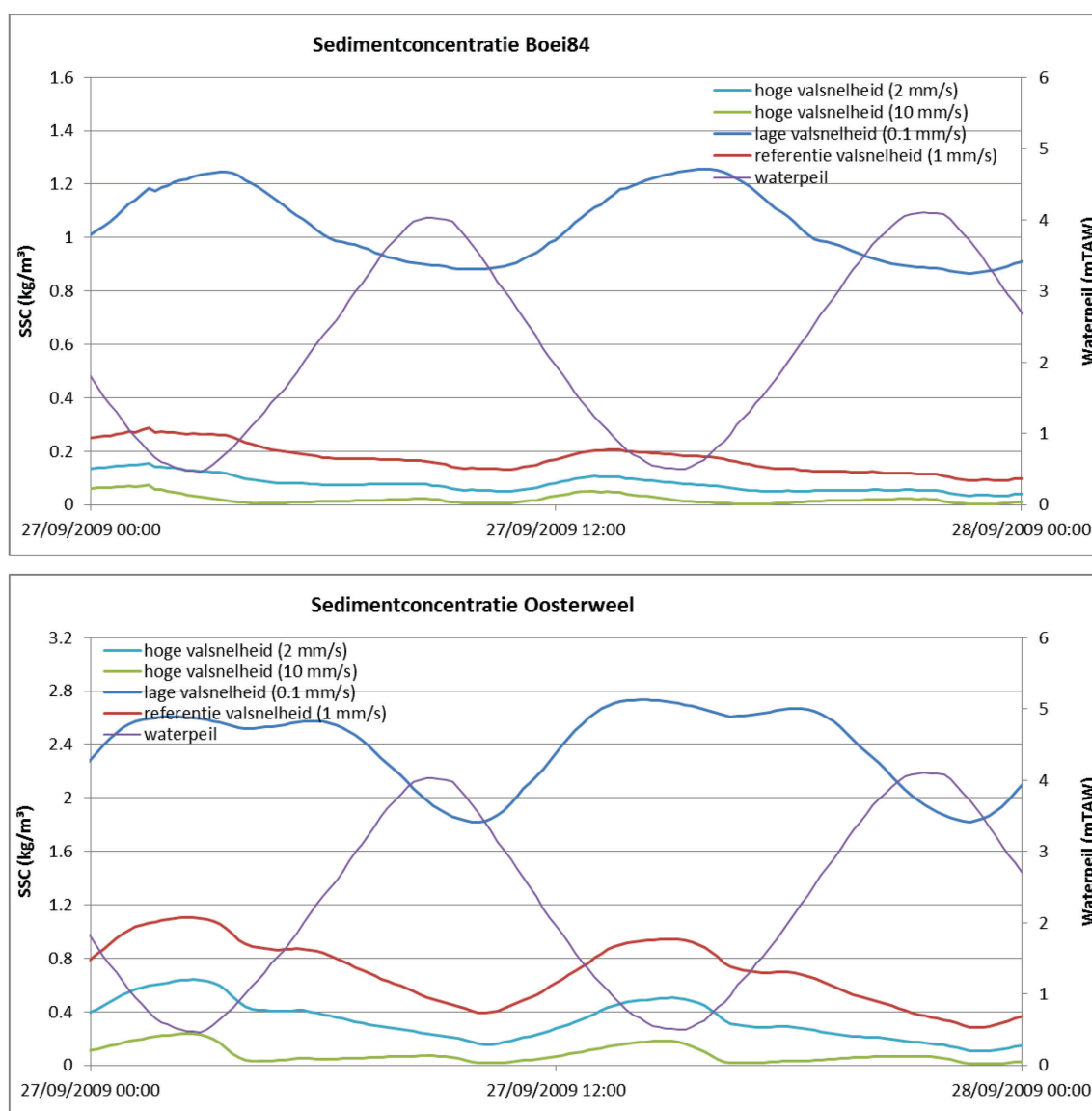
De valsnelheid is een van de belangrijkste parameters bij het transport van cohesieve sedimenten. Cohesieve sedimenten hebben de eigenschap vlokken te vormen (flocculatie). Hierdoor bestaat er een grote spreiding in de valsnelheid, van 10^{-4} tot enkele mm/s. Zonder vlokvorming zouden slibdeeltjes voortdurend in suspensie blijven.

De initiële waarde van de valsnelheid in het model is 1 mm/s. De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel worden weergegeven in Figuur 17. Het verlagen van de valsnelheid met een factor 10 (tot 0,1 mm/s) zorgt algemeen voor een stijging van sedimentconcentratie. Na LW kentering, tijdens vloed treedt echter geen stijging op van de sedimentconcentratie, in tegenstelling tot wat verwacht wordt op basis van de meetresultaten. Enkel ter hoogte van Boei 84, bij springtij, tijdens vloed,

treedt een beperkte stijging van de sedimentconcentratie op. Het verlagen van de valsnelheid zorgt ook voor een hogere sedimentconcentratie bij doottij dan bij springtij.

Het verhogen van de valsnelheid zorgt voor een daling van de sedimentconcentratie. Bij een verhoging met een factor 2, daalt ook de sedimentconcentratie circa met een factor 2. Bij een verhoging met een factor 10 daalt de sedimentconcentratie circa met een factor 4. Ook het verloop van de sedimentconcentratie wordt beïnvloed door de verhoging van de valsnelheid. Ter hoogte van Boei 84 is een beperkte stijging van de sedimentconcentratie te zien bij vloed. Deze is meer uitgesproken bij een verhoging met factor 10 ten opzichte van 2. Enkel wanneer de valsnelheid met een factor 10 verhoogd wordt, lijkt het sediment net na kentering hoogwater en laagwater quasi volledig uit te zakken (concentratie $\approx 0 \text{ kg/m}^3$). Ook de verhouding tussen de sedimentconcentratie bij springtij en doottij wijzigt. Het verhogen van de valsnelheid zorgt ervoor dat de sedimentconcentratie bij doottij minder dan de helft is van de sedimentconcentratie bij springtij.

Op basis van literatuur en metingen lijkt een valsnelheid van 10 mm/s echter een te hoge waarde. 2 mm/s lijkt een meer realistische waarde (IMDC, 2007).



Figuur 17 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor valsnelheid

5.1.2 Erosie

De parameters met betrekking tot erosie van sediment zijn de kritische erosieschuifspanning en de erosieparameter. Voor een slibbodem wordt de kritische schuifspanning voor erosie τ_{cr} gedefinieerd als de waarde vanaf dewelke het sediment begint te eroderen. Erosie(flux) E [kg/m²/s] wordt beschreven als functie van de erosieparameter M_E [kg/m²/s] en de (kritische) schuifspanning voor erosie (τ).

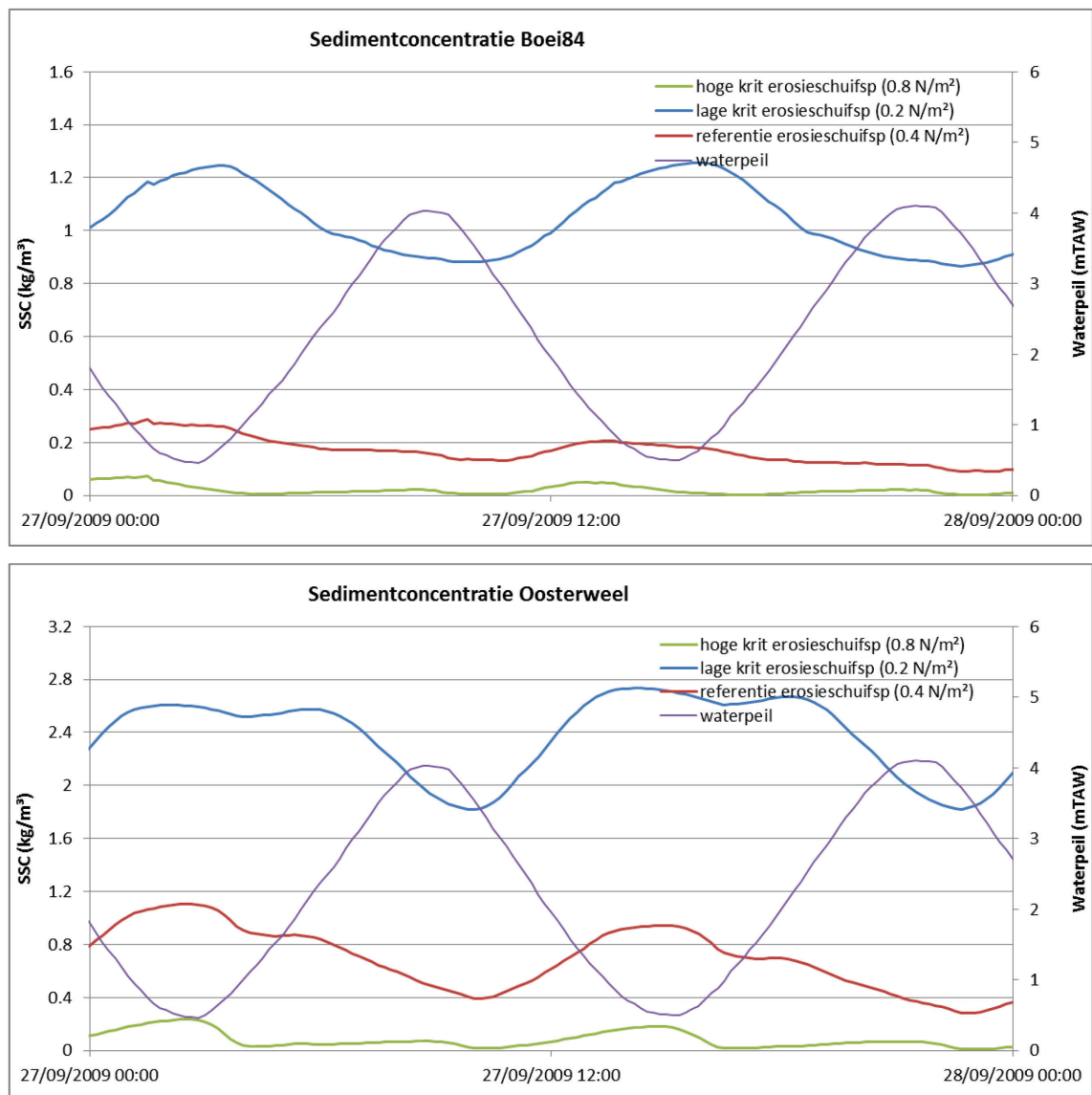
$$E = M_E \cdot \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad \text{voor } \tau_b > \tau_{cr}$$

De initiële waarden voor de kritische erosieschuifspanning en de erosieparameter in het model zijn respectievelijk 0,4 N/m² en 5 · 10⁻⁵ kg/m²/s. De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel bij verschillende waarden voor kritische erosieschuifspanning worden weergegeven in Figuur 18, en bij verschillende waarden voor de erosieparameter worden weergegeven in Figuur 19.

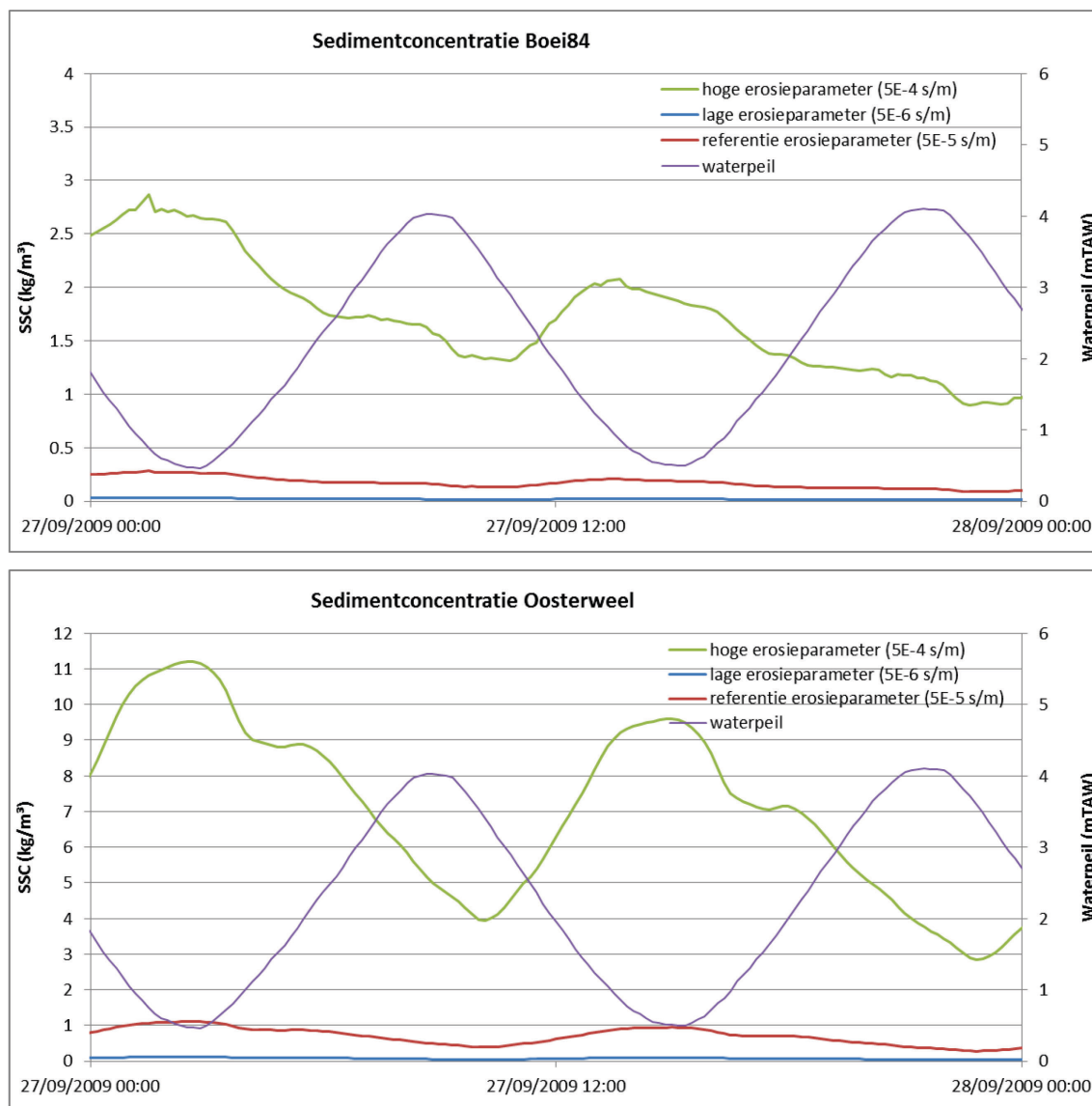
Het verhogen van de kritische erosieschuifspanning (met een factor 2) zorgt voor een daling van de sedimentconcentratie (factor 6 t.h.v. Boei 84, factor 3 à 4 t.h.v. Oosterweel). Het verloop van de sedimentconcentratie vertoont bij doodtij, ter hoogte van Boei 84 en Oosterweel een sterke daling tijdens vloed. Enkel bij springtij ter hoogte van Boei 84 treedt een te verwachten stijging van de sedimentconcentratie op. De absolute concentratie is echter te laag.

Het verlagen van de kritische erosieschuifspanning (met een factor 2) zorgt voor een stijging van de sedimentconcentratie (factor 3 à 4 t.h.v. Boei 84, factor 2 à 3 t.h.v. Oosterweel). Ter hoogte van Oosterweel vertoont het verloop van de concentratie zowel bij doodtij als bij springtij een sterke daling tijdens vloed. Ter hoogte van Boei 84 is deze daling beperkter. Vooral bij springtij treedt weerom een te verwachten stijging van de sedimentconcentratie op tijdens vloed. De absolute concentratie is echter te hoog. De stijging van de sedimentconcentratie ter hoogte van Boei 84, ten gevolge van het verlagen van de kritische erosieschuifspanning, is groter bij doodtij dan bij springtij.

Het verhogen of verlagen van de erosieparameter heeft voornamelijk effect op de grootte van de sedimentconcentratie. Een hogere erosieparameter geeft een hogere sedimentconcentratie, en vice versa. Het verloop van de sedimentconcentratie wijzigt echter weinig of niet. Een lagere erosieparameter geeft een sterkere daling bij doodtij dan bij springtij, ter hoogte van Boei 84.



Figuur 18 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor kritische erosieschuifspanning



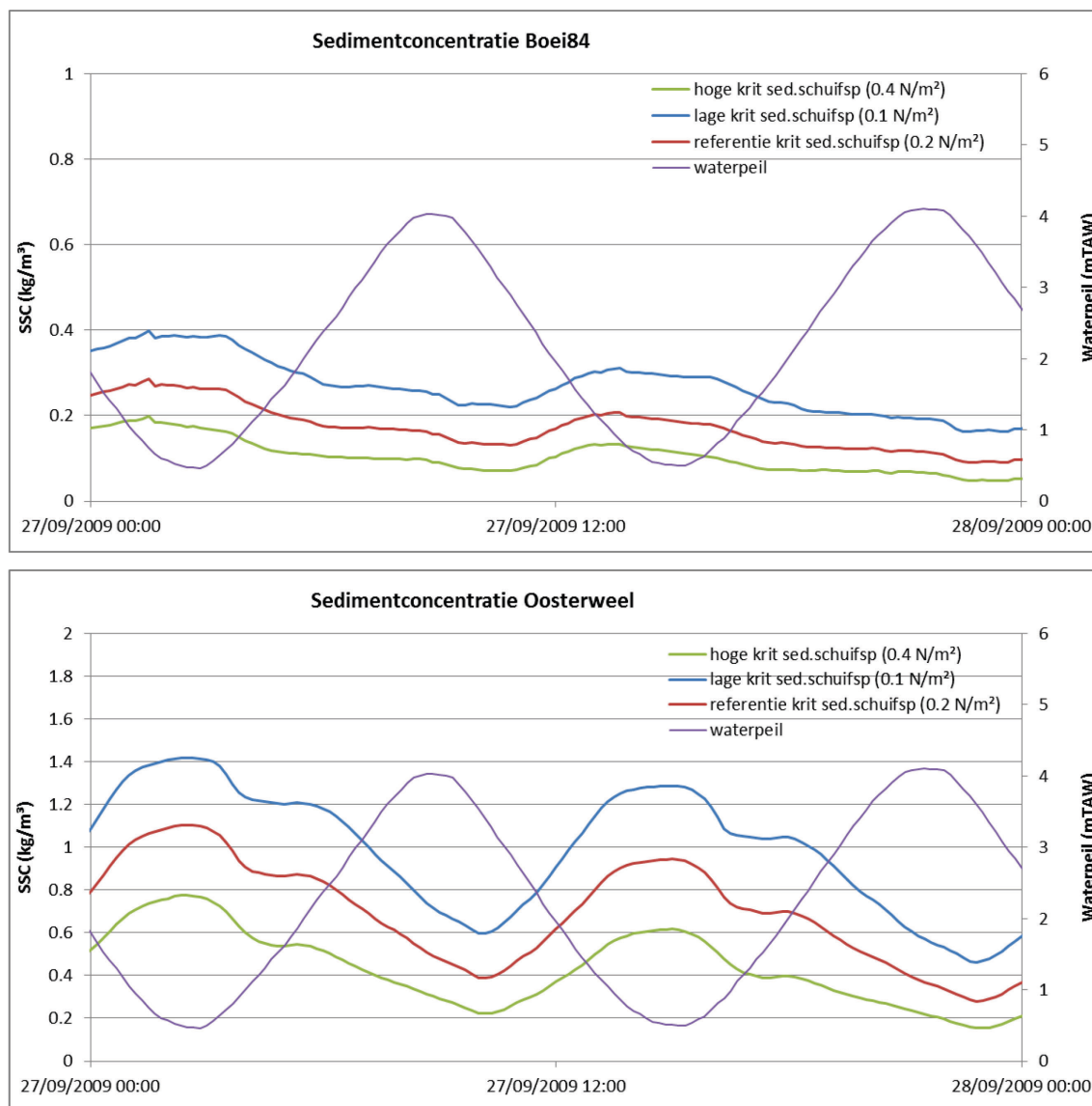
Figuur 19 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor erosieparameter

5.1.3 Sedimentatie

De kritische schuifspanning voor sedimentatie bepaalt of het sediment in suspensie blijft en dus ook hoeveel sediment beschikbaar is voor transport. Het sediment kan enkel zich op de bodem afzetten wanneer bodemschuifspanning kleiner is dan de kritische sedimentatieschuifspanning. De initiële waarde voor de kritische sedimentatieschuifspanning is $0,2 \text{ N/m}^2$. De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel worden weergegeven in Figuur 20.

Het verhogen van de kritische sedimentatieschuifspanning (met een factor 2) zorgt voor een daling van de sedimentconcentratie (met circa 1/4 t.h.v. Boei 84, met circa 1/5 t.h.v. Oosterweel). Het verlagen van de kritische sedimentatieschuifspanning (met een factor 2) zorgt voor een stijging van de sedimentconcentratie (met circa 1/4 t.h.v. Boei 84, met circa 1/5 t.h.v. Oosterweel).

Het verloop van de sedimentconcentratie vertoont ter hoogte van Oosterweel, zowel bij doottij als bij springtij een sterke daling tijdens vloed. Ter hoogte van Boei 84 is deze daling beperkter bij doottij, en treedt bij springtij zelfs een kleine stijging op. Bij een verlaagde sedimentatieschuifspanning is de daling bij kentering laagwater (en vloed) groter. Een hogere sedimentatieschuifspanning geeft een sterkere daling bij doottij dan bij springtij, ter hoogte van Boei 84.



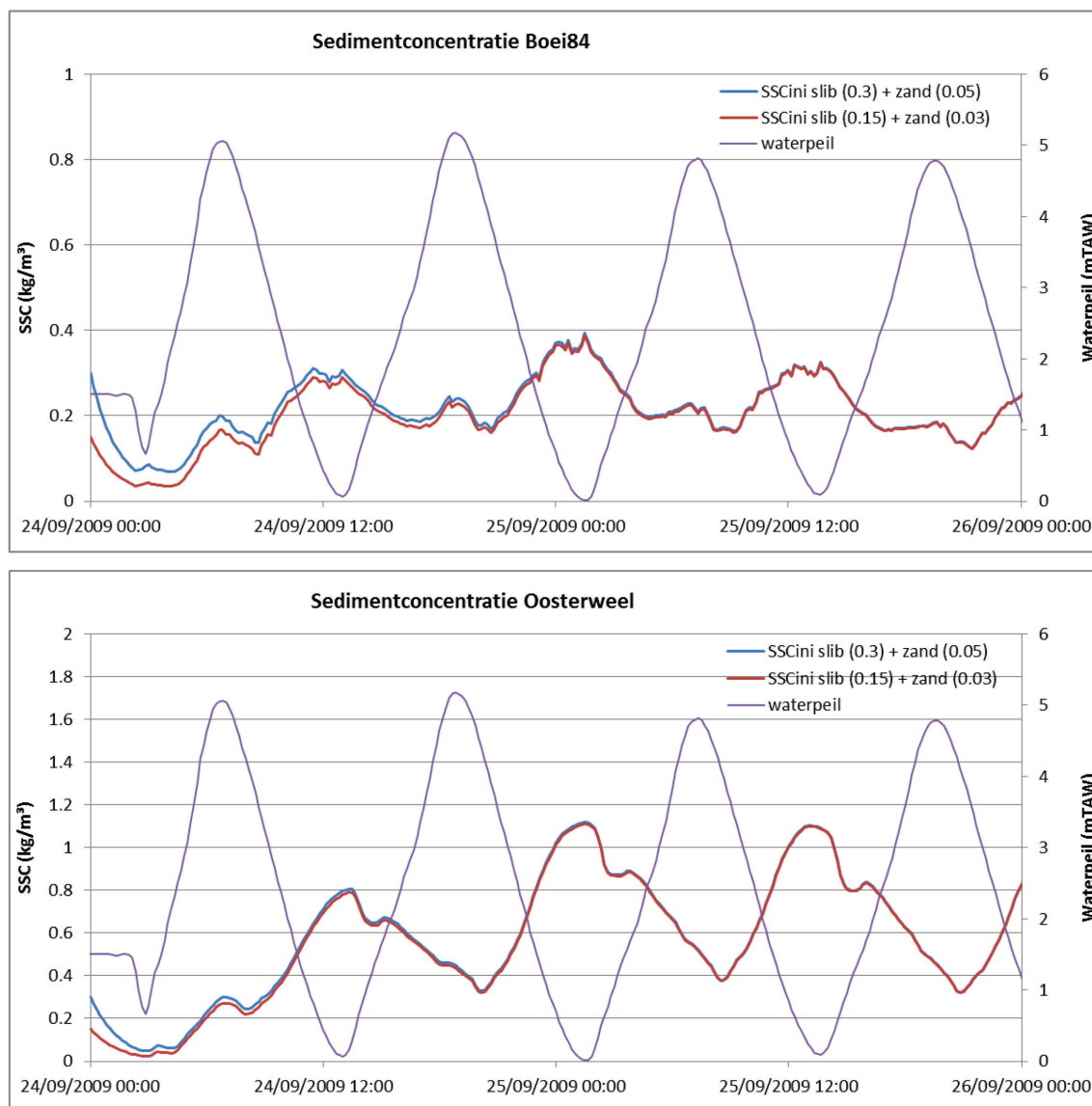
Figuur 20 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor kritische sedimentatieschuifspanning

Het effect van de kritische sedimentatieschuifspanning is in het model omgekeerd aan het effect van de kritische erosieschuifspanning. Een sedimentdeeltje zal enkel kunnen eroderen wanneer de bodemschuifspanning groter is dan de kritische erosieschuifspanning. Omgekeerd zal een sedimentdeeltje enkel kunnen sedimenteren wanneer de bodemschuifspanning kleiner is dan de kritische sedimentatieschuifspanning. De kritische sedimentatieschuifspanning heeft fysisch echter geen betekenis, aangezien de valsnelheid zal bepalen of een sedimentdeeltje al dan niet zal afgezet worden. Daarom is in de uiteindelijke kalibratie ervoor gekozen de kritische sedimentatieschuifspanning zodanig te verhogen (tot 1000) zodat de bodemschuifspanning steeds lager is dan kritische sedimentatieschuifspanning. Zo is deze parameter niet meer bepalend voor de hoeveelheid sediment in suspensie. Dit is eveneens de benadering zoals deze eerder geïmplementeerd werd in onder andere het LTV-slibmodel [van Kessel *et al.*, 2008].

5.1.4 Initiële sedimentconcentratie

De initiële waarde voor de sedimentconcentratie voor slib is $0,15 \text{ kg/m}^3$ en voor zand $0,03 \text{ kg/m}^3$. Deze waarden werden verhoogd naar respectievelijk $0,30 \text{ kg/m}^3$ en $0,05 \text{ kg/m}^3$. De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei 84 en Oosterweel worden weergegeven in Figuur 21.

Hogere initiële concentraties zand en/of slib hebben enkel effect tijdens het eerste en tweede getij van de simulatie. Na het tweede hoogwater van de simulatie is het effect van de hogere initiële sedimentconcentratie genormaliseerd.

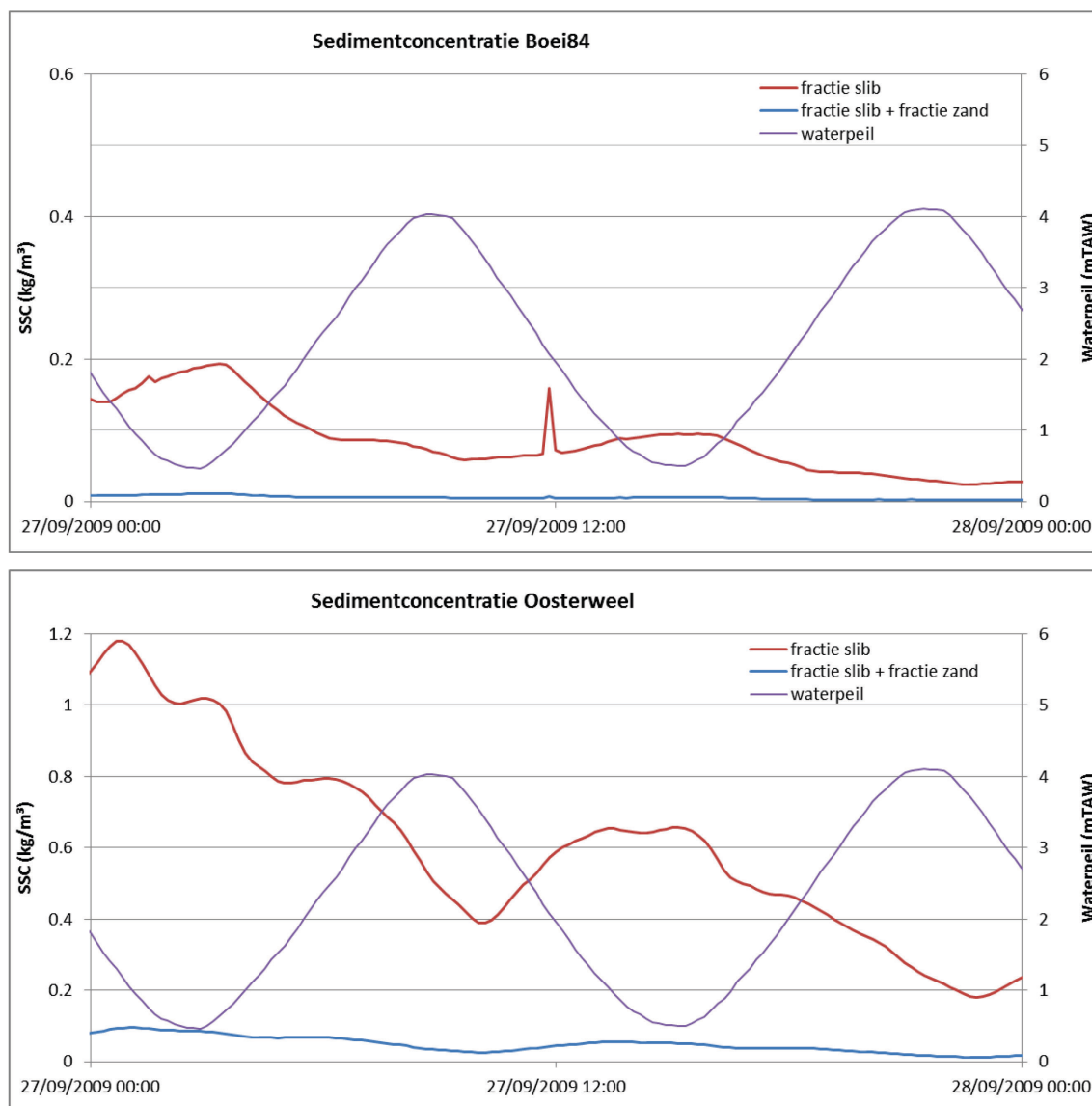


Figuur 21 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden voor initiële sedimentconcentratie

5.1.5 Effect toevoegen zandfractie

Zonder aanpassing van de instellingen voor slib, werd een fractie zand in het model toegevoegd. Dit zorgt voor een sterke daling van de sedimentconcentratie. De aanwezigheid van meerdere sedimentfracties heeft voornamelijk effect op de erosiesnelheid van de verschillende fracties. De erosiesnelheid wijzigt in verhouding met de samenstelling van de bodem, i.e. de dikte van de verschillende sedimentlagen. De dikte van de toegevoegde zandlaag is 1 m, tegenover een initiële dikte van 0,1 m voor de sliblaag. De erosieflux van de sliblaag zal dus met circa 90% afnemen.

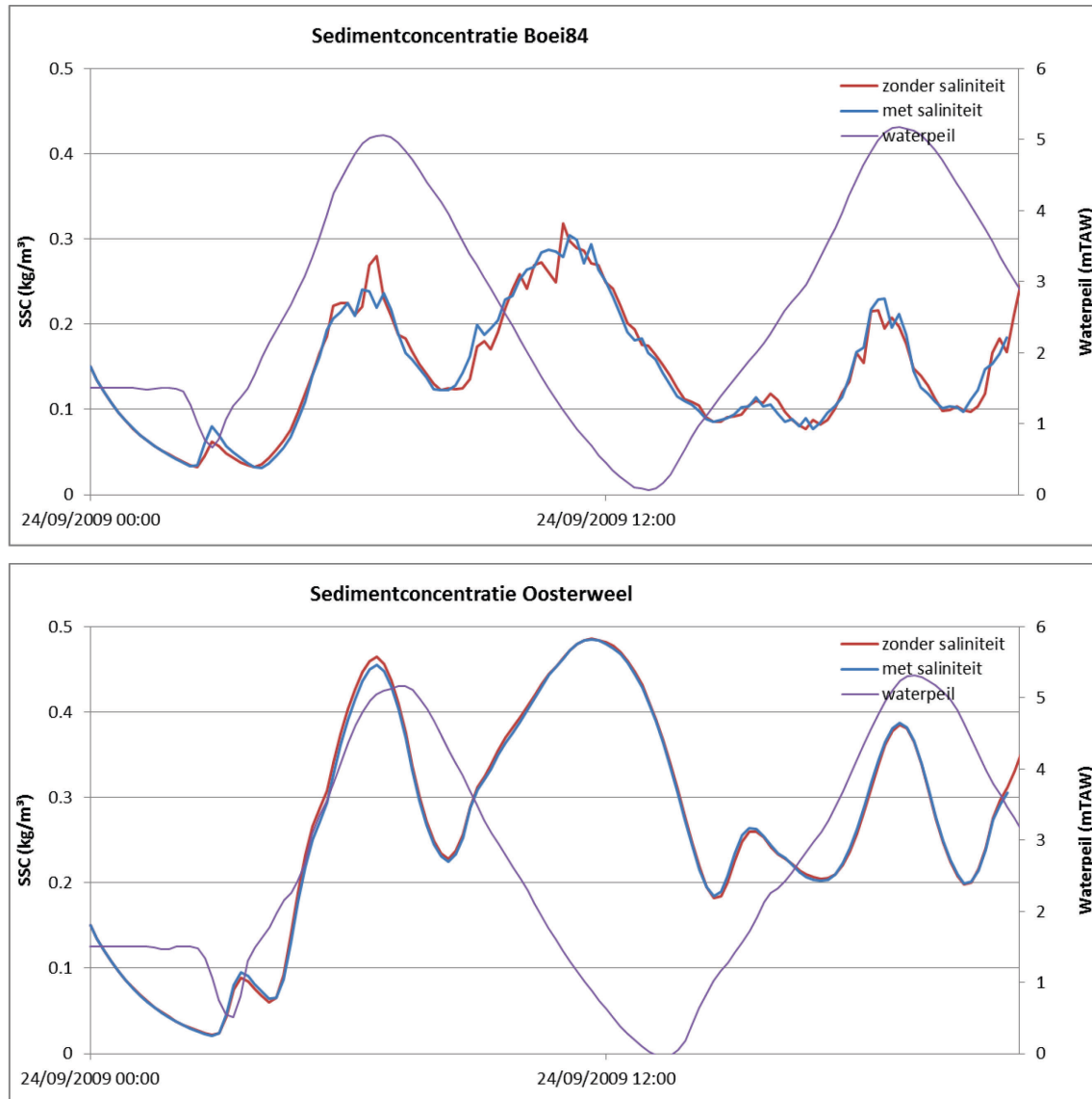
De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel worden weergegeven in Figuur 22.



Figuur 22 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening met enkel fractie slib, en met fractie slib + fractie zand

5.1.6 Effect saliniteit

Er werd getracht het effect van saliniteit mee te nemen in de 2D berekeningen. Deze berekeningen werden echter steeds instabiel. Uit de resultaten van de korte berekende periode kan wel afgeleid worden dat het meenemen van saliniteit quasi geen effect heeft op de sedimentconcentratie in de waterloop. De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel worden weergegeven in Figuur 23.

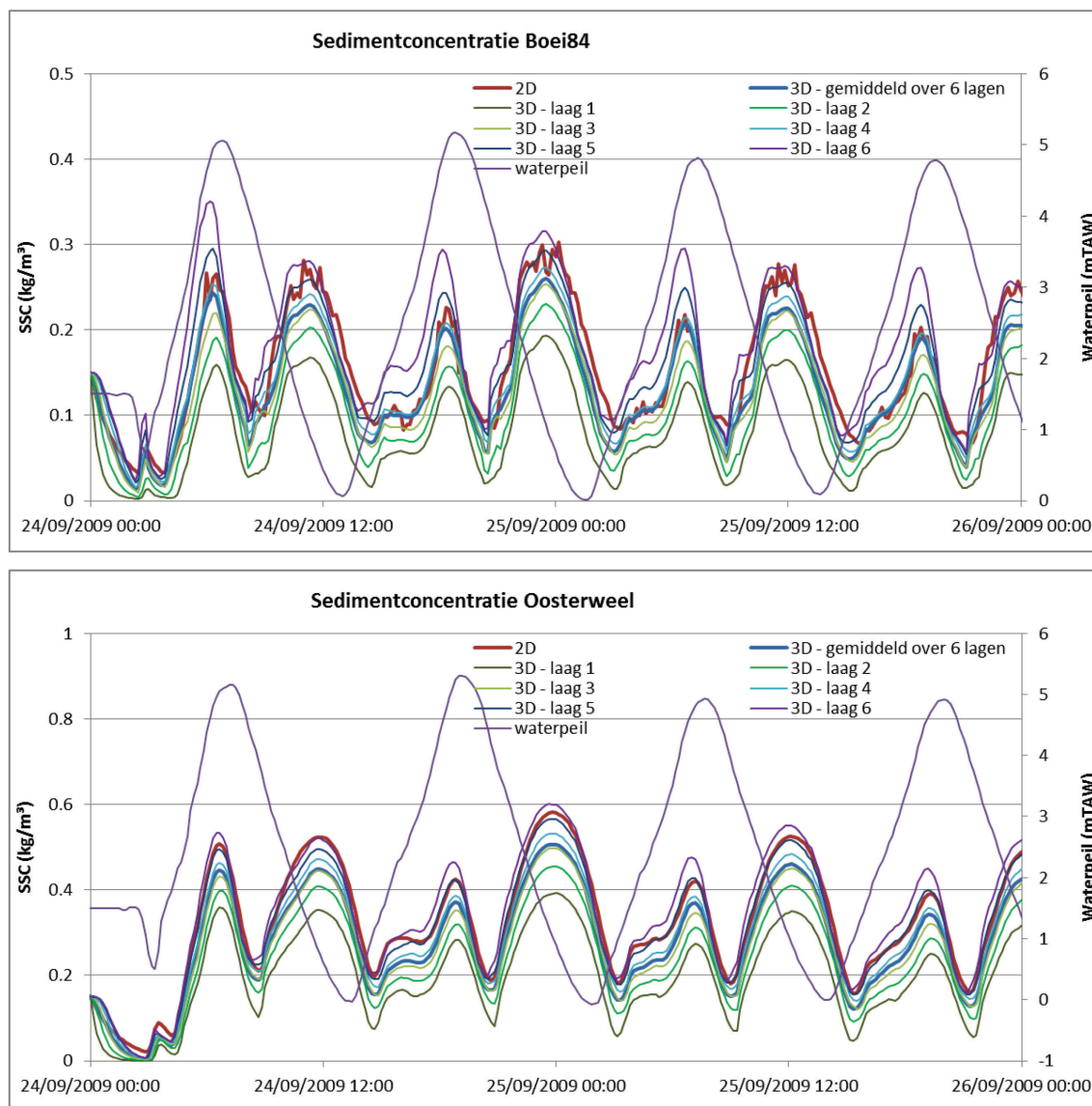


Figuur 23 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening zonder en met saliniteit

5.1.7 Effect 3D-2D

Er werd eveneens getracht de sedimenttransportberekening uit te voeren in een 3D-model met 6 lagen. Dit gaf echter enerzijds problemen met stabiliteit en anderzijds met rekentijd. De gesimuleerde waarden van sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel worden weergegeven in Figuur 24. Uit de resultaten van een doorgerekende periode met een 2D-model en een 3D-model met dezelfde parameters kan afgeleid worden dat het verschil tussen de berekende sedimentconcentratie in 2D of gemiddeld in 3D beperkt is.

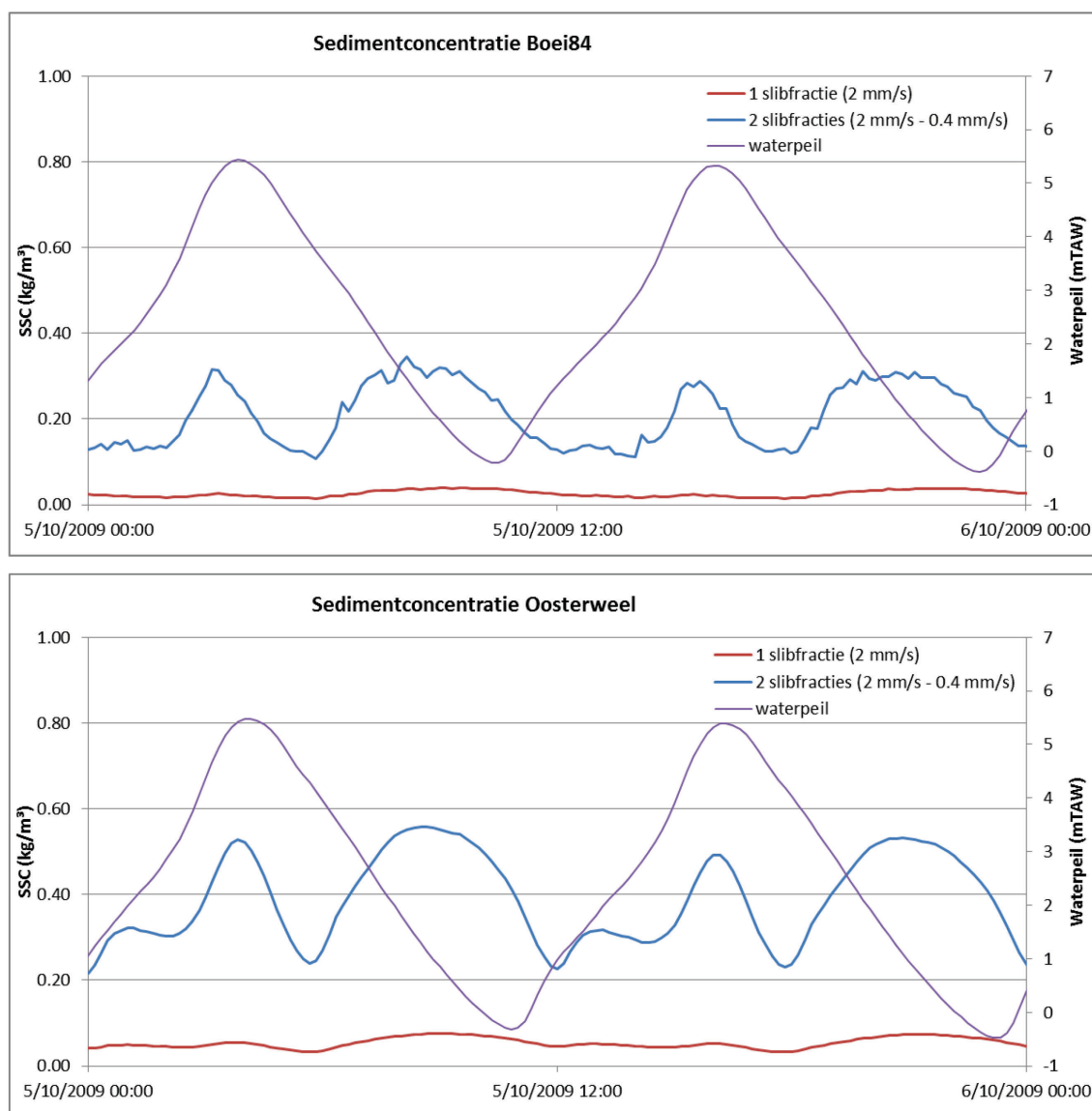
Sedimentatieprocessen in dokken en toegangsgeulen tot sluizen zijn 3D-processen die in een 2D-benadering niet worden beschouwd (densiteitstromingen). Echter voor de grootschalige sedimentbeweging in het estuarium is dit effect beperkt.



Figuur 24 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening in 2D of 3D

5.1.8 Effect toevoegen 2^{de} slibfractie

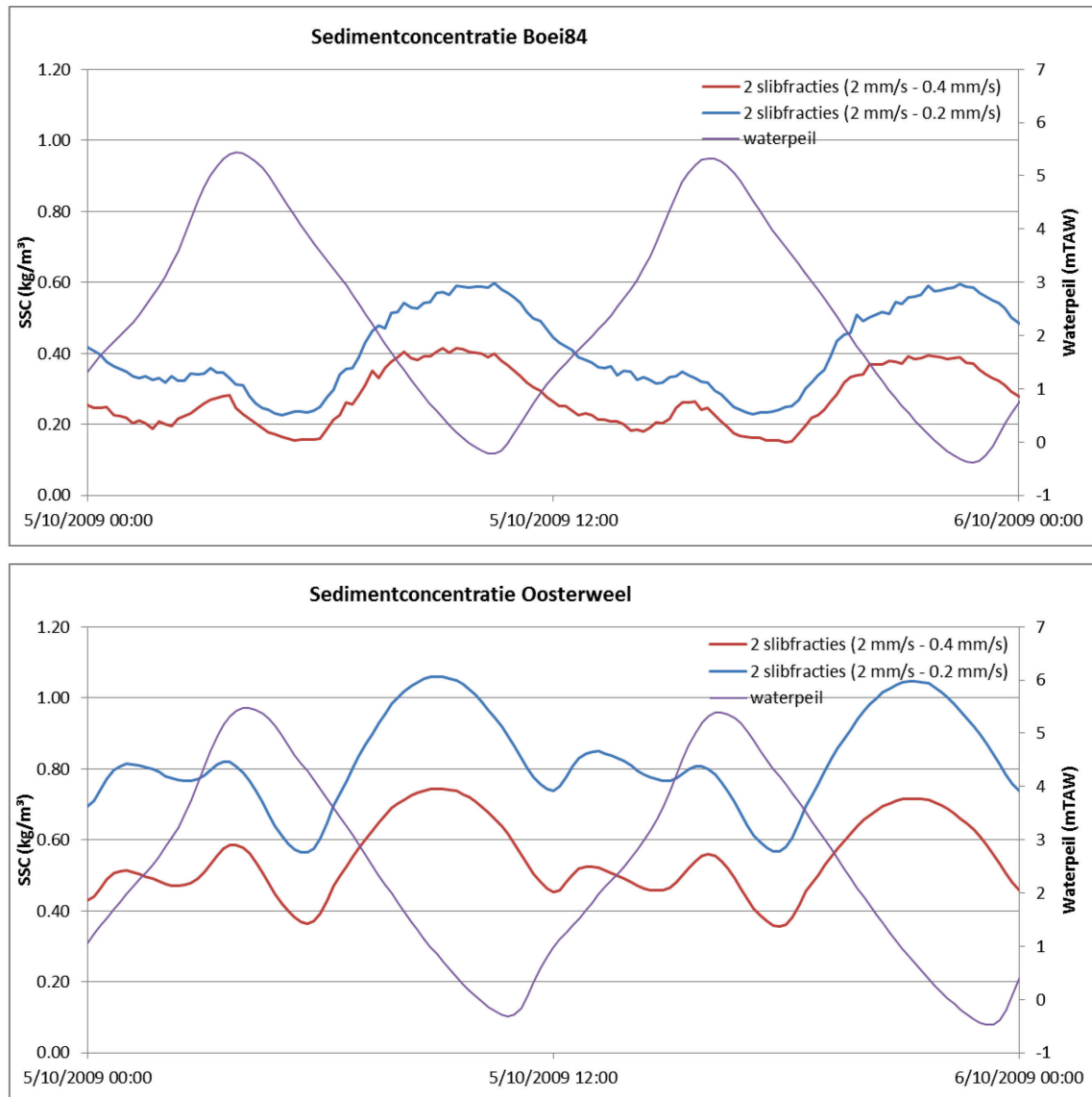
Om onderscheid te kunnen maken tussen grovere deeltjes in het slib, met een hoge valsnelheid en de fijnere deeltjes met een lagere valsnelheid werd een tweede slibfractie toegevoegd. Deze fractie heeft een lagere valsnelheid van 0,4 mm/s, en een hogere kritische erosieschuifspanning van 0,8 N/m² en gelijke erosieparameter van 1,2 E-04 kg/m².s. Het toevoegen van de tweede slibfractie met een lagere valsnelheid zorgt voor een verhoging van de sedimentconcentratie in de waterkolom. De sedimentconcentratiepieken tijdens eb en vloed zijn duidelijker te onderscheiden, evenals de minima in sedimentconcentratie na kentering.



Figuur 25 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij berekening met 1 of 2 slibfracties

5.1.9 Valsnelheid 2^{de} slibfractie

Het verlagen van de valsnelheid van de 2^{de} slibfractie, bij gelijke kritische erosieschuifspanning en erosieparameter, zorgt voor een stijging van de sedimentconcentratie in de waterkolom. Het verloop van de sedimentconcentratie wijzigt echter weinig of niet.



Figuur 26 – Gesimuleerde waarden sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 (boven) en Oosterweel (onder) bij verschillende waarden valsnelheid voor 2^{de} slibfractie

5.2 Modelvalidatie

5.2.1 Parameterwaarden

Op basis van bovenstaande gevoeligheidsanalyse werd besloten drie parameters te variëren bij de ijking van het model, zijnde: de valsnelheid, de kritische erosieschuifspanning en de erosieparameter.

De valsnelheid van slib werd in situ gemeten tijdens een meetcampagne in de zomer van 2006, in het kader van 'Uitbreiding studie densiteitsstromingen in de Beneden-Zeeschelde in het kader van LTV. Meetcampagne naar hooggeconcentreerde slibsuspensies', uitgevoerd door IMDC (2007a) i.s.m. Delft Hydraulics en Gems. In deze studie werden de korrelgrootte de valsnelheid van slib in situ gemeten met behulp van de 'In-Situ Settling Velocity-instrument (INSSEV)'. De valsnelheid werd gemeten tijdens verschillende fasen van het getij en bij verschillende sedimentconcentraties op locaties nabij het Deurganckdok. Hierbij werden gemiddelde waarden voor de valsnelheid bekomen tussen 0,5 en 4 mm/s.

In eerste instantie werd gewerkt met één slibfractie met een valsnelheid van 2 mm/s. Op basis van de resultaten van een eerste validatieronde en eerste scenarioberekeningen, en na overleg met de opdrachtgever werd besloten te werken met twee slibfracties. Om onderscheid te kunnen maken tussen grovere deeltjes in het slib, met een hoge valsnelheid en de fijnere deeltjes met een lagere valsnelheid werd een tweede slibfractie toegevoegd. Als waarde voor de valsnelheid voor deze slibfractie werd gekozen voor 0,2 mm/s.

De waarde voor de kritische erosieschuifspanning is vastgelegd op 0,4 N/m². Voor de tweede slibfractie werd een waarde van 0,8 N/m² genomen. Bij de kalibratie is de waarde van de erosieparameter gevarieerd om tot simulatieresultaten te komen vergelijkbaar met de validatiedata, ter hoogte van Oosterweel en Boei84. Hierbij is gekomen tot een waarde van $1,2 \cdot 10^{-03}$ kg/m²/s wanneer met slechts één slibfractie gewerkt werd. Wanneer de 2 slibfracties beschouwd werden, is gekomen tot een waarde van $8,0 \cdot 10^{-04}$ kg/m²/s.

De waarde van de kritische sedimentatieschuifspanning is zodanig verhoogd (tot 1000) zodat de bodemschuifspanning steeds lager is dan kritische sedimentatieschuifspanning. Zo is deze parameter niet meer bepalend voor de hoeveelheid sediment in suspensie. Dit is eveneens de benadering zoals deze eerder geïmplementeerd werd in onder andere het LTV-slibmodel [van Kessel *et al.*, 2008].

In tegenstelling tot de vorige studies, waarin slechts één fractie, met name slib, in beschouwing genomen wordt, is in deze studie ook zand als sedimentfractie toegevoegd. Deze fractie heeft als gemiddelde korreldiameter (D50) 130 µm. Zowel voor de slib- als voor de zandfractie is een ruimtelijk variërende initiële dikte van de bodemlaag opgegeven (zie §3.3.3).

De scenarioberekeningen zijn uitgevoerd met een tijdstap van 0,05 min, op 16 reken cores. Het doorrekenen van de volledige simulatieperiode van 5 weken en 3 dagen, duurt circa 12 dagen.

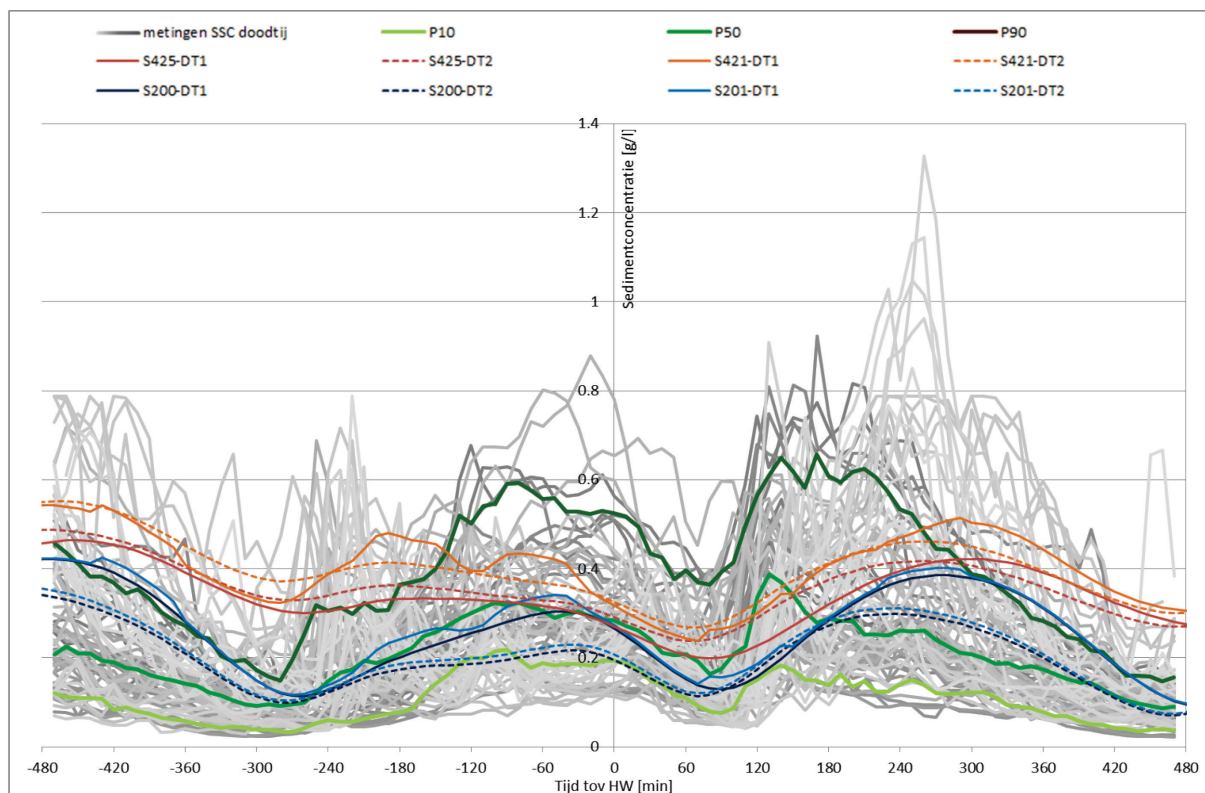
Tabel 8 – Waarden modelparameters na kalibratie

Parameter	Waarde 1 slibfractie	Waarde 2 slibfracties
Ruwheid	0,025	0,025
Valsnelheid w_s (mm/s)	2,0	2,0 – 0,2
Kritische erosieschuifspanning $\tau_{cr,erosie}$ (N/m ²)	0,4	0,4 – 0,8
Kritische sedimentatieschuifspanning $\tau_{cr, sed}$ (N/m ²)	1000	1000
Erosieparameter M_E (kg/m ² /s)	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$
Sedimentconcentratie afwaartse rand (kg/m ³) zand	0,03	0,03
slib1	0,03	0,015
slib2	/	0,015
Sedimentconcentratie opwaartse rand Terhagen zand (kg/m ³)	0,03	0,03
slib1	0,1	0,05
slib2	/	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Tielrodezand (kg/m ³)	0,03	0,03
slib1	0,3	0,15
slib2	/	0,15
Initiële sedimentconcentratie (kg/m ³) zand	0,03	0,03
slib1	0,15	0,15
slib2	/	0,15
Initiële dikte sedimentbodemaag (m)	grid	grid
Specifieke dichtheid (kg/m ³)	2650	2650
Droge dichtheid (kg/m ³) zand	1600	1600
slib1	550	550
slib2	550	550

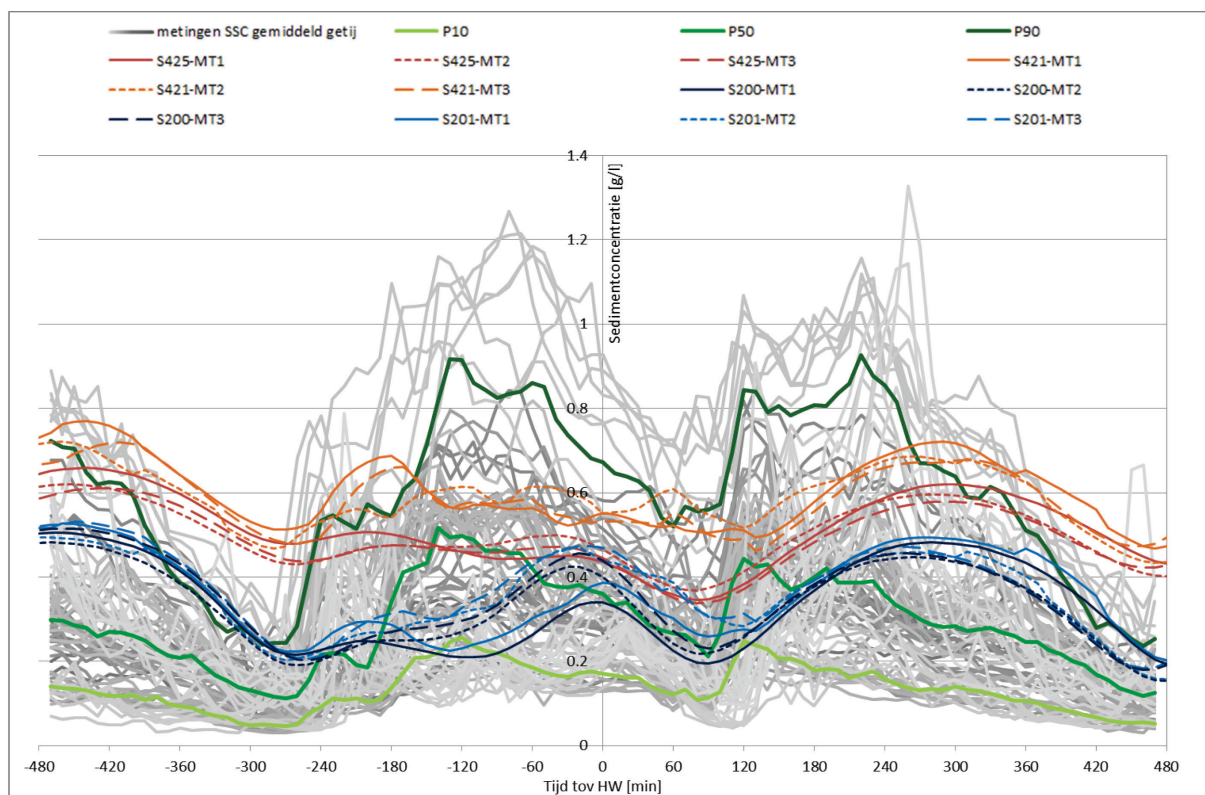
5.2.2 Vergelijking met data

In hoofdstuk 4 wordt een overzicht gegeven van de beschikbare data en data-analyse t.b.v. modelvalidatie. Voor de finale modelinstellingen werd een simulatie uitgevoerd voor een periode van 5 weken. De gesimuleerde waarden van de sedimentconcentratie ter hoogte van Oosterweel en Boei84 worden vergeleken met de resulterende data uit deze analyse. Voor de berekeningen zowel met 1 slibfractie als met 2 slibfracties zullen de resultaten uit twee simulaties gebruikt worden voor de validatie, i.e. de simulaties van het scenario zonder storten (S200 of S425) en het scenario met de huidige stortstrategie (S201 of S421).

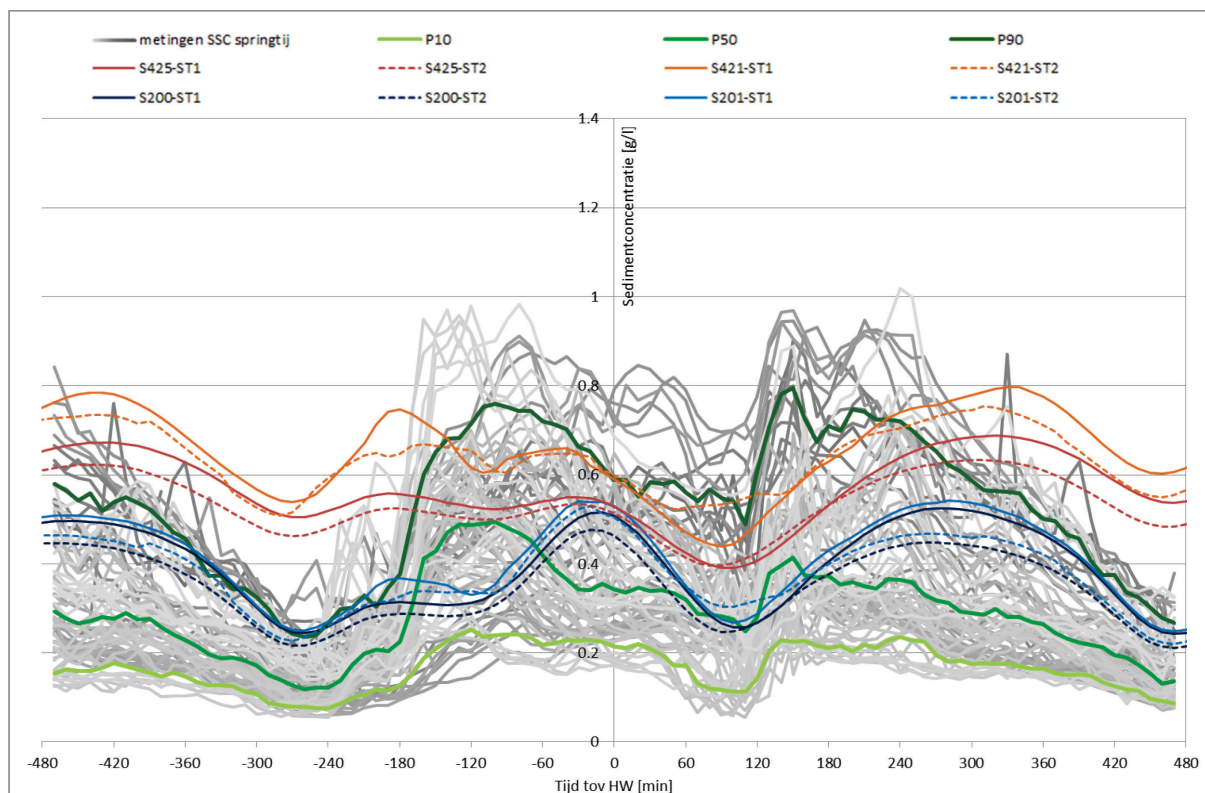
In de gesimuleerde tijdreeks van het waterpeil te Antwerpen wordt gezocht naar een karakteristiek doottij, gemiddeld getij en springtij, op basis van de karakteristieke getijverschillen te Antwerpen, zoals weergegeven in Tabel 4. Er worden in de simulatieperiode van 5 weken 2 periodes van doottij, 3 periodes van gemiddeld getij en 2 periodes van springtij weerhouden die voldoen aan de getij karakteristieken. Voor deze periodes wordt de sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel vergeleken met de sedimentconcentraties zoals weergegeven in §4.3.



Figuur 27 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij doodtij te Oosterweel
(grijs: alle metingen bij doodtij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))



Figuur 28 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij gemiddeld getij te Oosterweel
(grijs: alle metingen bij gemiddeld getij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))



Figuur 29 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij springtij te Oosterweel

(grijs: alle metingen bij springtij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))

Tot en met Figuur 32 geven de gemeten en de gesimuleerde sedimentconcentraties voor de karakteristieke getijperiodes weer voor respectievelijk Oosterweel en Boei84.

Ter hoogte van Oosterweel vallen de waarden van de gesimuleerde sedimentconcentratie met één slibfractie binnen het bereik van de waarden van de gemeten sedimentconcentratie. Het verloop van de sedimentconcentratie lijkt echter opgeschoven te zijn in de tijd ten opzichte van hoogwater. De maximale gesimuleerde sedimentconcentratie is voor de simulaties met één slibfractie quasi gelijk aan de P50-waarde van de gemeten sedimentconcentratie.

De waarden van de gesimuleerde sedimentconcentratie met twee slibfracties zijn ter hoogte van Oosterweel meestal groter dan de P50-waarde van de gemeten sedimentconcentratie. Voornamelijk bij kentering laagwater (circa 300 min voor hoogwater) zijn de gesimuleerde waarden hoger. Het uitzakken van het sediment lijkt niet goed gesimuleerd te worden. Bij kentering hoogwater (60 min na hoogwater) liggen de gesimuleerde waarden wel binnen het bereik van de waarden van de gemeten sedimentconcentratie. De waarde van de gesimuleerde maximale sedimentconcentratie ligt bij doottij en gemiddeld getij tussen de maxima van de P50 en P95-waarden van de gemeten sedimentconcentratie en zijn bij springtij quasi gelijk aan de P95-waarde van de gemeten sedimentconcentratie, doch komt het tijdstip ten opzichte van hoogwater niet overeen. De stijging van de sedimentconcentratie tijdens eb en vloed (120-240 min na/voor HW) verloopt bij de gesimuleerde sedimentconcentratie trager dan bij de waarden van de gemeten sedimentconcentratie.

Het voornaamste verschil tussen de resultaten van de simulaties met één of twee slibfracties is, ter hoogte van Oosterweel, de grootte van de berekende sedimentconcentraties. Zowel bij doottij als bij gemiddeld getij wordt de stijging van de sedimentconcentratie na laagwater (240 min voor HW) beter weergegeven bij simulatie met twee slibfracties.

Ter hoogte van Boei84, bij simulatie met één slibfractie, is de variatie tussen doottij en springtij in de gesimuleerde waarden van de sedimentconcentratie te klein. Bij doottij en gemiddeld getij komt de grootteorde van de gesimuleerde sedimentconcentratie ongeveer overeen met de P50-waarde van de metingen.

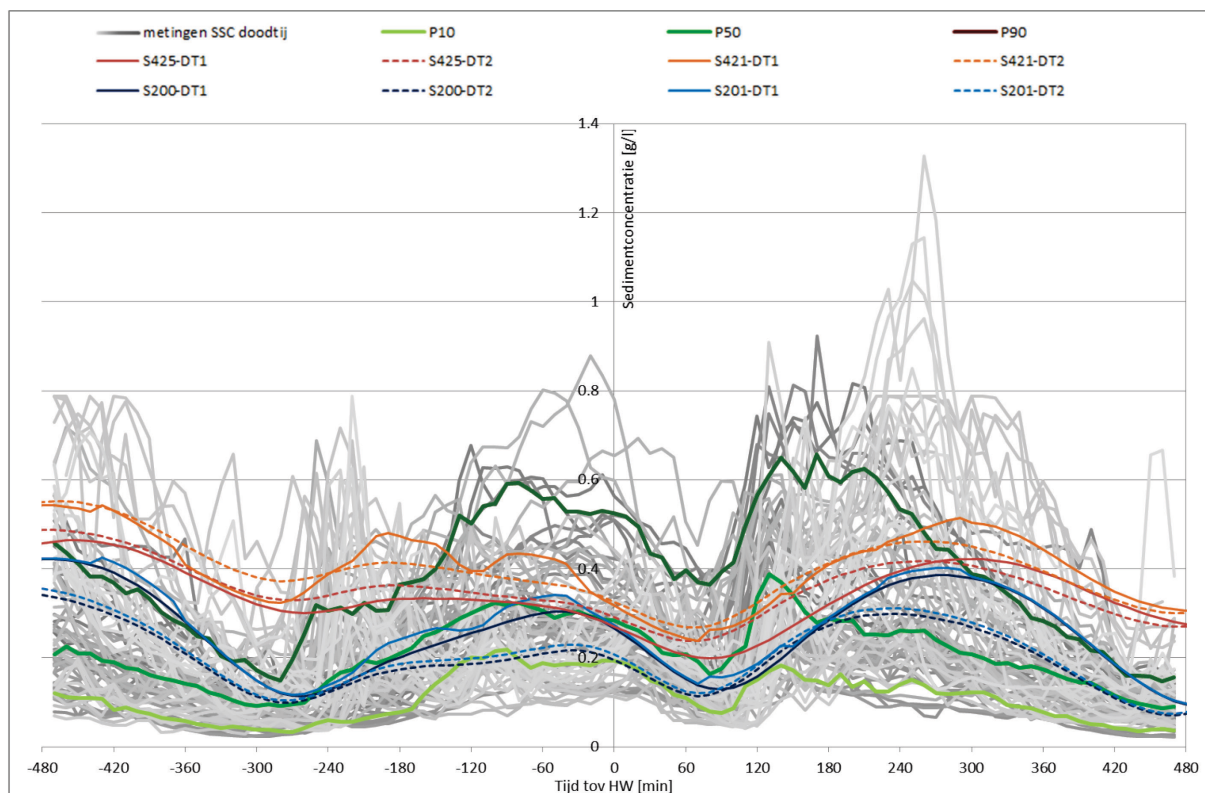
Bij springtij zijn de waarden van de gesimuleerde sedimentconcentratie bijna steeds lager dan de P50-waarde van de metingen. Bij gemiddeld getij en springtij is voornamelijk de maximale sedimentconcentratie tijdens eb (circa 240 minuten na hoogwater) te laag.

Bij simulatie met twee slibfracties, ter hoogte van Boei84 liggen de gesimuleerde waarden van de sedimentconcentratie bij doortij en bij gemiddeld getij tussen de P50- en P95-waarde van de gemeten sedimentconcentratie. Bij springtij komt de grootte-orde van de gesimuleerde sedimentconcentratie ongeveer overeen met de P50-waarde van de gemeten sedimentconcentratie. Zowel bij de gesimuleerde waarden als bij de metingen valt de minimale sedimentconcentratie circa 60 min na hoogwater. De gesimuleerde minimale waarde ligt bij doortij en bij springtij rond de minimale P50-waarde van de metingen, en bij gemiddeld getij rond de P95-waarde van de metingen.

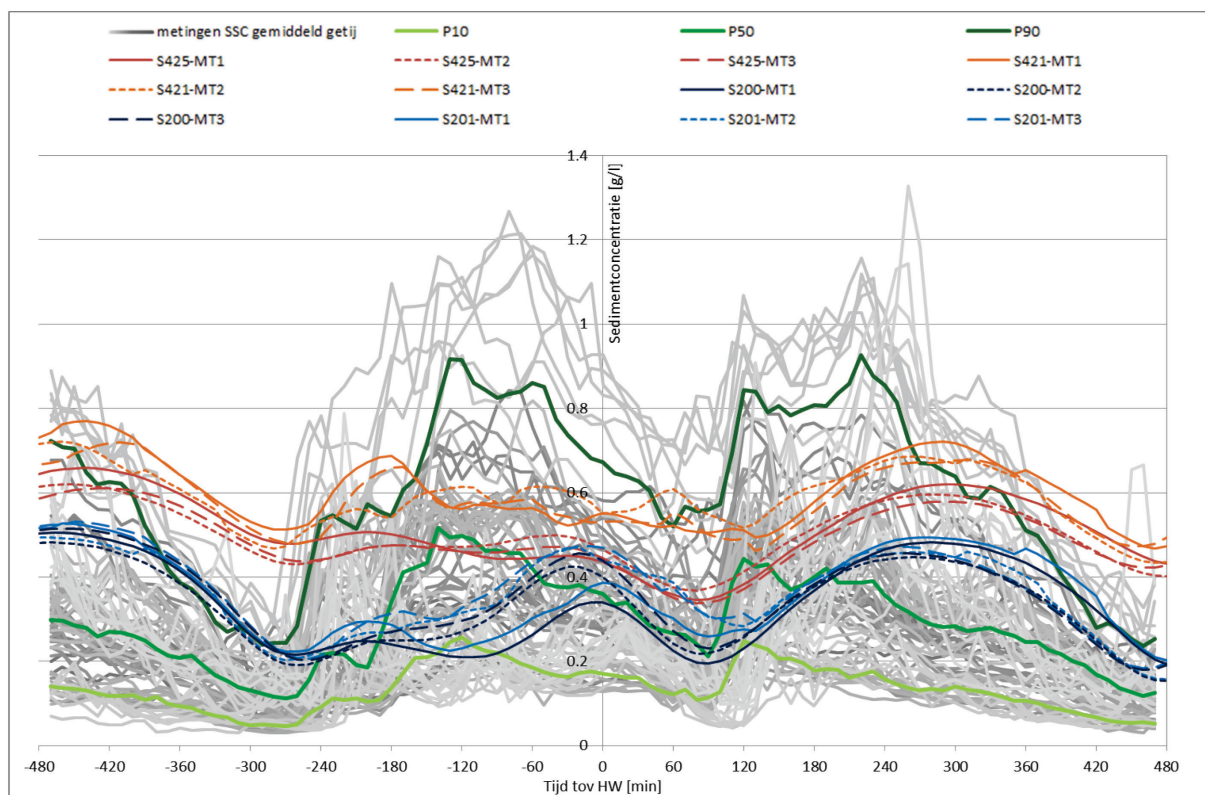
Ook ter hoogte van Boei84 is het voornaamste verschil tussen de resultaten van de simulaties met één of twee slibfractie de grootte van de berekende sedimentconcentraties. Het toevoegen van de tweede slibfractie zorgt voor hogere sedimentconcentraties zo'n 360 minuten voor en na hoogwater. Deze maximale waarden van sedimentconcentratie vallen echter niet volledig samen met de gemeten maximale waarden in sedimentconcentratie. De stijging van de sedimentconcentratie tijdens eb en vloed (120-240 min na/voor HW) bij de gesimuleerde sedimentconcentratie verloopt trager dan bij de gemeten sedimentconcentratie. Al lijkt deze al beter weergegeven te worden bij simulatie met twee slibfracties ten opzichte van simulatie met één slibfractie.

Aangezien de modelsimulaties uitgevoerd worden op basis van randvoorwaarden voor de periode september-oktober 2009, sluiten deze randvoorwaarden aan bij een zomer-situatie. In deze "droge" periode wordt ter hoogte van Boei 84 een lagere sedimentconcentratie gemeten. Mogelijks kan dit proces (een deel van) de afwijking verklaren. Daarnaast is de locatie Boei 84 net afwaarts de Plaat van Lillo gelegen. De onderschatting van de sedimentconcentratie in de scenarioberekeningen kan mogelijks te maken hebben met de (in het model beperktere) sedimentbeschikbaarheid op de nabije Plaat van Lillo.

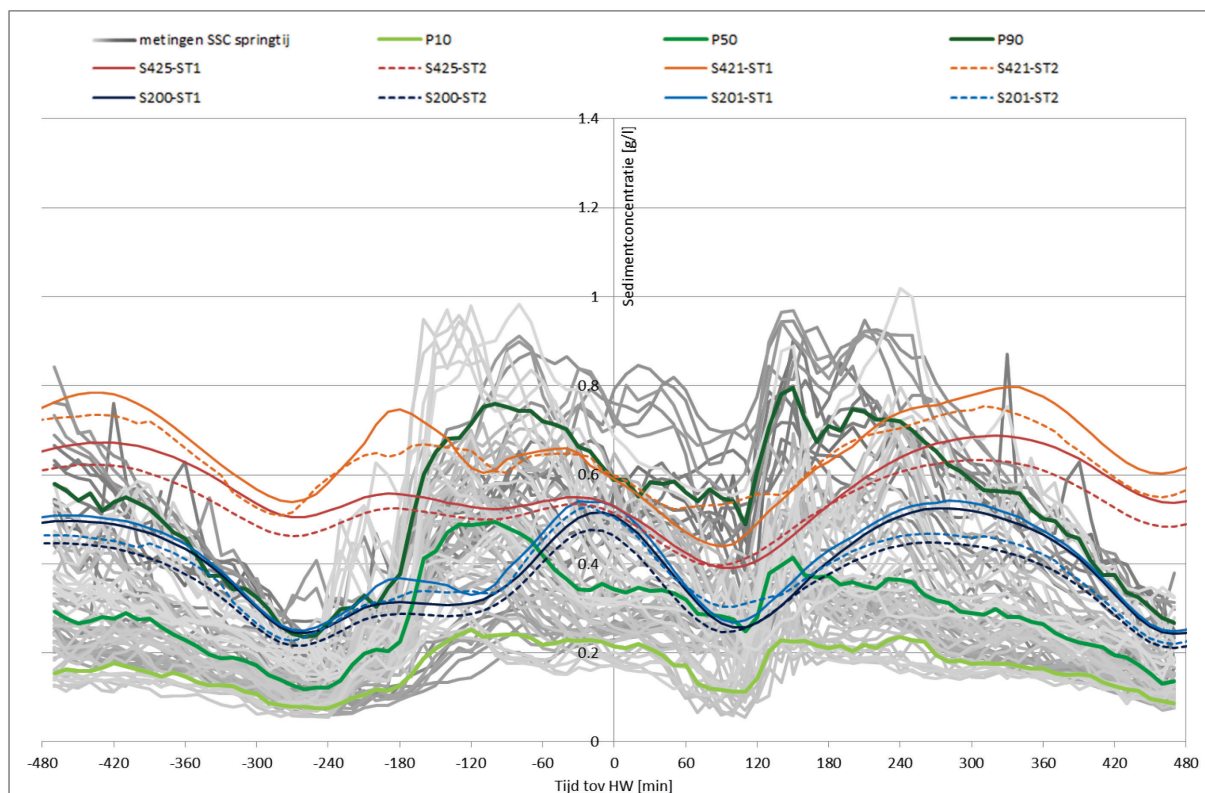
Gelet op de seizoenale invloed op de ligging van het turbiditeitsmaximum, met name het al dan niet voorkomen van hogere waarden in het afwaartse deel van het studiegebied, verdient het de aanbeveling het modelgebied uit te breiden naar opwaarts om also de seizoenale effecten te kunnen meenemen. Gelet op de lange rekentijden van het huidige model, dient hiervoor een optimalisatie van het model te gebeuren (cfr. vergroffen rekenrooster, offline slibberekeningen m.b.v. Delwaq). Tot op heden is het echter onduidelijk of de huidige modellen in staat zijn om deze seizoenale effecten op een degelijke manier te voorspellen.



Figuur 27 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij doottij te Oosterweel
(grijs: alle metingen bij doottij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))

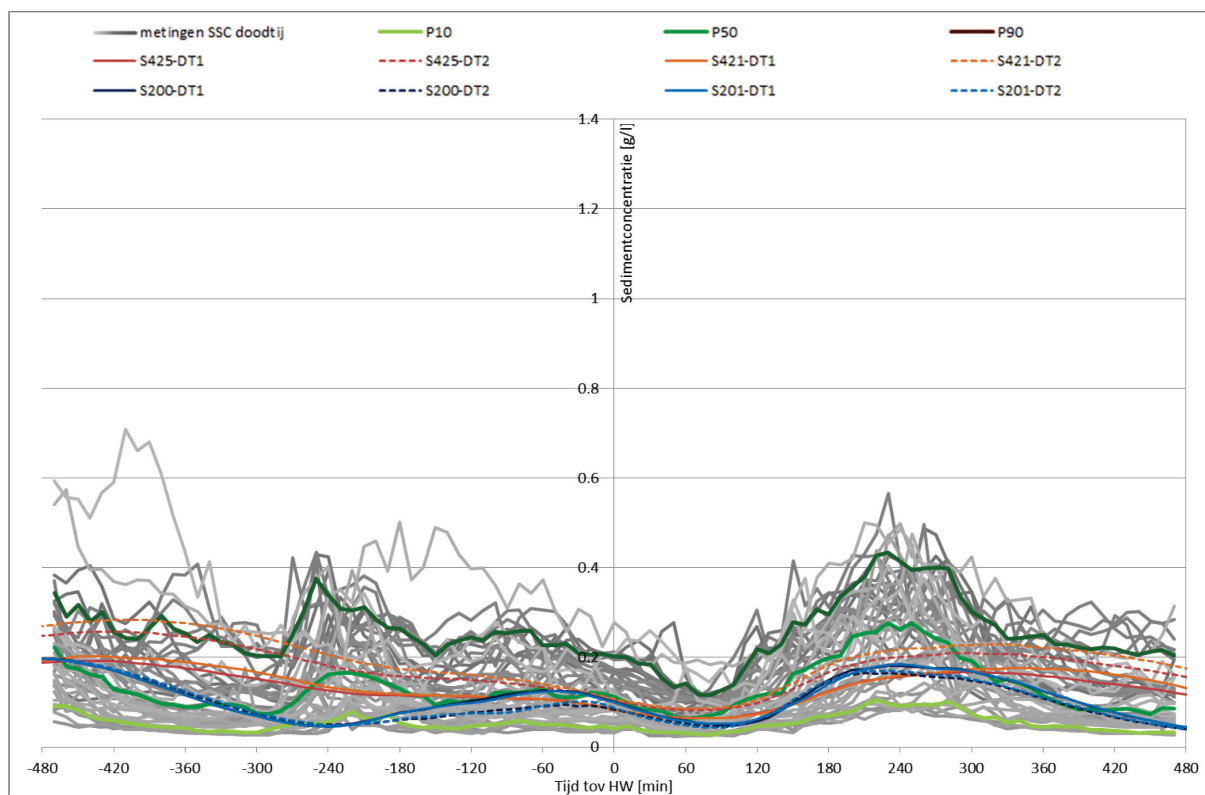


Figuur 28 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij gemiddeld getij te Oosterweel
(grijs: alle metingen bij gemiddeld getij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))



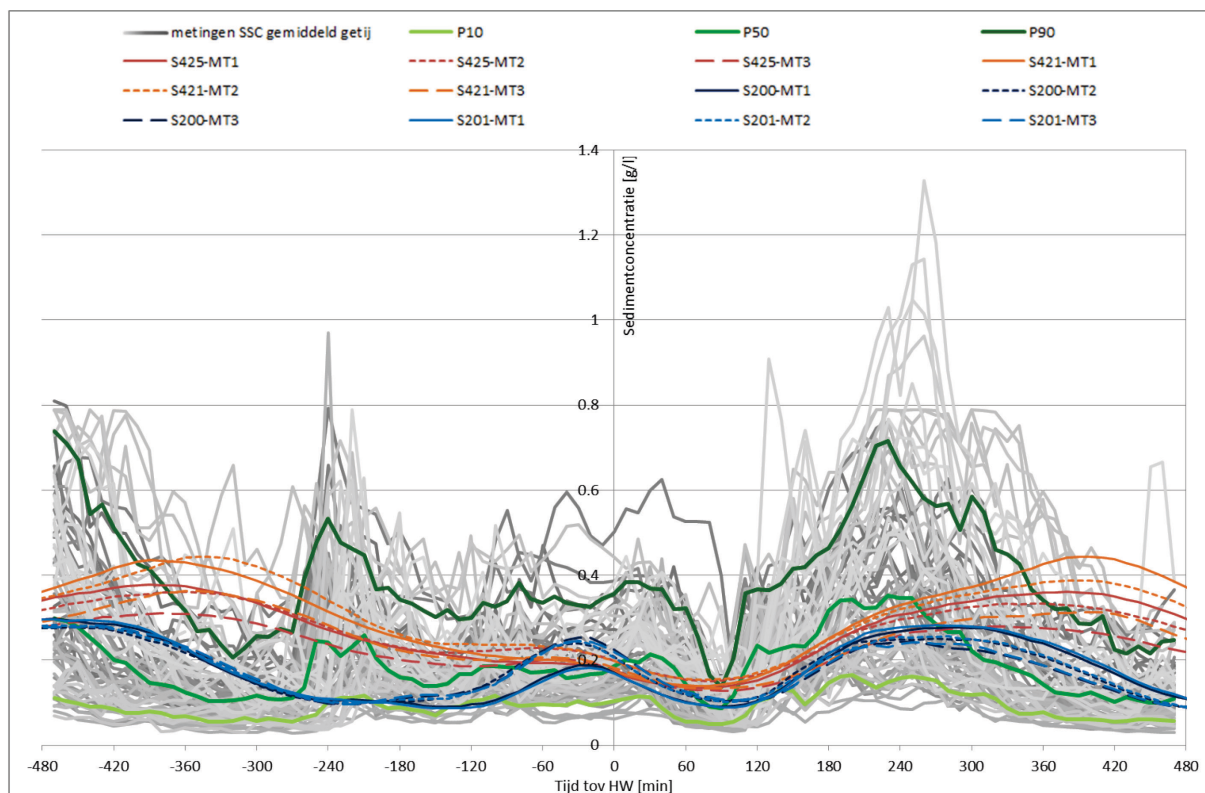
Figuur 29 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij springtij te Oosterweel

(grijs: alle metingen bij springtij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))

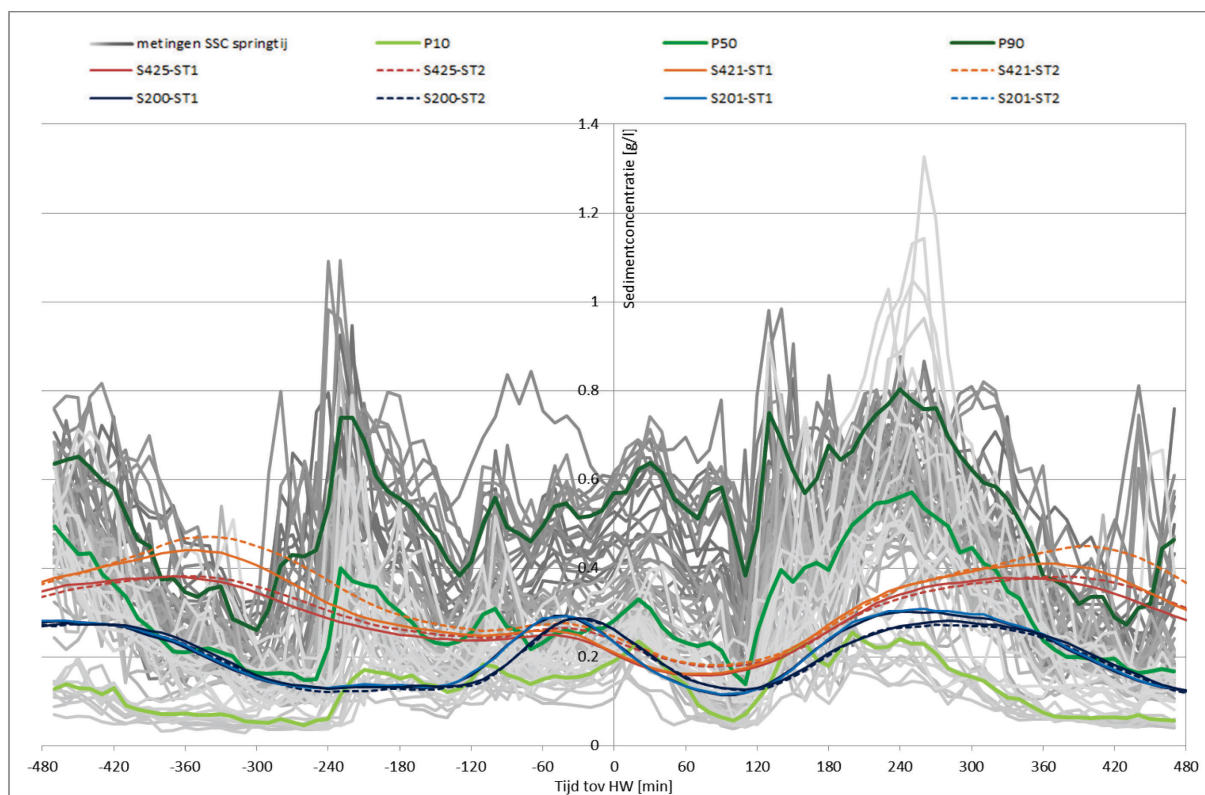


Figuur 30 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij doottij te Boei84

(grijs: alle metingen bij doottij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))



Figuur 31 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij gemiddeld getij te Boei84
 (grijs: alle metingen bij gemiddeld getij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))

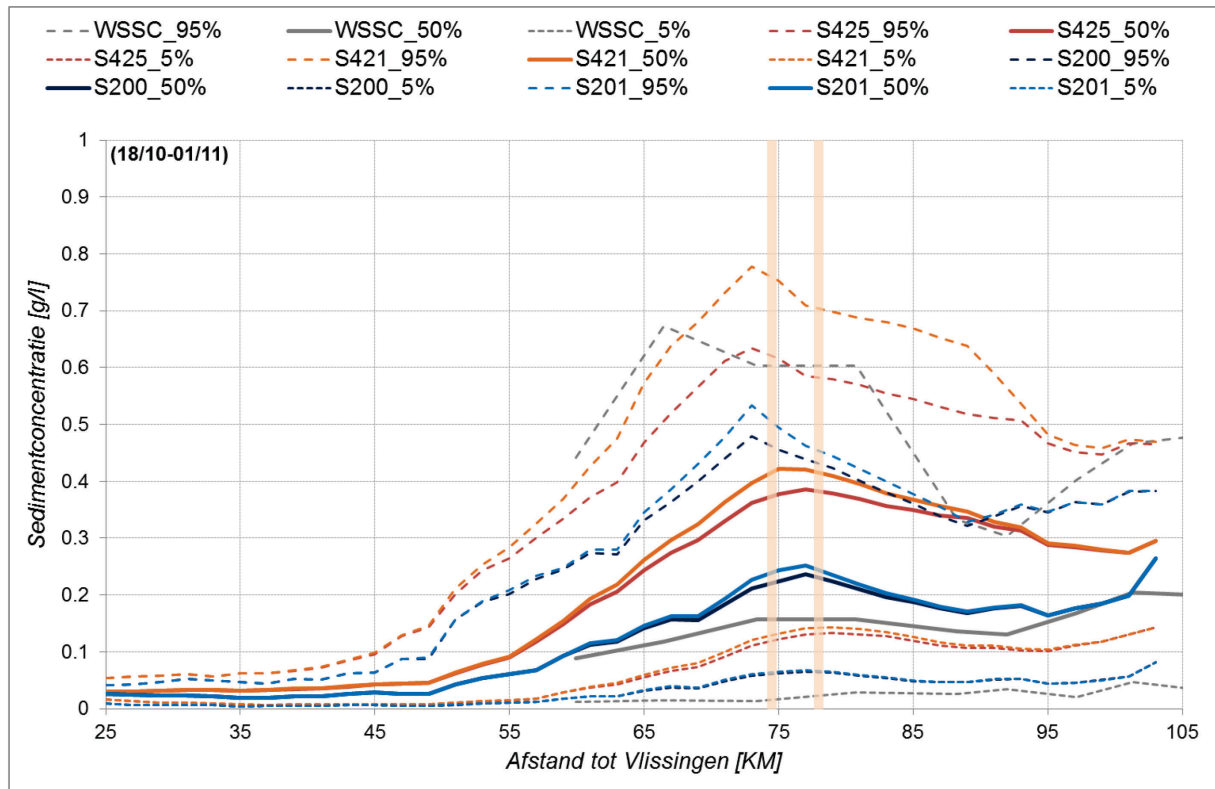


Figuur 32 - Overzicht verloop sedimentconcentratie bij springtij te Boei84
 (grijs: alle metingen bij springtij | groen: P10, P50, P90 | rood/oranje: model met 2 slibfracties zonder/met stortingen (S425/S421) | donker/lichtblauw: model met 1 slibfractie zonder/met stortingen (S200/S201))

Naast het verloop in de tijd van de sedimentconcentratie op bovenstaande meetposten, werden er in [Vandenbruwaene et al., 2015] resultaten gepresenteerd van de ruimtelijke variatie van de sedimentconcentratie langs het estuarium. Deze gegevens worden binnen deze studie gebruikt voor de validatie van het model. Het lengteprofiel in Figuur 33 geeft de gemeten en gesimuleerde waarden van het 5^{de}, 50^{ste} en 95^{ste} percentiel van de sedimentconcentratie langs de Westerschelde en Zeeschelde weer. De gemeten sedimentconcentratie is een gemiddelde waarde voor sedimentconcentratie in de waterkolom over de tijdsperiode 2001-2010. De gesimuleerde waarden worden gegeven zowel voor simulatie met één slibfractie, als met twee slibfracties. De gesimuleerde sedimentconcentratie is een gemiddelde waarde over de laatste springtij-doodtij-cyclus (14 dagen) van de simulatieperiode, zowel voor scenario zonder storten als voor scenario met de huidige stortstrategie. De verticale balken geven de stortlocaties (Oosterweel en Punt van Melsele) aan. Er zijn echter geen stortingen meer tijdens de laatste week van de simulatieperiode.

Uit de vergelijking tussen de metingen en de modelresultaten blijkt dat het model de werkelijkheid redelijk reproduceert. Het verloop volgens het lengteprofiel is vergelijkbaar tussen model en metingen. De gesimuleerde waarden van de sedimentconcentratie zijn, zoals te verwachten, hoger bij simulatie met 2 slibfracties (S421 of S425). Hierbij wordt echter de maximale P95-waarde van de sedimentconcentratie tussen 65 en 75 km van de monding, beter benaderd.

Er bestaan echter verschillen, zowel tussen metingen en model, als tussen de modelresultaten voor bepaalde zones. In het 95^{ste} percentiel is de gesimuleerde sedimentconcentratie lager dan de gemeten sedimentconcentratie tussen kilometer 60 en 90. In het 5^{de} en het 50^{ste} percentiel is de gesimuleerde sedimentconcentratie, zowel met één als twee slibfracties, hoger dan de gemeten sedimentconcentratie. Mogelijke oorzaken voor deze verschillen zijn de keuzes in modelparameters (o.a. sedimentbeschikbaarheid) alsook het feit dat de kalibratie van het model uitgevoerd werd voor een dataset over de periode 2008-2013, terwijl de gegevens van het lengteprofiel dateren van 2001-2010. In de periode 2008-2011 is er een verhoging in sedimentconcentratie vastgesteld, die nadien meer stabiel bleef en mogelijks verantwoordelijk is voor de afwijking (overschatting) van de sedimentconcentratie door het model ten opzichte van de metingen.



Figuur 33 – Lengteprofiel Westerschelde – Zeeschelde met 5^{de}, 50^{ste} en 95^{ste} percentiel sedimentconcentratie voor gemeten sedimentconcentratie in de waterkolom (WSSC) versus gesimuleerde sedimentconcentratie scenario zonder storten (S200 of S425) en scenario met huidige stortstrategie (S201 of S421), met één slibfractie (S200/S201) of met twee slibfracties (S425/S421)

6 MODELVALIDATIE STORTINGEN

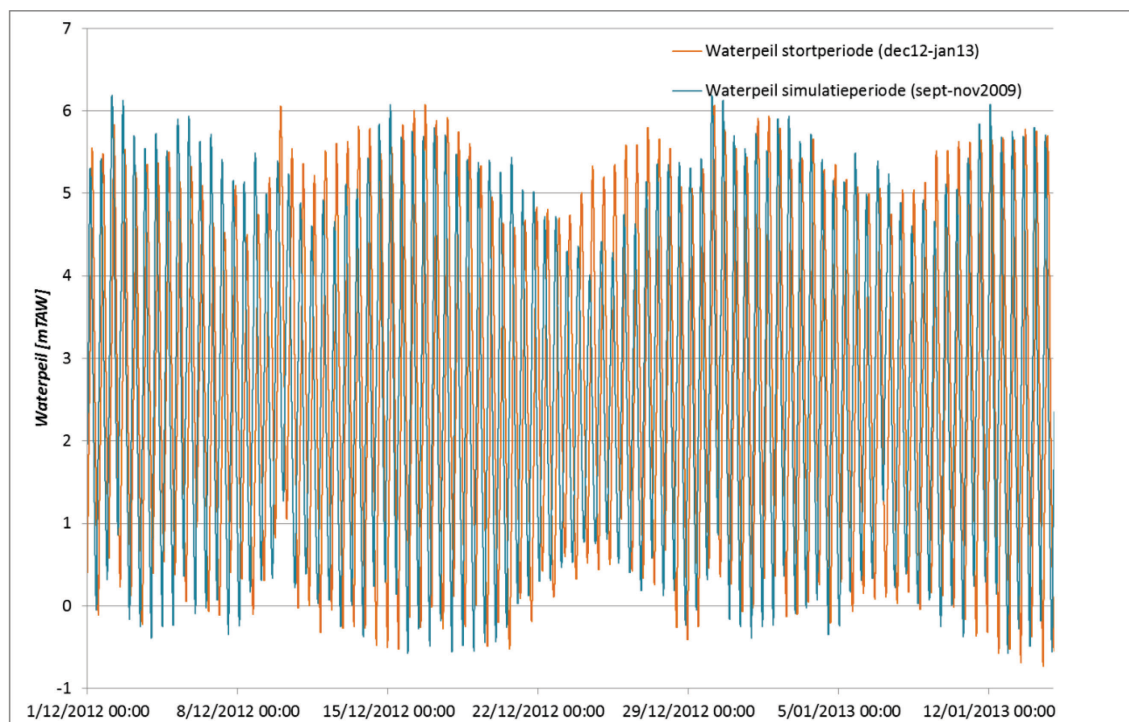
Een tweede vergelijking van de gesimuleerde en gemeten sedimentconcentratie wordt uitgevoerd voor een periode met intensieve stortingen, in december 2012. Voor deze simulatie worden de werkelijke storthoeveelheden opgelegd. Het verloop van de gemeten en gesimuleerde sedimentconcentratie ter hoogte van Boei84 en Oosterweel wordt, samen met de storthoeveelheden, weergegeven in Figuur 35.

Figuur 34 geeft het waterpeil in de Zeeschelde ter hoogte van Antwerpen gemeten tijdens de stortperiode in december 2012-januari 2013, en hierbij het gesimuleerde waterpeil te Antwerpen in de modelsimulatie in september – november 2009. Het springtij in het gemodelleerde waterpeil ligt circa één dag later ten opzichte van de gemeten waterpeil tijdens de werkelijke stortperiode.

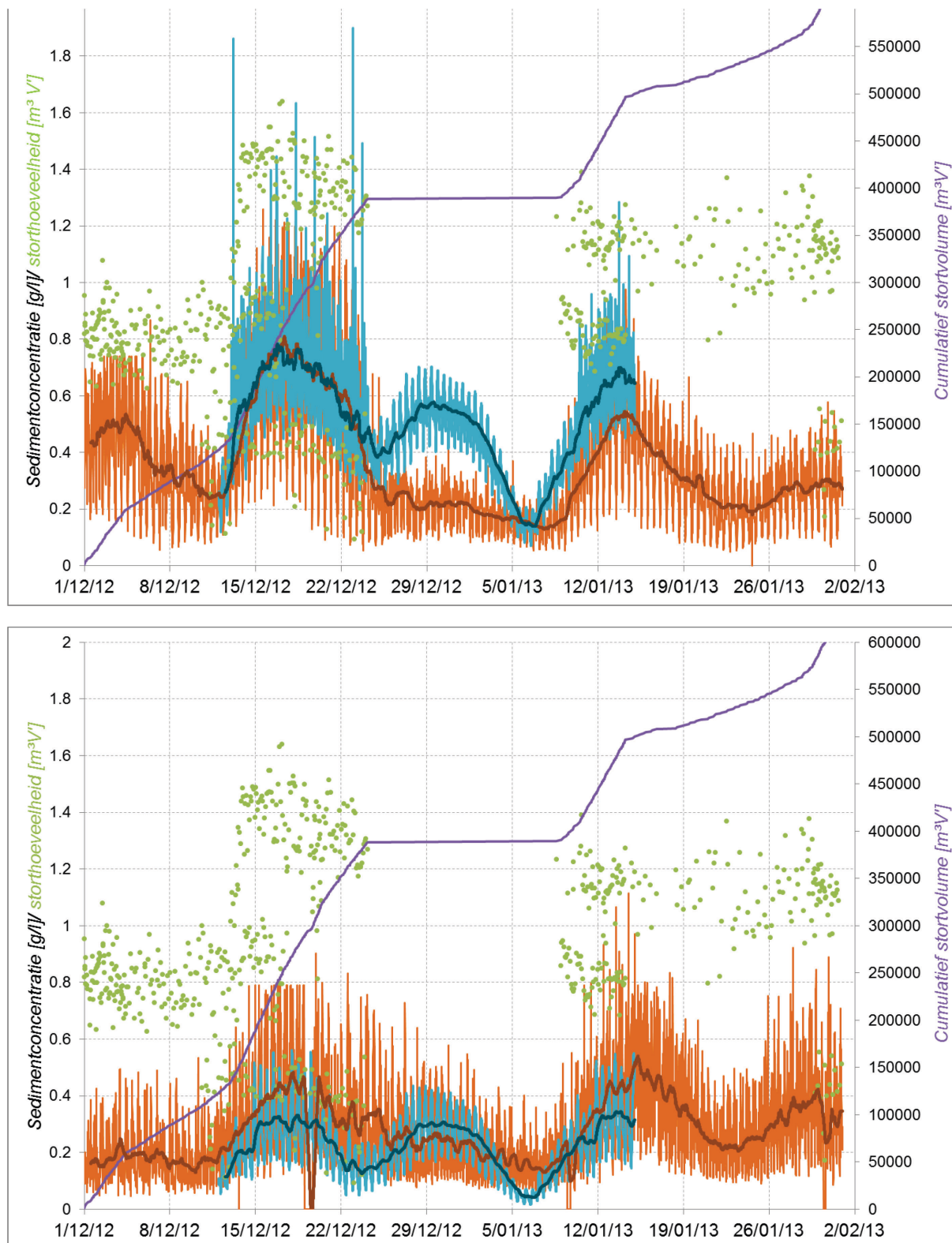
Ter hoogte van Oosterweel volgt de gesimuleerde getij-gemiddelde sedimentconcentratie goed het verloop van de gemiddelde gemeten sedimentconcentratie in de eerste periode van stortingen. Na de eerste stortperiode verloopt de daling van de gemiddelde gesimuleerde sedimentconcentratie trager dan bij de gemeten waarden. De gesimuleerde sedimentconcentratie wordt echter opnieuw hoger in de periode na stortingen, wat te wijten is aan een sterkere invloed van de springtij-doodtij cyclus in het model. De minimale waarde na de daling is echter wel ongeveer gelijk. Bij de tweede periode van stortingen lijken de stortingen in de simulatie vroeger te starten dan bij de metingen. De gesimuleerde getij-gemiddelde sedimentconcentratie stijgt meer dan de gemiddelde gemeten sedimentconcentratie.

Ter hoogte van Boei84 is het effect van de stortingen minder uitgesproken. Tijdens de perioden met stortingen is de gesimuleerde getij-gemiddelde sedimentconcentratie lager dan deze van gemeten sedimentconcentratie. Echter de initiële waarde van de gesimuleerde sedimentconcentratie is lager dan de waarde van de gemeten sedimentconcentratie op dat tijdstip. De stijging van de sedimentconcentratie heeft een quasi gelijke snelheid. Tijdens de periode zonder stortingen lijkt de gesimuleerde getij-gemiddelde sedimentconcentratie meer beïnvloed door het getij dan de gemeten sedimentconcentratie, die een dalend verloop kent. Het minimum van de sedimentconcentratie na de periode zonder stortingen is bij de gesimuleerde waarden kleiner dan bij de gemeten waarden. Ook bij de tweede periode van stortingen heeft de stijging van de sedimentconcentratie een quasi gelijke snelheid.

Uit bovenstaande vergelijking blijkt dat de stijging van de sedimentconcentratie bij de storting van slib redelijk goed gesimuleerd wordt door het model. De achtergrondconcentratie van sediment in de waterkolom wordt echter minder goed benaderd door het model.



Figuur 34 – Waterpeil in de Zeeschelde thv Antwerpen tijdens de stortperiode, december 2012-januari 2013 (oranje) en tijdens de simulatieperiode (september-november 2009)



Figuur 35 – Verloop gemeten (oranje) en gesimuleerde (blauw) sedimentconcentratie tijdens een periode met intensieve stortingen, te Oosterweel (boven) en Boei84 (onder). De dikke vloeiende lijn geeft de getijgemiddelde sedimentconcentratie weer.

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Conclusies

Voorliggend rapport bespreekt de modelopzet, gevoeligheidsanalyse en validatie van een 2D-model met sedimenttransportmodellering ten behoeve van scenarioberekeningen voor het terugstorten van sediment in de Beneden-Zeeschelde. De resultaten van het scenario-onderzoek worden gerapporteerd in [Coen *et al.*, 2015].

Het numerieke model dat gebruikt wordt voor de scenarioberekeningen is een detailmodel (afgeleid uit het grootschalige NEVLA-model) van het studiegebied gaande van Ossensisse in de Westerschelde als afwaartse grens, tot Tielrode (Boven-Zeeschelde) en Terhagen (Rupel) als opwaartse grens. Op basis van een gevoeligheidsanalyse werden de instellingen gezocht in de verschillende modelparameters om een optimale overeenstemming te realiseren met de sedimentconcentraties in de Beneden-Zeeschelde. Hierbij werd gebruik gemaakt van beschikbare metingen, waarbij zowel het lengteprofiel (gemiddeld in de tijd) als het verloop in de tijd (op 2 locaties) van de sedimentconcentratie als validatiedataset werd gebruikt. In een eerste stap werd slechts één slibfractie, in combinatie met één zandfractie in het model opgenomen. Na een eerste validatieronde en scenarioberekeningen, en om tot betere resultaten te komen werd een tweede slibfractie toegevoegd met een lagere valsnelheid. De finale modelinstellingen geven een goede overeenstemming tussen het model en de metingen, zowel voor het lengteprofiel als het continue verloop (Oosterweel zeer goed, bij Boei 84 onderschatting – zie verder bij aanbevelingen).

Validatie van de gesimuleerde sedimentconcentratie, bij simulatie met twee slibfracties, tegen gemeten sedimentconcentraties bij een reële stortperiode toont aan dat de stijging van de sedimentconcentratie bij de storting van slib redelijk goed gesimuleerd wordt door het model. De achtergrondconcentratie van sediment in de waterkolom wordt echter minder goed benaderd door het model. Dit is mogelijks te wijten aan een sterkere invloed van de doortij-springtijcyclus in het model.

7.2 Aanbevelingen

Op basis van de huidige modelresultaten is gebleken dat de zone nabij Doel tijdens bepaalde fases van het getij onderhevig is aan ongewenste schommelingen (ruis op het gemiddeld signaal) in de stroomsnelheden. Deze vertaalde zich ook door in een schommeling op de sedimentconcentratie in dit gebied (vanaf Nederlands-Belgische grens tot Liefkenshoek). Deze schommelingen beïnvloeden de gerapporteerde modelresultaten in eerder beperkte mate. Mogelijkerwijs zijn deze schommelingen te wijten aan een onvoldoende gedetailleerde implementatie van de strek- en leidam. Aanvullende simulaties met een betere implementatie van de strek- en leidam kunnen dit probleem verhelpen (lopend).

Op basis van de uitgevoerde modelvalidatie is gebleken dat het model het verloop (in tijd en in ruimte) van de sedimentconcentratie redelijkerwijs kan reproduceren. Desalniettemin treden er nog verschillen op die te wijten zijn aan het niet of minder in beschouwing brengen van bepaalde processen. Een eerste aspect dat vooralsnog niet in beschouwing wordt genomen is de seizoenale invloed op de ligging van het turbiditeitsmaximum. Uit metingen is gebleken dat er sterke seizoenale variaties kunnen optreden voor de stations op de rand van het turbiditeitsmaximum, in casu de zone nabij de Belgisch-Nederlandse grens langs afwaarts en de zone tussen Rupelmonde en Dendermonde langs opwaartse kant. Aangezien het model langs opwaartse zijde beperkt is tot Tielrode, verdient het de aanbeveling het modelgebied uit te breiden naar opwaarts om alzo de seizoenale effecten te kunnen meenemen. Gelet op de lange rekentijden van het huidige model, dient hiervoor een optimalisatie van het model te gebeuren (cfr. vergroffen rekenrooster, offline slibberekeningen m.b.v. Delwaq). Tot op heden is het echter onduidelijk of de huidige modellen in staat zijn om deze seizoenale effecten op een degelijke manier te voorspellen.

Het verdient dan ook de aanbeveling om de instellingen van de modelparameters en transportformulering verder te optimaliseren en de complexiteit van het model verder uit te breiden (bijvoorbeeld meerdere bodemlagen) zodat deze aspecten beter door het instrumentarium worden gereproduceerd. Dit kan zowel gebeuren voor het in deze fase ingezette modelinstrumentarium, alsook om dit als aandachtspunt mee te nemen in de hierboven geformuleerde alternatieve aanpak.

8 REFERENTIES

Coen, L.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Slibscenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

IMDC (2013a). LTV-Veiligheid en Toegankelijkheid. Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie. Basisrapport specifieke beheersvragen B23: Analyse stortvakken Beneden-Zeeschelde. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland iov. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.

IMDC (2013b). LTV-Veiligheid en Toegankelijkheid. Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie. Achtergrondrapport A-29: Harde lagen Beneden-Zeeschelde. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland iov. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.

IMDC (2013c). Monitoringprogramma Flexibel Storten - Analyse slibconcentratietingen Zeeschelde. International Marine & Dredging Consultants i.o.v. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen.

IMDC (2011) Ontwikkelingszone Saefthinge – Hydraulisch, sedimentologisch en morfologisch onderzoek. Deelrapport 6: Calibratie Sediment Saefthingedokmodel. International Marine & Dredging Consultants ism. Deltares, iov. Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen.

IMDC & VUB (2010). Lithologische en geomorfologische kaart van de Beneden - Zeeschelde - Analyserapport: Opmaak en Interpretatie.

IMDC (2007a). Uitbreiding studie densiteitsstromingen in de Beneden-Zeeschelde in het kader van LTV meetcampagne naar hooggeconcentreerde slibsuspensies. Deelrapport 9: Valsnelheid slib – INSSEV - zomer 2006. International Marine & Dredging Consultants ism. WL Delft Hydraulics, R. Kirby en Gems iov. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

IMDC (2007b). Uitbreiding studie densiteitsstromingen in de Beneden-Zeeschelde in het kader van LTV meetcampagne naar hooggeconcentreerde slibsuspensies. Deelrapport 10: Aanvullende slibparameters zomer 2006. International Marine & Dredging Consultants ism. WL Delft Hydraulics, R. Kirby en Gems iov. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

IMDC (2004). Optimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken Deurganckdok: deelrapport 2. Sedimentologisch en morfologisch model onderzoek. Versie 1.0. International Marine & Dredging Consultants iov. Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen.

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). Verbetering 2D randvoorwaardenmodel. Deelrapport 4: Extra aanpassingen Zeeschelde. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research, Antwerp, Belgium

Maximova, T.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Mostaert, F., (2010). Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde. Kalibratie en validatie van het hydrodynamisch 2 dimensionaal numeriek model: pilootstudie Notelaer en Ballooi. Version 2_0. WL Rapporten, 713_21. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Maximova, T.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (2011). Flow in river bends: A numerical model investigation. Version 2.0. WL Rapporten, 753_15. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2013). Habitatmapping ondiep water Zeeschelde. Deelrapport 2 – Numeriek 2D-model. Version 2_0. WL Rapporten, 00_028. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.

Plancke, Y. (2014). Stortstrategie Beneden-Zeeschelde: voorstel stortscenario's slib. WL memo, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Vandenbruwaene, W.; Wildemeersch, K.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 1 – Opzet en validatie slibmodel. Versie 2_0. WL Rapporten, 00_029. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea: Antwerpen, België.

van Kessel, T.; Vanlede, J.; Bruens, A. (2006) Development of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. Phase 1 and 2. WL Delft Hydraulics & Flanders Hydraulics Research iov RIKZ.

van Kessel, T.; Vanlede, J.; Kuijper, K.; de Kok, J. (2007) Further development and first application of a mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. Phase 2. WL Delft Hydraulics & Flanders Hydraulics Research iov RIKZ.

van Kessel, T.; Vanlede, J.; Eleveld, M.; van der Wal, D. (2008) Mud transport model for the Scheldt estuary in the framework of LTV. WL Delft Hydraulics & Flanders Hydraulics Research iov RIKZ.

Verheyen, B.; Leyssen, G.; Vanlede, J.; Schramkowski, G.; Mostaert, F. (2012, concept version). Verbetering randvoorwaardenmodel: Deelrapport 7: Afregeling van het 3D Scheldemodel. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium

Vos, G.; Bastiaensen, E.; De Bruyn, L.; De Schutter, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2011). Lithologische kaart Beneden-Zeeschelde: Resultaten korrelanalyse sedimentstalen. Versie 2_0. WL Rapporten, 736_56. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Vos, G.; Meire, D.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 4 – Zandscenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Waterbouwkundig Laboratorium (WL) (2009). MONEOS - jaarboek monitoring WL 2008 : Overzicht monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals door WL in 2008 in het Zeescheldebekken gemeten. Versie 4_0. WL Rapporten, Projectnr 833_07. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Waterbouwkundig Laboratorium (WL) (2010). MONEOS - jaarboek monitoring WL 2009 : Overzicht monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals door WL in 2009 in het Zeescheldebekken gemeten. Versie 4_0. WL Rapporten, Projectnr 833_07. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Waterbouwkundig Laboratorium (WL) (2011). MONEOS - jaarboek monitoring WL 2010 : Overzicht monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals door WL in 2010 in het Zeescheldebekken gemeten. Versie 4_0. WL Rapporten, Projectnr 833_07. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Waterbouwkundig Laboratorium (WL) (2012). MONEOS - jaarboek monitoring WL 2011 : Overzicht monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals door WL in 2011 in het Zeescheldebekken gemeten. Versie 4_0. WL Rapporten, Projectnr 833_07. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

Waterbouwkundig Laboratorium (WL) (2013). MONEOS -- jaarboek monitoring WL 2012: Factual data rapportage van monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals gemeten door WL in het Zeescheldebekken in 2012. Versie 2_0. WL Rapporten, 12_070_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Waterbouwkundig Laboratorium (WL) (2014). MONEOS -- jaarboek monitoring WL 2013: Factual data rapportage van monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals gemeten door WL in het Zeescheldebekken in 2013. Versie 4.0. WL Rapporten, 12_070. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

WL/Delft Hydraulics, (2007). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual

Waterbouwkundig Laboratorium

waterbouwkundiglaboratorium.be



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