



Vlaanderen
is wetenschap



14_025_2
WL rapporten

Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 2 – Opzet en validatie zandmodel

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be



Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde

Deelrapport 2 – Opzet en validatie zandmodel

Vos, G.; De Maerschalcck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Maart 2016

WL2016R14_025_2

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vos, G.; De Maerschallck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 2 – Opzet en validatie zandmodel. 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

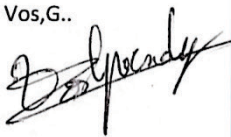



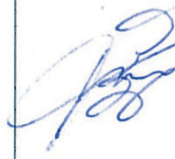
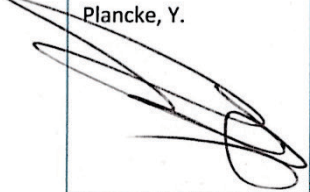
waterbouwkundiglaboratorium.be

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 2 – Opzet en validatie zandmodel		
Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2016R14_025_2
Keywords (3-5):	Sediment transport, zand, numeriek model, Schelde-estuarium		
Tekst (p.):	41	Bijlagen (p.):	44
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Uitzondering:	<input checked="" type="checkbox"/> Opdrachtgever
			<input type="checkbox"/> Intern
			<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
	<input type="checkbox"/> Nee	<input type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Goedkeuring

Auteur	Revisor	Projectleider	Coördinator Studie & Advies	Afdelingshoofd
Vos, G. 	De Maerschallck, B. 	Plancke, Y. 	Verwaest, T. 	Mostaert, F. 
Plancke, Y. 				

Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur(s)
1.0	13/03/2015	Conceptversie	Vos, G.; Plancke, Y.
1.1	02/12/2015	Conceptversie 2	Vos, G.
2.0	06/01/2016	Inhoudelijke revisie	De Maerschallck, B.
3.0	05/02/2016	Revisie opdrachtgever	Beirinckx, K.; Ides, S.; Van der Werf, J.
4.0	09/03/2016	Definitieve versie	Vos, G.

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 zandtransportmodellering 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
Lijst van de figuren in bijlage	VI
1 Inleiding	1
1.1 Doelstelling	1
1.2 Overige rapporten	1
2 Modelopzet	2
2.1 NEVLAmodel	2
2.2 Basismodel.....	2
2.2.1 Rekenrooster	2
2.2.2 Topo-bathymetrie.....	4
2.2.3 Uitvoerpunten	5
2.2.4 Randvoorwaarden	6
2.2.5 Tijdstap	6
2.2.6 Modelparameters.....	6
2.2.7 Simulatieperiode	6
2.3 Sedimenttransportmodellering	7
2.3.1 Sedimentfracties.....	7
2.3.2 Randvoorwaarden	7
2.3.3 Dikte bodemsedimentlaag	7
3 Modelopzet en gevoeligheidsanalyse zandtransport.....	8
3.1 Beschikbare metingen	8
3.2 Gevoeligheidsonderzoek	9
3.2.1 Overzicht uitgevoerde gevoeligheidsruns	9
3.2.2 Korrelgrootte	11
3.2.3 Secondary flow	12
3.2.4 Saliniteit	12
3.2.5 Sedimenttransportformule.....	13
3.2.6 Dikte bodemsedimentlaag + aantal sedimentfracties.....	16
3.3 Conclusie gevoeligheidsonderzoek	22
4 Modelvalidatie.....	25
4.1 Finale model-instellingen	29
5 Modelopzet en gevoeligheidsonderzoek morfologie.....	32

5.1	Metingen	32
5.2	Morfologisch model.....	33
5.2.1	Bepaling morfologisch getij en morfologische versnellingsfactor	33
5.2.2	Kalibratie/gevoeligheidsanalyse morfologisch modelleren	34
5.3	Conclusie morfologisch modelleren	37
6	Conclusie en aanbevelingen	38
6.1	Conclusies	38
6.2	Aanbevelingen	38
7	Referenties	40
	Bijlage A	B1
	Bijlage B: Sedimenttransportcapaciteit: Offline berekening.....	B36
7.1	Methodologie	B36
7.1.1	Inschatting korrelgrootte.....	B37
7.1.2	Afgeleide grootheden.....	B37
7.2	Resultaten.....	B38
	Bijlage C: Metingen.....	B41
	Liefkenshoek.....	B41
7.2.1	Oosterweel	B42
7.2.2	Kruikeke.....	B43

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1 – Overzicht modelparameters	6
Tabel 2 – Initiële waarden modelparameters	9
Tabel 3 – Overzicht van de uitgevoerde gevoeligheidsruns	10
Tabel 4 – gebruikte parameters binnen de formule Soulsby-Van Rijn (Bron: Van Rijn et al., 2003)	14
Tabel 5 – gebruikte parameters binnen de formule Engelund/Hansen	15
Tabel 6 – Percentage slibfractie en zandfracties per lithologische klasse	17
Tabel 7 – Gebruikte parameters voor de verschillende sedimentfracties in run 17	18
Tabel 8 – Overzicht getijcondities tijdens metingen	25
Tabel 9 – Gebruikte parameters voor de finale modelinstellingen	29
Tabel 10 – Bepaling van Morfologische versnellingsfactor voor 1 jaar	34
Tabel 11 – Overzicht van de uitgevoerde morfologische runs	35

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1 – Rekenrooster van het Delft3D NEVLAmodel (groen) en het studiemodel (rood).....	2
Figuur 2 – Detail van het rekenrooster ter hoogte van Schaar Ouden Doel, Deurganckdok en Kruikebe.....	3
Figuur 3 – Situering studiegebied in model, met afwaartse rand t.h.v. Raai 6 en opwaartse randen te Tielrode en Terhagen.....	4
Figuur 4 – Topo-bathymetrie van lei- en strekdam voor (links) en na (rechts) manuele aanpassing.....	5
Figuur 5 – Vergelijking gemodelleerde en gemeten sedimenttransport Oosterweel voor verschillende korreldiameters (150µm in z002, 100µm in z003 en 200µm in z004)	11
Figuur 6 – Vergelijking gemodelleerde en gemeten sedimenttransport Kruikebe voor verschillende korreldiameters (150µm in z002, 100µm in z003 en 200µm in z004)	11
Figuur 7 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Oosterweel.....	13
Figuur 8 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Kruikebe	13
Figuur 9 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002, Van Rijn) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Oosterweel	14
Figuur 10 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002, Van Rijn) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Kruikebe	15
Figuur 11 – Vergelijking sedimenttransport Van Rijn (z028, Van Rijn) en Engelund-Hansen (z027) in Oosterweel	16
Figuur 12 – Vergelijking sedimenttransport Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Kruikebe	16
Figuur 13 – Initieel opgelegde dikte cohesieve sliblaag	18
Figuur 14 – Initieel opgelegde dikte laag fijn zand	19
Figuur 15 – Initieel opgelegde dikte laag zand	19
Figuur 16 – Initieel opgelegde dikte laag grof zand.....	20
Figuur 17 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Oosterweel.....	21
Figuur 18 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Kruikebe	21
Figuur 19 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Oosterweel.....	22
Figuur 20 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Kruikebe	22
Figuur 21 – Effect van aanpassing van de korrelgrootte op totale sedimenttransport per getijfase	23
Figuur 22 – Effect van aanpassing van de saliniteit op totale sedimenttransport per getijfase	23
Figuur 23 – Effect van aanpassing van de sedimenttransportformule op totale sedimenttransport per getijfase	23
Figuur 24 – Effect van aanpassing van dikte van de erodeerbare laag en het aantal sedimentfracties op totale sedimenttransport per getijfase.....	24
Figuur 25 – Vergelijking waterstand Liefkenshoek tijdens meting (14/05/2014) en waterstand model op 5/10/2009.....	26

Figuur 26– Vergelijking waterstand Liefkenshoek tijdens meting (14/05/2014) en waterstand model op 5/10/2009.....	26
Figuur 27 – Vergelijking waterstand Kruibeke tijdens meting (02/07/2014) en waterstand model op 3/10/2009	27
Figuur 28 – Vergelijking stroomsnelheid in Oosterweel tussen model en meting	28
Figuur 29 – Vergelijking stroomsnelheid in Kruibeke tussen model en meting.....	28
Figuur 30 – Vergelijking sedimenttransport bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Oosterweel	30
Figuur 31 – Vergelijking sedimenttransport bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Kruibeke	31
Figuur 32 – Gemiddelde jaarlijkse erosie/sedimentatie patronen berekend voor de periode 2009-2014 (links) en consistentiekaart voor dezelfde periode (rechts)	32

LIJST VAN DE FIGUREN IN BIJLAGE

Figuur A 1 – Vergelijking gemodelleerde en gemeten sedimenttransport in Liefkenshoek.....	B1
Figuur A 2 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Liefkenshoek	B1
Figuur A 3 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Liefkenshoek..	B2
Figuur A 4 – Vergelijking sedimenttransport Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Liefkenshoek	B2
Figuur A 5 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Liefkenshoek	B3
Figuur A 6 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Liefkenshoek	B3
Figuur A 7 – Vergelijking sedimenttransport bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Liefkenshoek ..	B4
Figuur A 8 – Vergelijking stroomsnelheid in Liefkenshoek tussen model en meting.....	B4
Figuur A 9 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid voor basisrun (z002)en run saliniteit (z006) in Liefkenshoek	B5
Figuur A 10 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Oosterweel	B5
Figuur A 11 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Kruibeke	B6
Figuur A 12 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002)en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Liefkenshoek.....	B6
Figuur A 13 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002)en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Oosterweel.....	B7
Figuur A 14 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002)en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Kruibeke	B7
Figuur A 15 - Vergelijking stroomsnelheid Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Liefkenshoek	B8
Figuur A 16 – Vergelijking stroomsnelheid Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Oosterweel.....	B8
Figuur A 17 - Vergelijking stroomsnelheid Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Kruibeke	B9
Figuur A 18 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Liefkenshoek	B9
Figuur A 19 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Oosterweel.....	B10
Figuur A 20 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Kruibeke	B10
Figuur A 21 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Liefkenshoek	B11
Figuur A 22 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Oosterweel.....	B11
Figuur A 23 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Kruibeke	B12
Figuur A 24 – Vergelijking stroomsnelheid bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Liefkenshoek ...	B12
Figuur A 25 – Vergelijking stroomsnelheid bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Oosterweel.....	B13
Figuur A 26 – Vergelijking stroomsnelheid bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Kruibeke	B13
Figuur A 27 – Erosie/sedimentatie per jaar voor de periode 2009-2014 (deel 1 en 2).....	B14
Figuur A 28 – Erosie/sedimentatie per jaar voor de periode 2009-2014 (deel 3 en 4).....	B15

Figuur A 29 – Consistentie kaart voor de periode 2009 – 2014 (deel 1 en 2).....	B16
Figuur A 30 – Consistentie kaart voor de periode 2009 – 2014 (deel 3 en 4).....	B17
Figuur A 31 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 1..	B18
Figuur A 32 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 2..	B19
Figuur A 33 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 3..	B20
Figuur A 34 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 4..	B21
Figuur A 35 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 1	B22
Figuur A 36 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 2	B23
Figuur A 37 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 3	B24
Figuur A 38 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 4	B25
Figuur A 39 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 1	B26
Figuur A 40 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 2	B27
Figuur A 41 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 3	B28
Figuur A 42 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 4	B29
Figuur A 43 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 1	B30
Figuur A 44 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 2	B31
Figuur A 45 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 3	B32
Figuur A 46 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 4	B33
Figuur A 47 – Vergelijking erosie/sedimentatie na doorlooptijd van 1 jaar (links), 3 jaar (midden) en 5 jaar (rechts).....	B34
Figuur A 48 – Vergelijking jaarlijkse erosie/sedimentatie voor het eerste jaar van run zm123 (links), van jaar 2 tot 3 (midden) en van jaar 4 tot 5 (rechts).....	B35

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 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 afwaartse stuk van het Vlaamse deel van het estuarium, de Beneden-Zeeschelde, lopen de huidige onderhoudsvergunningen nog tot december 2017. Momenteel wordt zanderige 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 o.a. zandwinstrategie, aanleg Oosterweeltunnel en risico 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 zanderige specie. De scenarioberekeningen worden beschreven in (Vos *et al.*, 2016). Deze zullen worden gebruikt om uiteindelijk tot de optimale invulling te komen van de toekomstige stortstrategie in de Beneden-Zeeschelde. De strategie voor het terugstorten van slibrijke specie wordt in een ander rapport beschreven (Coen *et al.*, 2016).

1.2 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:

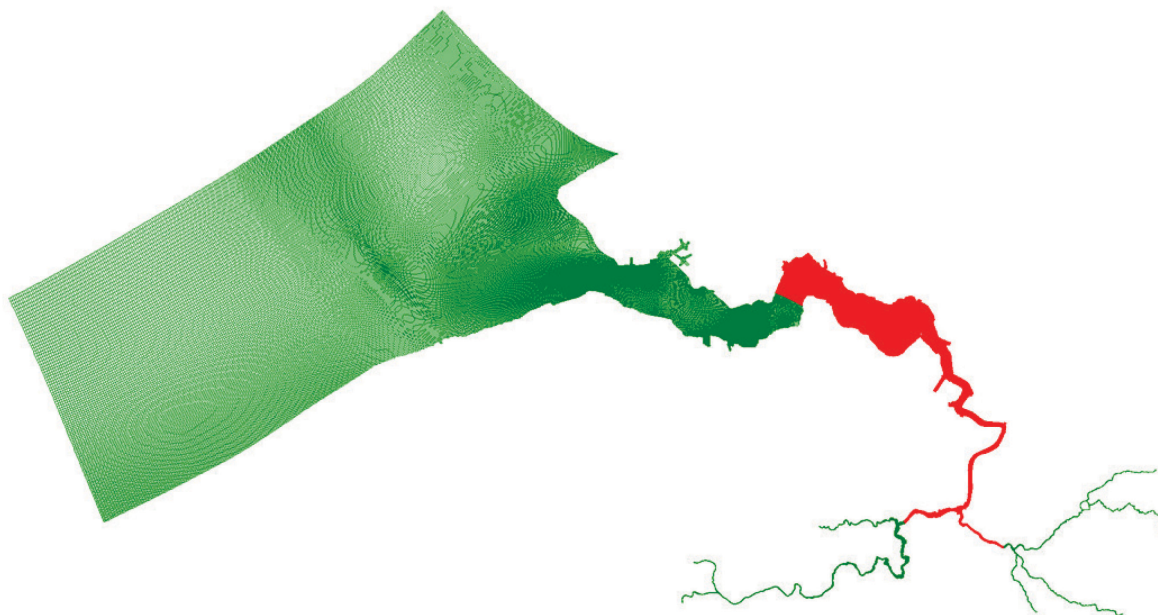
- DR 1. Opzet en validatie slibmodel
- DR 2. Opzet en validatie zandmodel
- DR 3. Slibscenario's.
- DR 4. Zandscenario's
- DR 5. Wijziging sedimentatie ter hoogte van baggerlocaties en slikken en schorren
- DR 6. Effecten op primaire productie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib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

2.1 NEVLAmodel

Het numeriek 2D-model gebruikt in deze studie is geknipt uit het zogenaamde NEVLA-model. Het NEVLA-model is een 3D-hydrodynamisch model ontwikkeld met SIMONA (Verheyen *et al.*, 2012 en Maximova *et al.*, 2013). Dit model omvat het volledige Schelde-estuarium: het Belgische 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 – Rekenrooster van het Delft3D NEVLAmodel (groen) en het studiemodel (rood)

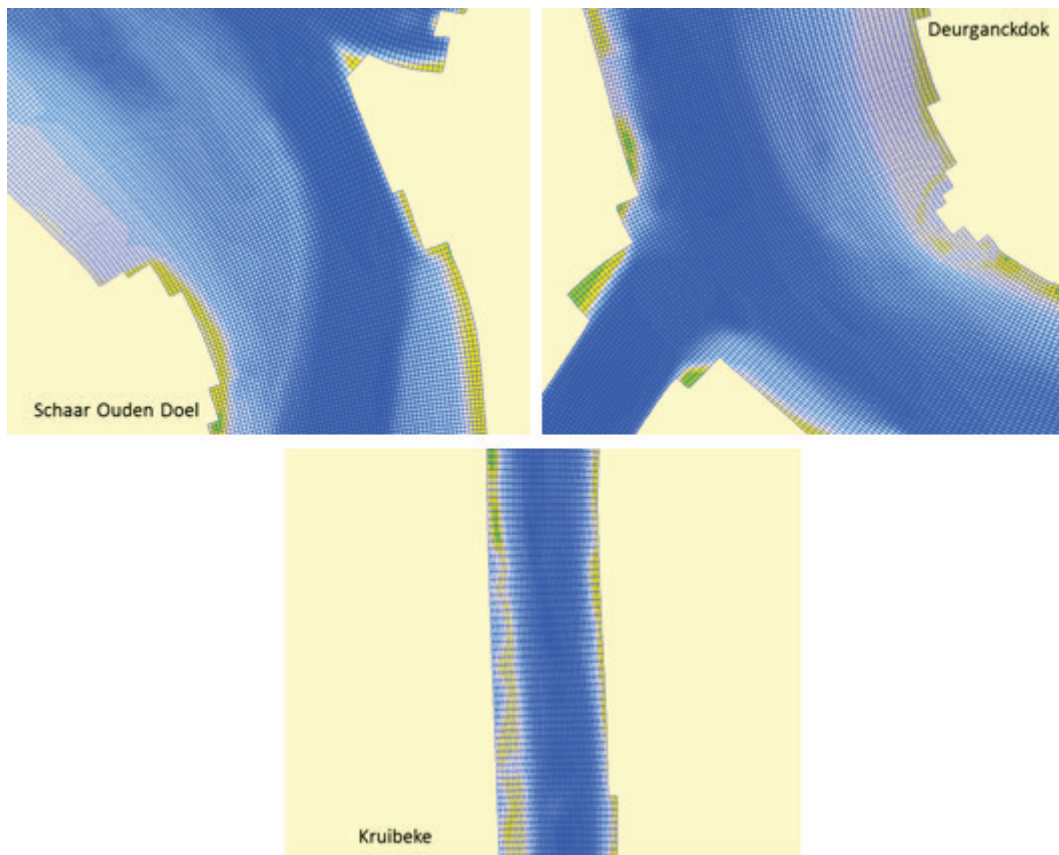
2.2 Basismodel

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 3).

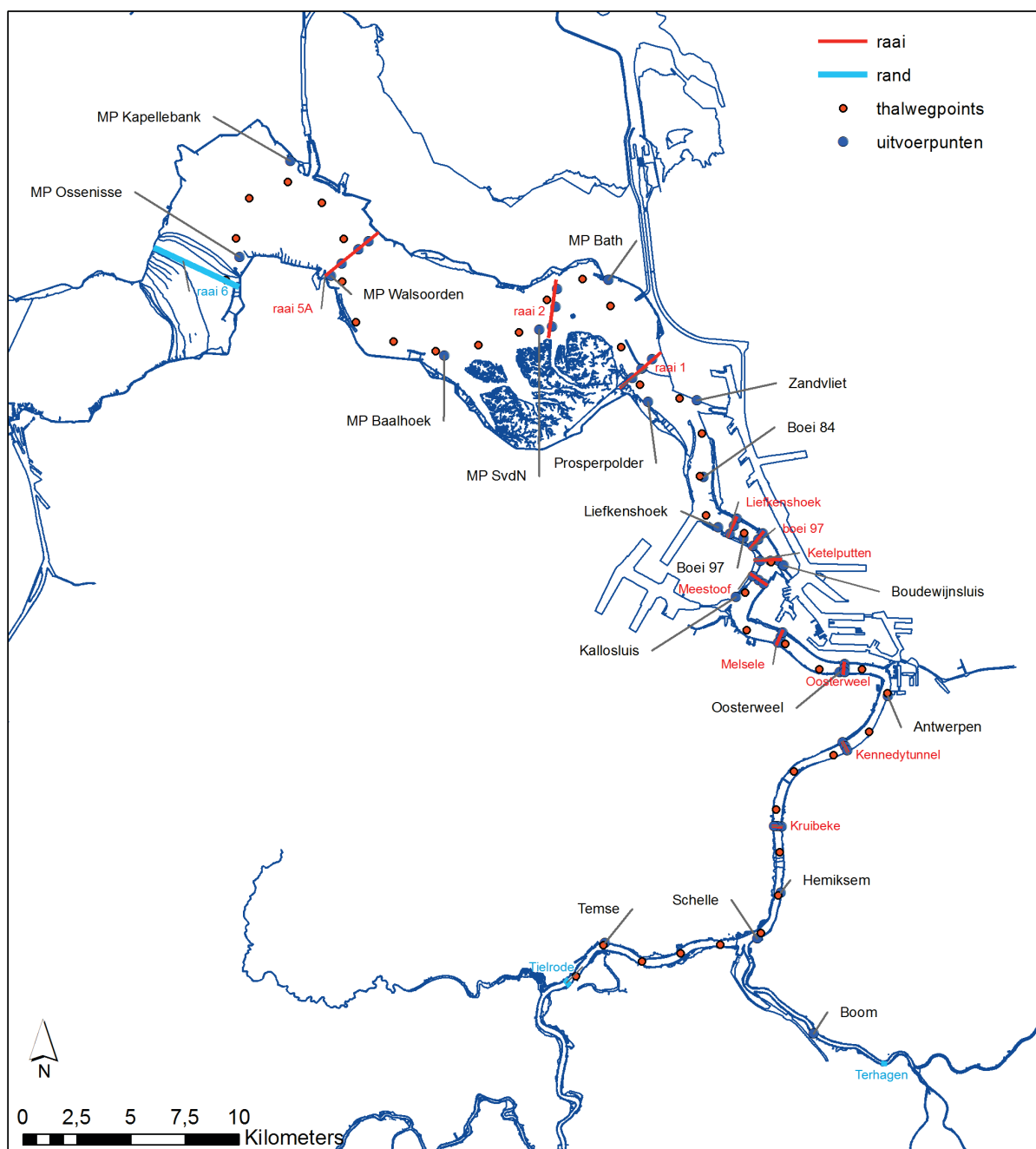
2.2.1 Rekenrooster

Het rooster 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, toegangseu len sluis 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 bedraagt circa 26 m x 18 m (lengte x breedte). Ter hoogte van het Deurganckdok bedraagt een grootte van een gridcel circa 16 m x 18 m, en ter hoogte van Kruibeke circa 30 m x 14 m. (zie Figuur 2).



Figuur 2 – Detail van het rekenrooster ter hoogte van Schaar Ouden Doel, Deurganckdok en Kruibeke



Figuur 3 – Situering studiegebied in model, met afwaartse rand t.h.v. Raai 6 en opwaartse randen te Tielrode en Terhagen

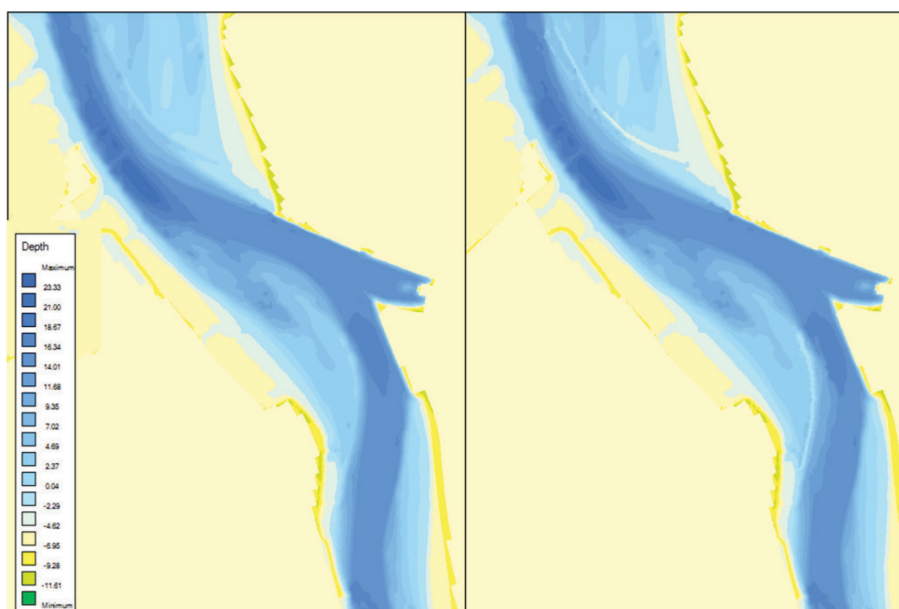
2.2.2 Topo-bathymetrie

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 om de totale bestandsgrootte van het samengestelde bathymetrische grid werkbaar te houden. Aangezien de gridcellen van het model groter zijn dan 5x5 m (zie §3.2.1) vormt dit geen probleem voor het aanmaken van de modelbathymetrie.

De bathymetrie van het Deurganckdok is bepaald op basis van de waarde van de aanlegdiepte van het dok: TAW -19 m in het midden van het dok en TAW -17 m ter hoogte van de commerciële ligplaatsen.

Aan de afwaartse rand van het model werd een waterstandsrandvoorwaarde opgelegd op een doorsnede met meerdere geulen. Het model vertoonde hydrodynamisch numerieke instabiliteit ter hoogte van deze afwaartse rand. De bathymetrie aan de afwaartse rand van het model werd kunstmatig verdiept om de stabiliteit van het model te verbeteren. Ook een reductie van de tijdstap werd toegepast om de instabiliteit te verhelpen.

Daarnaast werden ter hoogte van de leidam van de Ballastplaat en strekdam aan Ouden Doel een detailbathymetrie van de dammen ingevoerd en manueel nagekeken of de top van de dammen correct weergegeven werd in de bathymetrie (de top werd eveneens 2 cellen breed gemaakt). Op deze manier worden instabiliteiten voorkomen rond deze dammen. Figuur 4 geeft de topobathymetrie voor en na deze ingreep weer. Deze bathymetrie werd pas toegepast vanaf run z020 (zie verder).



Figuur 4 – Topo-bathymetrie van lei- en strekdam voor (links) en na (rechts) manuele aanpassing

2.2.3 Uitvoerpunten

Figuur 3 geeft de gebruikte uitvoerpunten en raaien weer die in het model gedefinieerd werden. Hierbij werd gebruik gemaakt van meetstations/debietraaien waar continu gemeten wordt, en die dus nuttig kunnen zijn voor validatie van het model. Daarnaast werden in het interessegebied (Ketelputten) een aantal extra raaien gedefinieerd. Op elke raai werden 3 uitvoerpunten gedefinieerd, 1 op de thalweg en 2 aan weerszijden, in het ondiepere deel van de geul. Daarnaast werd op de thalweg om de 2 km eveneens een uitvoerpunt bepaald.

2.2.4 Randvoorwaarden

De opgelegde tijdreeksen aan de op- en afwaartse randen van het model werden gegenereerd op basis van een simulatie met het NEVLA-model, die gebruikt werd binnen het onderzoek Habitatmapping Zeeschelde (Maximova *et al.* 2013). De simulatieperiode van dit model loopt van 24/09/2009 tot 24/10/2009. Het model werd voor deze periode gevalideerd binnen het onderzoek Habitatmapping Zeeschelde.

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 debieten opgelegd, afkomstig uit het NEVLA-model.

2.2.5 Tijdstap

Voor de basisberekening werd gebruik gemaakt van een tijdstap van 0,125 min (~7,5 s) – de originele tijdstap die ook gebruikt werd in het moedermodel. In het interessegebied komt het Courantgetal met deze tijdstap rond 10 à 15.

2.2.6 Modelparameters

Een overzicht van de toegepaste modelparameters voor het basismodel wordt gegeven in Tabel 1.

Tabel 1 – Overzicht modelparameters

Parameter	Waarde
Tijdstap	7,5 s
Secondary flow	Off
Initiële waterstand	TAW +1,5 m
Horizontal eddy viscosity	1 m ² /s
HLES	Off
Aantal (vertical) lagen	1 (2D model)
Versie Delft3D Flow	5.00.00.1234 (Linux)
Zout transport	Off
Wind	Off
Formule Ruwheid	Manning
Waarde bodemruwheid	0,025 s/m ^{1/3}

2.2.7 Simulatieperiode

Voor de gevoeligheidsanalyse en de validatie van het sedimenttransport werd een simulatieperiode van één volledige springtij-doodtij-cyclus gebruikt, voor de periode van 24/09/2009 tot 08/10/2009. Voor de morfologische runs wordt een morfologisch getij doorgerekend voor een periode van 3 dagen (zie verder).

2.3 Sedimenttransportmodellering

2.3.1 Sedimentfracties

Aangezien de Beneden-Zeeschelde wordt gekarakteriseerd door sedimenttransport van zowel slib als zand, werd oorspronkelijk de keuze gemaakt om de scenario's voor het terugstorten van zand respectievelijk slib 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, door een aantal deskundigen (o.a. Commissie Monitoring Westerschelde) werd het belang aangehaald van beide fracties en de onderlinge interactie. Daarom werd binnen het gevoeligheidsonderzoek eveneens een model opgezet waarbij beide fracties gezamenlijk gemodelleerd werden.

In het model dient 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/m³ genomen (specifieke dichtheid = 2650 kg/m³ en porositeit 40%) en wordt een d₅₀ van 150 µm gekozen. Deze keuze is gebaseerd op korrelgroottes van het sediment van de bodemstalen bemonsterd tijdens een reeks 13u-metingen in de Zeeschelde (Plancke et al., 2014). De initiële concentratie van het zand in de waterkolom werd ruimtelijk constant gehouden en gelijk aan 0,05 kg/m³.

2.3.2 Randvoorwaarden

Aan de op- en afwaartse randen van het model wordt een constante sedimentconcentratie opgelegd, afgeleid op basis van metingen (Vandenbruwaene *et al.*, 2015) en gelijk aan 0,05 kg/m³. Daarnaast werd aan de randen een evenwichtsconcentratie opgelegd, wat ervoor zorgt dat aan de randen de sedimentconcentratie in evenwicht gehouden wordt met de lokale stromingskarakteristieken en er dus aan de rand quasi geen sedimentatie of erosie zal optreden.

2.3.3 Dikte bodemsedimentlaag

Voor de basisrun werd een bodemsedimentlaag met uniforme dikte van 5 m aangenomen. Binnen het gevoeligheidsonderzoek werd eveneens gewerkt met een variabele dikte van de bodemsedimentlaag.

3 MODELOPZET EN GEVOELIGHEIDSANALYSE

ZANDTRANSPORT

3.1 Beschikbare metingen

Vergeleken met bijvoorbeeld waterstandmetingen zijn sedimenttransportmetingen in het Schelde estuarium eerder schaars. Bovendien zijn, omwille van de beschikbare technieken, de geschatte transporten slechts beperkt nauwkeurig. Ten behoeve van de modelvalidatie werden in het voorjaar van 2014 een aantal stromings- en sedimenttransportmetingen uitgevoerd in de Zeeschelde (Plancke et al., 2014). Hierbij werd op 8 locaties zowel de stroomsnelheid als het zandtransport gemeten tijdens verschillende 13u-metingen. De datasets van de metingen in Liefkenshoek (14/05/2014), Oosterweel (16/05/2014) en Kruibeke (02/07/2014) zullen gebruikt worden ter validatie van dit model. Tijdens de meting in Liefkenshoek werd omwille van sterke wind bij vloed gemeten ter hoogte van linkeroever en bij eb ter hoogte van rechteroever. Aangezien voor deze meetlocatie dus twee kortere meetreeksen beschikbaar zijn, werd er tijdens het validatietraject minder belang gehecht aan deze dataset. Pro forma werden de resultaten voor Liefkenshoek opgenomen in de bijlage.

Bij deze metingen werden de stroomsnelheden gemeten m.b.v. enerzijds de Aanderaa RCM-9 en anderzijds met een ADCP (RDI Rio Grande). Beide zijn akoestische snelheidsmeters. De Aanderaa meet op één punt op de verticaal. De ADCP meet het verticale profiel van net boven de bodem tot net onder het wateroppervlak. De ADCP wordt bovendien gemonteerd onder een bijboot die continu dezelfde raai vaart om op die manier de stroming over de volledige dwarssectie van de rivier te monitoren.

Voor het meten van het sedimenttransport, en dan voornamelijk het zandtransport, werd in dit onderzoek gebruik gemaakt van de Delftse fles. Binnen deze studie werd zowel een opstelling op frame (hoogte 20 cm en 40 cm boven de bodem) als de opgehangen opstelling (hoogte 130 cm en 230 cm boven de bodem) gebruikt.

Daarnaast werd tijdens de meetcampagnes eveneens een bodemmonster genomen. Deze monsters werden later aan een granulometrische analyse onderworpen.

In Bijlage C worden de resultaten (waterstand, stroomsnelheid, sedimenttransport en korrelgrootteverdeling) van deze meetcampagnes per meetlocatie weergegeven.

De d50 van het bodemsediment bedraagt 52 µm in Liefkenshoek, 139 µm in Oosterweel en 145 µm in Kruibeke. Hierbij dient men echter op te merken dat het monster bij Liefkenshoek waarschijnlijk niet representatief mag worden beschouwd, aangezien de korrelgrootte van het nabij-bodem transport groter is.

Aan het begin van de eb treedt typisch een relatief hoog transport op dat geleidelijk afneemt tot op het moment van kentering laagwater; vervolgens neemt het transport terug toe om ongeveer 1 uur voor hoogwater een piek te bereiken; Kruibeke vertoont tevens een bijkomende piek aan het begin van de vloed.

3.2 Gevoeligheidsonderzoek

Om inzicht te krijgen in de bepalende parameters inzake het sedimenttransport in het numerieke model, werd een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd. Hierbij werd telkens één parameter gevarieerd. De effecten van deze ingrepen werden geanalyseerd in de uitvoerpunten van Kruibeke, Liefkenshoek en Oosterweel, aangezien hiervoor de metingen beschikbaar waren. Er werd hier telkens gewerkt met de centraal gelegen uitvoerpunten op de thalweg. Hierbij werd gebruik gemaakt van een getij dat vergelijkbaar was met dat van de metingen (zie §3.3). Er is enerzijds gekeken naar de stroomsnelheid en anderzijds naar het sedimenttransport. In Tabel 2 worden de initiële modelparameters weergegeven, die gebruikt werden in de basisrun (run z002). Deze parameters werden in de volgende runs gevarieerd.

Tabel 2 – Initiële waarden modelparameters

Parameter	Waarde
Tijdstap	7,5 s
Korrelgrootte	150 μm
Sedimentconcentratie afwaartse rand	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Terhagen (kg/m^3)	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Tielrode (kg/m^3)	0,05
Initiële sedimentconcentratie (kg/m^3)	0,1 ²
Initiële dikte sedimentbodemaag (m)	5
Specifieke dichtheid (kg/m^3)	2650
Droge dichtheid (kg/m^3)	1600

3.2.1 Overzicht uitgevoerde gevoeligheidsruns

Tabel 3 geeft een overzicht van de gevoeligheidsruns die in de volgende paragrafen zullen besproken worden. Er wordt gekeken naar het effect van korrelgrootte, de gebruikte sedimenttransportformule, het effect van instellingen zoals secondary flow en saliniteit en het effect van het gebruik van meerdere fracties. De blauwe markering geeft voor elke run aan waar het verschil ligt met de basisrun z002.

² Aangezien het interessegebied afwaarts van de samenvloeiing van Boven-Zeeschelde en Rupel ligt, die beide 0,05 kg/m^3 aanbrengen, werd een initiële sedimentconcentratie van 0,1 kg/m^3 in het volledige gebied opgelegd. Echter het effect van initiële sedimentconcentratie was zeer beperkt op de simulatie.

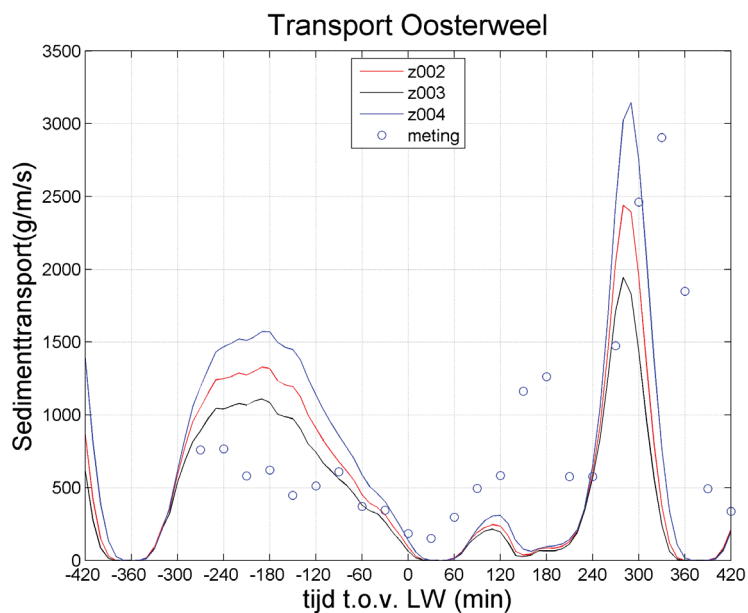
Tabel 3 – Overzicht van de uitgevoerde gevoeligheidsruns

Run	Korrel-grootte	Sediment-transportformule	Tijdstap	Secondary flow	Saliniteit	Morfologie	# fracties	Dikte sedimentlaag	Duur sim.
z002	150µm	Van Rijn (1993)	0,125	nee	nee	nee	1	5 m	2 weken
z003	200µm	Van Rijn (1993)	0,125	nee	nee	nee	1	5 m	2 weken
z004	100µm	Van Rijn (1993)	0,125	nee	nee	nee	1	5 m	2 weken
z006	150µm	Van Rijn (1993)	0,125	nee	ja	nee	1	5 m	2 weken
z016	150µm	Soulsby/Van Rijn	0,125	nee	nee	nee	1	5 m	2 weken
z017	100, 150, 300 µm	Soulsby/Van Rijn	0,125	nee	nee	nee	3 zandfracties + slib	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	2 weken
z020	100, 150, 300 µm	Van Rijn (1993)	0,025	nee	nee	ja	3 zandfracties + slib	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	2 weken
z029	150 µm	Engelund Hansen	0,125	nee	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	2 weken
z025	150 µm	Engelund Hansen	0,05	ja	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	3 dagen. (morf. getij)
z027	150 µm	Van Rijn (1993)	0,05	nee	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	3 dagen. (morf. getij)
z028	150 µm	Engelund Hansen	0,05	nee	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	3 dagen. (morf. getij)

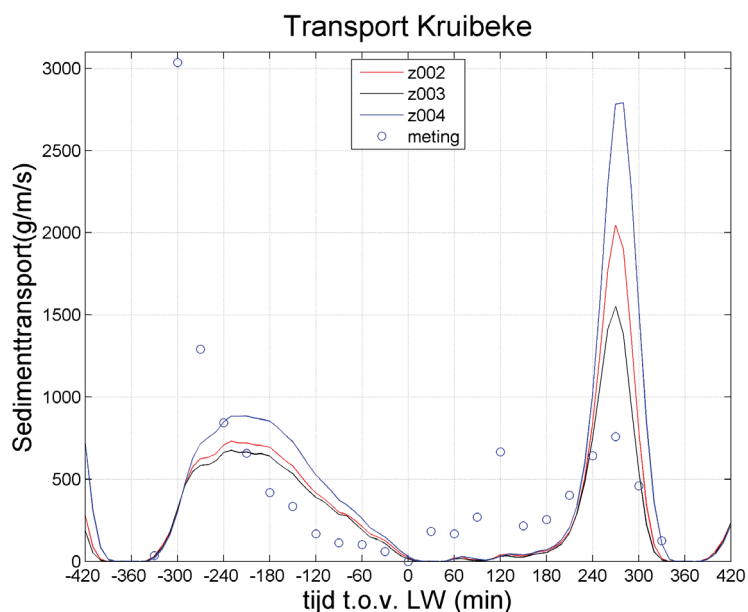
3.2.2 Korrelgrootte

Als korrelgrootte voor de basisrun (run z002) werd een korreldiameter van 150 μm gekozen, daarnaast werd eveneens een run met korrelgrootte 200 μm (run z004) en 100 μm (run z003) doorgerekend.

Rekening houdend met de gemeten korrelgroottes tijdens de 13u-metingen komt een korrelgrootte van 130 μm ongeveer overeen met de gemiddelde korrelgrootte van het bodemmateriaal (Plancke et al., 2014). Uit de metingen die werden uitgevoerd voor het opstellen van de lithologische kaart van de Beneden-Zeeschelde (IMDC & VUB, 2010) werd een d50 van 154 μm afgeleid voor de zandfractie.



Figuur 5 – Vergelijking gemodelleerde en gemeten sedimenttransport Oosterweel voor verschillende korreldiameters (150 μm in z002, 100 μm in z003 en 200 μm in z004)



Figuur 6 – Vergelijking gemodelleerde en gemeten sedimenttransport Kruibeke voor verschillende korreldiameters (150 μm in z002, 100 μm in z003 en 200 μm in z004)

Wat het gemodelleerde sedimenttransport betreft blijkt logischerwijze dat de kleinere korrelgroottes een groter transport geven. Het relatieve verloop over de getijcyclus is gelijkaardig bij metingen en modellering. De grootste verschillen manifesteren zich bij de maximale transporten. Bij Liefkenshoek (Figuur A 1) geeft een toename van 50 μm in korrelgrootte aanleiding tot een afname van het transport tot 150 g/m/s tijdens de pieksnelheden bij eb. Bij vloed is er een afname van ca. 80 g/m/s. Voor Oosterweel (Figuur 5) is het effect groter, met name, ca. 250 g/m/s bij eb en ca. 500 g/m/s bij vloed. In Kruibeke (Figuur 6) levert een verhoging van de korrelgrootte van 150 naar 200 μm bij eb een daling op van het transport met een 50 g/m/s en bij vloed een daling van 500 g/m/s. Bij een verlaging van de korrelgrootte naar 100 μm stijgt het transport bij de ebpiek met ca. 150 g/m/s en bij de vloedpiek met ca. 750 g/m/s.

3.2.3 Secondary flow

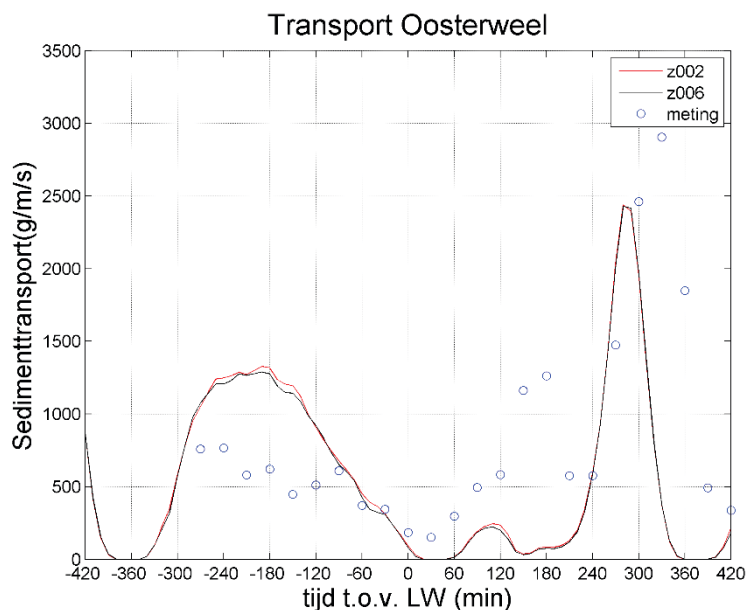
Het effect van het gebruik van secondary flow werd eveneens bekeken door vergelijking van runs z028 en z025, waarbij bij run z025 wel secondary flow gebruikt wordt en bij run z028 niet. Deze runs werden doorgerekend voor een morfologisch getij over 3 dagen. Run z025 was echter hydrodynamisch instabiel en er werd dus voor geselecteerd om secondary flow niet mee te nemen in de uiteindelijke modelinstellingen.

3.2.4 Saliniteit

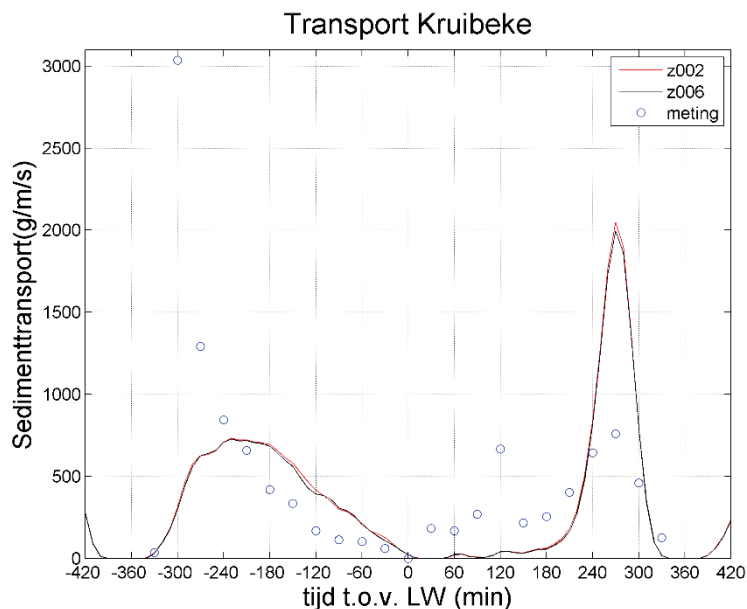
Bij run z006 werd het saliniteitsveld uit NEVLA gebruikt. Figuur 7 en Figuur 8 geven voor respectievelijk Oosterweel en Kruibeke het gemeten sedimenttransport en het gemodelleerde sedimenttransport weer voor de basisrun (z002) en de saliniteitsrun (z006). Figuur A 9 geeft hetzelfde weer voor Liefkenshoek.

Wat het sedimenttransport betreft is er weinig verschil zichtbaar tussen de twee runs, enkel voor Liefkenshoek is er t.o.v. run z002 een kleine verlaging van het transport bij eb.

Horizontale saliniteitsgradiënten kunnen een effect hebben op de estuariene recirculatie en op de getij-asymmetrie. Hierdoor wordt het theoretische logaritmische snelheidsprofiel verstoord. Omdat hier een dieptegemiddeld model gebruikt wordt zullen deze effecten niet gerepresenteerd worden door het model en verwacht men geen of nauwelijks effect op het zandtransport.



Figuur 7 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Oosterweel



Figuur 8 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Kruibeke

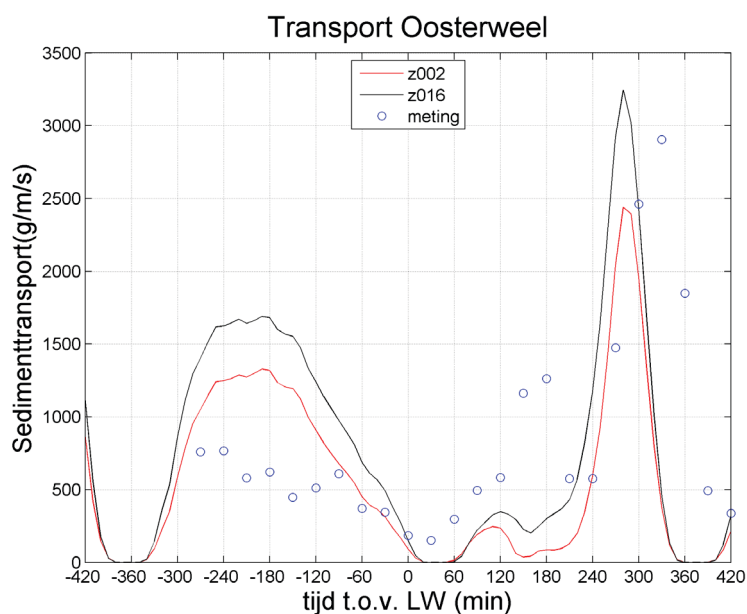
3.2.5 Sedimenttransportformule

Bij run z016 werd de sedimenttransportformule van Soulsby/Van Rijn gebruikt, met als parameters de waarden die aangegeven werden in het rapport van Van Rijn et al. (2003) over het modelleren van zandtransport (zie Tabel 4). Bij vergelijking van de gebruikte waarde voor de parameter FACD90 met de berekende waarde op basis van de uitgevoerde metingen blijkt dat de werkelijke waarde iets hoger te liggen (1,5 à 1,7). De resultaten van deze run werden vergeleken met de resultaten van run z002, waar de formule van Van Rijn (default in Delft3D) gebruikt werd.

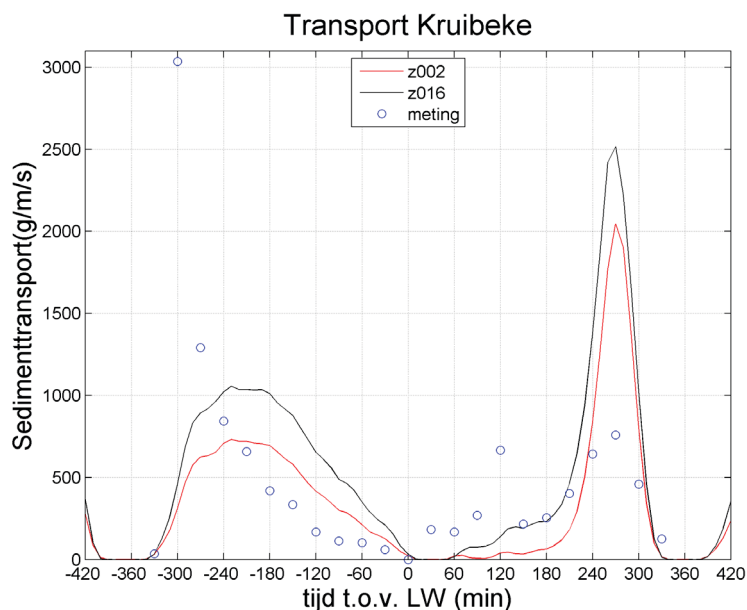
Tabel 4 – gebruikte parameters binnen de formule Soulsby-Van Rijn (Bron: Van Rijn et al., 2003)

Parameter	Value
ACAL (calibration coefficient)	1 (default)
FACD90 (ratio of d50 and d90)	1.3
Z0 (roughness height)	0.01 m

Het sedimenttransport wordt hoger ingeschat door de formule van Soulsby/Van Rijn dan door de default formule van Van Rijn die in Delft3D gebruikt wordt. In Liefkenshoek (Figuur A 3) stijgt het sedimenttransport bij maximum eb met ca. 300 g/m/s, bij maximum vloed met ca. 600 g/m/s. Voor Oosterweel (Figuur 9) en Kruikeke (Figuur 10) ligt deze stijging rond dezelfde grootte-orde, met name respectievelijk 400 g/m/s en 300 g/m/s bij maximum eb en 750 g/m/s en 500 g/m/s bij maximum vloed. Ook bij lagere snelheden zijn de verschillen groot.



Figuur 9 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002, Van Rijn) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Oosterweel



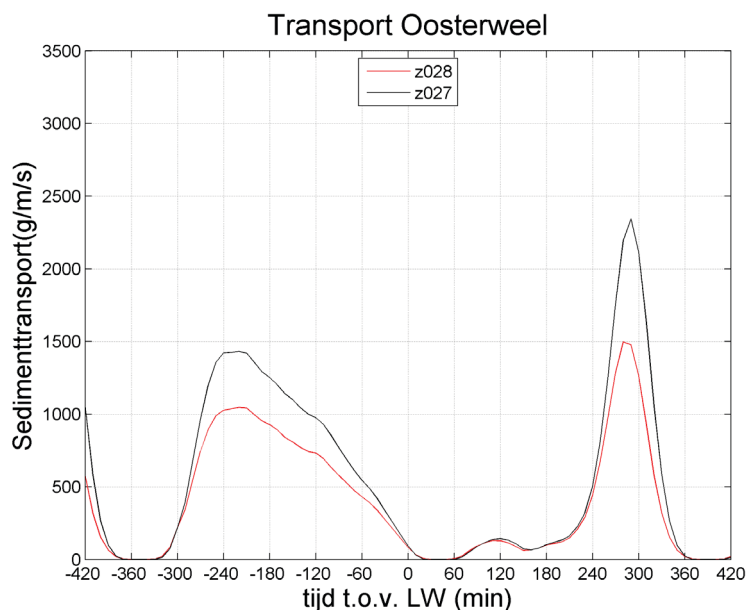
Figuur 10 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002, Van Rijn) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Kruibeke

Voor de vergelijking van de sedimenttransportformules van Van Rijn en Engelund-Hansen worden run z027 en run z028 gebruikt. De gebruikte parameters binnen de formule van Engelund-Hansen worden weergegeven in Tabel 5. Binnen Ceuppens et al. (2015) werd een aantal parameterinstellingen vergeleken, hieruit kwam de parameterinstelling hieronder weergegeven, als een van de meest realistische naar voren voor de Schelde (andere instellingen zorgden voor zeer lage transporten).

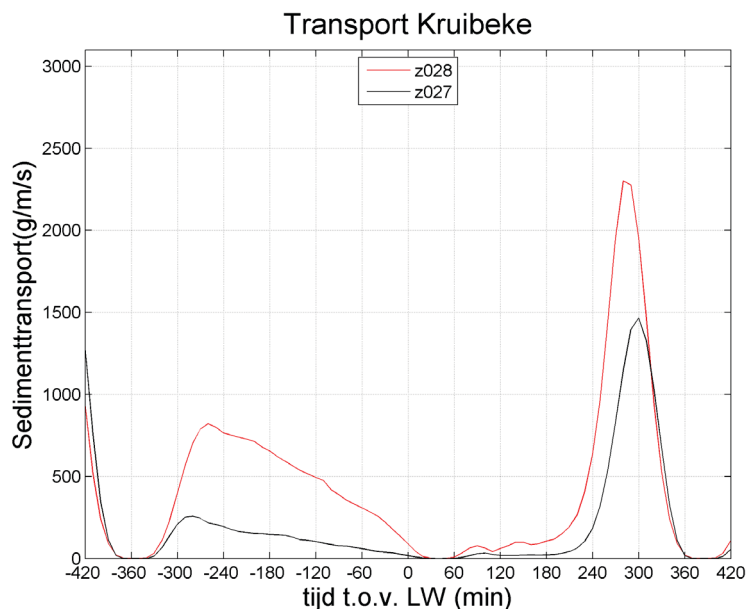
Tabel 5 – gebruikte parameters binnen de formule Engelund/Hansen

par 1: calibration coeff	1
par 2: bed roughness height [m]	0.000356

Het gemodelleerde sedimenttransport is bij gebruik van de formule van Engelund-Hansen hoger in Liefkenshoek (Figuur A 4) en in Oosterweel (Figuur 11) dan het gemodelleerde sedimenttransport bij gebruik van de formule van Van Rijn. In Kruibeke (Figuur 12) voorspelt Engelund-Hansen lagere transporten dan de formule van Van Rijn, ook zijn hier de verschillen groter bij eb dan bij vloed, terwijl dat voor Oosterweel omgekeerd is.



Figuur 11 – Vergelijking sedimenttransport Van Rijn (z028, Van Rijn) en Engelund-Hansen (z027) in Oosterweel



Figuur 12 – Vergelijking sedimenttransport Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Kruibeke

3.2.6 Dikte bodemsedimentlaag + aantal sedimentfracties

Naast een uniforme bodemsedimentlaag (zowel in dikte als in samenstelling) in de basisrun werd eveneens een bodemsedimentlaag aangemaakt die opgebouwd is uit verschillende sedimentfracties en een variabele dikte heeft (run z017). De dikte van de bodemsedimentlaag (initial sediment layer thickness at bed) is geïmplementeerd als grid. Dit grid werd berekend uit het verschil tussen de bathymetrie en de diepte van de harde laag.

De diepte van de harde lagen van de Beneden-Zeeschelde werd bepaald in het kader van de studie 'Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuv vergunningen terugstorten baggerspecie', in het kader van LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid, door IMDC (2013b) ism. Deltares, Svašek Hydraulics en ARCADIS Nederland. De diepte van de harde laag in de Beneden-Zeeschelde is bepaald op basis van

de basis-Quartaairkaart, 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 in 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 waarvoor door het Waterbouwkundig Laboratorium korrelanalyses werden uitgevoerd (IMDC & VUB, 2010, Vos et al. 2011). Naargelang de sedimentfracties die bij de modellering werden opgenomen werd voor elk van de lithologische klassen (van 1 t.e.m. 6) uit de lithologische kaart een gemiddeld percentage bepaald van elk van de sedimentfracties binnen deze klassen. Bij de zandmodellering werd er gewerkt met een slibfractie (cohesief) en 3 zandfracties (niet-cohesief, resp. 100, 150 en 300 µm) (zie Tabel 6).

Tabel 6 – Percentage slibfractie en zandfracties per lithologische klasse

Klasse	Naam	Percentage cohesief	Percentage fijn zand	Percentage zand	Percentage grof zand
1	Slib	71	24	4	1
2	Zandhoudend Slib	60	27	11	2
3	Slibhoudend Zand	28	30	31	11
4	Zand	8	18	48	26
5	Harde Bodem	8	18	48	26
6	Onbekend	39	14	16	31

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 uit gegaan 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 er aangenomen dat het onderscheid tussen reflectie op een harde laag en een sterk gecompacteerd sedimentlaag niet goed gemaakt werd binnen de lithologische kaart. 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 erodeerbare laag werd in 4 delen gesplitst op basis van de percentages van de voorkomende lithologische klassen. (bv. Bij lithologische klasse 4 bestaat 7,5 % van de erodeerbare dikte uit slib, 18,3% is fijn zand, 47,8% is zand en 26,4% grof zand).

Aangezien de sliblaag binnen Delft3D maximaal 10 m dik kan zijn werd nog een verdere aanpassing aangebracht. Indien er sprake is van slib (i.e. klasse 1 of 71% slib) moet 71% van de sedimentdikte rond de 10 m uit komen, zoniet zal de verhouding zand/slib niet juist zijn omdat Delft3D het teveel aan slib niet meeneemt. O.w.v. die reden wordt de maximale dikte van het totale sedimentpakket op 14 m gebracht (71% hiervan is ca. 10 m).

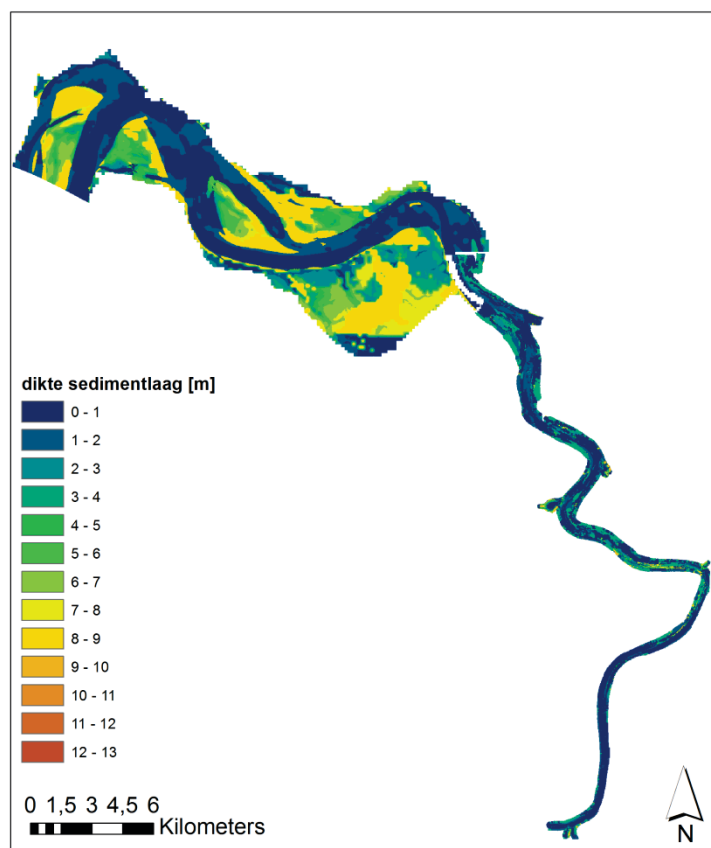
Voor de Westerschelde, waar er geen lithologische kaart aanwezig is, werden alle gebieden onder laagwater toegekend aan klasse 4, al de rest werd klasse 2. De Boven-Zeeschelde en de Rupel werden toegekend aan klasse 3. Figuur 13 geeft de dikte weer van de (cohesieve) sliblaag,

Figuur 14 t.e.m. Figuur 16 de dikte van resp. fijn zand, zand en grof zand.

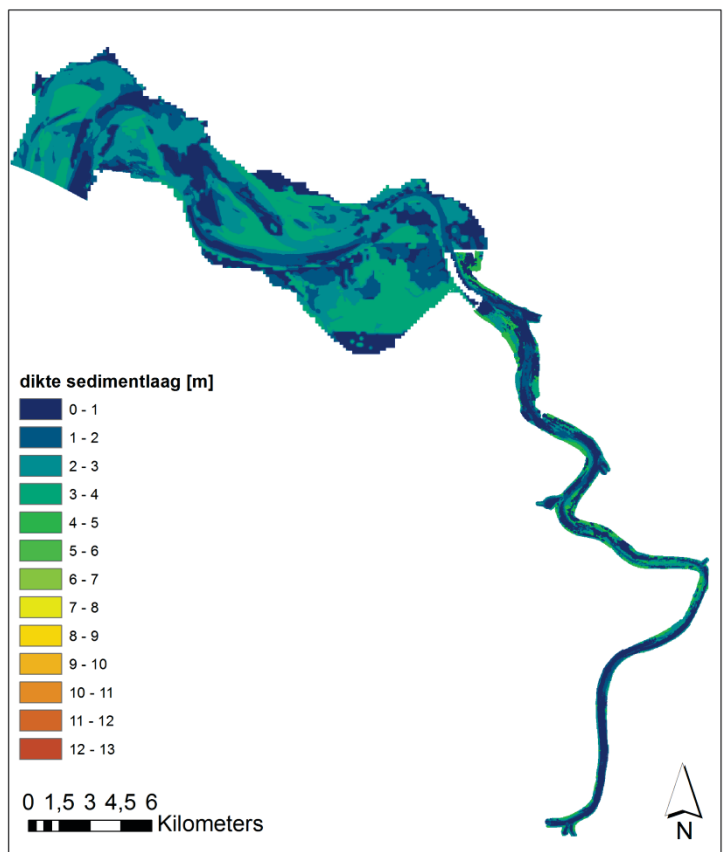
Tabel 7 geeft de instellingen weer van de parameters voor de verschillende sedimentfracties.

Tabel 7 – Gebruikte parameters voor de verschillende sedimentfracties in run 17

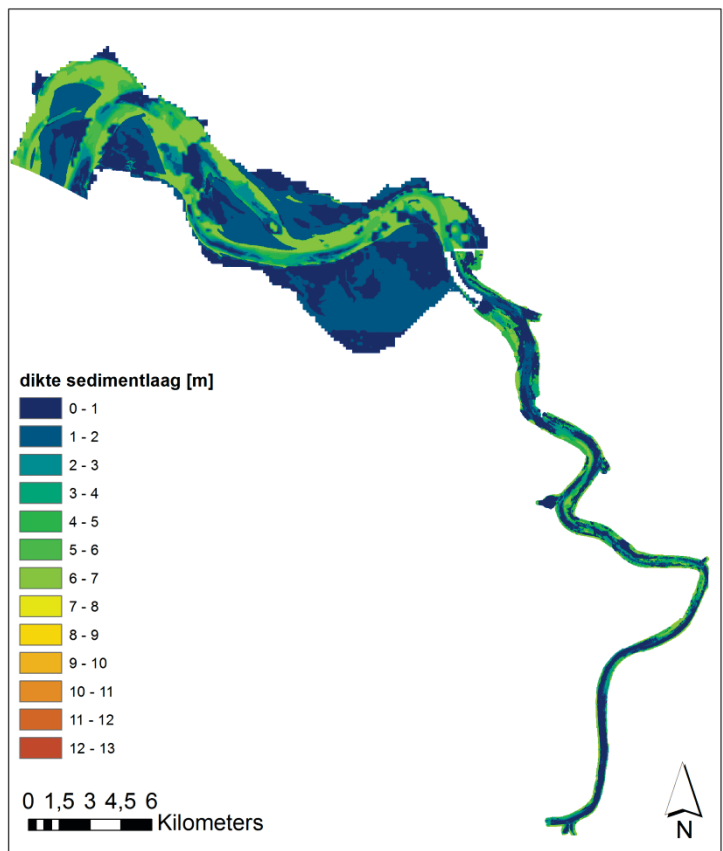
Parameter	Slib	Fijn zand	Zand	Grof zand
Specific density [kg/m ³]	2650	2650	2650	2650
Dry bed density [kg/m ³]	500	1600	1600	1600
D50 [μm]	/	100	150	300
Settling Velocity [mm/s]	0,25	/	/	/
Critical bed shear stress for sed.	1000	/	/	/
Critical bed shear stress for er. [N/m ²]	0,5	/	/	/
Erosion parameter [kg/m ² /s]	0,0001	/	/	/



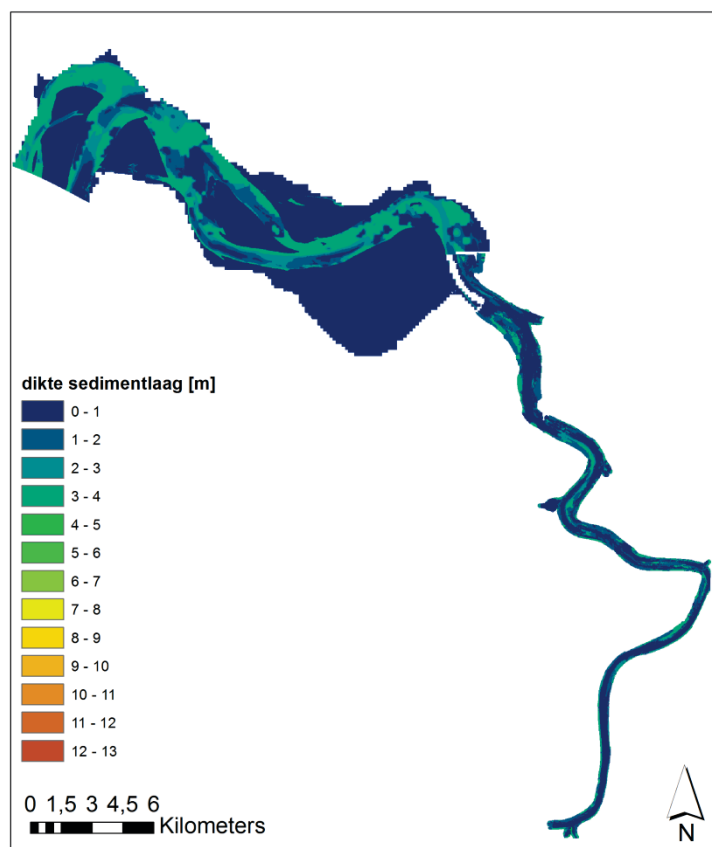
Figuur 13 – Initieel opgelegde dikte cohesieve sliblaag



Figuur 14 – Initieel opgelegde dikte laag fijn zand



Figuur 15 – Initieel opgelegde dikte laag zand

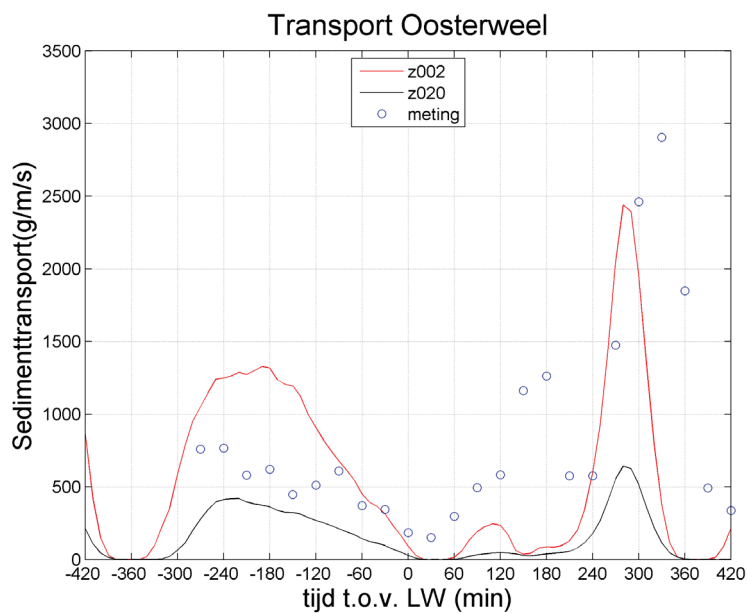


Figuur 16 – Initieel opgelegde dikte laag grof zand

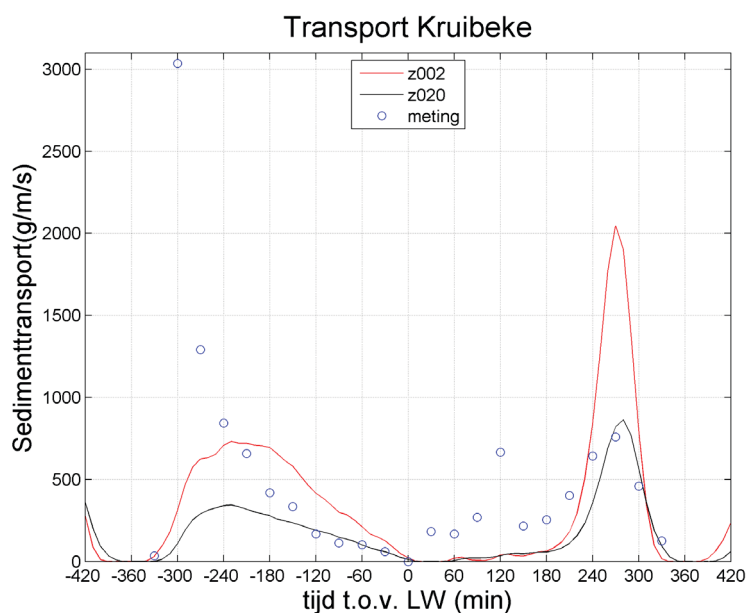
Er werd enerzijds een vergelijking gemaakt tussen run z002 en run z020, waar bij run z002 één enkele zandfractie gebruikt wordt en een initiële sedimentlaag van 5 m dik. Run z020 heeft een variabele dikte voor de initiële sedimentlaag zoals hoger beschreven en 4 sedimentfracties (1 slibfractie en 3 zandfracties van 100, 150 en 200 μm). De gebruikte sedimenttransportformule bij deze beide runs is de formule van Van Rijn. Wel werd bij run z020 de bathymetrie aangepast tijdens de run (morfologische run), en werd de tijdstap verkleind naar 0,025 min (=1,5 s), dit laatste omdat een tijdstap van 0,125 minuten niet stabiel bleek bij het uitvoeren van morfologische modelruns. Uit de vergelijking van de grootte van het sedimenttransport tijdens de eerste tijdstappen (voor de start van de morfologische aanpassingen aan de bathymetrie) blijkt dat hier reeds verschillen zijn en dat de tijdstap dus bepalend is.

Daarnaast werd eveneens een vergelijking gemaakt tussen run z016 en run z017. Bij run z016 werd met 1 zandfractie en een sedimentlaag van 5 m gewerkt, en bij run z017 met 4 sedimentfracties (zoals bij run z020) en een variabele dikte van de sedimentlaag. Hier was de gebruikte sedimenttransportformule echter deze van Soulsby/Van Rijn.

Wat betreft het sedimenttransport is er een grote daling van de transporten zichtbaar, zowel voor Liefkenshoek (Figuur A 5) als Oosterweel (Figuur 17) als Kruibeke (Figuur 18). Dit is mogelijk te wijten aan het feit dat er minder sediment beschikbaar is, aangezien op verschillende plaatsen de volledige sedimentlaag wordt weggeërodeerd

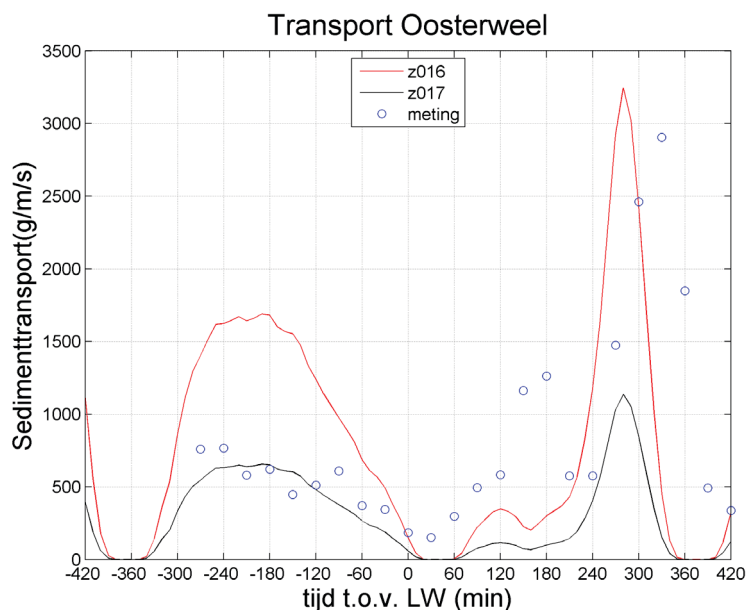


Figuur 17 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Oosterweel

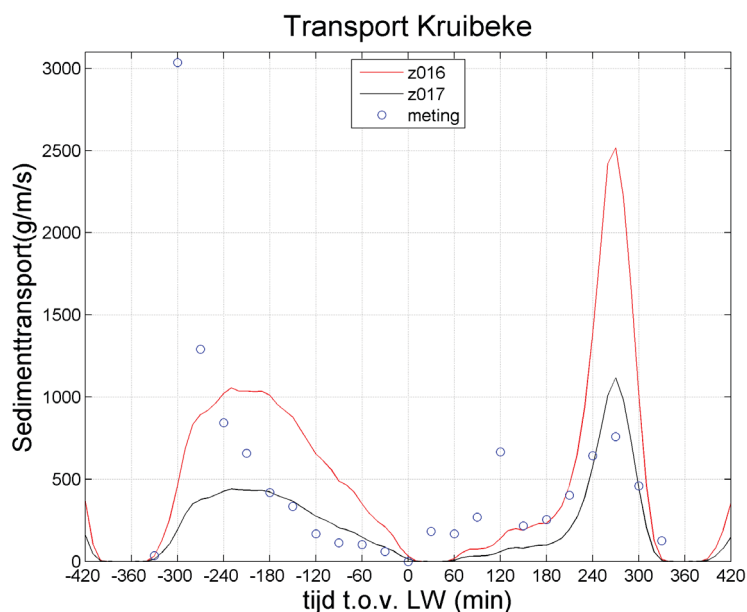


Figuur 18 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Kruibeke

Bij vergelijking van de gemodelleerde sedimenttransporten volgens run z016 en run z017 is ook, zowel bij Liefkenshoek, Oosterweel als Kruibeke (resp. Figuur A 6, Figuur 19 en Figuur 20) een duidelijke daling van het sedimenttransport zichtbaar bij het gebruik van meerdere sedimentfracties en een variabele initiële sedimentdikte.



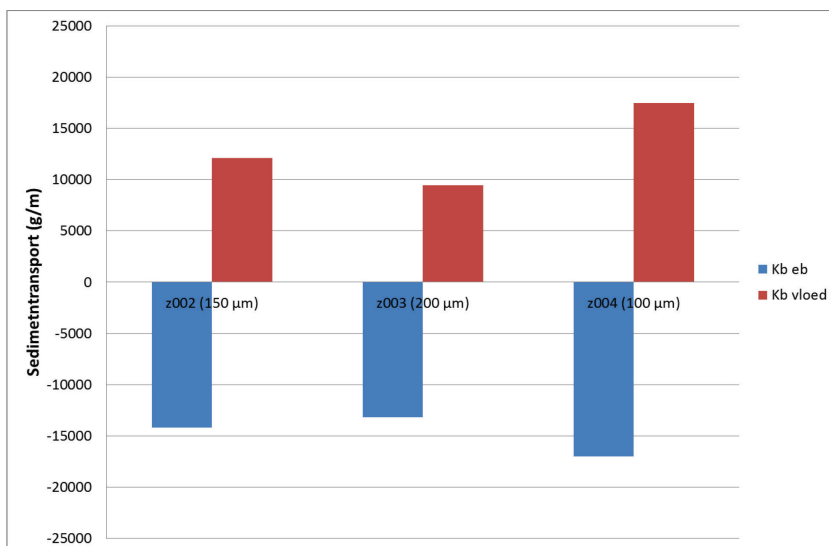
Figuur 19 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Oosterweel



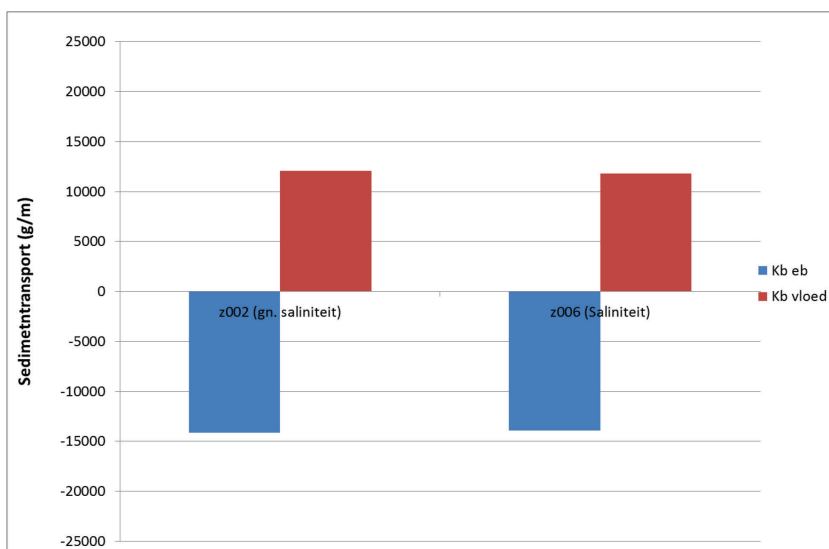
Figuur 20 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Kruibeke

3.3 Conclusie gevoeligheidsonderzoek

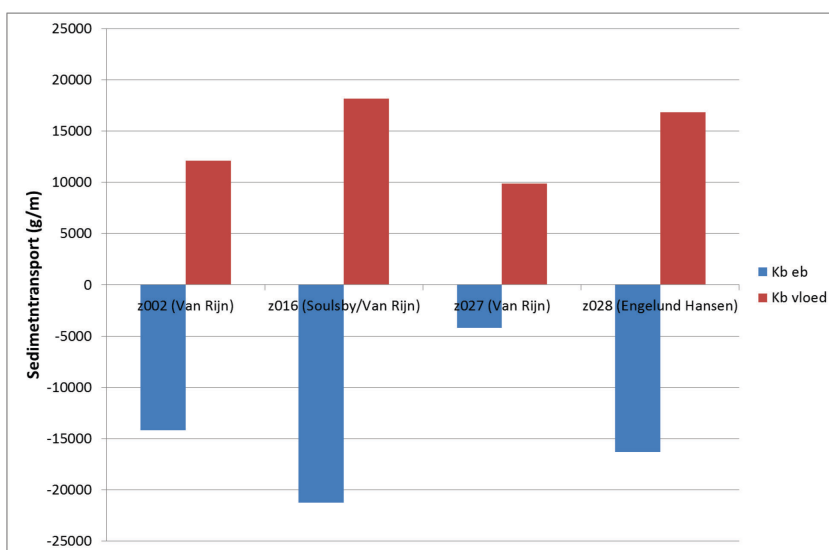
Een overzicht van het effect van de verschillende parameterinstellingen op het sedimenttransport wordt in wat volgt gegeven met behulp van een integratie van het sedimenttransport per getijfase. Er wordt hier ter illustratie gewerkt met het sedimenttransport ter hoogte van Kruibeke. Uit Figuur 21 blijkt dat de korrelgrootte een effect heeft op het sedimenttransport, wat ook logisch is: grotere korrels zullen minder makkelijk in transport gaan dan kleinere korrels. Figuur 22 geeft aan dat saliniteit slechts een beperkt effect hebben. Figuur 23 en Figuur 24 geven aan dat vooral de sedimenttransportformule, de dikte van de erodeerbare laag en het aantal zandfracties een invloed hebben op het totale sedimenttransport.



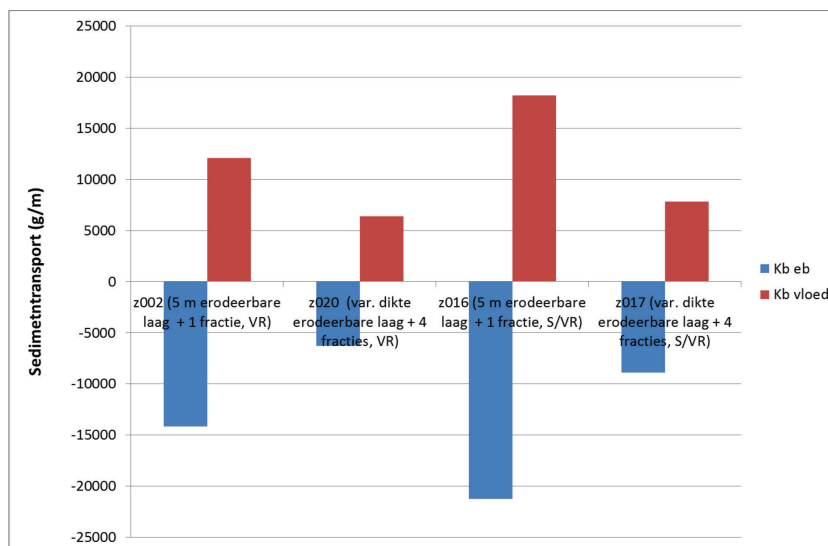
Figuur 21 – Effect van aanpassing van de korrelgrootte op totale sedimenttransport per getijfase



Figuur 22 – Effect van aanpassing van de saliniteit op totale sedimenttransport per getijfase



Figuur 23 – Effect van aanpassing van de sedimenttransportformule op totale sedimenttransport per getijfase



Figuur 24 – Effect van aanpassing van dikte van de erodeerbare laag en het aantal sedimentfracties op totale sedimenttransport per getijfase

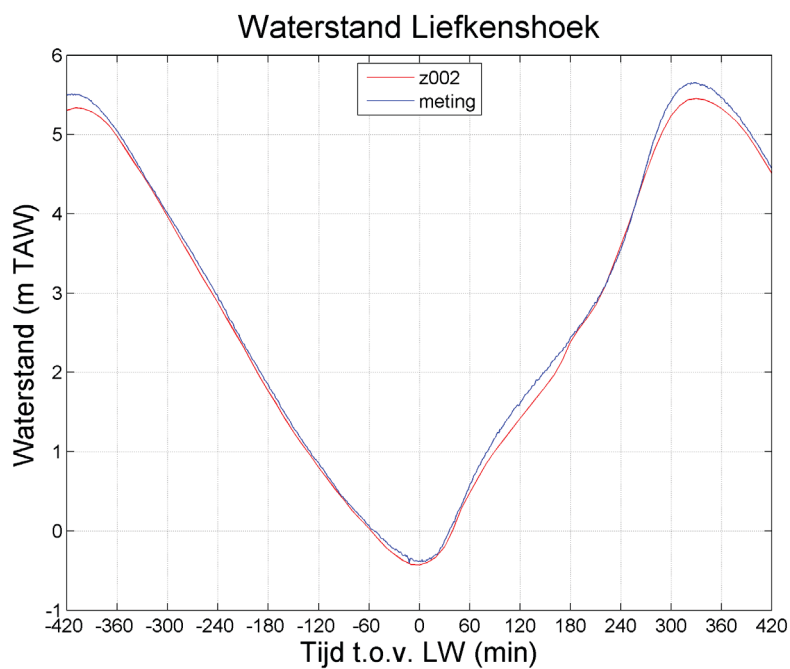
4 MODELVALIDATIE

De vergelijking van stroomsnelheden en sedimenttransport tussen meting en model zal gebeuren voor een vergelijkbaar getij. Het vergelijkbaar getij werd bepaald op basis van de getijfactor k , i.e. de ratio van de getijamplitude over de gemiddelde getijamplitude. In de gemodelleerde periode wordt gezocht naar een getij met een gelijkaardige getijfactor (zie Tabel 8). Voor Liefkenshoek en Oosterweel werd het getij van 5 en 6 oktober 2009 (LW 5/10/2009, 22u40 voor Liefkenshoek, 23u10 voor Oosterweel) geselecteerd. Dit getij heeft een getijfactor van slechts 1,12 (HW naar LW) en 1,14 (LW naar HW), maar werd geselecteerd omwille van zijn symmetrisch karakter (getijslag van HW naar LW en van LW naar HW ongeveer gelijk). Er was in de tijdreeks namelijk geen ander getij met een gelijkaardige getijfactor in combinatie met een symmetrisch getij. Als uitvoerpunt werd gekozen voor een punt dat wat betreft de waterdiepte het best overeenstemt met de waterdiepte op de meetlocatie. Dit omwille van het belang van de waterdiepte bij het berekenen van het sedimenttransport. Dit houdt in dat telkens voor het diepst gelegen uitvoerpunt op de raaien ter hoogte van Liefkenshoek, Oosterweel en Kruikeke gekozen werd, hoewel zelfs dan er nog een behoorlijke afwijking is voor Liefkenshoek en Kruikeke. In Figuur 25 wordt de vergelijking weergegeven tussen de waterstand in het model voor het geselecteerd getij en de waterstand tijdens de meting in Liefkenshoek. Figuur 26 geeft dezelfde vergelijking weer voor Oosterweel.

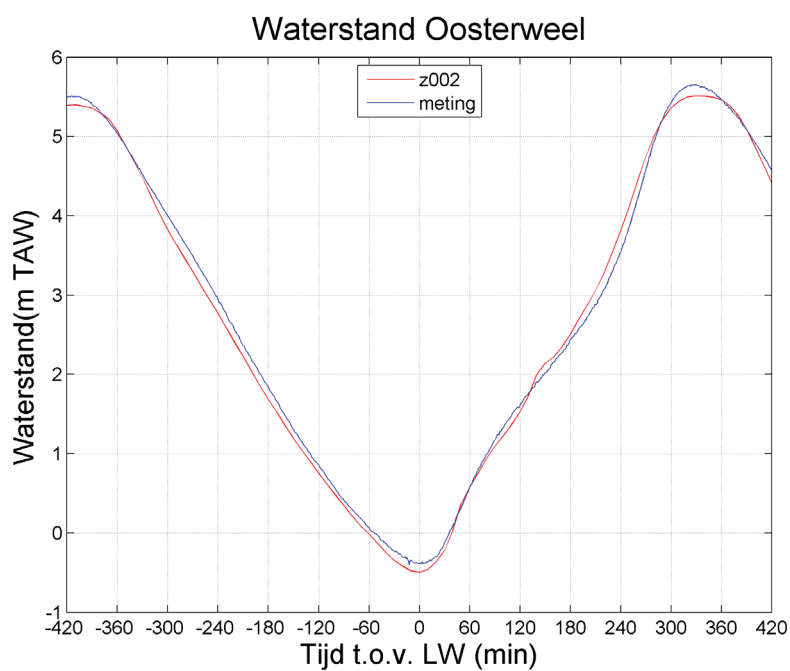
Voor Kruikeke, waar de getijfactor 1 moet zijn werd het getij van 3/10 (met LW om 10u10 en getijfactor 1,01) geselecteerd. Figuur 27 geeft de vergelijking tussen de gemeten waterstanden en de gemodelleerde waterstanden in Kruikeke.

Tabel 8 – Overzicht getijcondities tijdens metingen

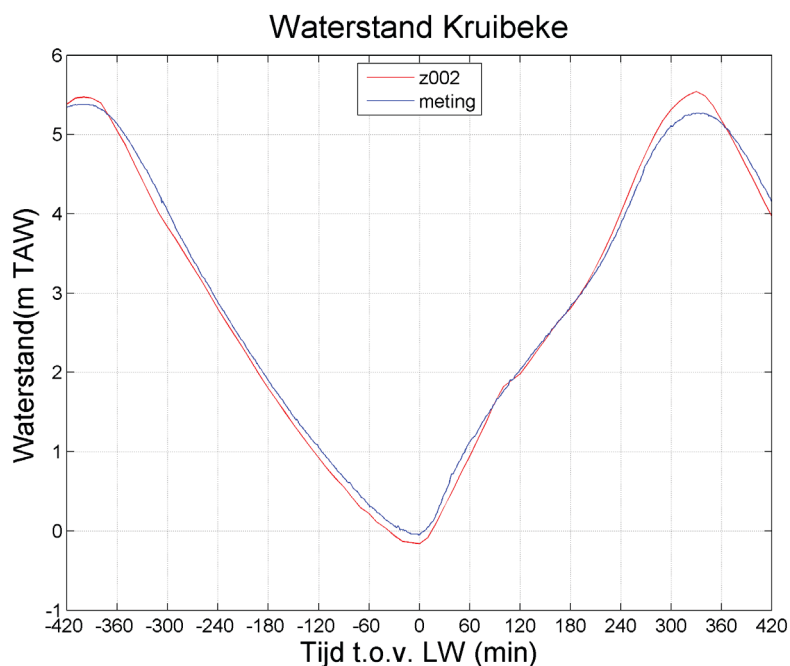
	HW 1 [cm TAW]		LW [cm TAW]		HW 2 [cm TAW]		Δ HLW [cm]		Δ LHW [cm]		k [-]		Diepte [m TAW]	
	nat.	mod.	nat.	mod.	nat.	mod.	nat.	mod.	nat.	mod.	nat.	mod.	nat.	mod.
Liefkenshoek	550	534	-38	-43	565	545	588	577	603	588	1,1 6	1,1 3	14	12
Oosterweel (tijpost Antw.- loodsgebouw)	567	540	-52	-50	567	551	619	590	619	591	1,1 8	1,1 3	11	11
Kruikeke (tijpost Hemiksem)	538	547	-5	-16	527	549	543	563	532	565	1,0 0	1,0 1	8	11



Figuur 25 – Vergelijking waterstand Liefkenshoek tijdens meting (14/05/2014) en waterstand model op 5/10/2009

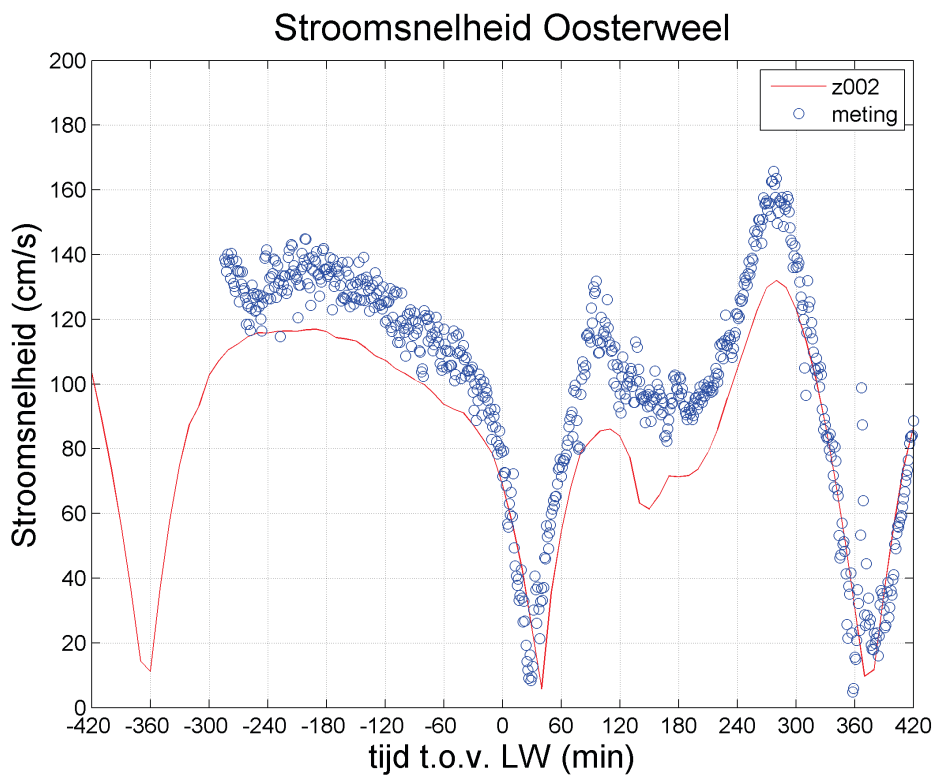


Figuur 26– Vergelijking waterstand Liefkenshoek tijdens meting (14/05/2014) en waterstand model op 5/10/2009

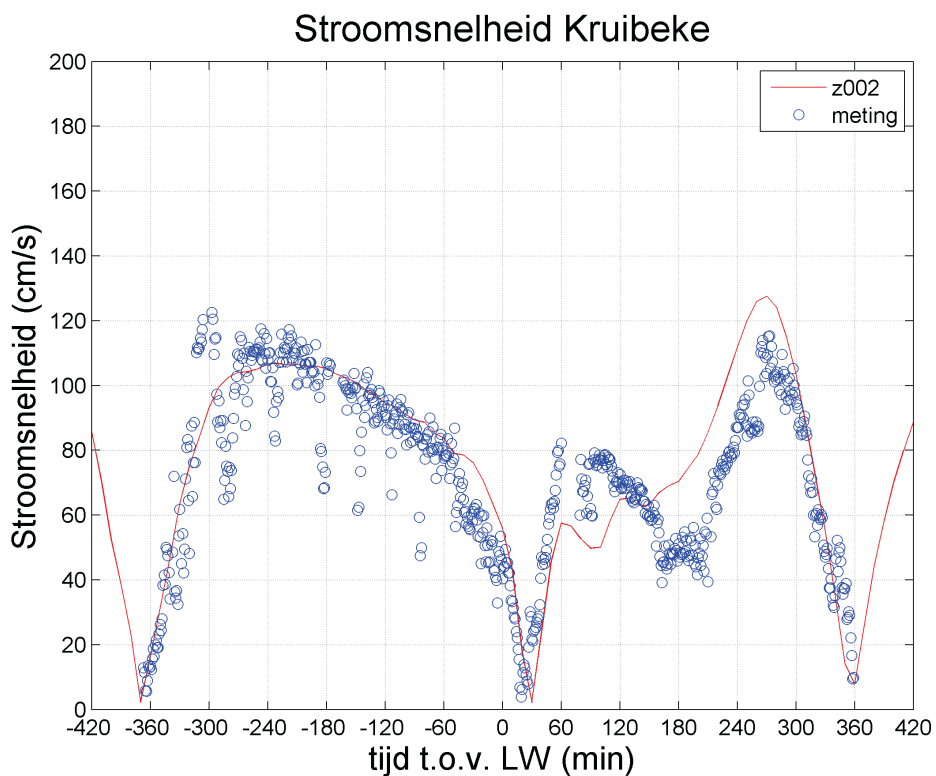


Figuur 27 – Vergelijking waterstand Kruibeke tijdens meting (02/07/2014) en waterstand model op 3/10/2009

Figuur A 8 geeft een vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheden in Liefkenshoek voor de basisrun z002. Figuur 28 geeft dezelfde vergelijking voor Oosterweel en Figuur 29 voor Kruibeke. In Liefkenshoek komt de gemodelleerde stroomsnelheid bij vloed vrij goed overeen met de gemeten stroomsnelheid (kleine onderschatting). Bij eb is de onderschatting iets meer uitgesproken. In Kruibeke worden de ebsnelheden beter ingeschat dan de vloedsnelheden. Bij vloed is er eerst een onderschatting, vanaf 2u na laagwater worden de stroomsnelheden overschat. In Oosterweel wordt de stroomsnelheid zowel bij eb als bij vloed met ongeveer 20 cm per seconde onderschat.



Figuur 28 – Vergelijking stroomsnelheid in Oosterweel tussen model en meting



Figuur 29 – Vergelijking stroomsnelheid in Kruibeke tussen model en meting

4.1 Finale model-instellingen

Als finale model instellingen werd gekozen voor de instellingen van run z028/z029. De instellingen bij beide runs zijn gelijk, alleen is run z028 uitgevoerd met een kleinere tijdstap en een morfologisch getij. Een overzicht van de gebruikte parameters wordt weergegeven in Tabel 9. Er werd gekozen om geen saliniteit of secondary flow toe te passen omdat blijkt dat het gebruik hiervan geen duidelijk positief effect heeft op de voorspellende waarde van het model (bovendien is het model bij het gebruik van secondary flow instabiel). Het gebruik van zout in het model heeft wel een effect maar de run met zout voorspelt niet beter of slechter de metingen dan de run zonder zout. Hetzelfde geldt voor de overige parameters. Er werd daarom gekozen om te werken met een korrelgrootte van 150 μm , omdat die het dichtst aanleunt bij de reële korrelgrootte. Omdat het gebruik van verschillende fracties geen groot effect heeft (het is eerder de dikte van de sedimentlaag die bepalend is), maar wel een negatief effect heeft op de rekentijd werd gekozen om slechts met 1 zandfractie te werken. Het gebruik van een variabele dikte van de sedimentlaag heeft wel een effect, en bleek bij het uitvoeren van morfologische runs een iets realistischer sedimentatie-erosie patroon te genereren (zie §5). Als sedimenttransportformule werd gekozen voor de formule van Engelund-Hansen omdat uit de literatuur bleek dat deze beter geschikt is voor het morfologisch modelleren van de Beneden-Zeeschelde (Van Dam, 2014).

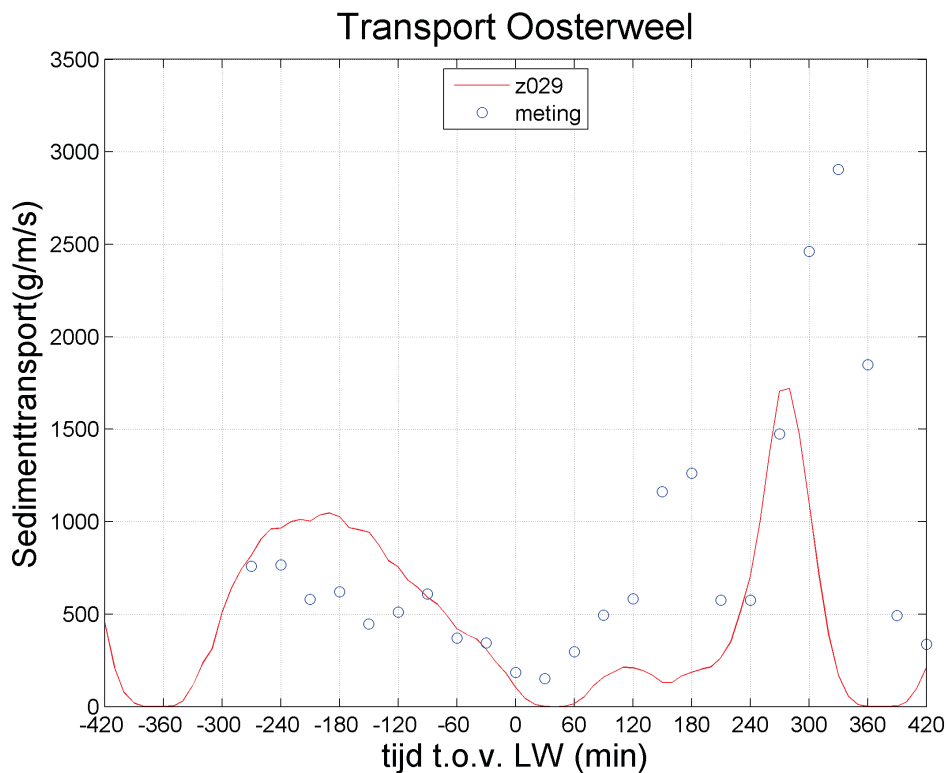
Figuur A 24 tot en met Figuur A 26 geeft de vergelijking van de gemeten en de gemodelleerde snelheden bij de finale modelinstellingen. Figuur A 7 en Figuur 30 en Figuur 31 geven de vergelijking van de gemeten en de gemodelleerde transporten bij de finale modelinstellingen. Wat betreft de snelheden was er in de gevoeligheidsruns weinig effect te zien van de verschillende parameterinstellingen, met uitzondering van het effect van de tijdstap (zie vergelijking run z002 en run z020 - Figuur A 18 t.e.m. Figuur A 20). Figuur A 9 t.e.m. Figuur A 23 geeft voor de verschillende gevoeligheidsruns een vergelijking van de gemodelleerde t.o.v. de gemeten snelheden. De gemodelleerde snelheden benaderen de gemeten snelheden vrij goed.

De gemodelleerde transporten geven een overschatting in de vloedfase bij Kruikeke en Liefkenshoek en een onderschatting bij Oosterweel. Bij de eb fase is de afwijking beperkter. Hoewel er runs waren die in sommige stations beter scoorden, scoorden die in de andere stations dan weer slechter (of in de eb fase). Via de finale modelinstellingen wordt het transport globaal gezien goed voorspeld.

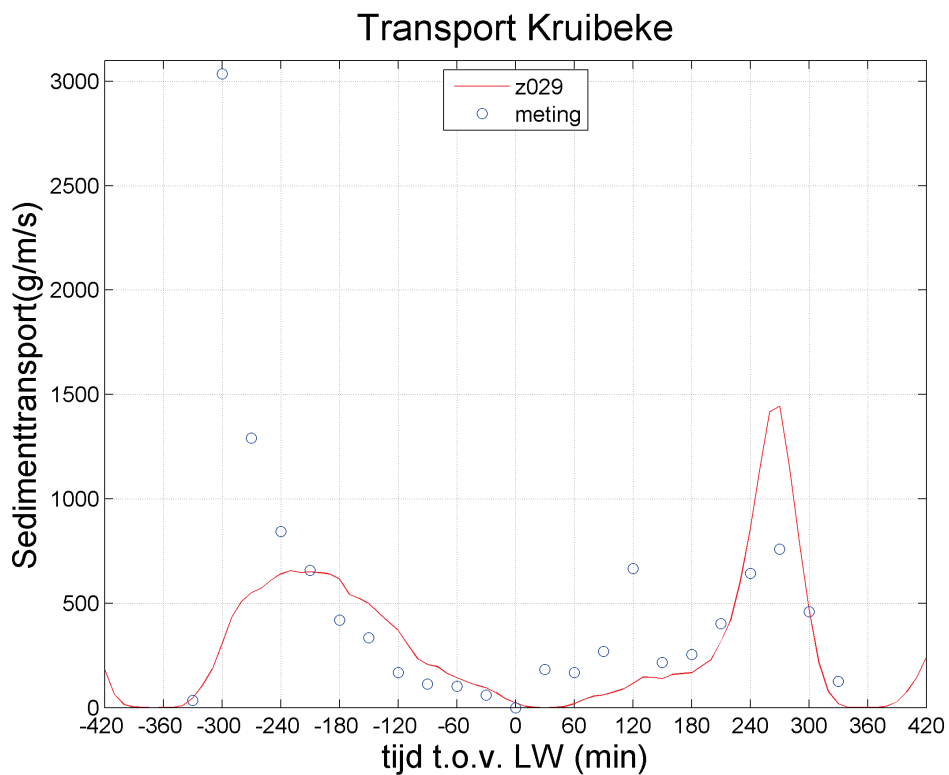
Tabel 9 – Gebruikte parameters voor de finale modelinstellingen

Parameter	Waarde
Ruwheid (Manning) ($\text{s/m}^{1/3}$)	0,025
Korrelgrootte	150 μm
Tijdstap	7,5 s
Aantal sedimentfracties	1
Sedimenttransportformule	Engelund - Hansen
Secondary flow	nee
Saliniteit	nee
Sedimentconcentratie afwaartse rand	0,05
Sedimentconcentratie opwaartse rand Terhagen (kg/m^3)	0,05

Sedimentconcentratie opwaartse rand Tielrode (kg/m ³)	0,05
Initiële sedimentconcentratie (kg/m ³)	0,05
Initiële dikte sediment bodemlaag (m)	variabel (o.b.v. lithologische kaart)
Specifieke dichtheid (kg/m ³)	2650
Droge dichtheid (kg/m ³)	1600



Figuur 30 – Vergelijking sedimenttransport bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Oosterweel



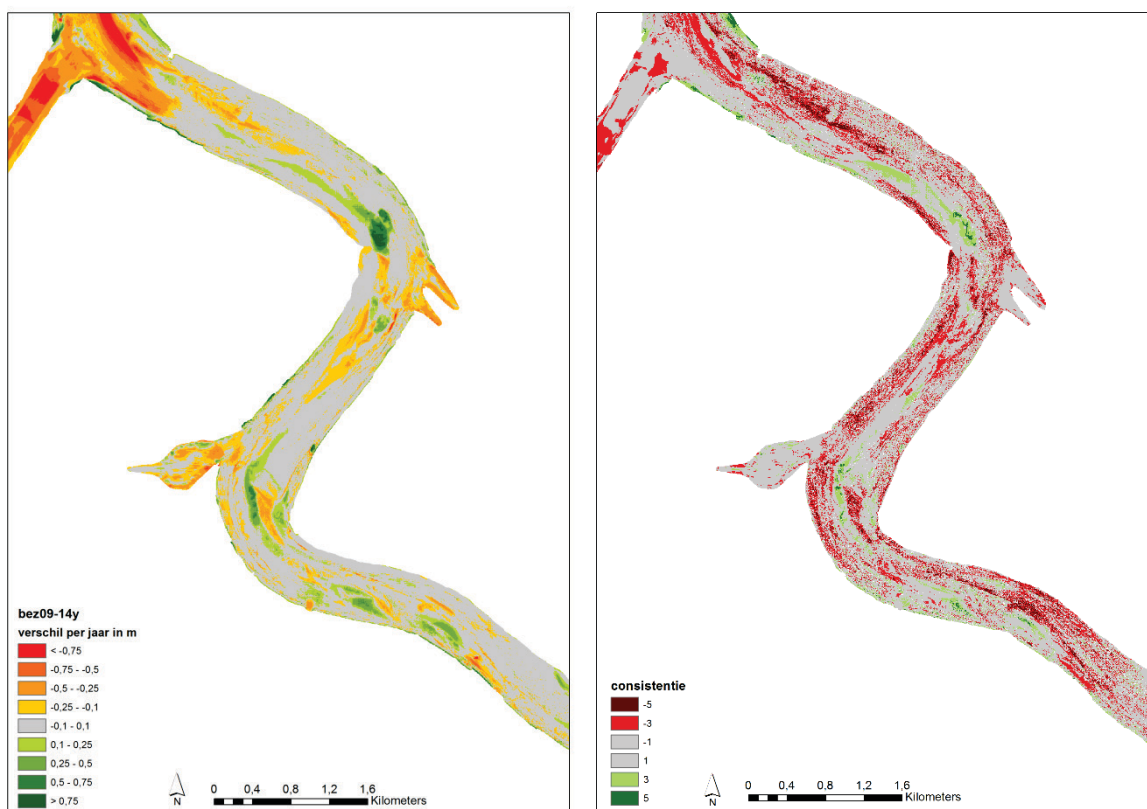
Figuur 31 – Vergelijking sedimenttransport bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Kruibeke

5 MODELOPZET EN GEVOELIGHEIDSONDERZOEK MORFOLOGIE

Voor het evalueren van het morfologisch gedrag van gestort materiaal zal gebruik gemaakt worden van het hierboven beschreven model, waarbij de bathymetrie bij elke tijdstap aangepast wordt op basis van de berekende erosie/sedimentatie. In de eerste fase vindt een gevoeligheidsonderzoek plaats waar een vergelijking gebeurt met grootschalige morfologische veranderingen in de natuur. In de tweede fase vindt een validatie plaats op basis van een reële stortcampagne in de Ketelputten.

5.1 Metingen

Voor de validatie van de erosie- en sedimentatiepatronen en –hoeveelheden wordt gebruik gemaakt van de bathymetrische verschilkaart tussen 2014 en 2009. Het verschil tussen deze twee bathymetrieën werd vervolgens gedeeld door 5 om de gemiddelde jaarlijkse erosie en sedimentatie te bekomen (zie Figuur 32 links ter illustratie). Figuur A 27 en Figuur A 28 geven voor het hele modelgebied deze bathymetrische verschilkaarten weer. Met deze techniek wordt ervoor gezorgd dat tijdelijke effecten niet meegenomen worden en langere termijn erosie en sedimentatie eerder tot uiting komt.



Figuur 32 – Gemiddelde jaarlijkse erosie/sedimentatie patronen berekend voor de periode 2009-2014 (links) en consistentiekaart voor dezelfde periode (rechts)

Daarnaast werden ook 'consistentiekaarten' aangemaakt (Figuur 32 ter illustratie) Figuur A 29 en Figuur A 30 geven voor het hele modelgebied deze consistentiekaarten weer. Hierbij werd van 2009 tot en met 2014 per jaar een verschilkaart gemaakt, en werd een waarde -1 toegekend waar erosie optreedt en een waarde 1 waar sedimentatie optreedt. Vervolgens werden een som gemaakt over de 5 jaren. Op deze manier krijgen zones met 5 opeenvolgende jaren van sedimentatie een waarde van 5, zones met 5 opeenvolgende jaren van erosie een waarde -5. De tussenliggende waardes duiden op een afwisseling van erosie en sedimentatie. Op deze manier worden de zones waar over een langere periode erosie of sedimentatie optreedt geïdentificeerd en kan geëvalueerd worden of deze zones ook door het model worden gereproduceerd. Het is logisch dat de zones waar afwisselend erosie en sedimentatie optreedt moeilijker zullen gereproduceerd worden door het model.

5.2 Morfologisch model

5.2.1 Bepaling morfologisch getij en morfologische versnellingsfactor

Om de rekentijden te beperken wordt een morfologische versnellingsfactor gebruikt, die de morfologische veranderingen per tijdstap opschaalt. In het kader van eerder onderzoek werd gebruik gemaakt van de morfologische versnellingsfactor toegepast op een of meerdere springtij-doodtij cycli (Dam et al., 2013, Grasmeyer et al., 2013) of een morfologische versnellingsfactor op een zogenaamd morfologisch getij (Kuijper, 2006, Tank, 1996).

In de Westerschelde is het 'karakteristiek' debiet het debiet dat optreedt bij een getij tussen gemiddeld getij en een gemiddeld springtij. Dit wordt ook wel het morfologisch maatgevend getij genoemd. Het morfologisch maatgevend getij voor de Westerschelde wordt gekarakteriseerd door een getijfactor van 1,08 (Tank, 1996). De getijfactor wordt berekend door de ratio te nemen van het opgetreden getijverschil en jaargemiddelde getijverschil. Er werd aangenomen dat ook voor de Zeeschelde een getijfactor van 1,08 geldt voor het morfologisch getij.

In de tijdreeks van gemodelleerde waterstanden ter hoogte van Liefkenshoek werd een getij gezocht met een getijfactor van 1,08. Op die manier kan ter hoogte van het interessegebied een morfologisch maatgevend getij ingesteld worden. Het getij van 6/10/2009 11:10 tot en met 6/10/2009 23:20 kwam hiervoor in aanmerking. Voor de aanmaak van de randvoorwaarden werd dit getij vervolgens verschillende malen herhaald.

Morfologische processen zijn traag in vergelijking met de waterbeweging en spelen zich af op een tijdschaal van maanden tot decennia. Om extreme simulatietijden te voorkomen is het mogelijk de berekende erosie/sedimentatie per tijdstap te vermenigvuldigen met een morfologische versnellingsfactor. Het gebruik van een morfologische versnellingsfactor kent echter ook zijn beperkingen. Wanneer de factor te hoog gekozen wordt, kan deze de oplossing beïnvloeden. Om de maximale factor te bepalen wordt de gewenste morfologische tijdschaal (in dit geval een jaar) gedeeld door de tijd die doorgerekend wordt (een aantal getijden) (zie Tabel 10). Het morfologisch effect dat na 3, 6, 9 etc...getijden bereikt wordt, wordt op deze manier vermenigvuldigd met de morfologische versnellingsfactor.

Tabel 10 – Bepaling van Morfologische versnellingsfactor voor 1 jaar

Aantal door te rekenen getijden	Morfologische versnellingsfactor	Run
29	24	Run zm101
9	78	Run zm102
6	117	Run zm103
3	235	Run zm104

Elk van de bovenstaande versnellingsfactoren werden toegepast in een testrun (zie Tabel 10) om te zien in hoeverre het gebruik van de versnellingsfactor een effect heeft op het voorspelde erosie-sedimentatie patroon. Hieruit bleek dat de erosie-sedimentatie patronen sterk gelijkend waren voor een morfac van 24, 78 en 117. Vanaf factor 235 worden de afwijkingen groter. Bovendien wordt in dynamische omgeving niet aangeraden om een te hoge morfac te gebruiken (Tonnon et al, 2006). In de literatuur werd geen morfac gevonden voor morfologisch modelleren van de Schelde die veel hoger was dan ca. 100. Er werd daarom gekozen om met 6 getijden en een morfac van 117 de gevoeligheidsanalyse voor morfologisch modelleren uit te voeren.

5.2.2 Kalibratie/gevoeligheidsanalyse morfologisch modelleren

Tabel 11 geeft een overzicht van de morfologische runs die in wat volgt besproken zullen worden. Voor elke run werd als output een cumulatieve sedimentatie- erosiekaart gemaakt, die vergeleken wordt met de bathymetrische verschilkaart op basis van de metingen, Figuur 32.

Tabel 11 – Overzicht van de uitgevoerde morfologische runs

Run	Korrel-grootte	Sediment-transportformule	Tijdstap	Secondary flow	Saliniteit	# fracties	Dikte sedimentlaag	AlfaBn	AlfaBs	Duur sim.
zm103	150 µm	Van Rijn	0,05	nee	nee	1	5 m	1,5	1	6 getijden
zm105	150 µm	Engelund-Hansen	0,05	nee	nee	1	5 m	1,5	1	6 getijden
zm108	150 µm	Engelund-Hansen	0,05	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	1,5	1	6 getijden
zm110	100, 150, 300 µm	Engelund-Hansen	0,05	nee	nee	3 zandfracties + slib	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	1,5	1	6 getijden
zm114	150 µm	Van Rijn	0,05	nee	nee	1	5 m	50	1	6 getijden
zm118	150 µm	Van Rijn	0,05	nee	nee	1	5 m	0,15	1	6 getijden
zm121	150 µm	Engelund-Hansen	0,05	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	1,5	0,1	6 getijden
zm123	150 µm	Engelund-Hansen	0,05	nee	nee	1	Variabel (o.b.v. lithologische kaart)	0,15	1	30 getijden

Sedimenttransportformule

Figuur A 31 tot en met Figuur A 34 geven de vergelijking weer tussen run zm103 (Van Rijn) en run zm105 (Engelund-Hansen). Hieruit blijkt voor het meest afwaartse deel (Figuur A 31) een grote gelijkheid tussen de voorspelde erosie-sedimentatiepatronen. Opwaarts van Deurganckdok zijn de voorspelde patronen echter bijna tegengesteld. De formule van Van Rijn voorspelt in de diepere delen sterke erosie en aan de oevers sedimentatie, terwijl dat bij de formule van Engelund-Hansen net andersom is. Bovendien zijn de voorspelde erosie- en sedimentatie-hoeveelheden erg groot in vergelijking met de werkelijke hoeveelheden: er wordt vaak tot 5 meter bodemverandering voorspeld, terwijl dit in de werkelijkheid (zie Figuur A 27 en Figuur A 28) vele malen minder is. Ook wat betreft de patronen is er geen gelijkheid te zien tussen de modelresultaten en de bathymetrische verschilkaarten en consistentiekaarten.

Dikte sedimentlaag + aantal fracties

Figuur A 35 tot en met Figuur A 38 geeft de vergelijking weer tussen run zm108 en run zm110, waarbij run zm108 rekent met 1 sedimentfractie en een variabele dikte van de initiële sedimentlaag en run zm110 met 4 sedimentfracties en een variabele dikte van de initiële sedimentlaag. Bij deze runs werd de sedimenttransportformule van Engelund-Hansen gebruikt. Uit de vergelijking blijkt dat er amper verschil is tussen beide runs. Vergelijking met het meest opwaartse deel van de output voor run zm105 (Figuur A 34 - rechts) toont wel een iets beperktere sedimentatie en erosie voor de runs met een variabele dikte van de initiële sedimentlaag (en dus iets realistischer).

AlfaBn en AlfaBs

Figuur A 39 tot en met Figuur A 42 geven het effect weer van het aanpassen van AlfaBn (Transverse bed gradient factor for bed load transport), Figuur A 43 tot en met Figuur A 46 van het aanpassen van AlfaBs (Streamwise bed gradient factor for bed load transport). De default waarde voor AlfaBn is 1,5 en werd gebruikt bij run zm103 (Figuur A 34 – links). Deze werd in run zm114 aangepast naar 50 en in run zm118 naar 0,15.

Bij de vergelijking van run zm114 en zm118 blijkt dat bij deel 1 en deel 2 (Figuur A 39 en Figuur A 40) voor run zm114 erosiebanden voorkomen naast de vaargeul, die minder uitgesproken zijn bij run zm118. Daarnaast is bij run zm118 opwaarts van Liefkenshoek een doorlopende erosieve band zichtbaar in de vaargeul, die bij run zm114 onderbroken wordt door een zone met sedimentatie. Bij deel 3 en deel 4 (Figuur A 41 en Figuur A 42) is de erosie nog veel meer uitgesproken, maar komt in run zm118 duidelijk nog meer tot uiting dan bij run zm114. Het aanpassen van AlfaBn heeft dus wel degelijk invloed, en grotere waarden zorgen voor een verlaging van de erosie- en sedimentatiehoeveelheden, maar niet in die mate dat deze de werkelijke waarden benaderen. Ook de patronen blijven gelijk en dus niet realistisch;

De vergelijking voor een aanpassing van AlfaBs van 1 bij run zm108 naar 0,1 bij run zm121 geeft amper verschillen aan. Er werd ook een run opgestart met een waarde AlfaBs van 10, maar deze run crashte.

Langere doorlooptijd

Omwille van de grote overschatting van de erosie- en sedimentatiehoeveelheden bij het morfologisch modelleren, werd de hypothese geopperd dat het model na de hierboven gebruikte doorlooptijd nog niet in evenwicht is, i.e. dat de hydrodynamische condities en de bathymetrische eigenschappen nog niet aan elkaar zijn aangepast. Dit zou betekenen dat indien een langere doorlooptijd gebruikt zou worden er een geleidelijke afname van de erosie- en sedimentatiehoeveelheden zou moeten optreden. Om dit te testen werd run zm123 uitgevoerd, waarbij een equivalent van 5 jaar werd doorgerekend (i.e. 30 getijden met een morfac van 117). Figuur A 47 geeft de erosie- en sedimentatie hoeveelheden weer na respectievelijk 1 jaar, 3 jaar en 5 jaar doorlooptijd voor de zone rond Antwerpen. Figuur A 48 geeft de jaarlijkse erosie- en

sedimentatiehoeveelheden voor het eerste jaar, de periode tussen jaar 2 en jaar 3 en de periode tussen jaar 4 en jaar 5. Het valt inderdaad op dat de verschillen kleiner worden, vooral na het eerste jaar.

5.3 Conclusie morfologisch modelleren

De resultaten werden sterk beïnvloedt door de keuze van de sedimenttransportformule. Uit de literatuur bleek dat voor de Westerschelde de formule van Engelund-Hansen de beste resultaten opleverde (o.a. Van Dam, 2014).

Het gebruik van een variabele dikte van de initiële sedimentlaag bleek eveneens een positieve invloed te hebben, m.n. de erosie- en sedimentatiehoeveelheden bleven hierdoor iets beperkter. Het gebruik van een variabele sedimentdikte en dus het rekening houden met de aanwezigheid van harde lagen in de bodem geeft logischerwijze een meer realistische voorspelling. Ook in de realiteit is de aanwezigheid van harde lagen mogelijk een bepalende factor in de hoeveelheid erosie die optreedt en de hoeveelheid sediment die beschikbaar is voor afzetting.

Bij een langere doorlooptijd van het morfologisch model bleek dat de transporthoeveelheden doorheen de tijd afnamen en realistischer waarden werden gemodelleerd. Op dit moment is de originele bathymetrie echter zodanig veranderd door de erosie- en sedimentatie in (vooral) het eerste jaar, dat de sedimentatie- en erosiepatronen niet meer betrouwbaar zijn.

6 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Ten behoeve van de invulling van de toekomstige stortstrategie voor het terugstorten van zanderige specie in de Beneden-Zeeschelde, werd een 2D-numeriek model opgezet binnen Delft3D, gebaseerd op het bestaande NEVLA-model. Er werd gekozen voor een detailmodel dat het interessegebied omvat met een afwaartse rand ter hoogte van Baarland en opwaartse randen ter hoogte van Driegoten (Boven-Zeeschelde) en Boom (Rupel).

In een eerste fase werd het bestaande hydrodynamische model uitgebreid met sediment transport. Op basis van de (beperkte hoeveelheid) beschikbare sediment transport metingen werd het model gevalideerd voor dit aspect. Hieruit bleek dat de hydrodynamica en het zandtransport binnen de Beneden-Zeeschelde vrij goed kan benaderd worden. Uit het gevoeligheidsonderzoek bleek dat zowel de formule van Van Rijn als deze van Engelund-Hansen een goede benadering geven van de gemeten transporten. Echter, voor bepaalde fases in het getij treden nog afwijking op tussen model en metingen, waarbij de beperkte hoeveelheid beschikbare metingen een beperking vormen voor een uitgebreide validatie.

In de tweede fase werd het sediment transport model uitgebreid met morfologische updates. Op basis van de beschikbare jaarlijkse topo-bathymetrische opnames in de Beneden-Zeeschelde, werden de modelresultaten afgezet tegen zowel de consistentiekaarten (deze geven aan waar systematisch erosie of sedimentatie optreedt) als de verschilkaarten. Ondanks het aanpassen van verschillende parameters, was het morfologisch model niet in staat de sedimentatie-erosiepatronen (noch de ruimtelijk spreiding, noch de intensiteit) te reproduceren.

Gelet op de beperkte tijd in het kader van dit project, werd besloten de scenario-berekeningen uit te voeren gebruik makend van de sedimenttransport berekening, zonder gebruik te maken van de morfologische doorvertaling ervan in het model. De verschillende stortscenario's zullen doorgerekend worden in een hydrodynamisch model (zonder morfologie) en op basis van de wijzigingen in sedimenttransportcapaciteit (zie Vos et al, 2015) zal een inschatting gemaakt worden van het initiële effect van de stortingen die als bodemverandering worden aangebracht.

6.2 Aanbevelingen

Tijdens de validatie van het sedimenttransportmodel bleek dat er slechts een zeer beperkte hoeveelheid gegevens beschikbaar is omtrent het zandtransport in de Beneden-Zeeschelde. Indien men streeft om in de toekomst morfologische simulaties uit te voeren in de Zeeschelde, zijn sowieso bijkomende sediment transport metingen noodzakelijk om een gedegen validatie mogelijk te maken.

De beschikbare metingen werden uitgevoerd op 3 punten in de Beneden-Zeeschelde, waarbij telkens op 4 punten over de verticale gemeten werd. Aangezien de numerieke modellen ofwel een onderscheid maken tussen bodem- en suspensietransport (cfr. formule van Van Rijn), ofwel een diepte-geïntegreerd totaal transport (cfr. formule van Engelund-Hansen), dient deze informatie (bv. meer punten over de verticale) beschikbaar te zijn uit de metingen om een vergelijking mogelijk te maken. Binnen voorliggende studie werd gebruik gemaakt van de beschikbare data die, mits aanname van een bepaalde verticale verdeling, doorgerekend werden tot een diepte-geïntegreerd transport. Zowel de metingen zelf, als deze doorvertaling introduceren een bepaalde onzekerheid die moet gekwantificeerd worden.

Binnen de voorliggende studie werd gebruik gemaakt van een detailmodel voor het studiegebied. Eén van de belangrijkste beperkingen bleek de keuze van goede randvoorwaarden te zijn ter hoogte van de modelgrenzen. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat, omwille van stabiliteitsproblemen, een kunstmatige verdieping werd aangebracht ter hoogte van de afwaartse grens. Deze aanpassing zal sowieso resulteren in een fout inzake het sedimenttransport en de morfologie, wat zich mogelijkerwijs propageert in het model. Het verdient dan ook de aanbeveling om (1) de kunstmatige verdieping te verwijderen op voorwaarde dat het model stabiel blijft, en (2) de modelgrenzen te verleggen naar de grenzen van het estuarium zodat opwaarts (grenzen van het getijgebied cfr. Merelbeke, Grobbendonk, Herenthout,...) de randvoorwaarden onafhankelijk zijn van het getij en afwaarts (Vlakte van de Raan/Noordzee) de variatie over de getijcyclus beperkt blijft.

Tenslotte wordt ook opgemerkt dat in het kader van deze studie, maar ook in het kader van andere studies (Dam, G., 2006) er initieel grote bodemveranderingen optreden. Dit wijst op een onevenwicht tussen de waterbeweging en de morfologie in het model, terwijl dit in de realiteit niet het geval is (tenzij geologische harde lagen hier dominant zijn). Het verdient dan ook de aanbeveling dieper in te gaan op dit aspect en na te gaan in welke mate deze schijnbare model-anomalie kan verklaard worden. Opmerkelijk is tevens dat de initiële bodemveranderingen anders zijn voor verschillende sedimenttransport formules, iets wat meer aandacht heeft.

7 REFERENTIES

- Ceuppens, S.; Darcis, M. (2015). Studie naar het sedimenttransport in het Schelde-estuarium: de theorie, de metingen en de reproduceerbaarheid met numerieke modellen. University of Antwerp: Antwerpen, België.
- Coen, L.; De Maerschalk, 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
- Dam, G.; Van Prooijen, B. (2006). Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van "FINEL2d". Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout. III, 92 + figures pp.
- Dam, G., Grasmeyer, B. Taal, M. (2013). Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid – Eindrapport. IMDC NV/Deltares/Svasek Hydraulics/ARCADIS Nederland: Antwerpen. 95 + bijlagen pp.
- Grasmeyer, B., Dam, G., Taal, M. (2013). Actualisatie Delft3D Model van de Westerschelde: Lange Termijn Visie Veiligheid & Toegankelijkheid Schelde. IMDC NV/Deltares/Svasek Hydraulics/ARCADIS Nederland: Antwerpen. 40 pp.
- Engelund, F.; Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 62 p.
- IMDC & VUB (2010). Lithologische en geomorfologische kaart van de Beneden - Zeeschelde - Analyserapport: Opmaak en Interpretatie.
- Kuijper, K.; van der Kaaij, T.; de Goede, E. (2006). LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium: Delft 3D. Delft Hydraulics/Waterbouwkundig Laboratorium: Delft. 582 pp.
- 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. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerp. IX, 60 + 87 p. appendices pp.
- Plancke, Y.; Paridaens, K. (2012). Comparison of measurement techniques for monitoring sediment transport under field conditions, in the Scheldt estuary, in: (2012). Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2012 Conference (HMEM 2012), Snowbird, Utah, August 12-15, 2012. pp. [1-8]
- Plancke, Y.; Vereecken, H.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Integraal plan Boven-Zeeschelde: Deelrapport 3 – Factual data-rapport sediment transport metingen in de Zeeschelde in 2014. Versie 4.0. WL Rapporten, 13_131. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Tank, F.T.G.. (1996). Het gedrag van drempels in de Westerschelde. Parameterisatie. Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, IMAU R 96-08. Utrecht, Nederland.

Tonnon, P.K.; van Rijn, L.C.; Walstra, D.J.R. (2006). The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface. Coastal Engineering 54 (2007), pp. 279-296.

Van Dam, T. (2014). Morfologie en hydrodynamica in de Beneden-Zeeschelde: Ontwikkelingen van 1960 tot 2010. Svasek Hydraulics: Rotterdam, Nederland.

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

Van Rijn, L.C.; Walstra, D.J.R. (2003). Modelling of Sand Transport in DELFT3D. Z3624. DG Rijkswaterstaat. Rijks-Instituut voor Kust en Zee/RIKZ.

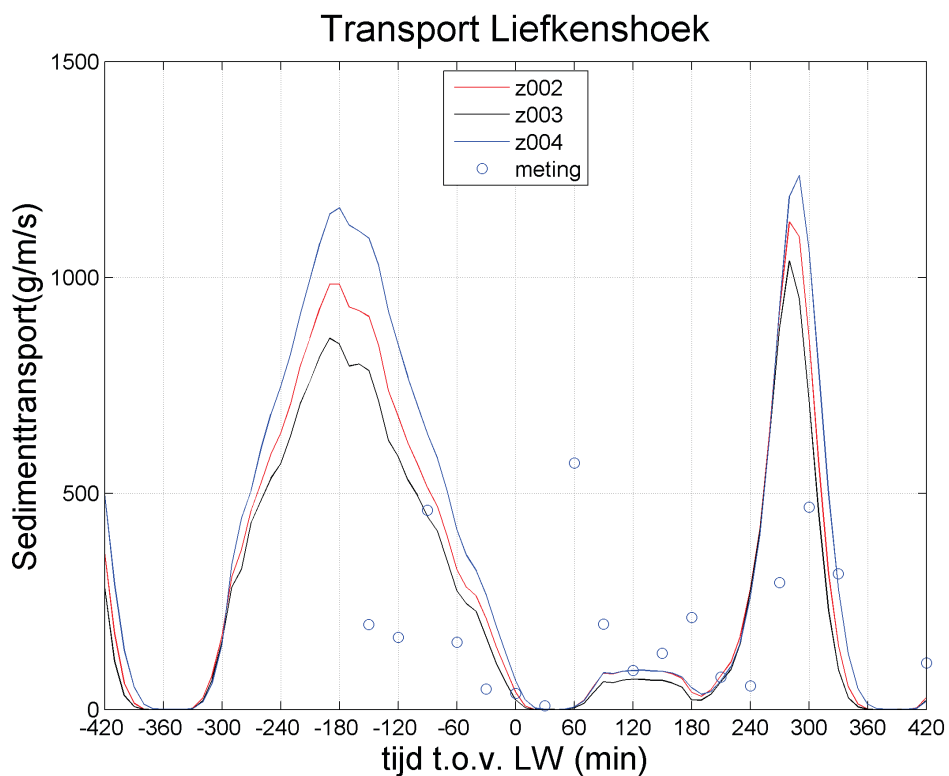
Verheyen, B.; Leyssen, G.; Vanlede, J.; Schramkowski, G.; Mostaert, F. (2012, concept version). Verbetering randvoorwaardenmodel: Deelrapport 7: Afregeling van het 3D Scheldemodel. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium

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

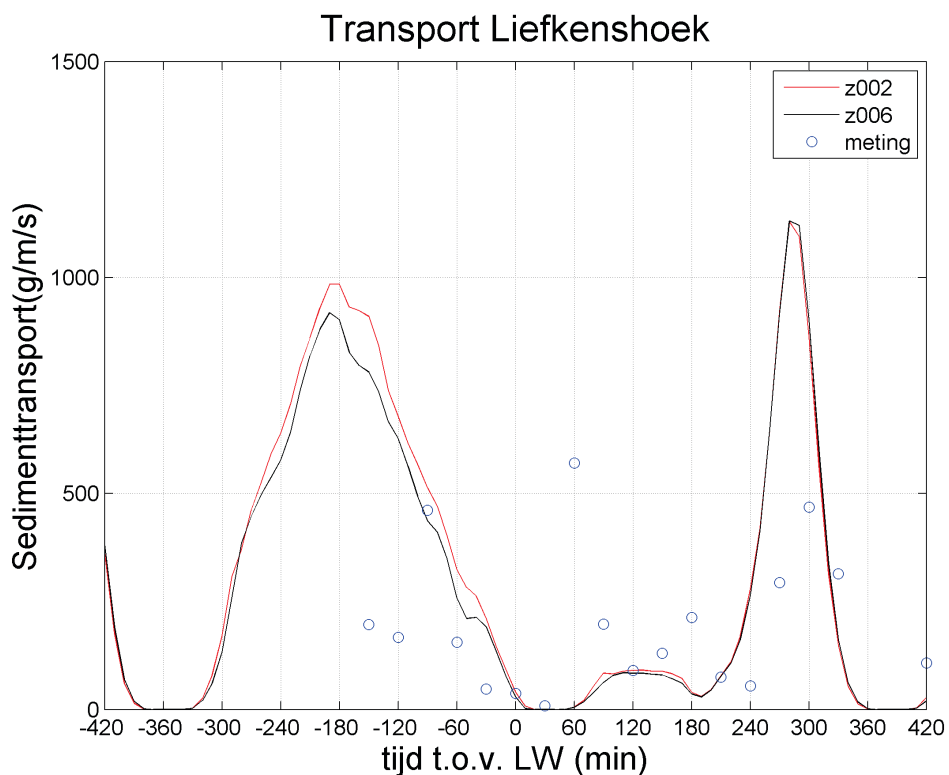
Vos, G.; Meire, D.; De Maerschalck, B.; Plancke Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: Deelrapport 4 – Zandscenario's. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

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

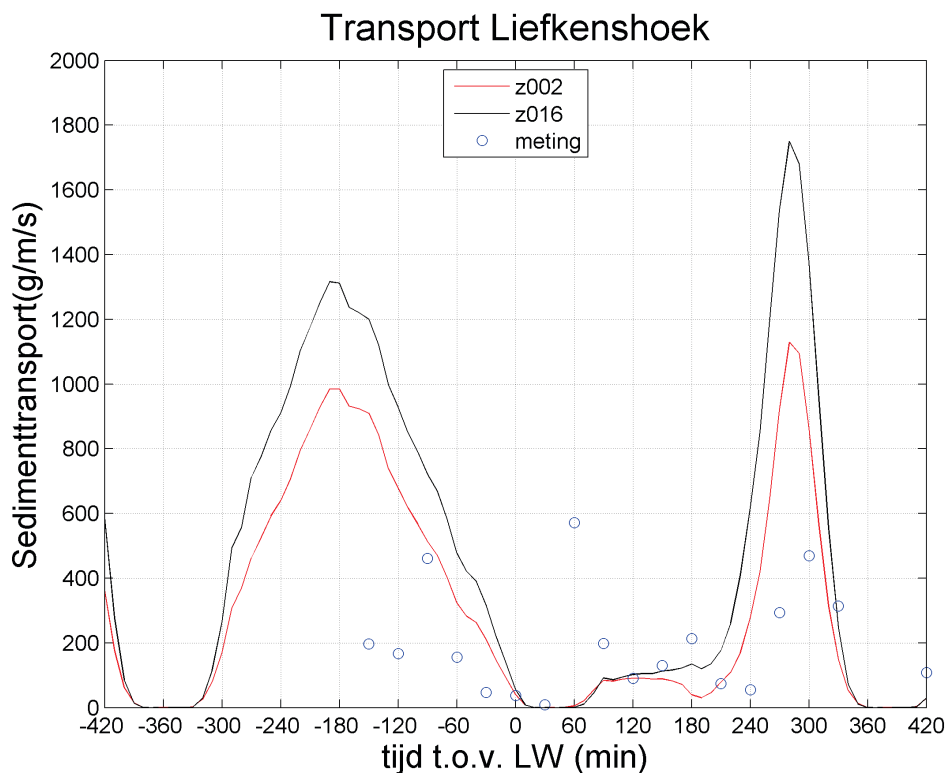
BIJLAGE A



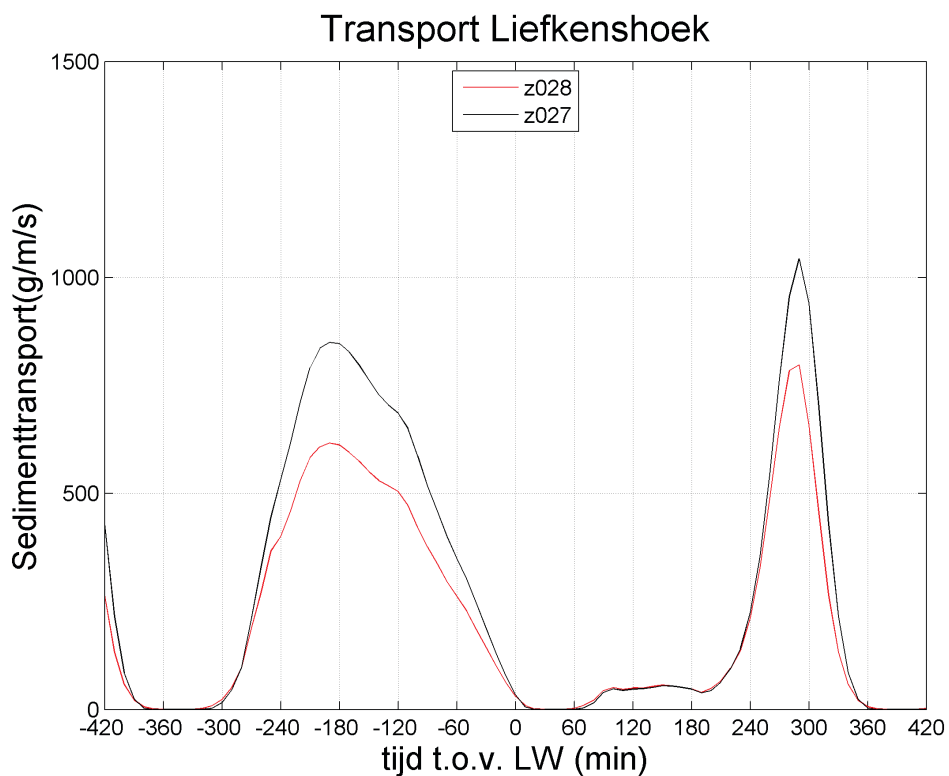
Figuur A 1 – Vergelijking gemodelleerde en gemeten sedimenttransport in Liefkenshoek



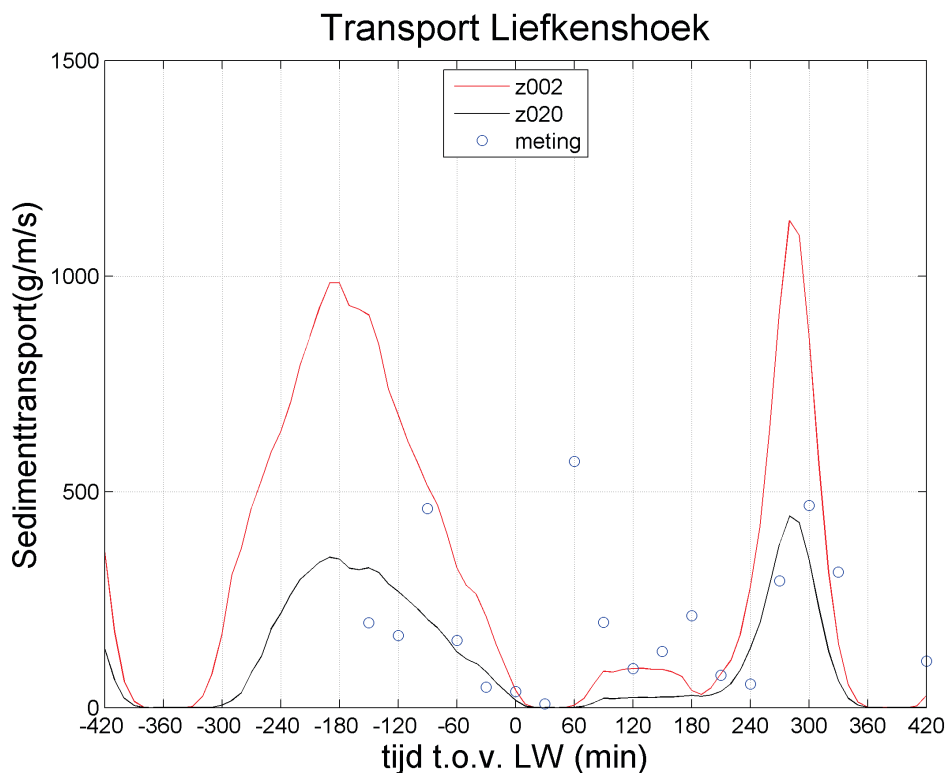
Figuur A 2 – Vergelijking sedimenttransport basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Liefkenshoek



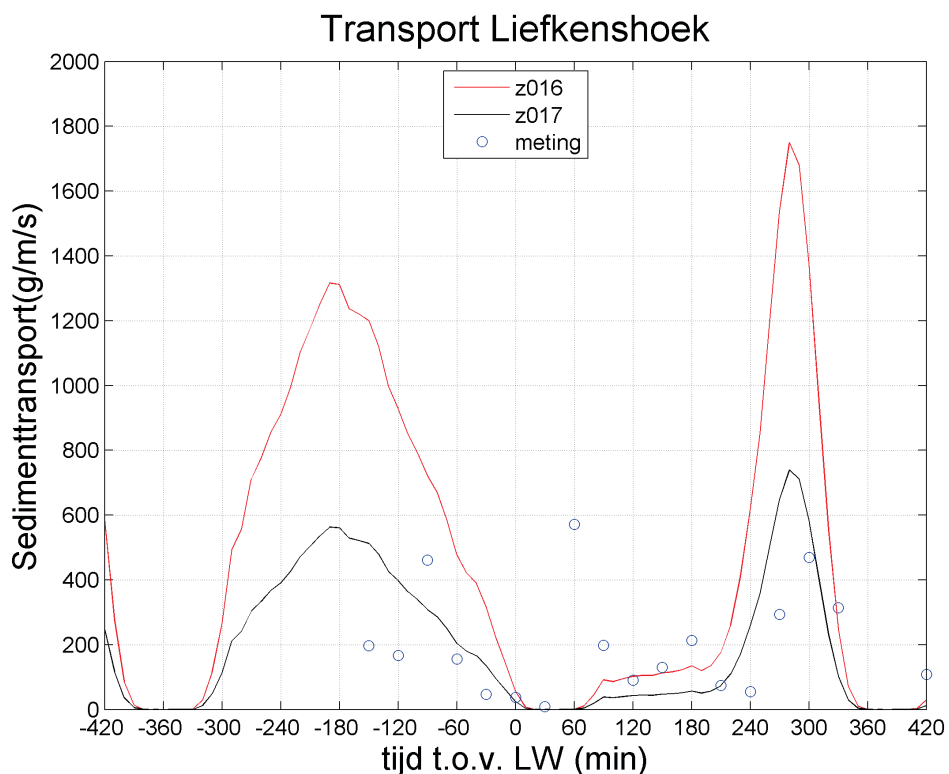
Figuur A 3 – Vergelijking sedimenttransport basiscursus (z002) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Liefkenshoek



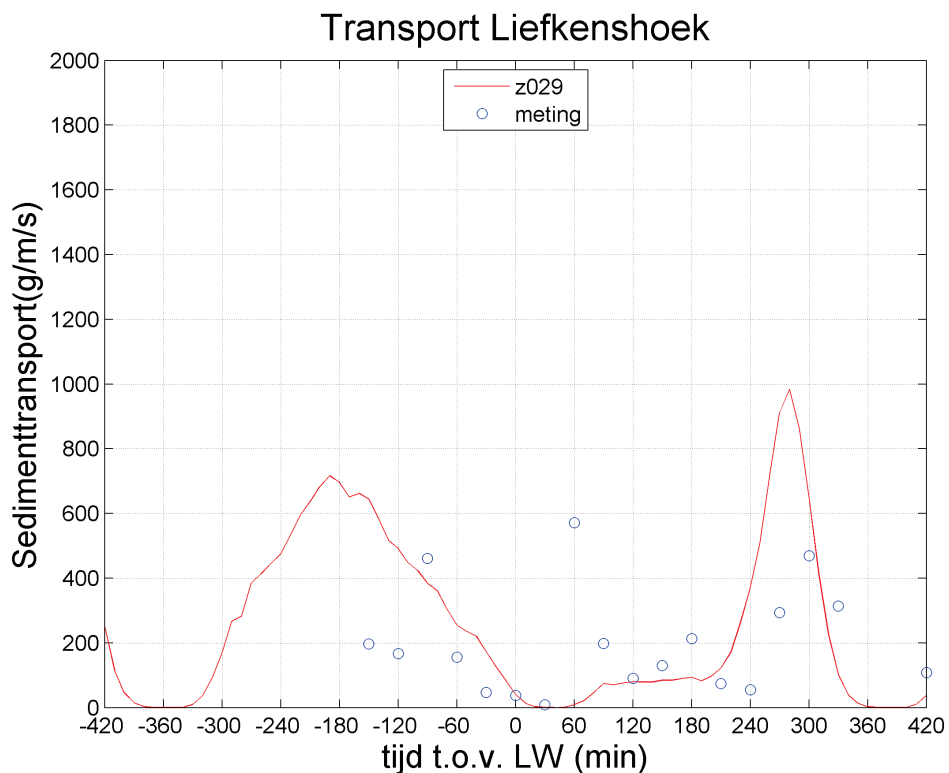
Figuur A 4 – Vergelijking sedimenttransport Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Liefkenshoek



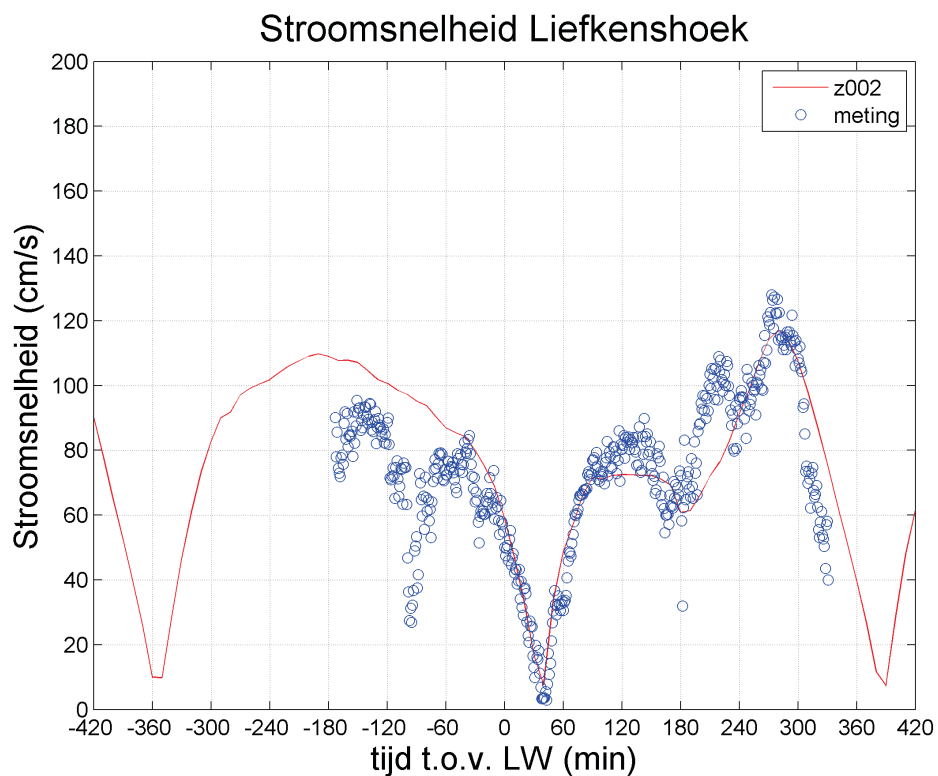
Figuur A 5 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Liefkenshoek



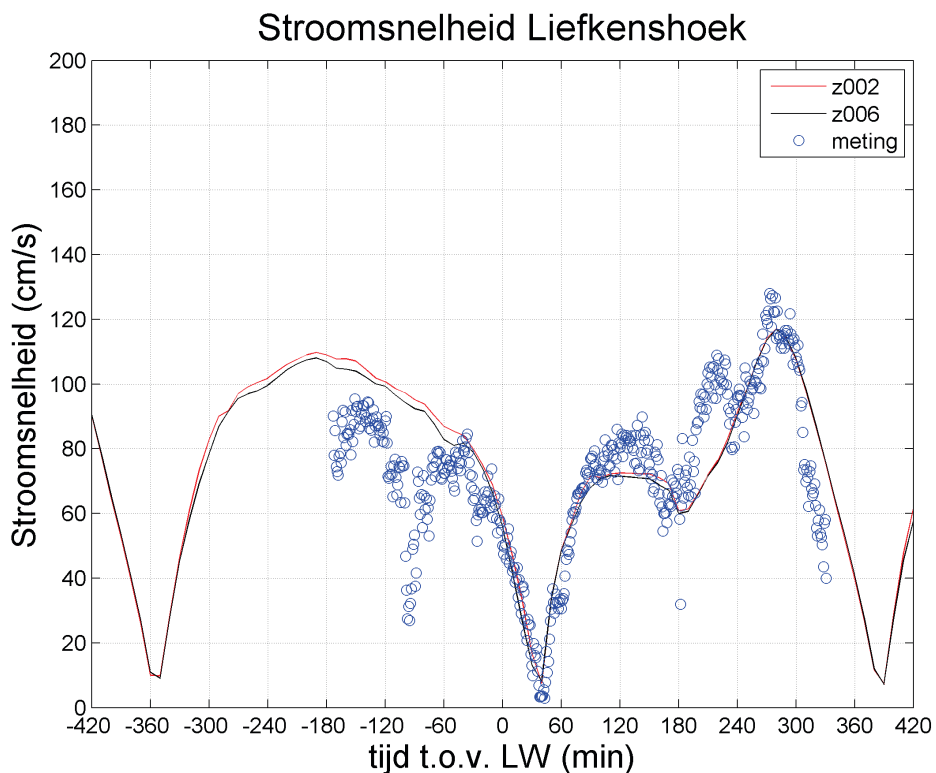
Figuur A 6 – Vergelijking sedimenttransport bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Liefkenshoek



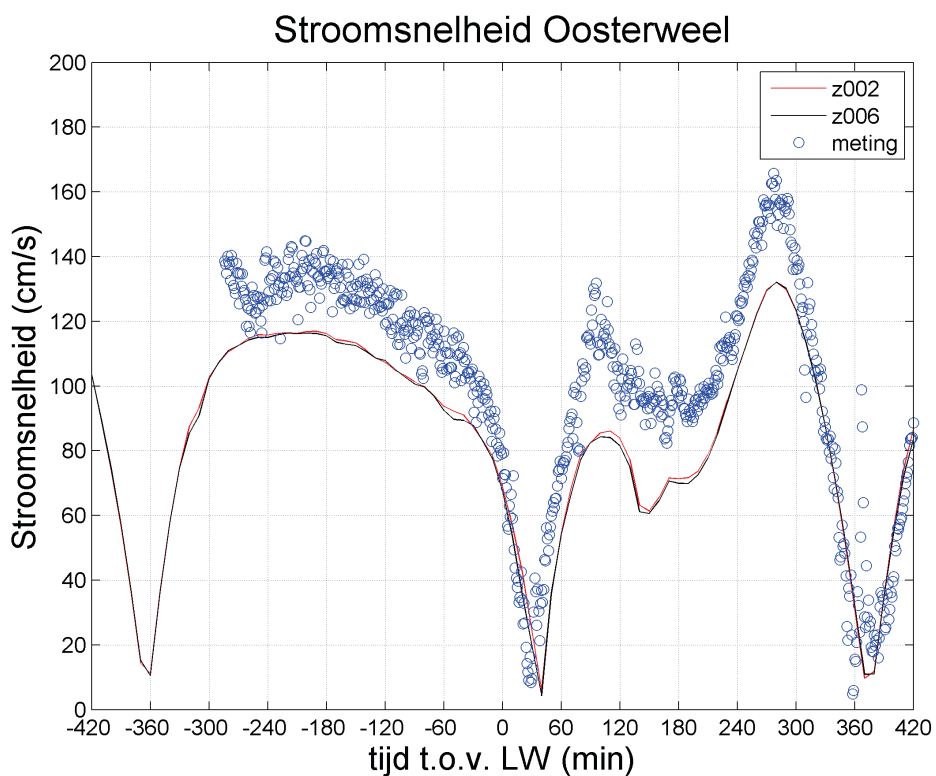
Figuur A 7 – Vergelijking sedimenttransport bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Liefkenshoek



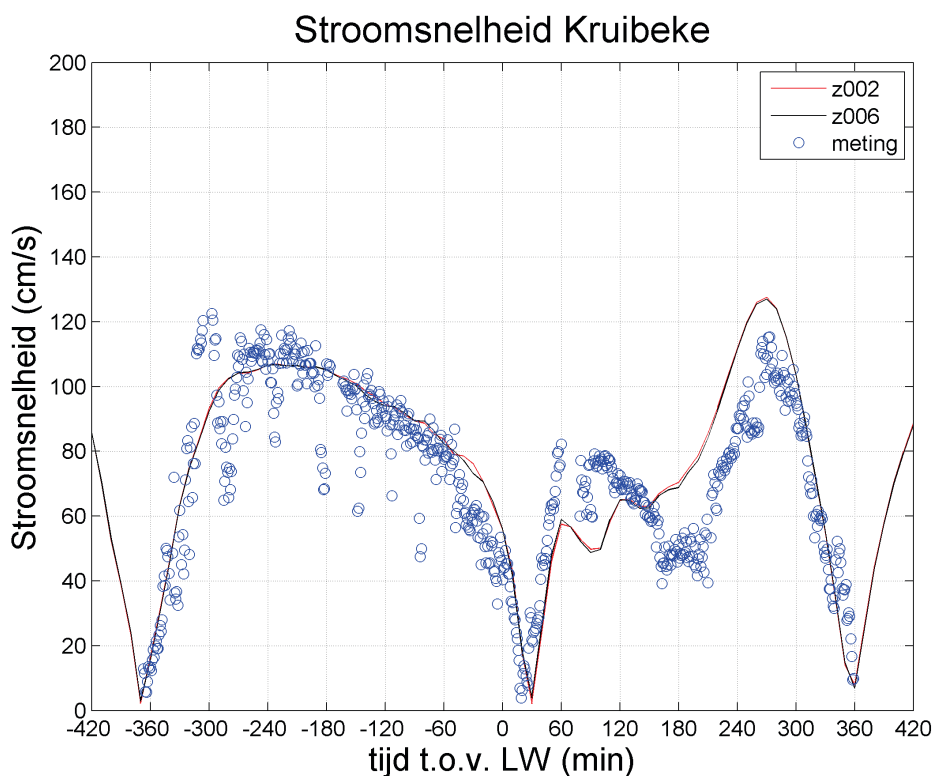
Figuur A 8 – Vergelijking stroomsnelheid in Liefkenshoek tussen model en meting



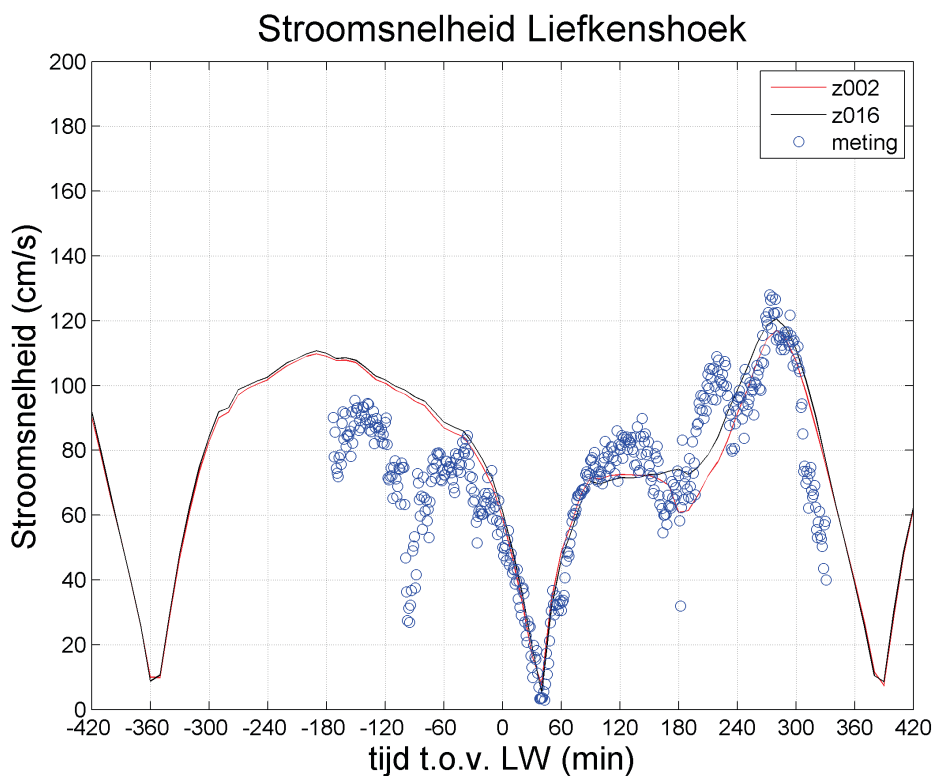
Figuur A 9 – Vergelijking gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid voor basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Liefkenshoek



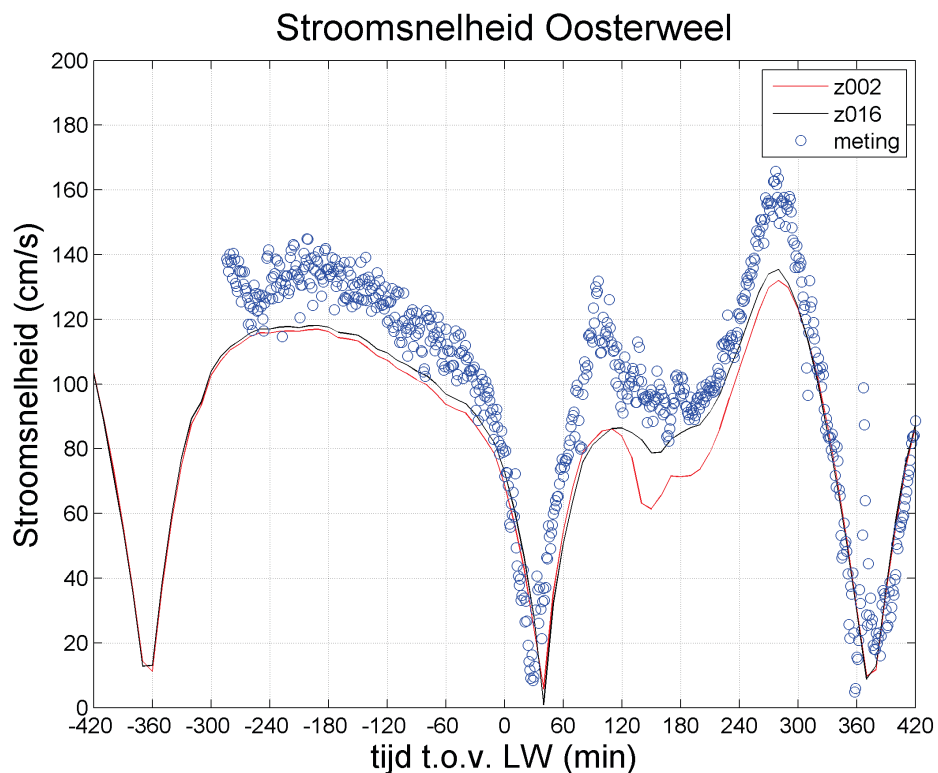
Figuur A 10 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Oosterweel



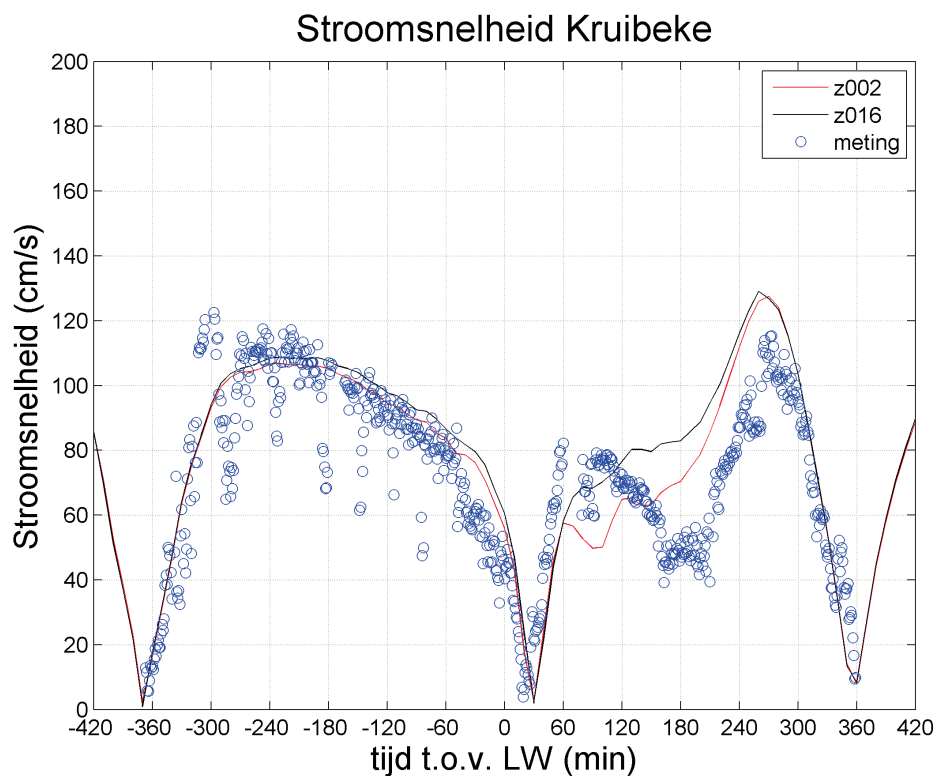
Figuur A 11 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run saliniteit (z006) in Kruibeke



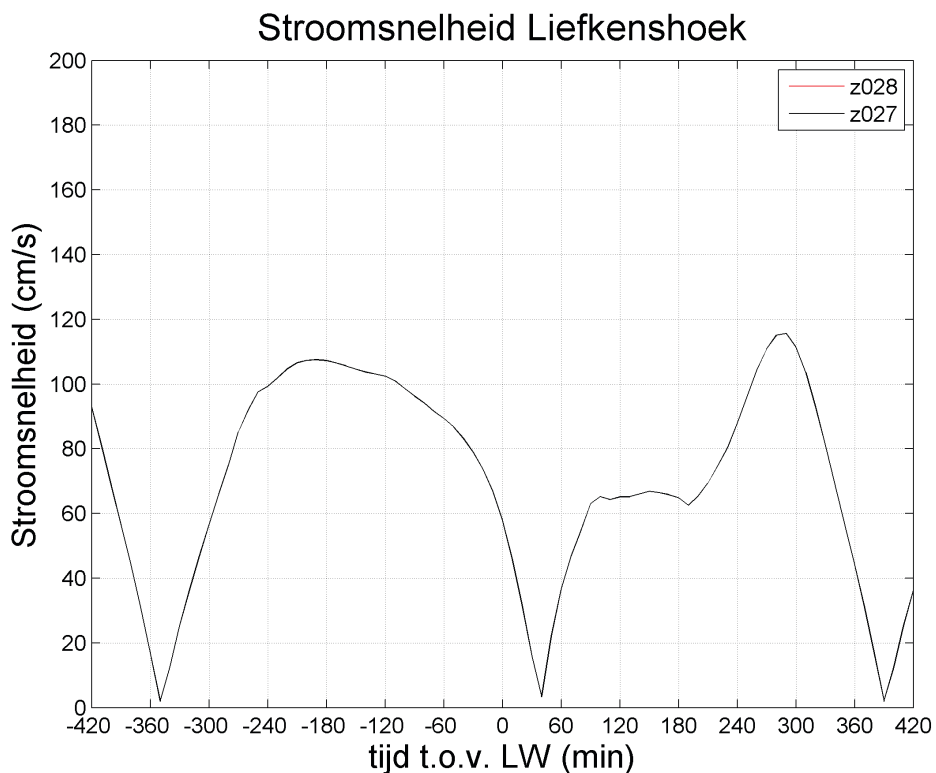
Figuur A 12 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Liefkenshoek



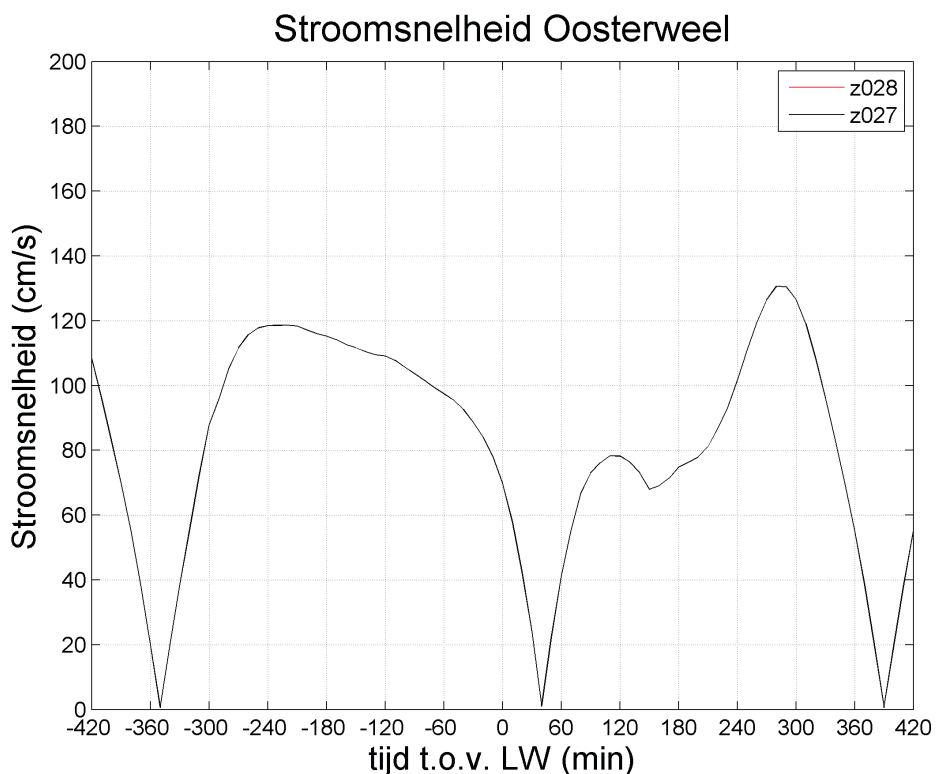
Figuur A 13 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Oosterweel



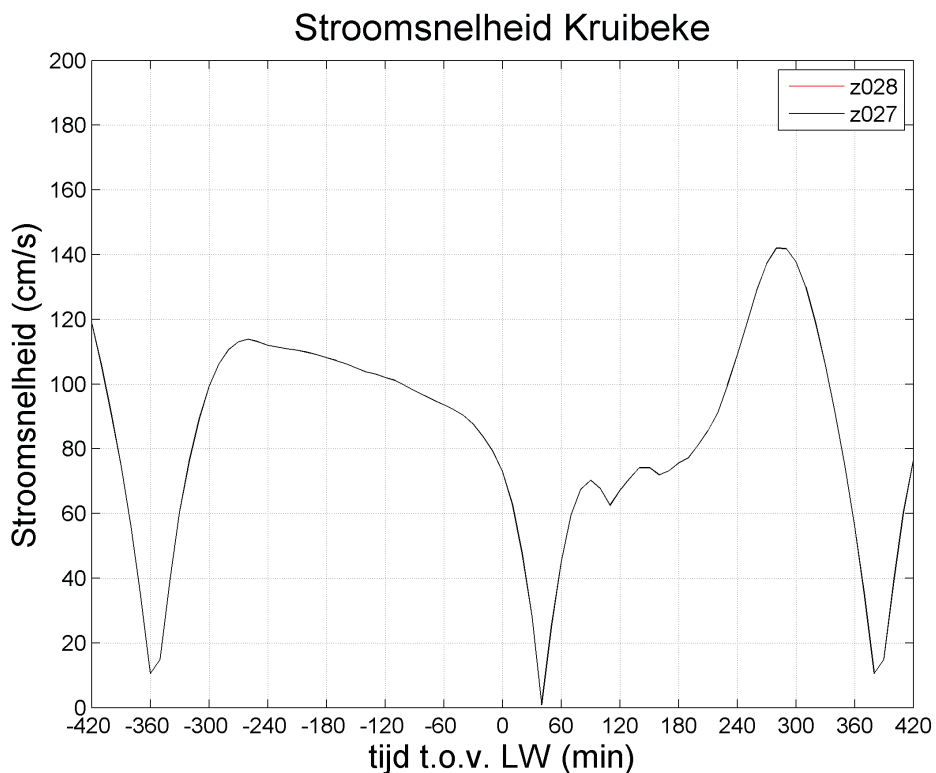
Figuur A 14 – Vergelijking stroomsnelheid basisrun (z002) en run Soulsby/Van Rijn (z016) in Kruibeke



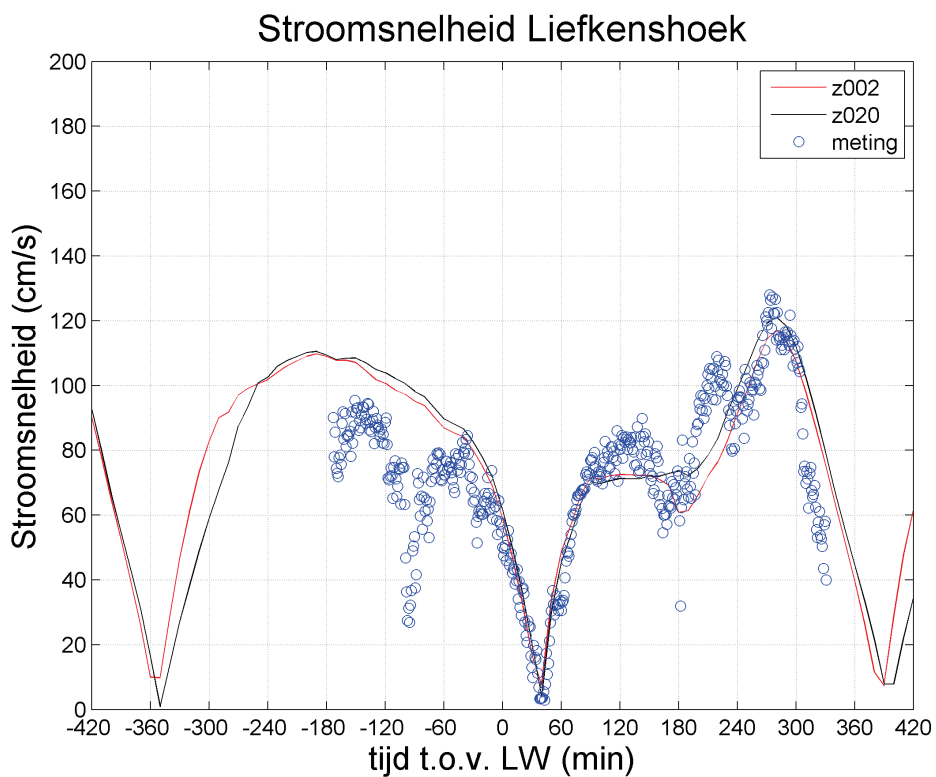
Figuur A 15 - Vergelijking stroomsnelheid Van Rijn (z028) en Englund-Hansen (z027) in Liefkenshoek



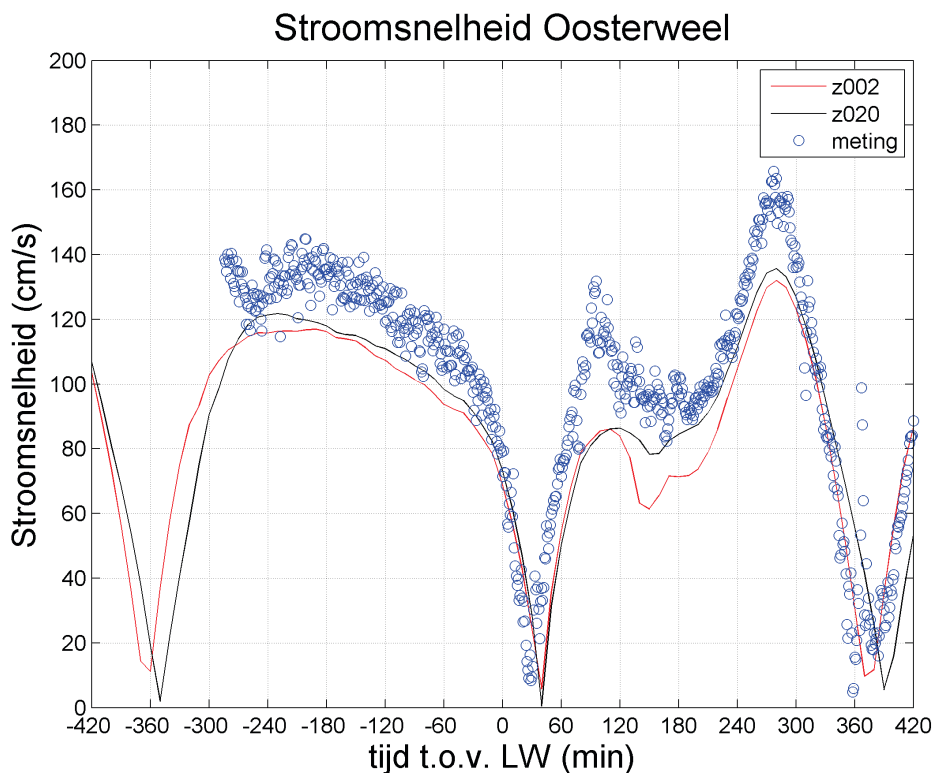
Figuur A 16 – Vergelijking stroomsnelheid Van Rijn (z028) en Englund-Hansen (z027) in Oosterweel



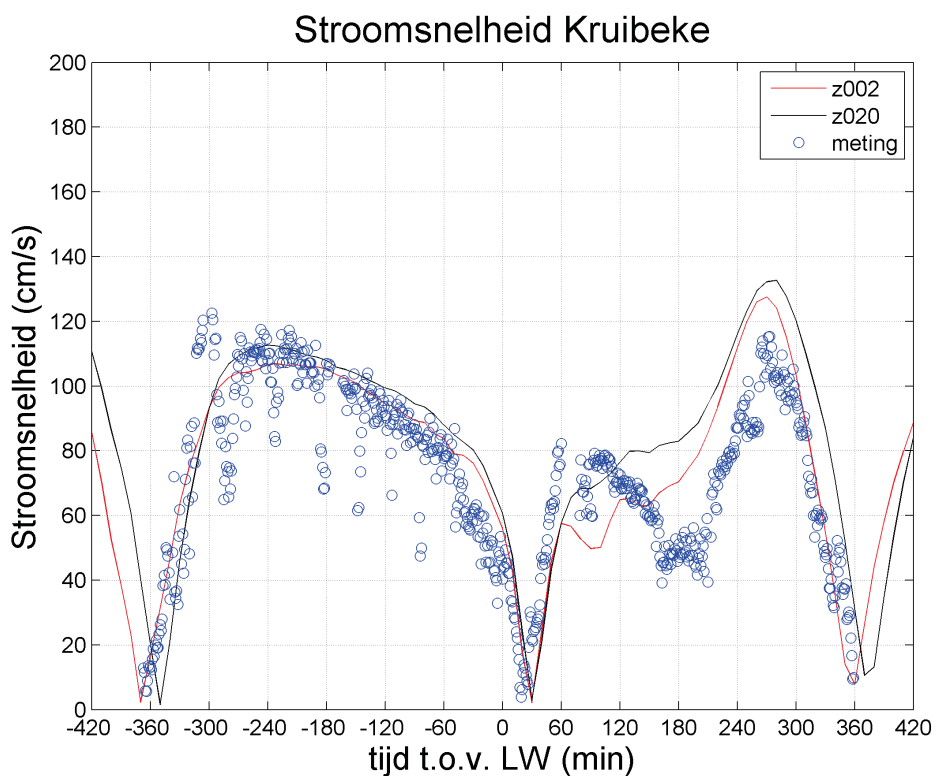
Figuur A 17 - Vergelijking stroomsnelheid Van Rijn (z028) en Engelund-Hansen (z027) in Kruibeke



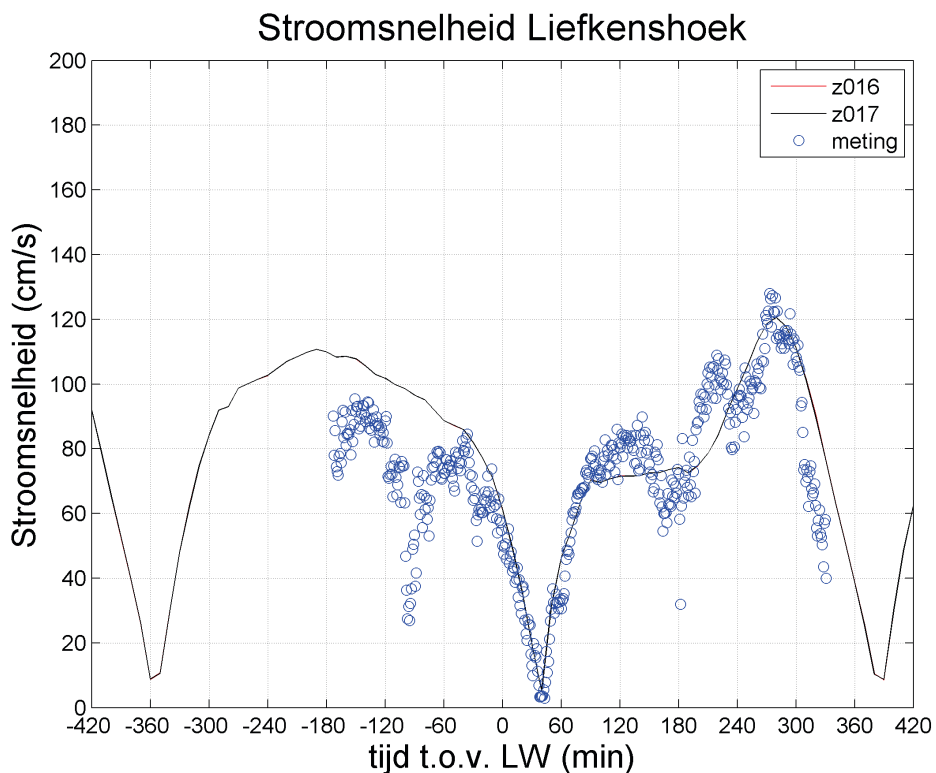
Figuur A 18 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Liefkenshoek



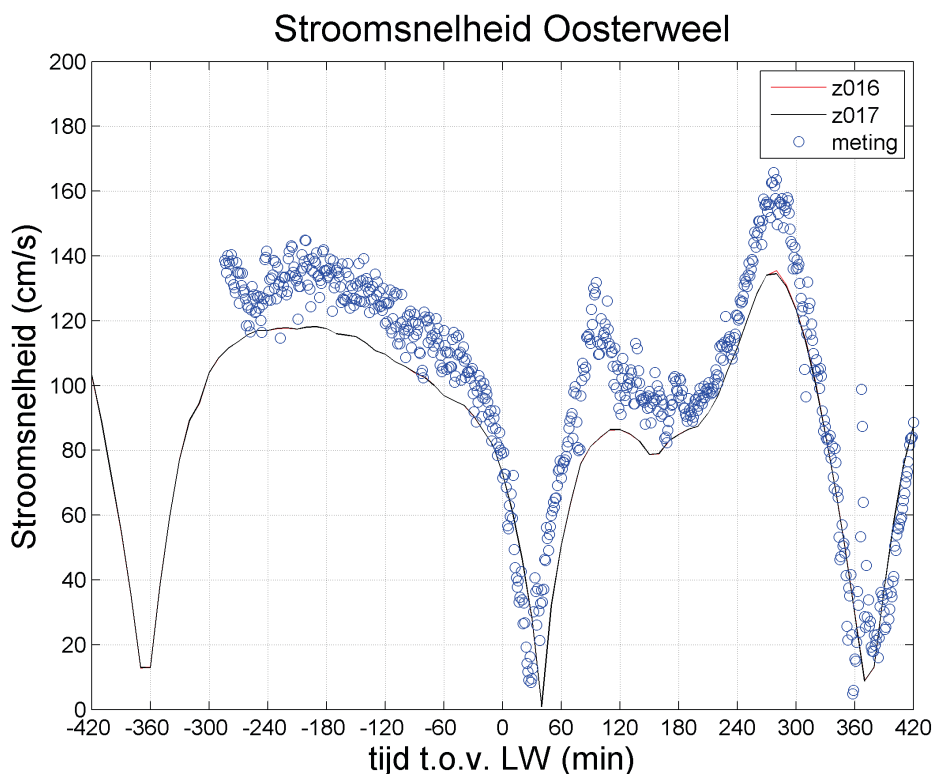
Figuur A 19 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Oosterweel



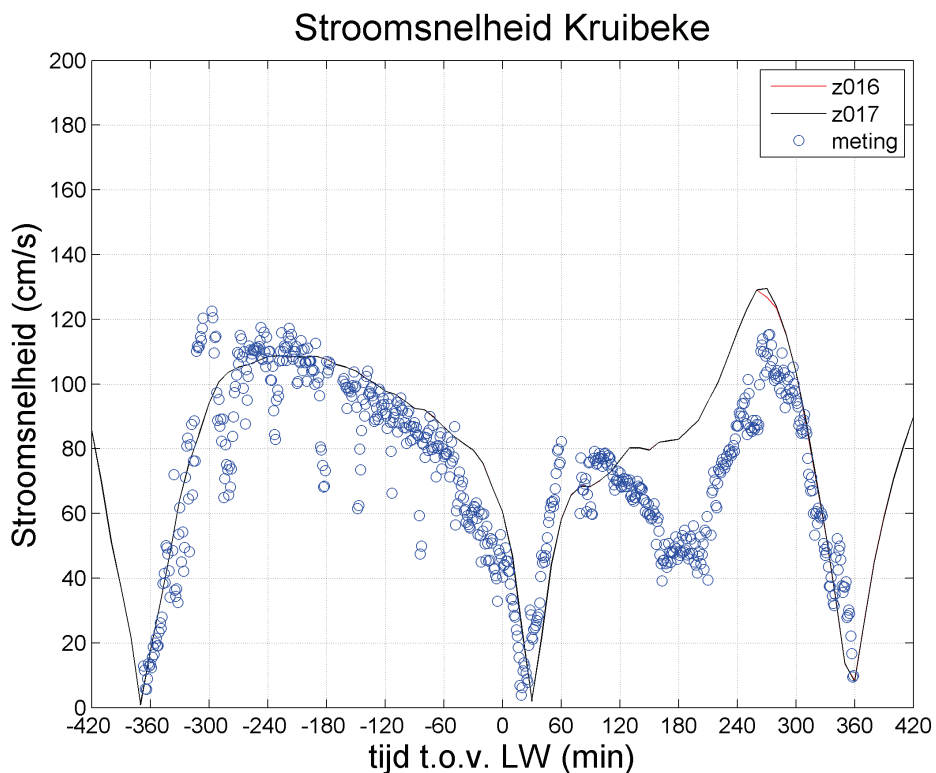
Figuur A 20 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z002) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z020) met formule van Van Rijn in Kruibeke



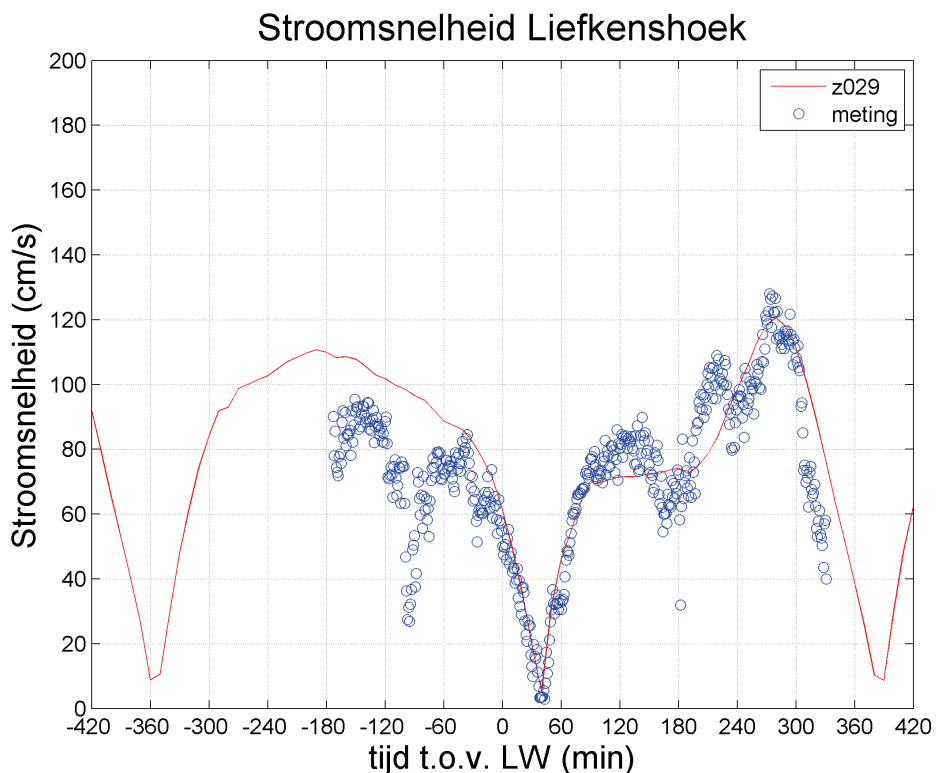
Figuur A 21 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Liefkenshoek



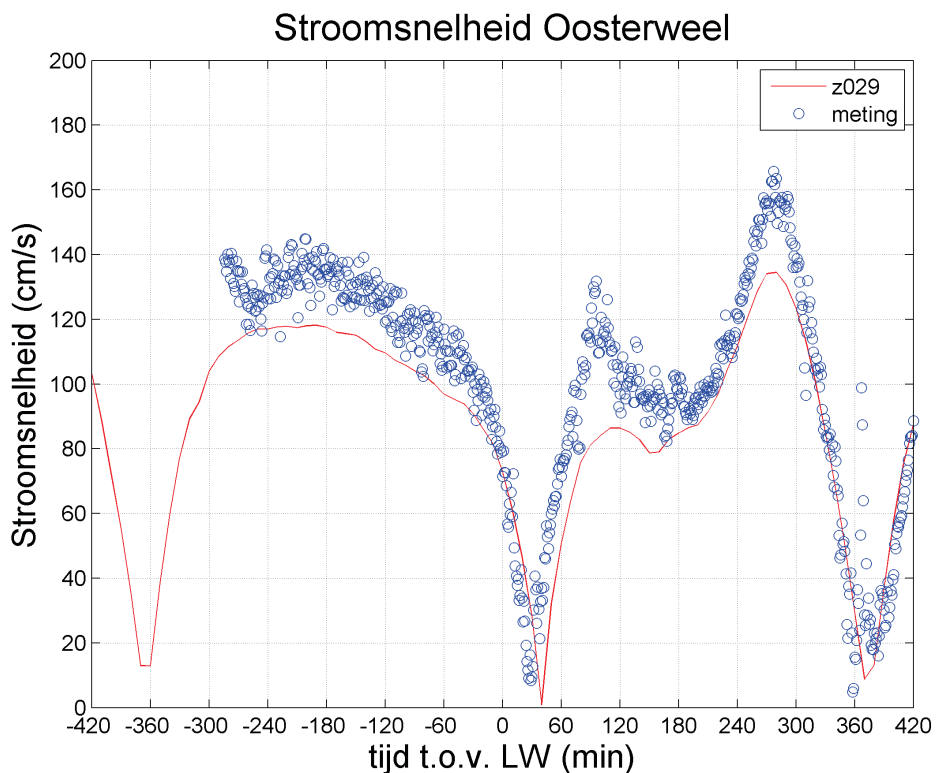
Figuur A 22 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Oosterweel



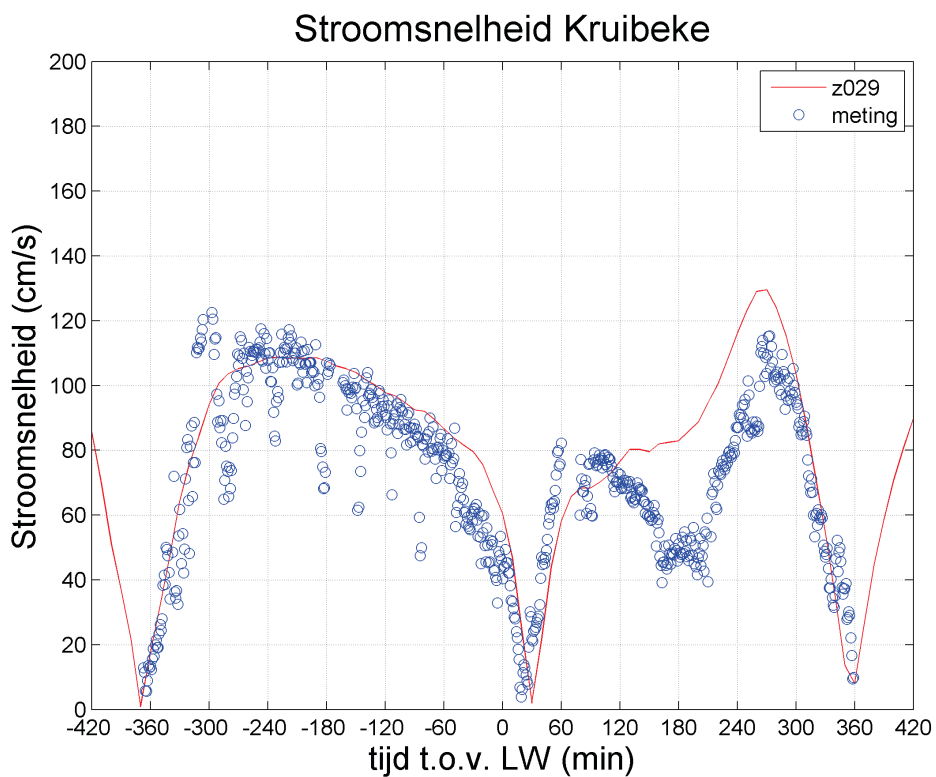
Figuur A 23 – Vergelijking stroomsnelheid bij 1 zandfractie (run z016) en bij 3 zandfracties + 1 slibfractie (run z017) met formule van Soulsby/Van Rijn in Kruibeke



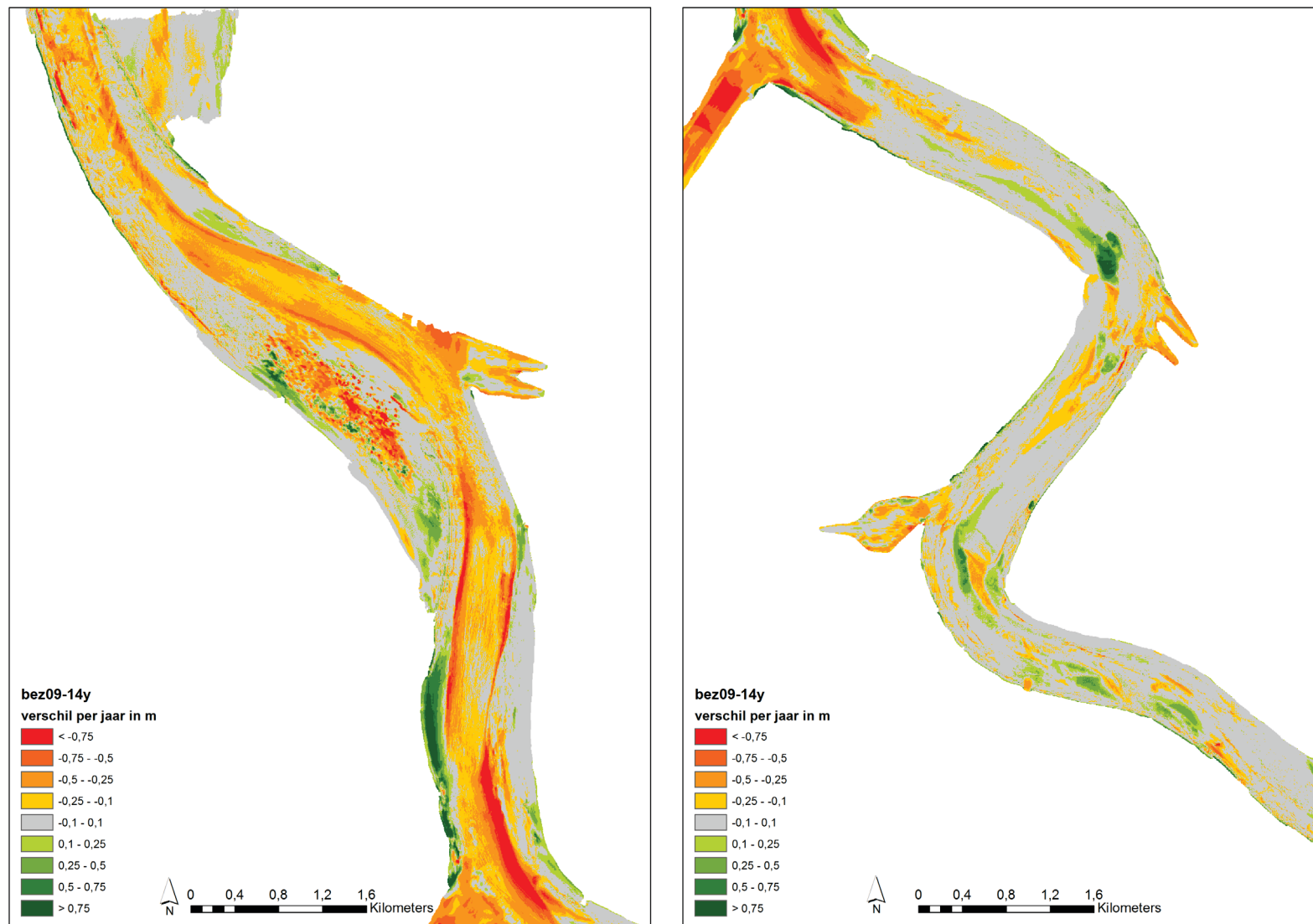
Figuur A 24 – Vergelijking stroomsnelheid bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Liefkenshoek



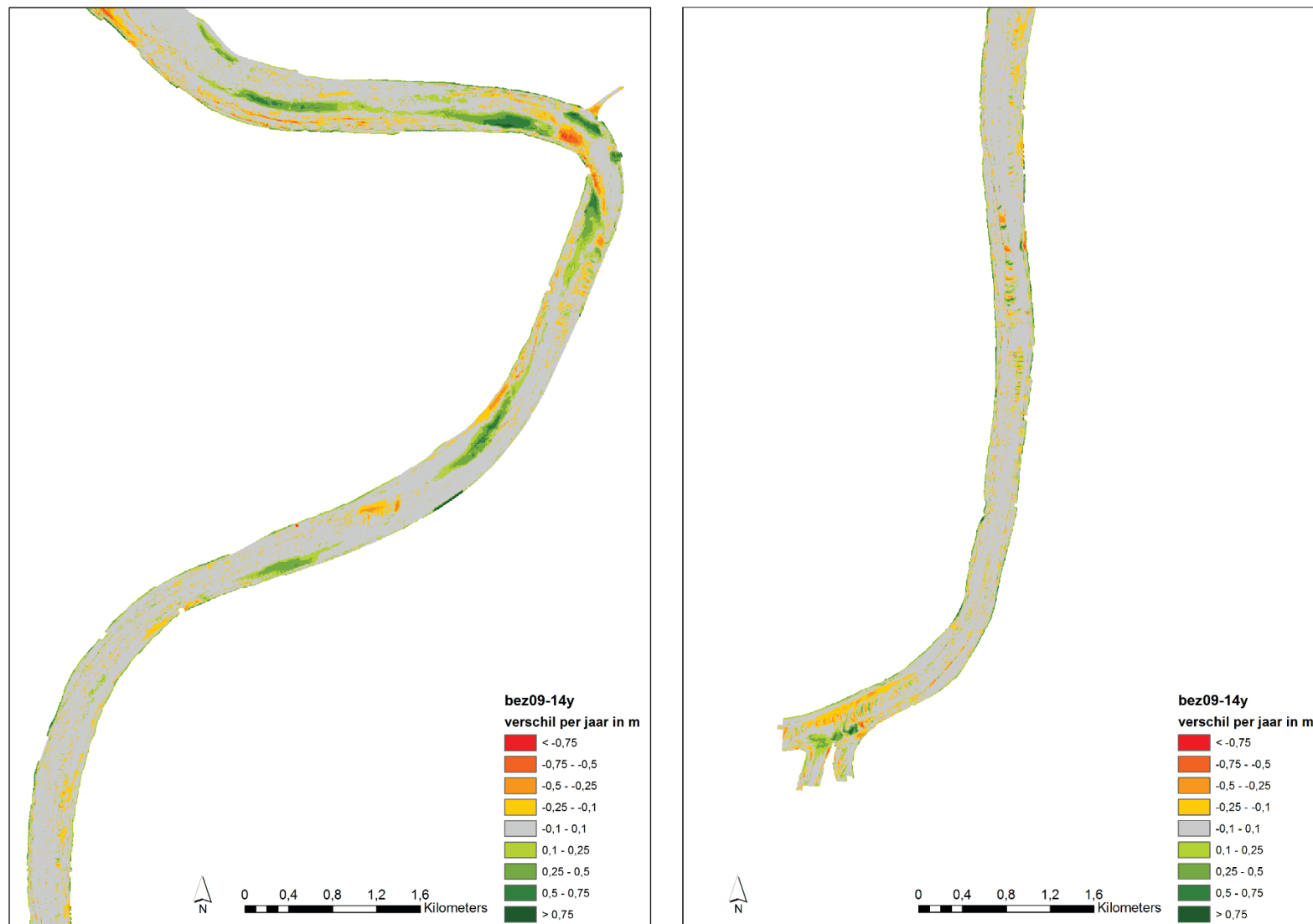
Figuur A 25 – Vergelijking stroomsnelheid bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Oosterweel



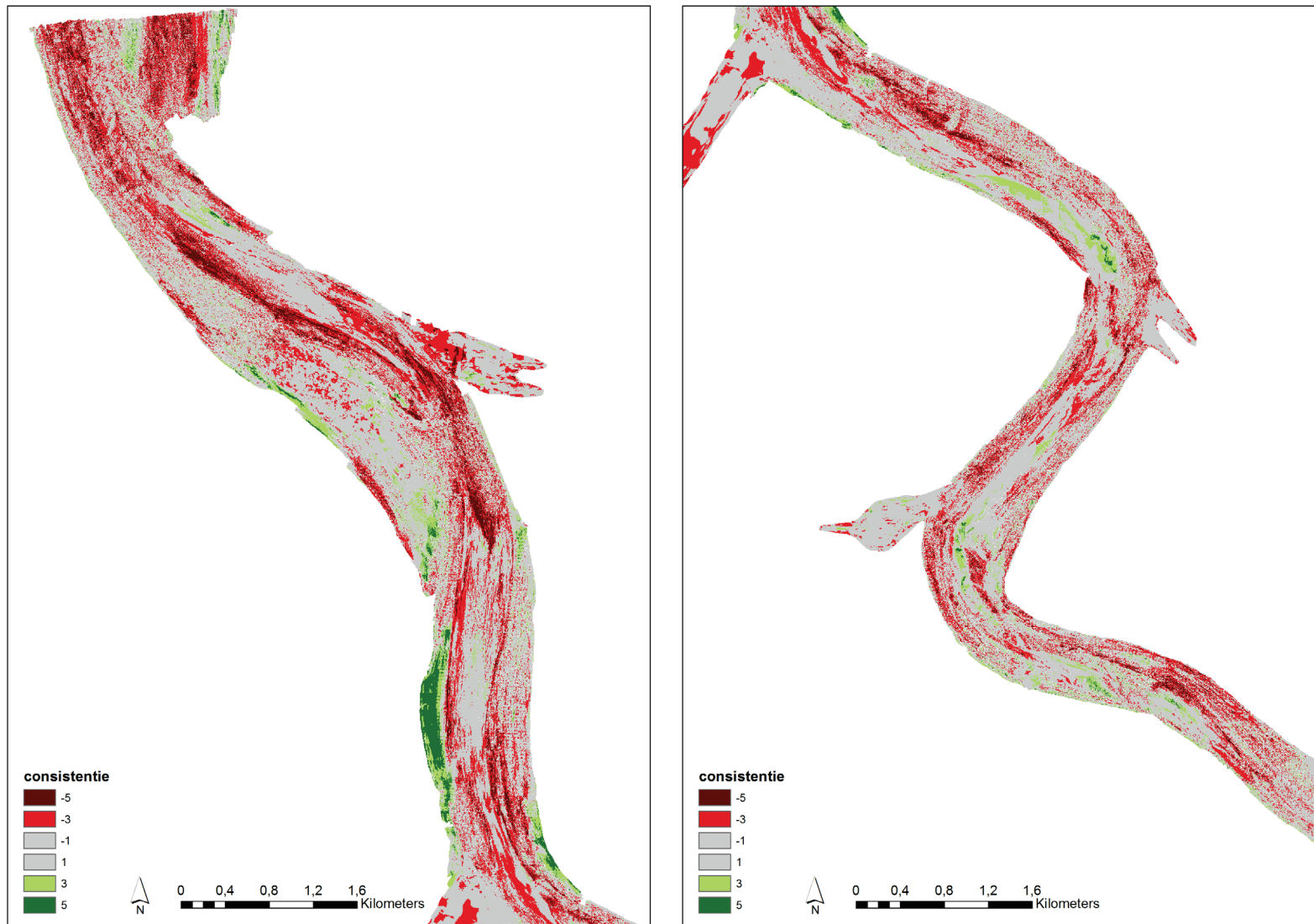
Figuur A 26 – Vergelijking stroomsnelheid bij finale modelinstellingen en bij metingen voor Kruibeke



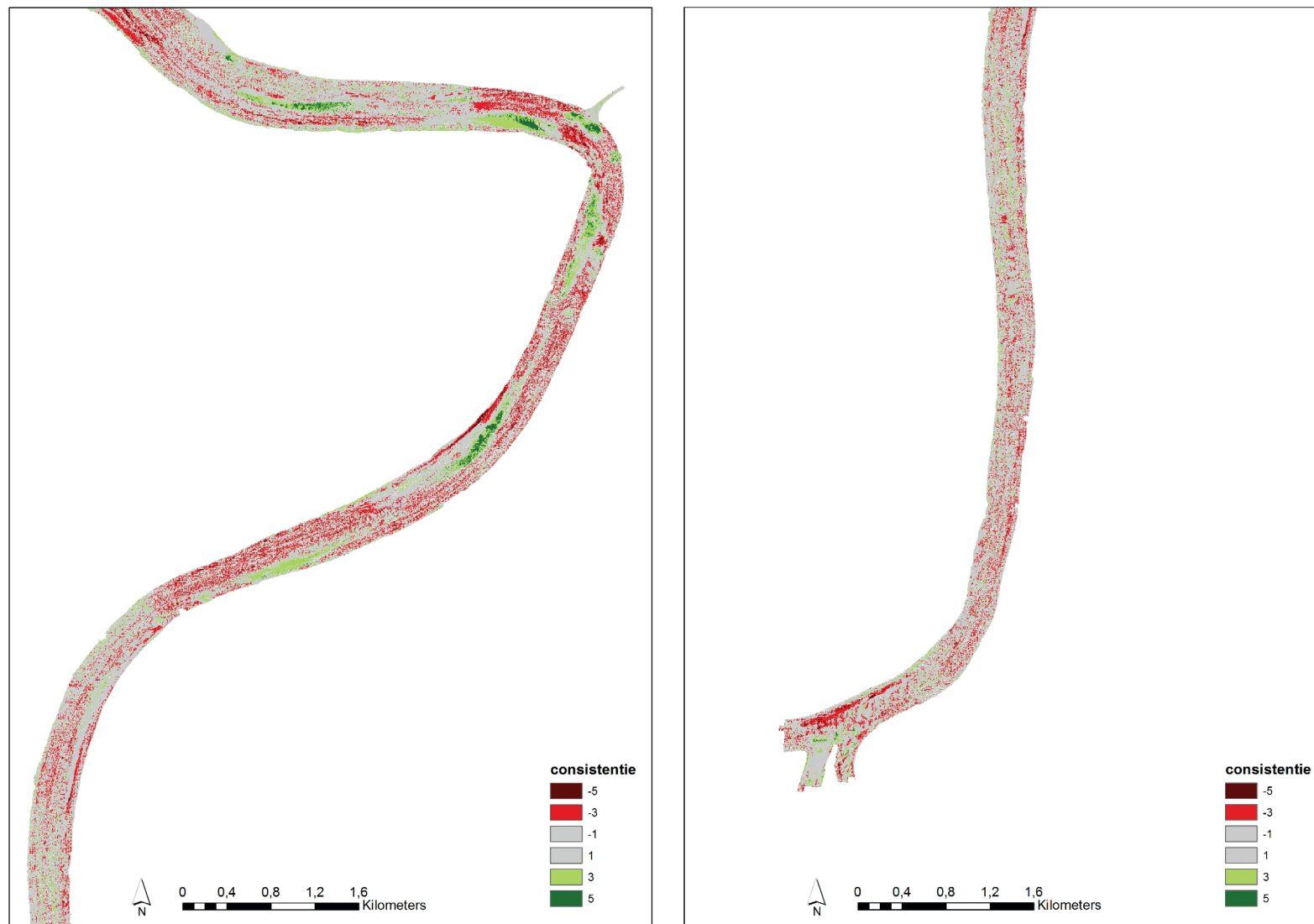
Figuur A 27 – Erosie/sedimentatie per jaar voor de periode 2009-2014 (deel 1 en 2)



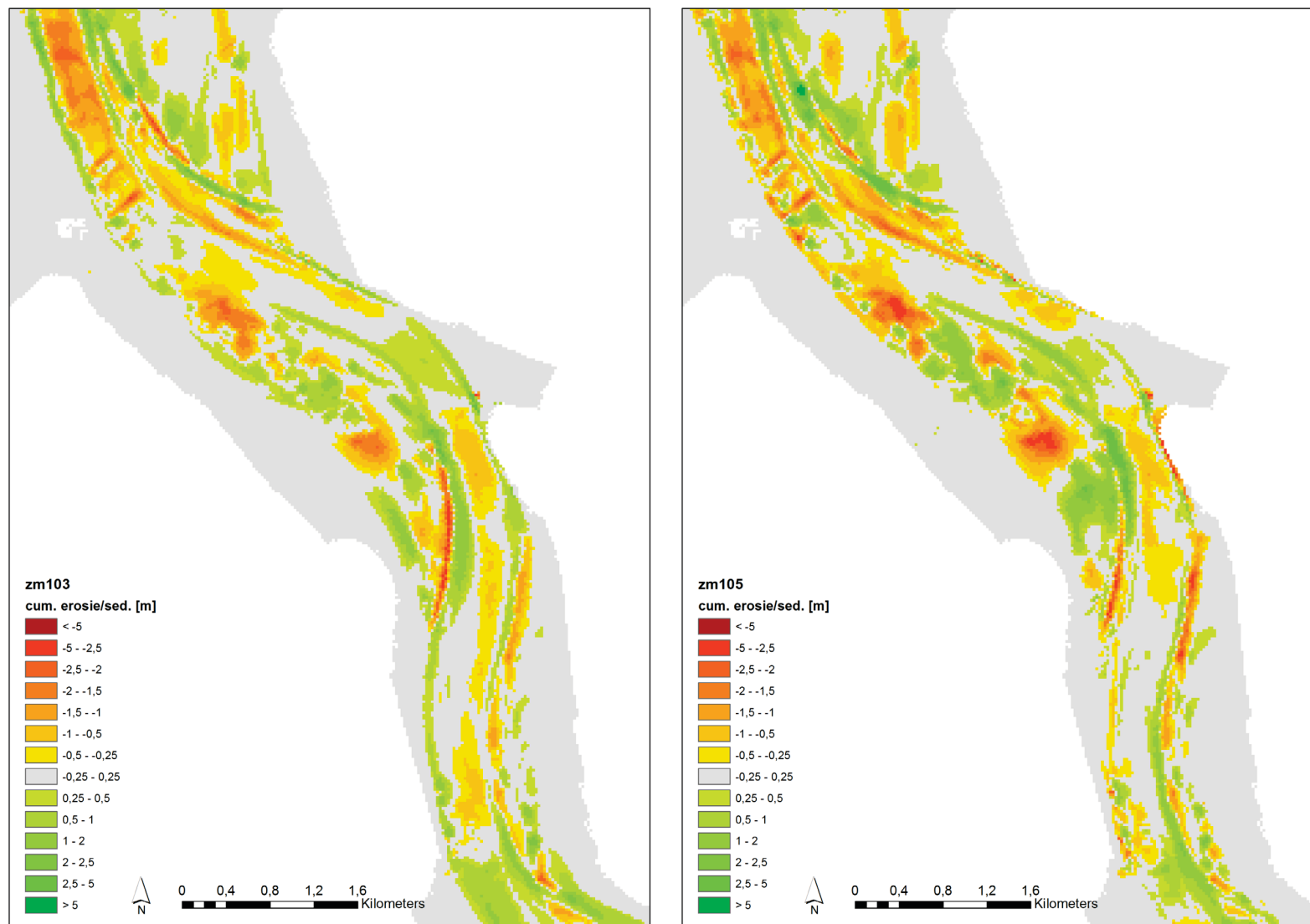
Figuur A 28 – Erosie/sedimentatie per jaar voor de periode 2009-2014 (deel 3 en 4)



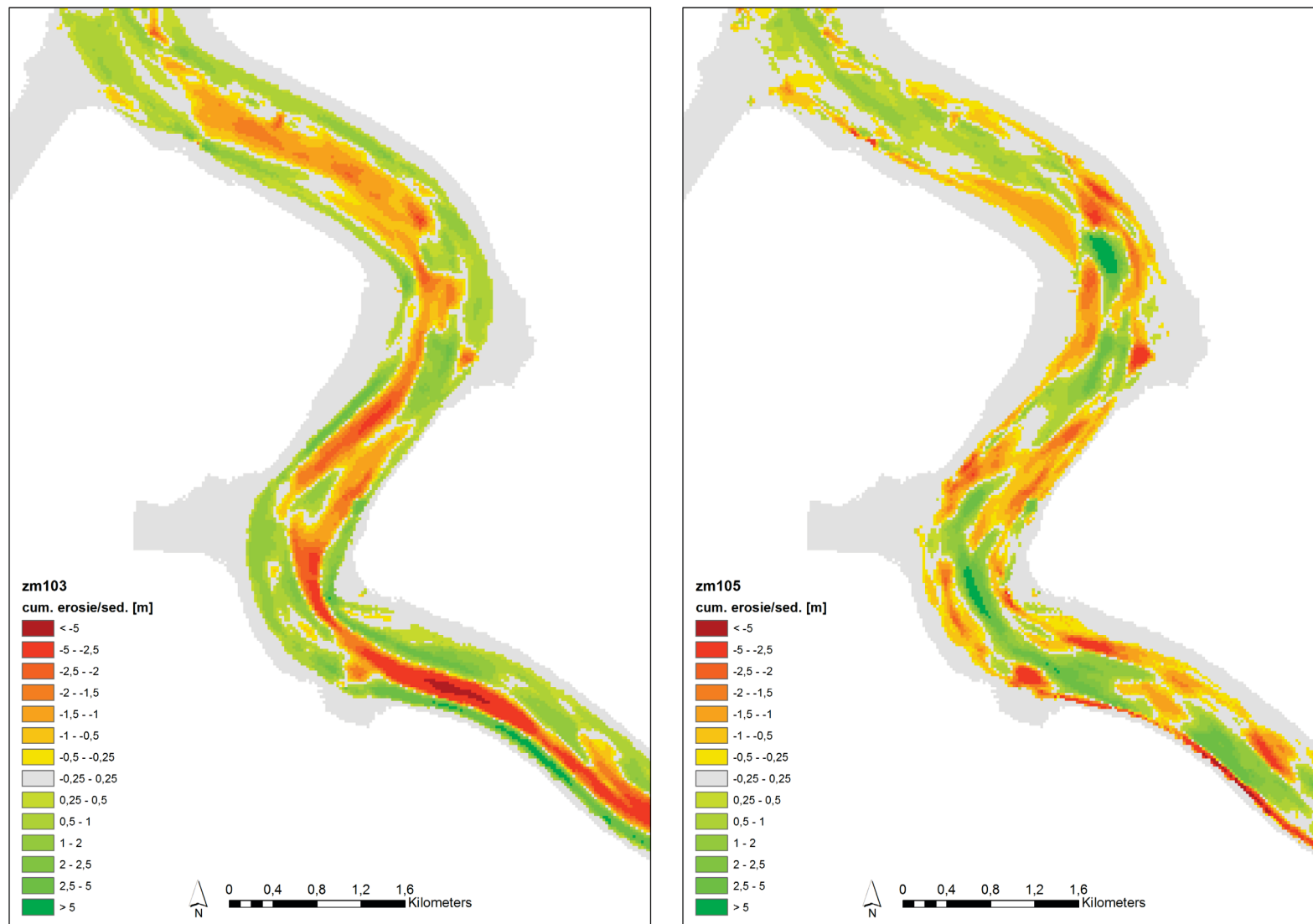
Figuur A 29 – Consistentie kaart voor de periode 2009 – 2014 (deel 1 en 2)



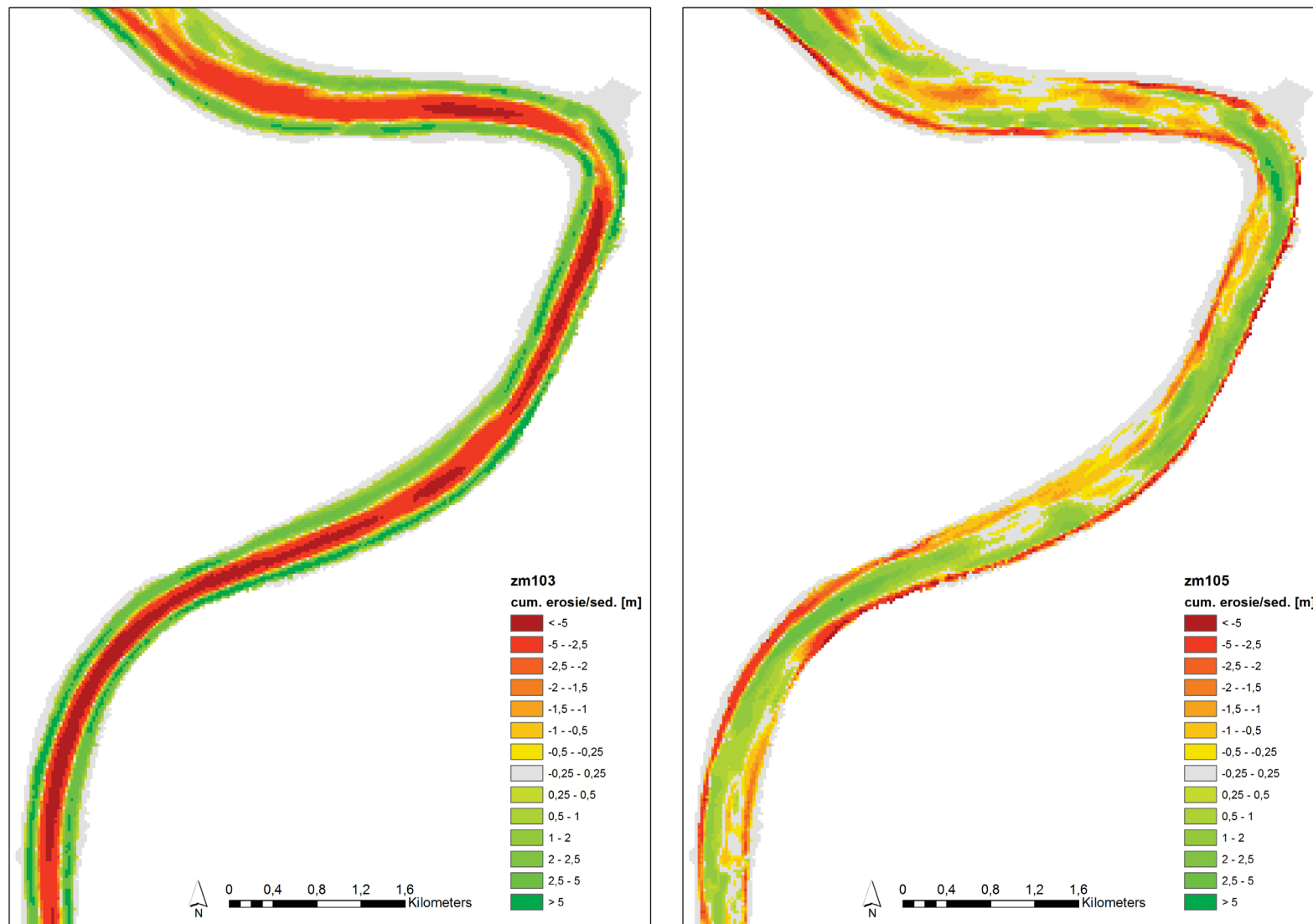
Figuur A 30 – Consistentie kaart voor de periode 2009 – 2014 (deel 3 en 4)



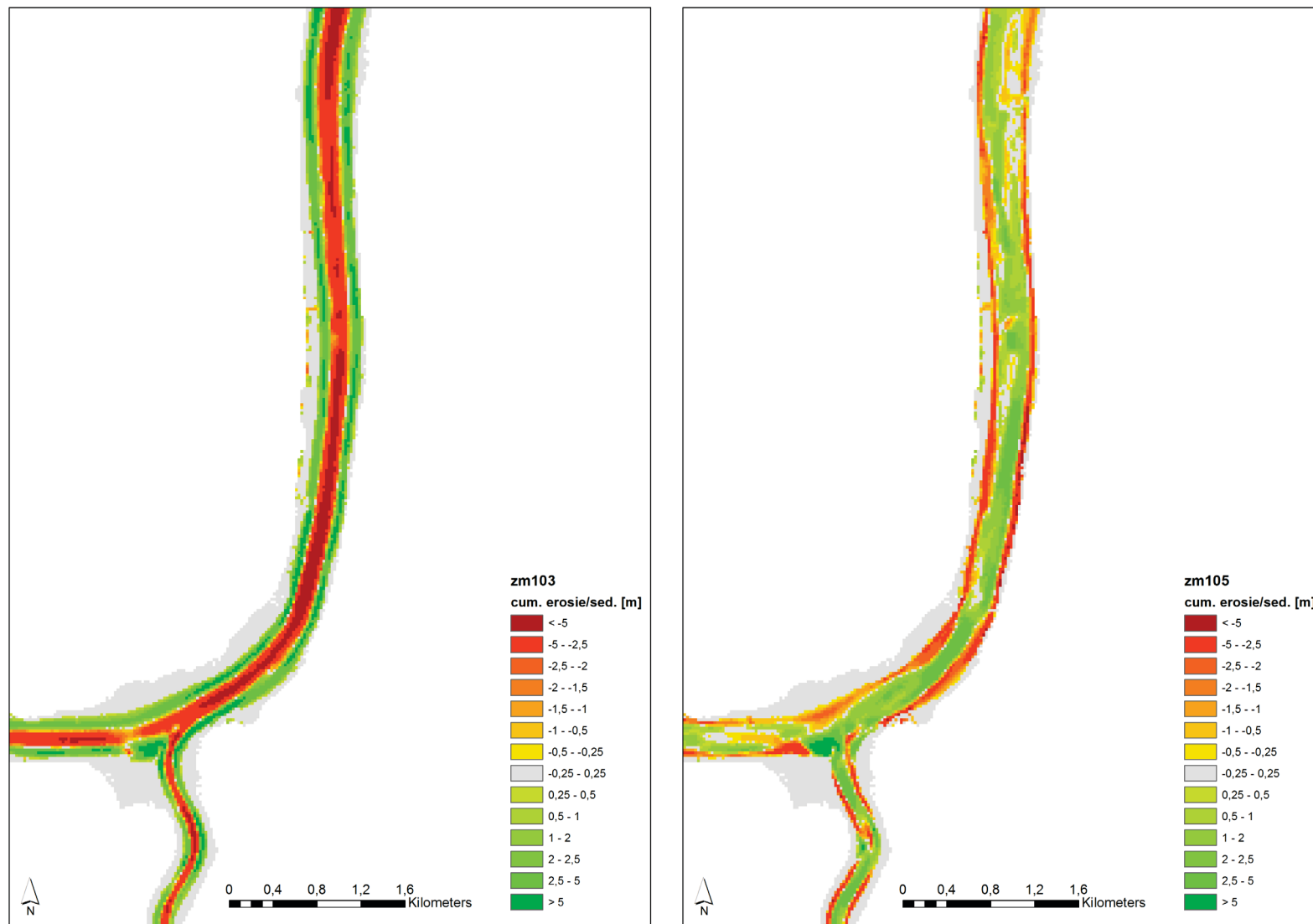
Figuur A 31 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 1



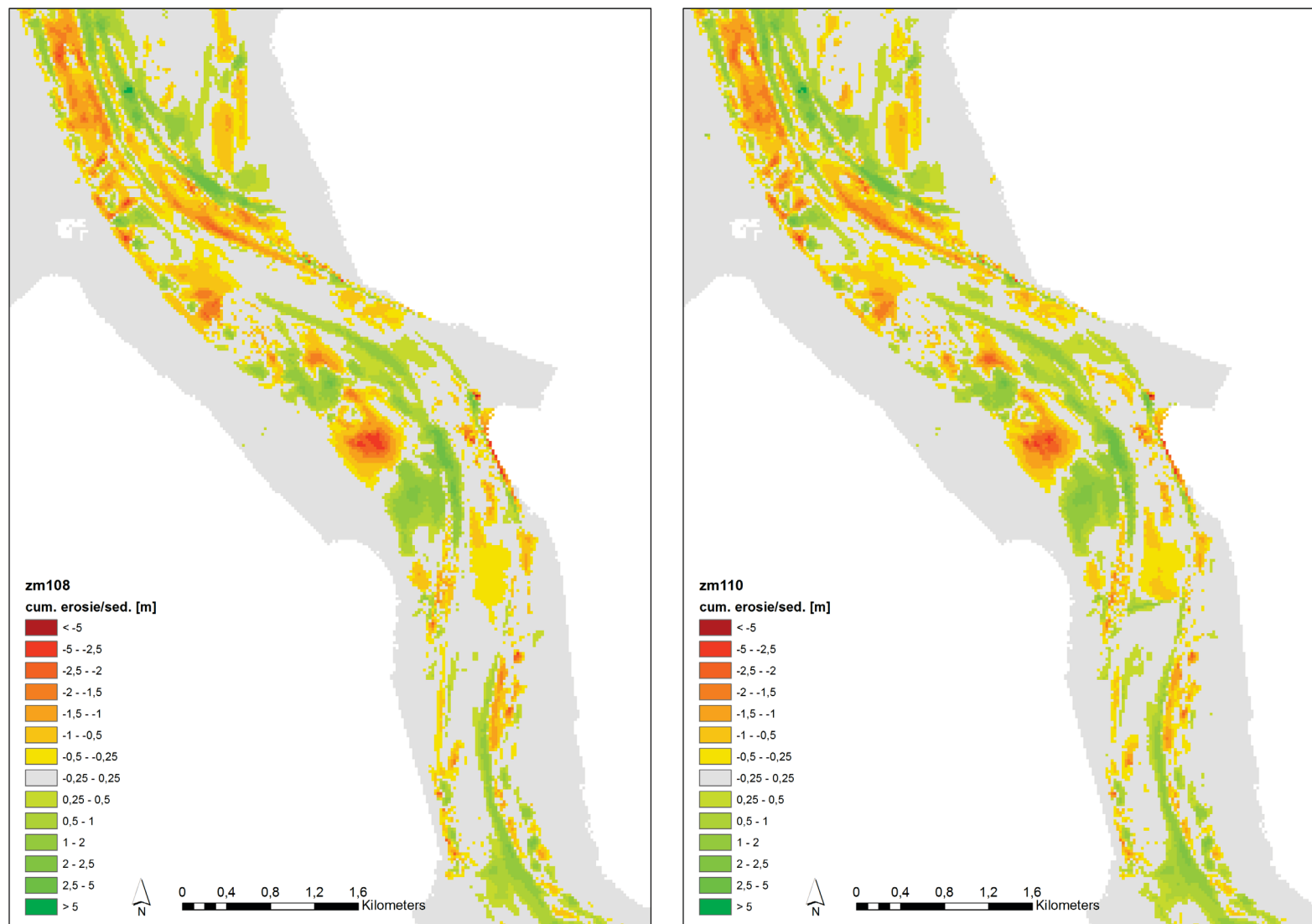
Figuur A 32 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 2



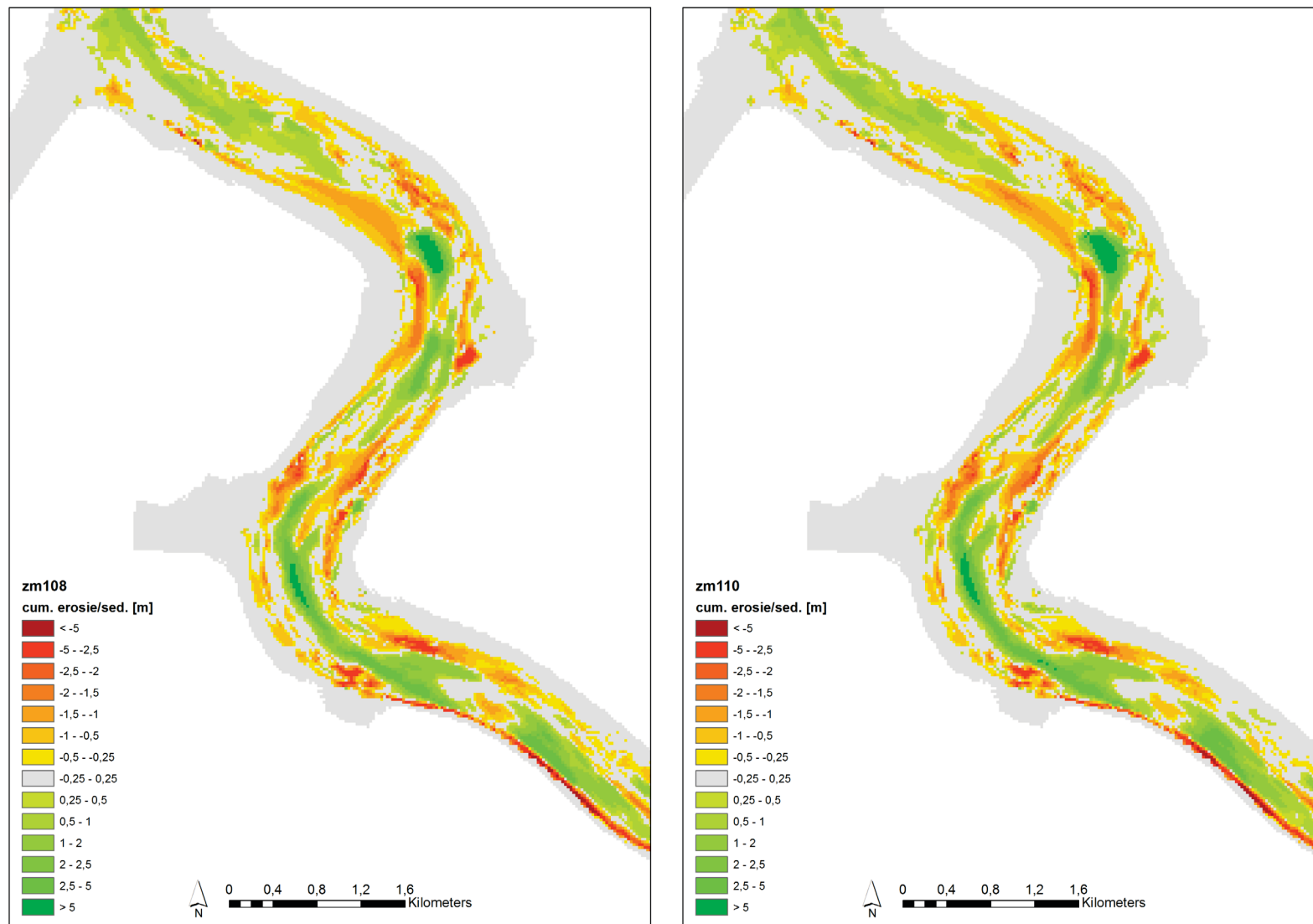
Figuur A 33 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 3



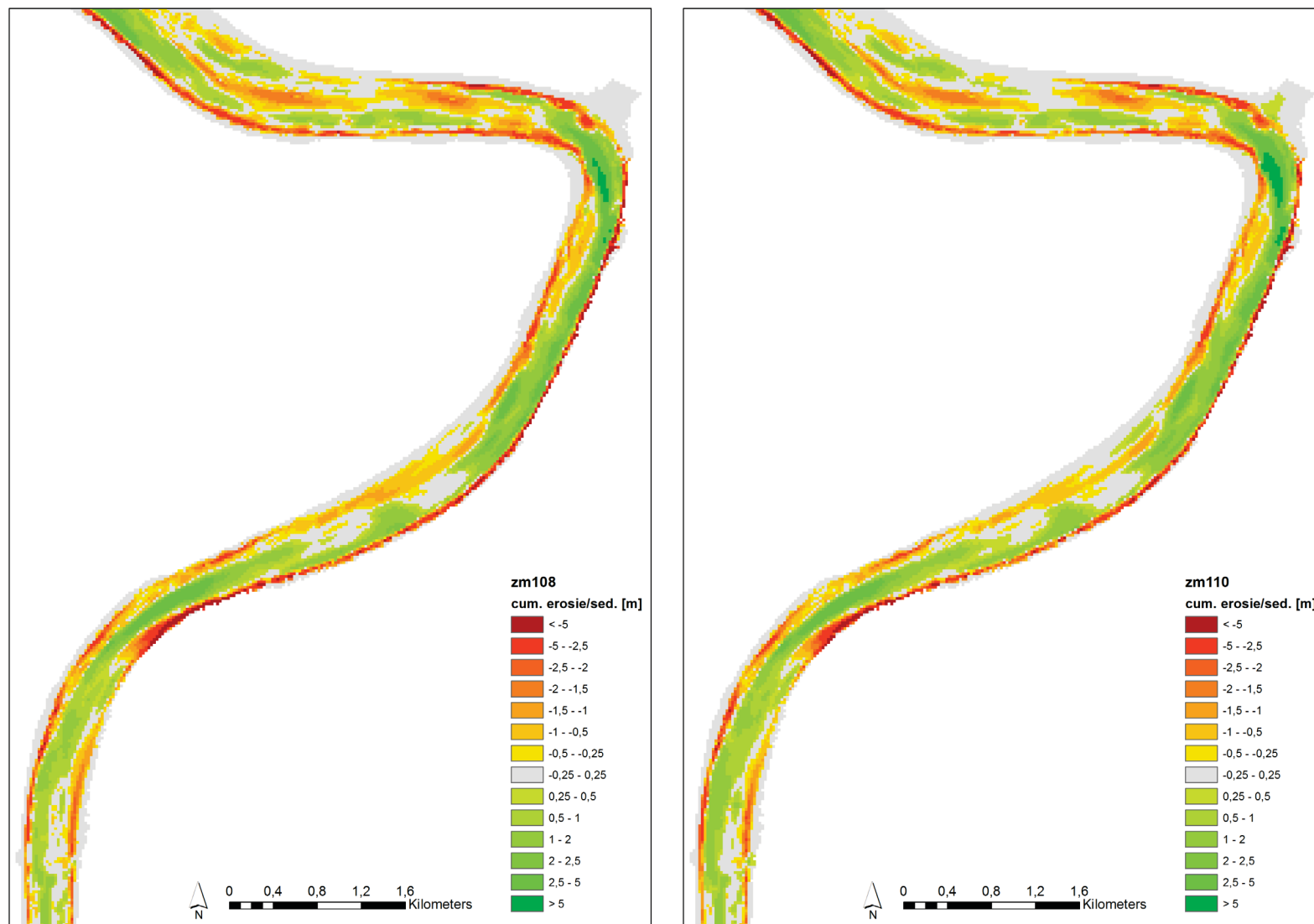
Figuur A 34 – Vergelijking run zm103 (formule Van Rijn) en run zm105 (formule Engelund-Hansen): deel 4



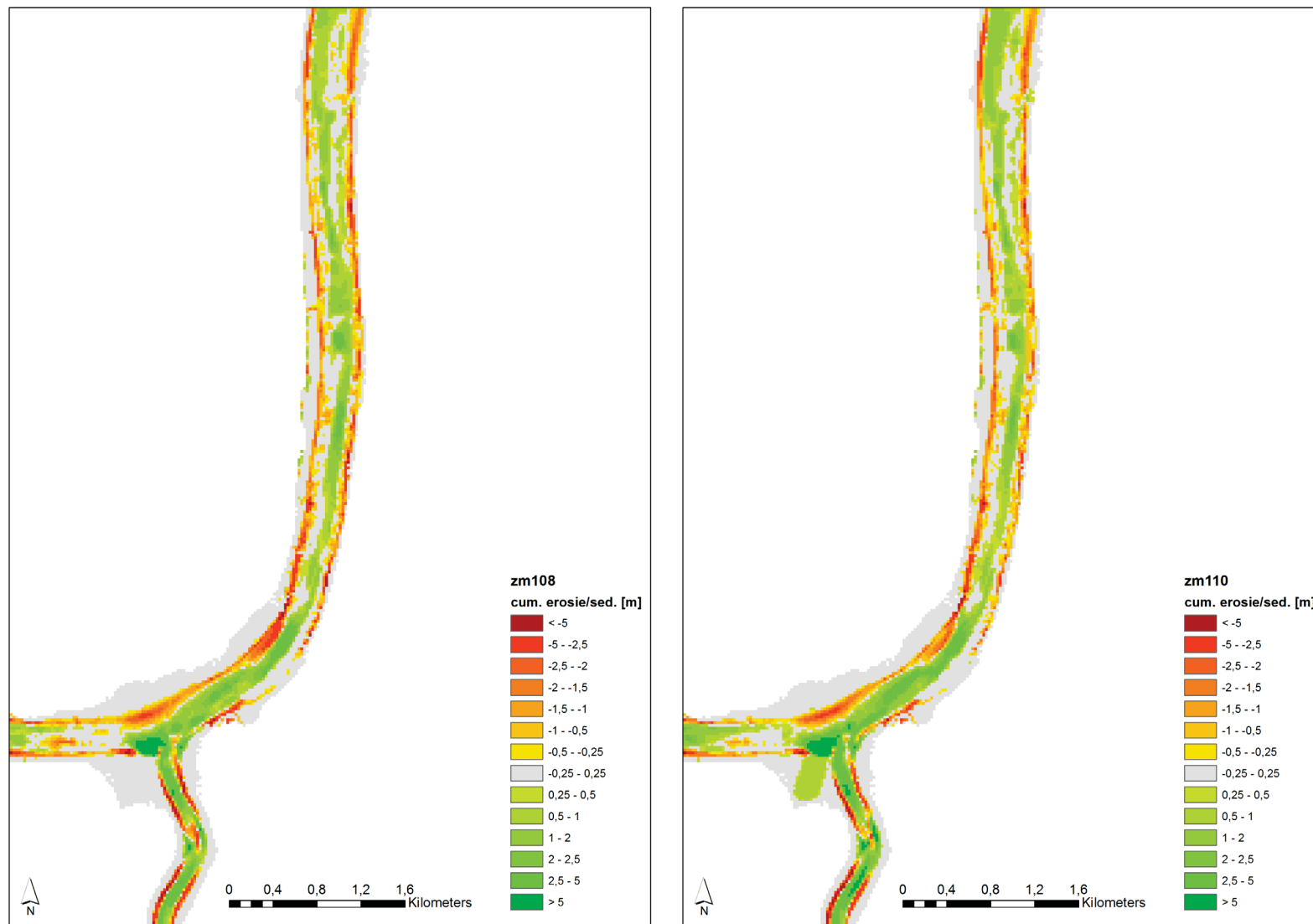
Figuur A 35 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 1



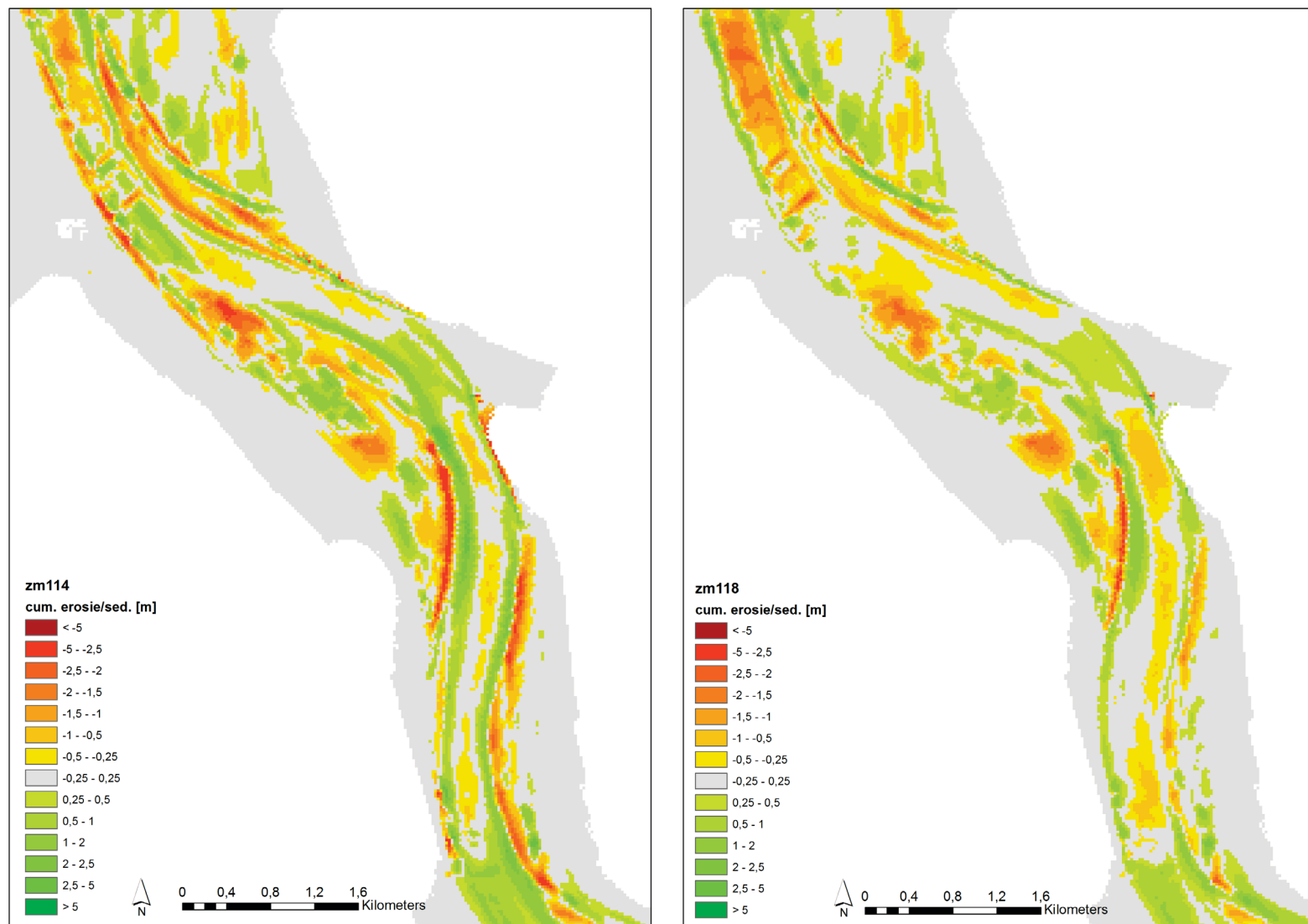
Figuur A 36 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 2



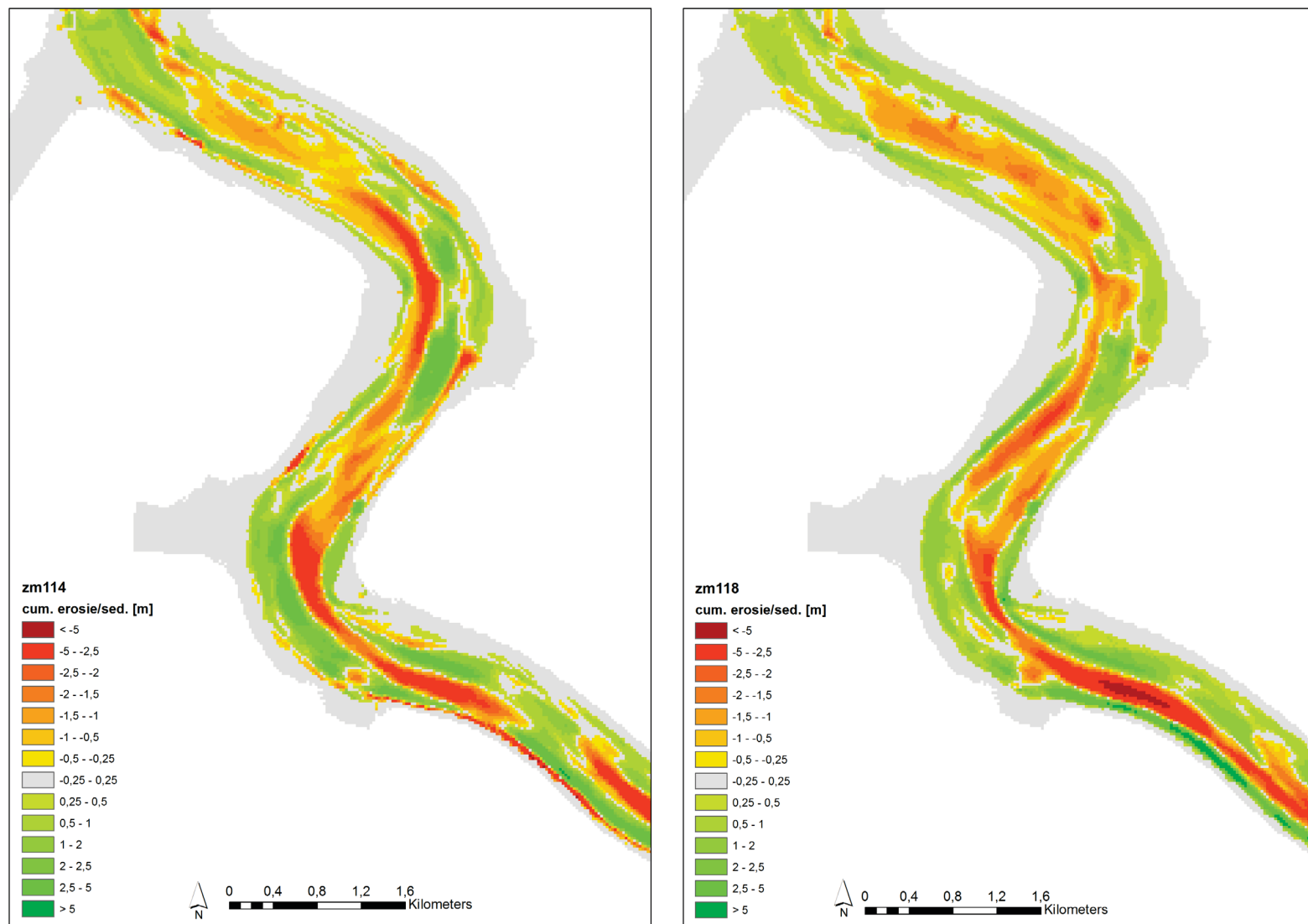
Figuur A 37 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 3



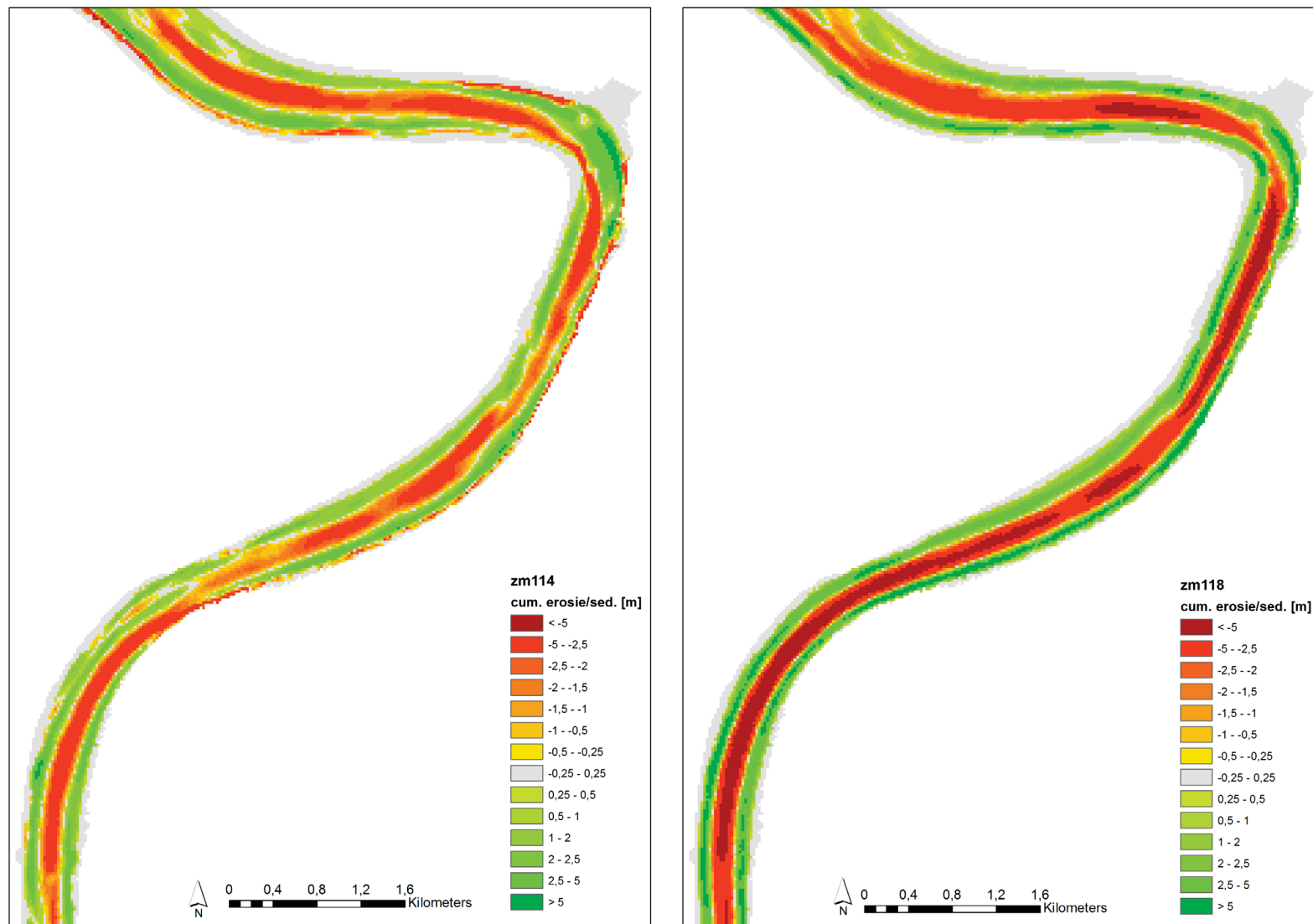
Figuur A 38 – Vergelijking run zm108 (1 sedimentfractie) en run zm110 (4 sedimentfracties): deel 4



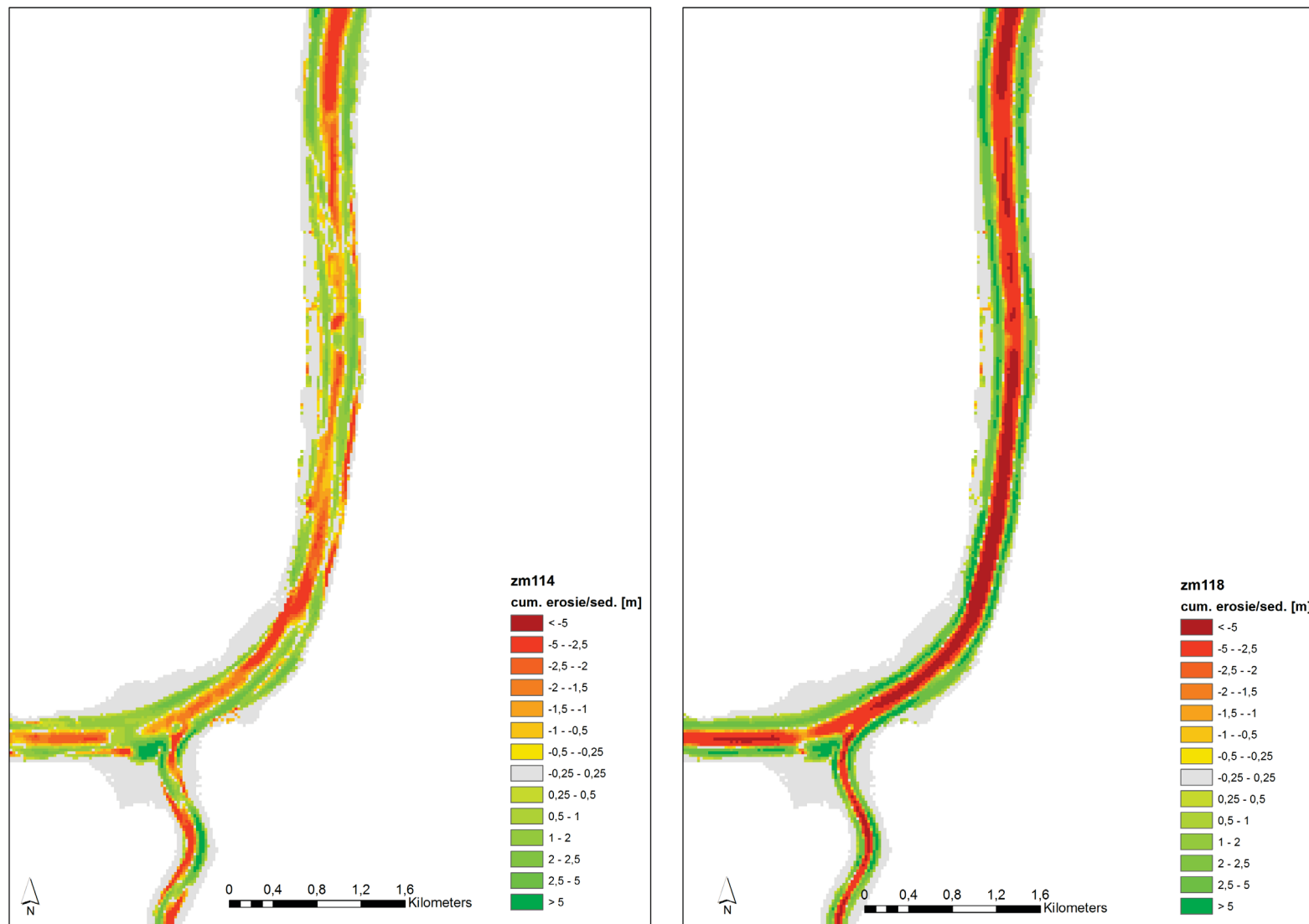
Figuur A 39 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 1



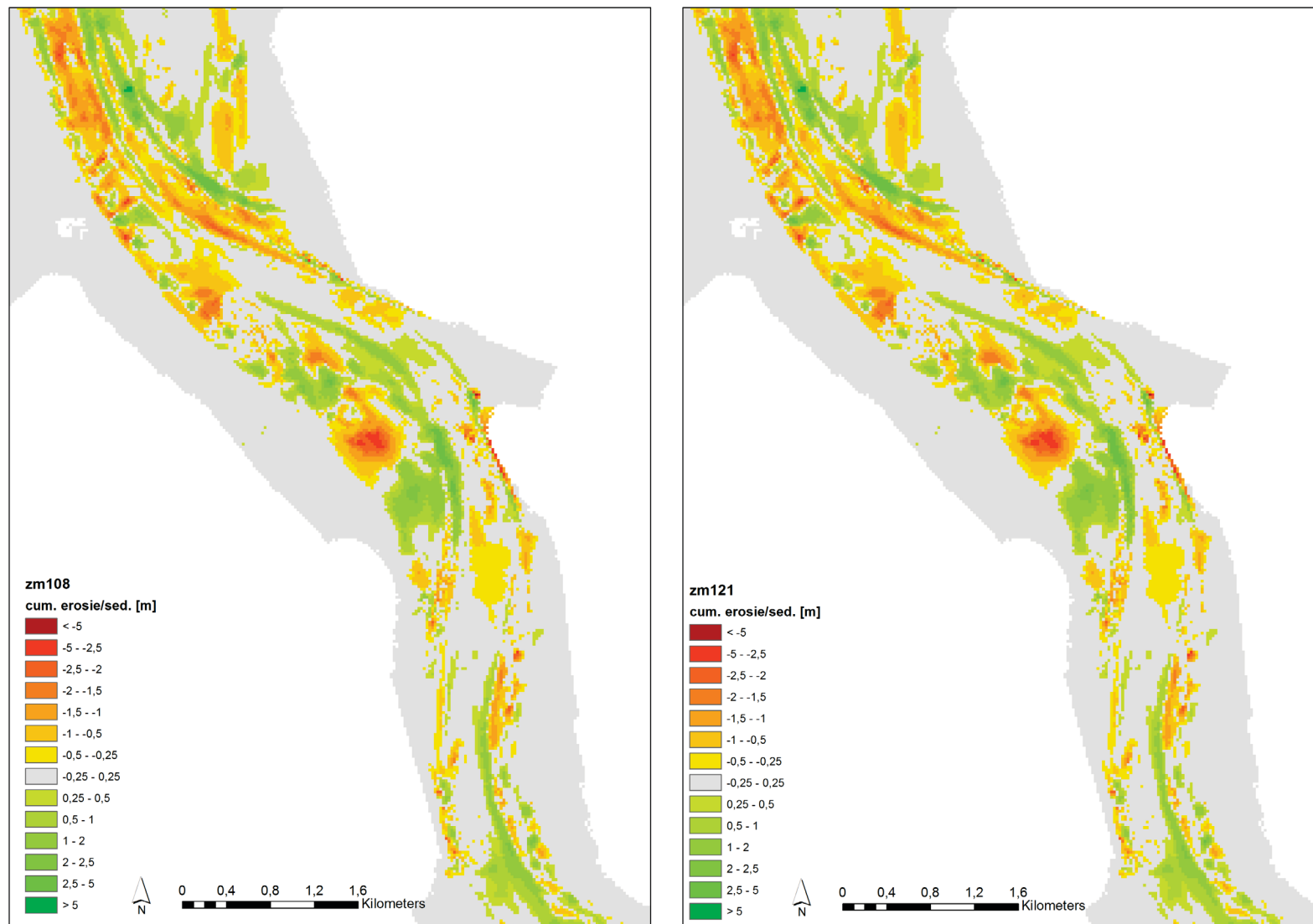
Figuur A 40 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 2



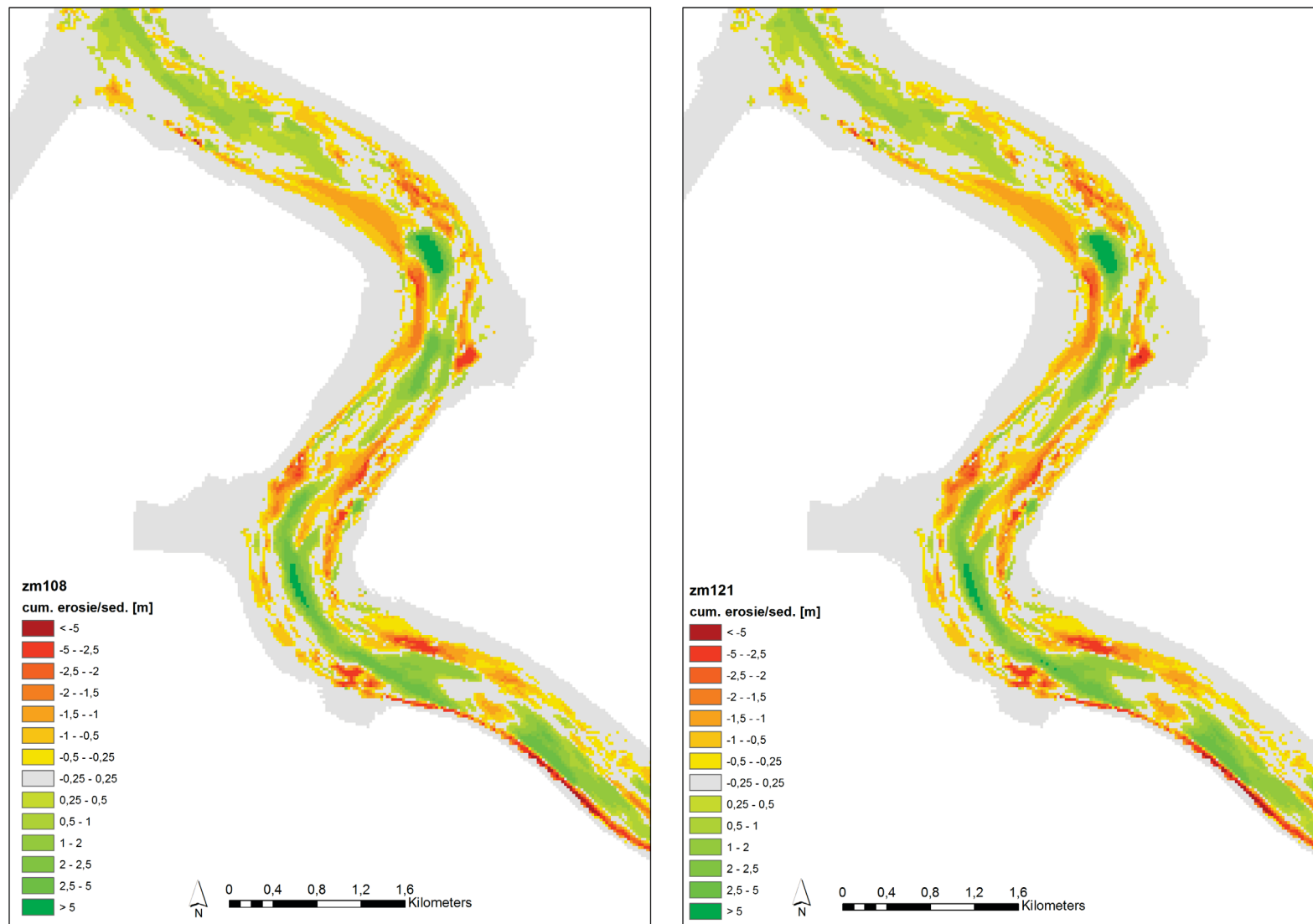
Figuur A 41 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 3



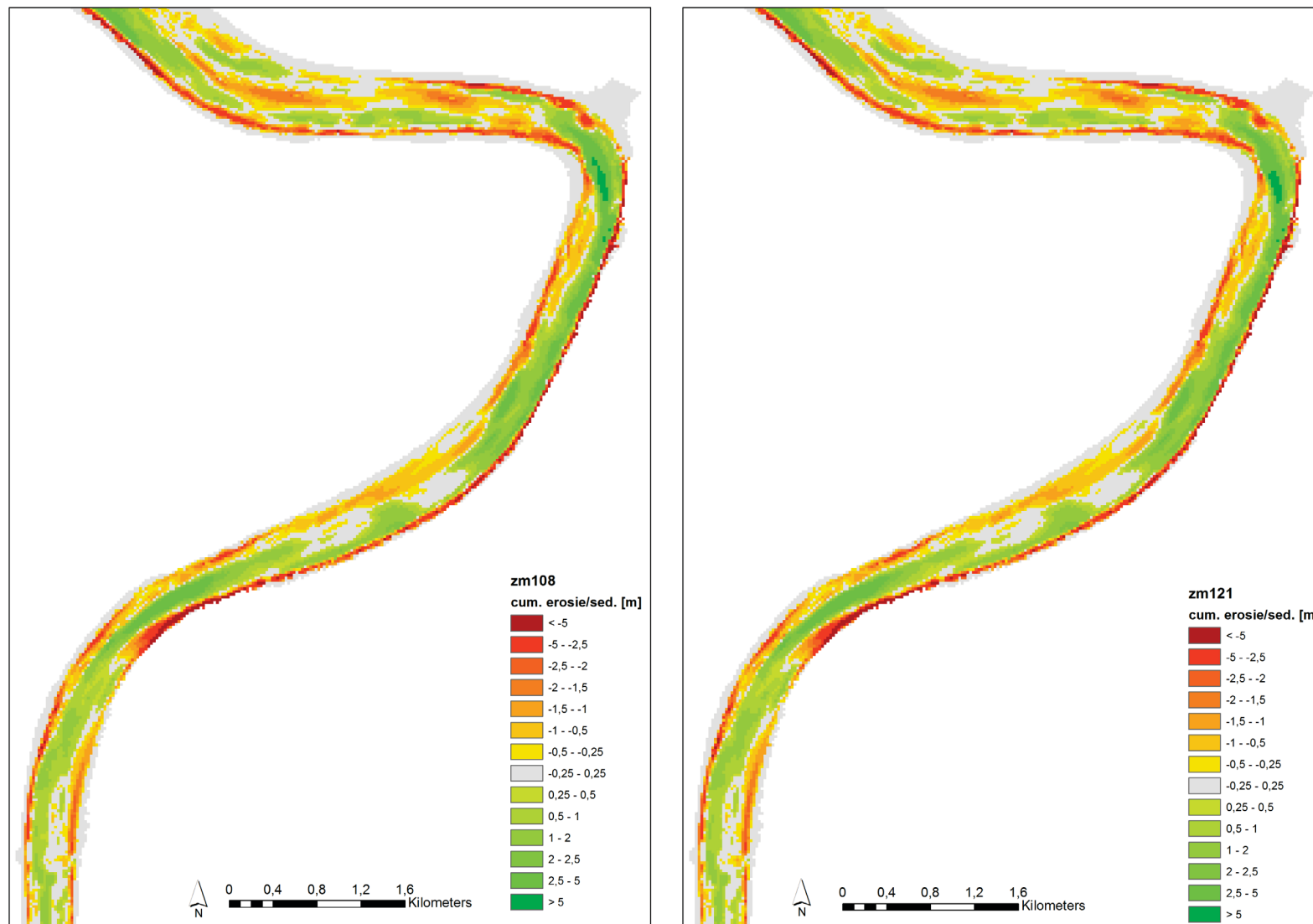
Figuur A 42 – Vergelijking run zm114 (AlfaBn = 50) en run zm118 (AlfaBn=0,15): deel 4



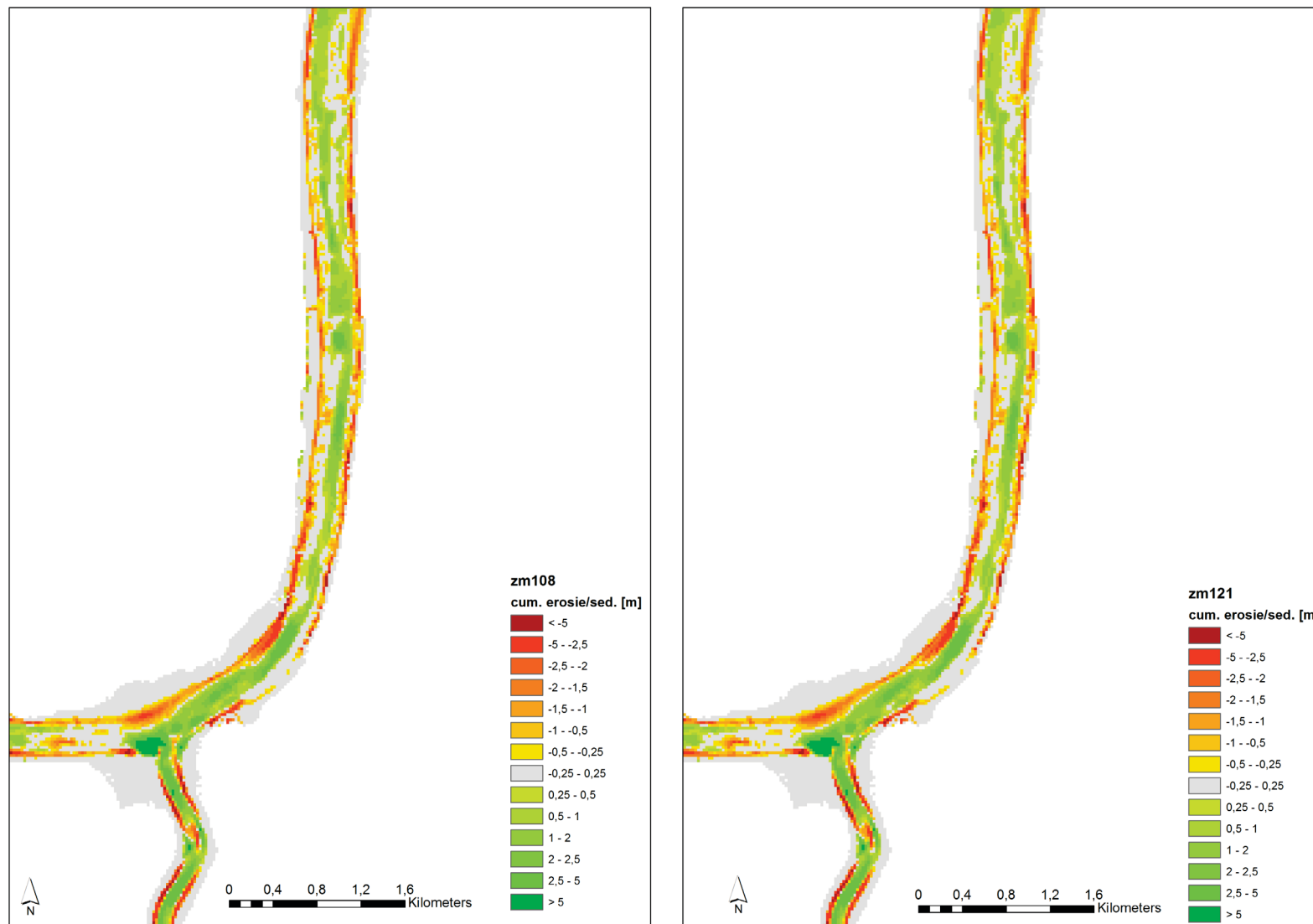
Figuur A 43 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 1



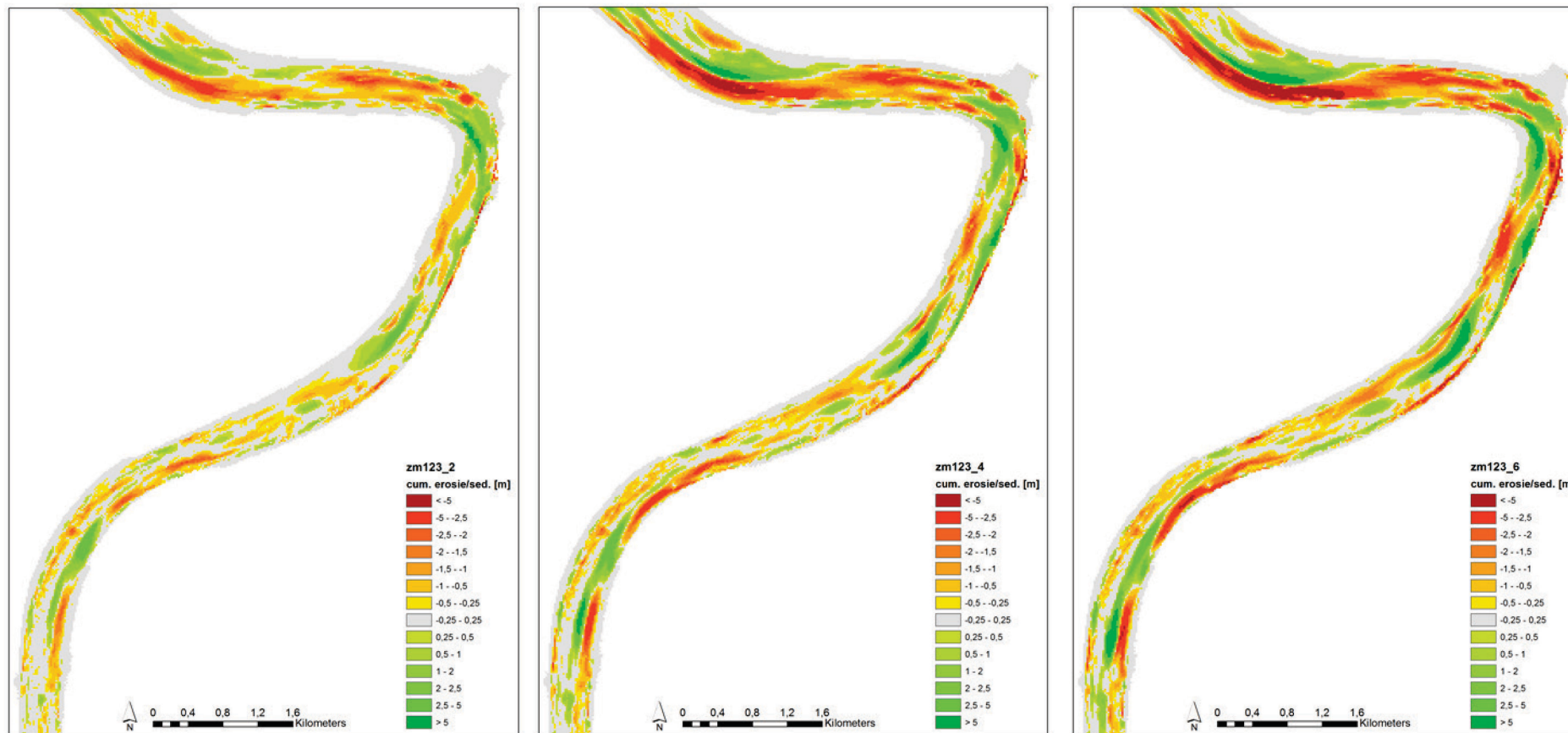
Figuur A 44 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 2



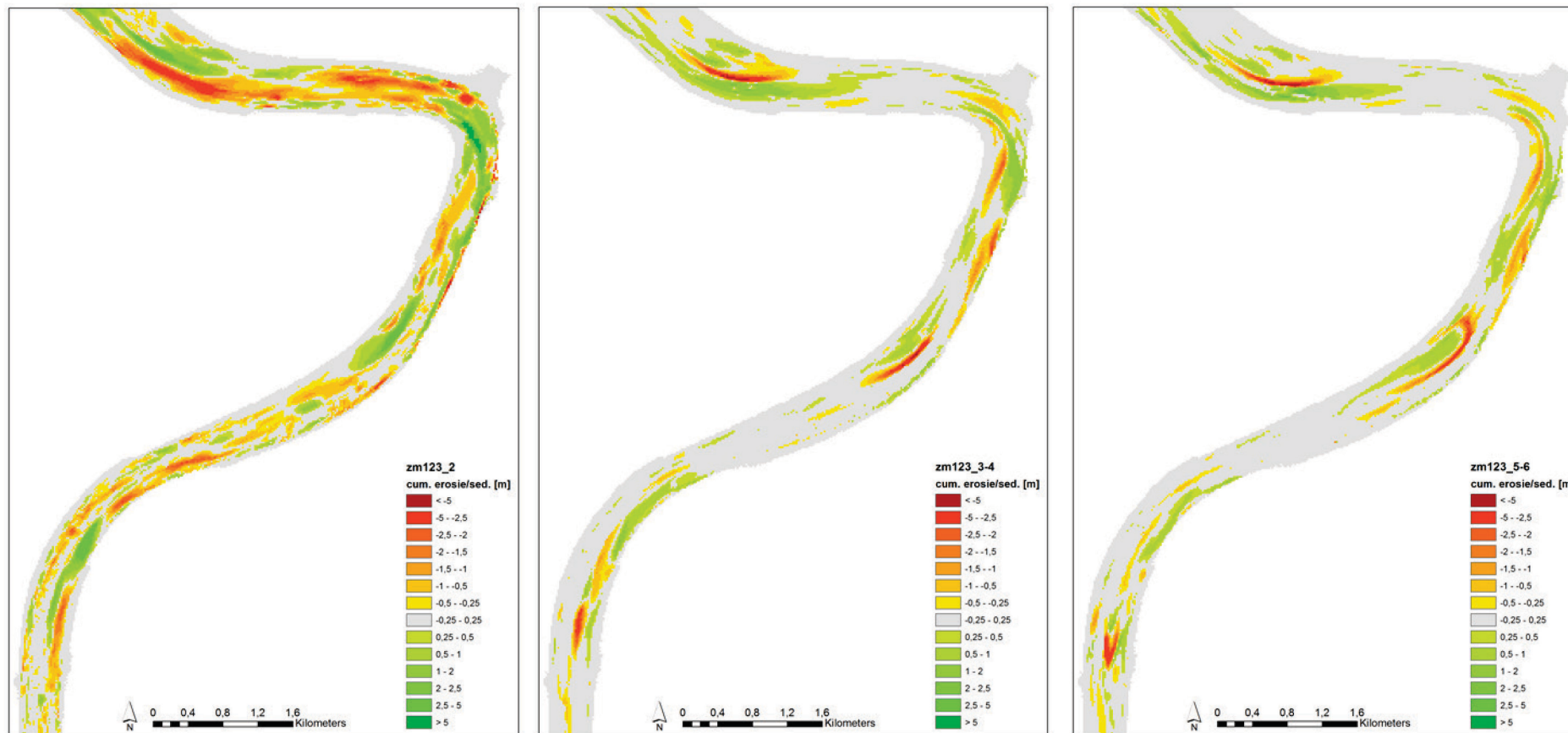
Figuur A 45 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 3



Figuur A 46 – Vergelijking run zm108 (AlfaBs = 1) en run zm121 (AlfaBs=0,1): deel 4



Figuur A 47 – Vergelijking erosie/sedimentatie na doorlooptijd van 1 jaar (links), 3 jaar (midden) en 5 jaar (rechts)



Figuur A 48 – Vergelijking jaarlijkse erosie/sedimentatie voor het eerste jaar van run zm123 (links), van jaar 2 tot 3 (midden) en van jaar 4 tot 5 (rechts)

BIJLAGE B: SEDIMENTTRANSPORTCAPACITEIT: OFFLINE BEREKENING

In het numerieke model is de ruimtelijke variatie van de korrelgrootte van het bodemsediment moeilijk op te leggen. Op basis van beschikbare bodemstalen, blijkt er in de realiteit echter een aanzienlijke variatie aanwezig te zijn (zie Figuur B 1). Daarom werd in een eerste fase een inschatting gemaakt van de sedimenttransportcapaciteit via een offline berekening, waarbij rekening gehouden werd met de ruimtelijke variabiliteit in korrelgrootte. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de relatie tussen de d50 en de maximale stroomsnelheid. Voor deze berekening werd gebruik gemaakt van de formule van Engelund- Hansen.

7.1 Methodologie

De sedimenttransportcapaciteit wordt berekend op basis van de benadering van Engelund-Hansen [Engelund-Hansen, 1967]:

$$q_T = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g \cdot d_{50}^3}$$

Met: $\varphi = \frac{0,1 \cdot \theta^{2,5}}{f}$

$$f = \frac{2 \cdot g \cdot S_f \cdot (WL - D)}{v^2}$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d_{50}}$$

$$\tau = \rho_w \cdot u_*^2$$

$$u_* = \min\left(\frac{v}{2,5 \cdot \log\left(\frac{12,27 \cdot (WL - D)}{1,5 \cdot d_{50}}\right)}; 0,1 \cdot v\right)$$

WL: waterstand op betreffende locatie [mTAW]

D: bodemligging [mTAW]

v: diepte-gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

D50: mediane korrelgrootte [m]

S_f: bodemhelling [-]

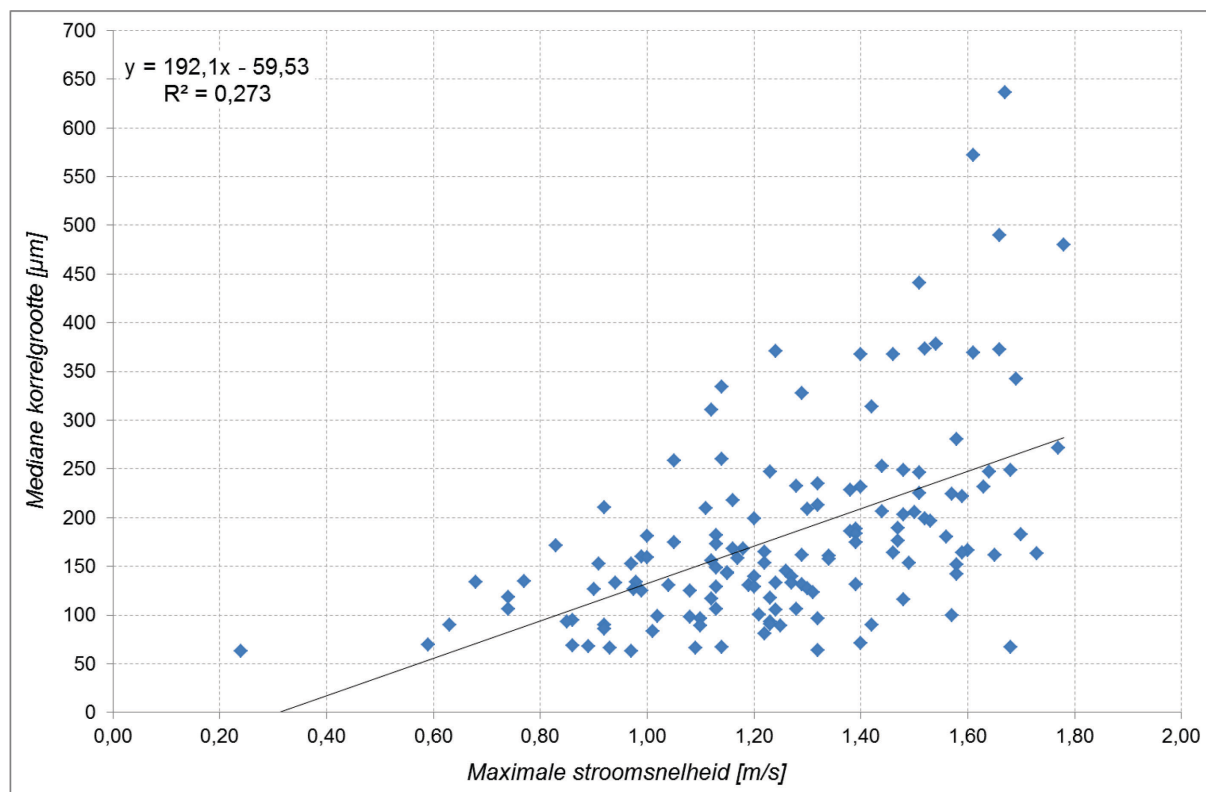
De waterstanden, bodemligging en diepte-gemiddelde stroomsnelheid worden uit de numerieke modelsimulatie (simulatie 2022) afgeleid. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de gegevens uit 2 volledige getijcycli (omwille van de dagelijkse ongelijkheid van het getij) rond springtij (06/10/2009 0:00 – 07/10/2010 1:00).

De bodemhelling S_f is een parameter die voor estuaria minder relevant is. Daarom is deze in deze berekening vervangen door de instantane waterhelling, berekend tussen Bath en Hemiksem. Het meer afwaarts, resp. opwaarts, gelegen deel van het modeldomein wordt niet meegenomen in de berekening aangezien deze buiten het interessegebied van deze studie ligt (en tevens gevoeliger is voor potentiële randeffecten).

De korrelgrootte wordt bepaald op basis van de maximale stroomsnelheid, beschreven in onderstaande paragraaf.

7.1.1 Inschatting korrelgrootte

Voor het berekenen van de sedimenttransportcapaciteit dient informatie beschikbaar te zijn omtrent de korrelgrootte. Recent werd er een nieuwe lithologische en geomorfologische kaart voor de Beneden-Zeeschelde opgemaakt [IMDC & VUB, 2010], waarvoor tevens een groot aantal bodemonsters werd genomen. Aanvullend aan een kwalitatieve beoordeling, werden deze monsters op korrelgrootte geanalyseerd [Vos *et al.*, 2011]. Deze resultaten werden in combinatie met beschikbare gemodelleerde stroomsnelheden [Maximova *et al.*, 2013] gebruikt om een correlatie op te stellen tussen de maximale stroomsnelheid bij springtij en de d50. Voor de relatie werden enkel de monsters weerhouden van de zandige stalen (i.e. d50 groter dan 63 µm), en wordt weergegeven in Figuur B 1.



Figuur B 1 – Correlatie tussen maximale stroomsnelheid en d50 in de Beneden-Zeeschelde

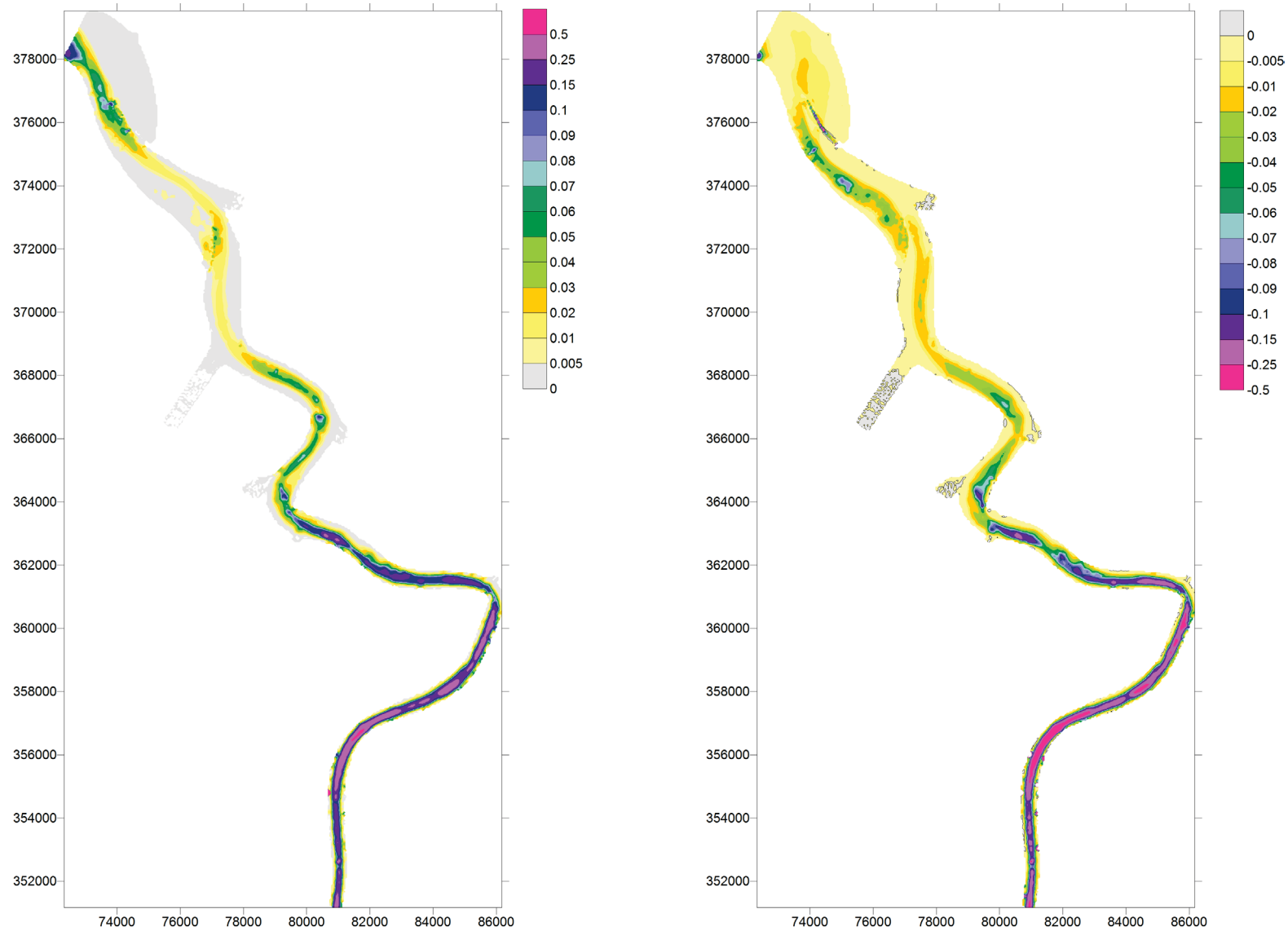
7.1.2 Afgeleide grootheden

De sedimenttransportcapaciteit werd berekend voor alle roosterpunten gelegen onder de 0 mTAW (dit stemt ongeveer overeen met laagwater) gedurende 2 getijdycli. Van deze tijdreeks werden volgende grootheden afgeleid:

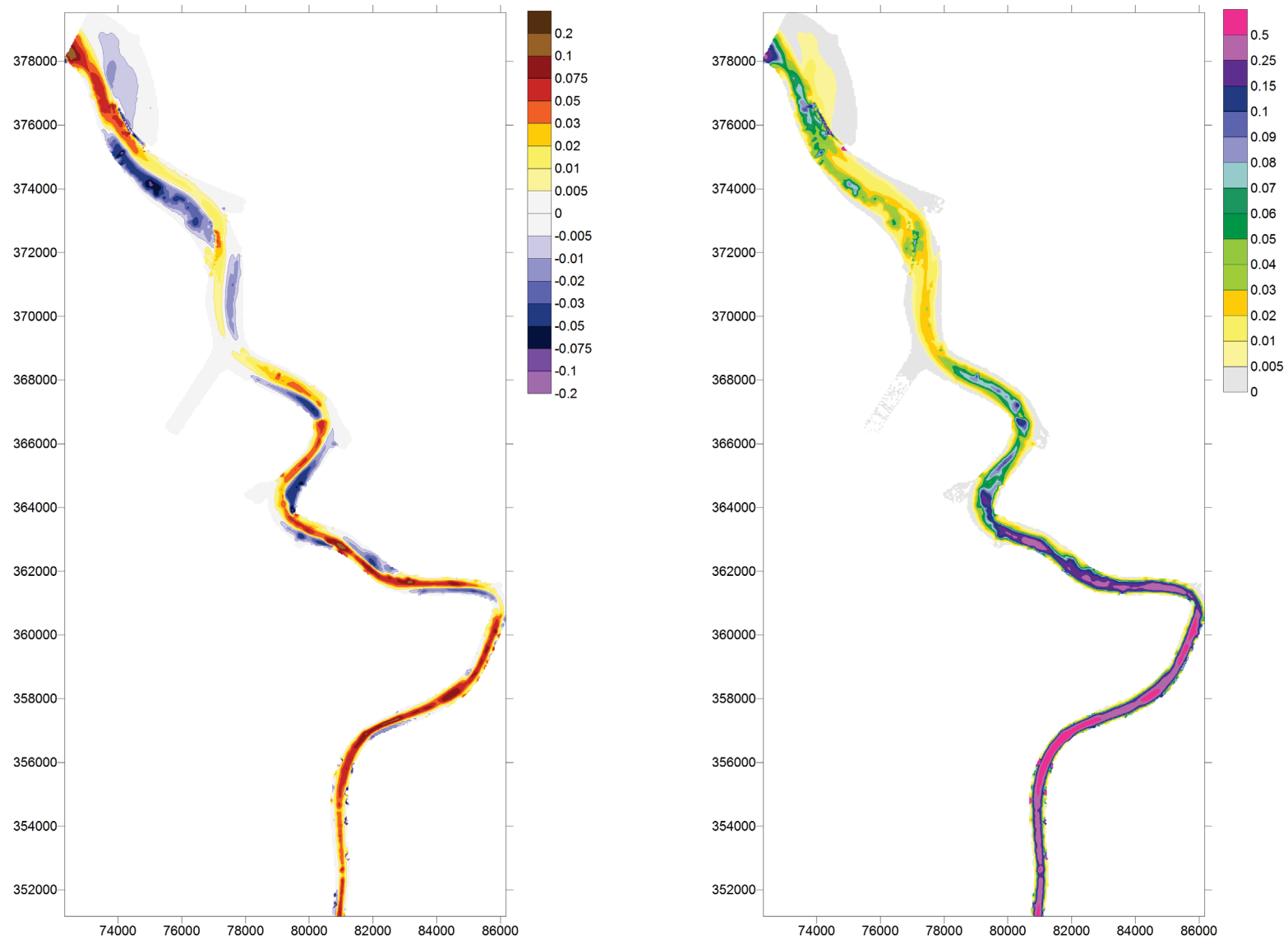
- Sedimenttransportcapaciteit bij eb: som van de sedimenttransportcapaciteiten tijdens eb (positief)
- Sedimenttransportcapaciteit bij vloed: som van de sedimenttransportcapaciteiten tijdens vloed (negatief)
- Netto sedimenttransportcapaciteit: som van de sedimenttransportcapaciteiten over de 2 volledige getijdycli [eb-dominant = positief en vloed-dominant = negatief]
- Bruto sedimenttransportcapaciteit: absolute som van de sedimenttransportcapaciteiten over de 2 volledige getijdycli

7.2 Resultaten

Figuur B 2 en Figuur B 3 geven de verschillende afgeleide sedimenttransportcapaciteiten weer voor de Beneden-Zeeschelde. Uit Figuur B 3 (links) is duidelijk het verschil in dominantie zichtbaar, waar in de zone tussen de grens en Antwerpen een afwisselend patroon tussen beide oevers naar voor komt. Opwaarts Antwerpen lijkt het systeem eb-gedomineerd te zijn. Uit Figuur B 3 (rechts) blijkt dat de grootste sedimenttransportcapaciteiten terug te vinden zijn opwaarts Antwerpen. Dit hangt samen met het groter getijverschil in deze zone en de daaruit resulterende grotere stroomsnelheden. In de zone tussen de grens en Deurganckdok komen de drempel van Zandvliet en de drempel van Frederik eruit als zones met een kleinere sedimenttransportcapaciteit, wat in overeenstemming is met het “drempel” zijn, een zone waar regelmatig onderhoudsbaggerwerken moeten plaatsvinden. Sedimentatie/erosie treedt op wanneer de gradiënt van de transportcapaciteit af-/toeneemt. Bij de overgang van een lage naar een hoge sedimenttransportcapaciteit zal dus een drempel ontstaan.



Figuur B 2 – Sedimenttransportcapaciteit bij eb (links) en bij vloed (rechts)



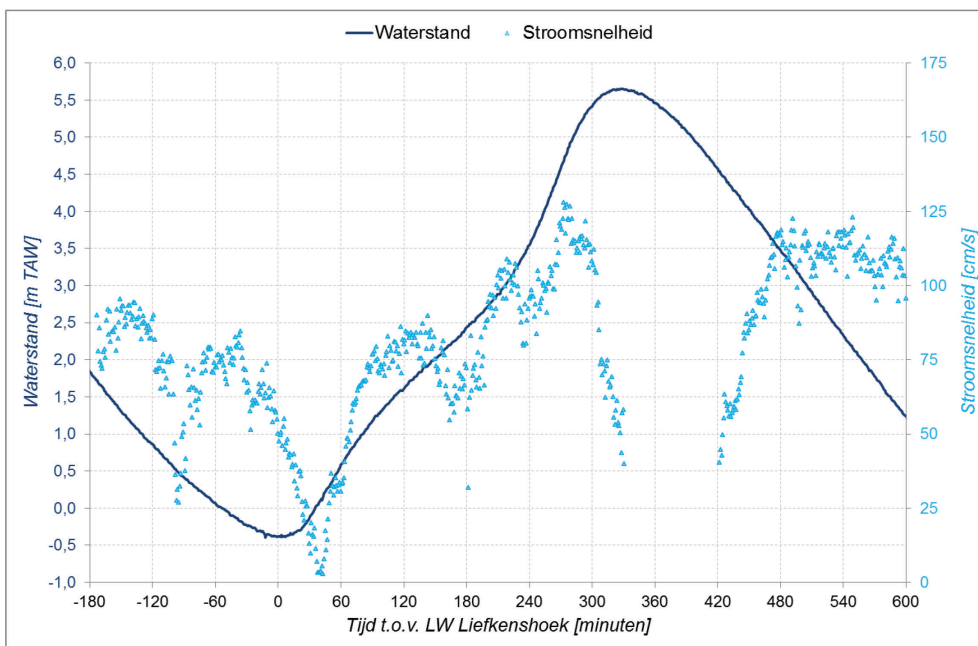
Figuur B 3 – Sedimenttransportcapaciteit netto (links) en bruto (rechts)

BIJLAGE C: METINGEN

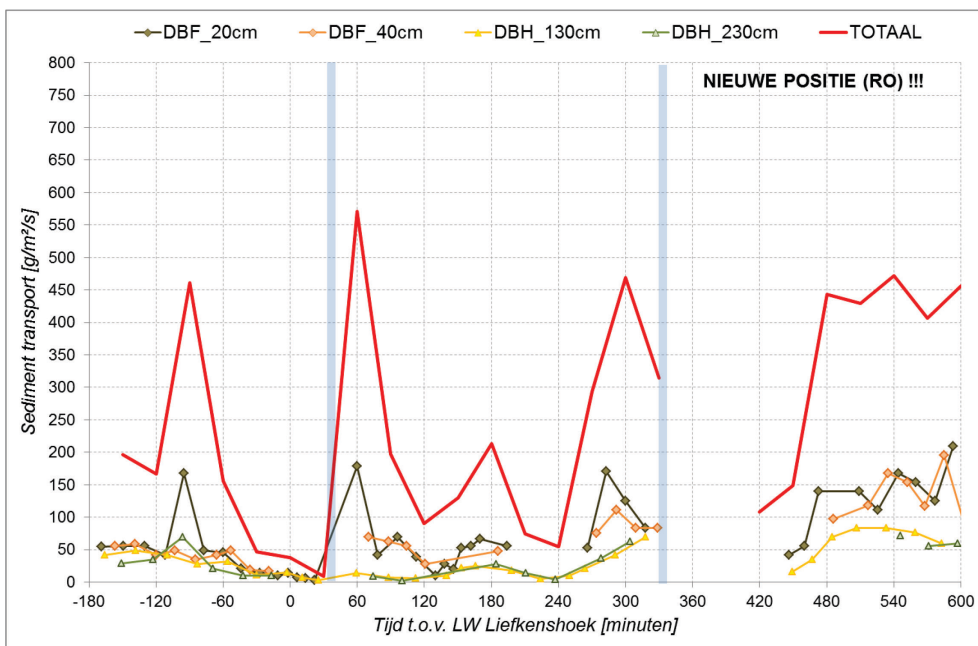
In wat volgt worden de resultaten (waterstand, stroomsnelheid, sedimenttransport en korrelgrootteverdeling) van de meetcampagnes in Liefkenshoek, Oosterweel en Kruikeke weergegeven.

Liefkenshoek

Figuur C 1 geeft de waterstand en stroomsnelheid weer, Figuur C 2 het gemeten en totaal berekende sedimenttransport en Tabel C 1 de karakteristieke korreldiameters ter hoogte van Liefkenshoek.



Figuur C 1 – Overzicht waterstanden en stroomsnelheden Aanderaa t.h.v. Liefkenshoek



Figuur C 2 – Overzicht gemeten sediment transport en berekend totaal transport t.h.v. Liefkenshoek

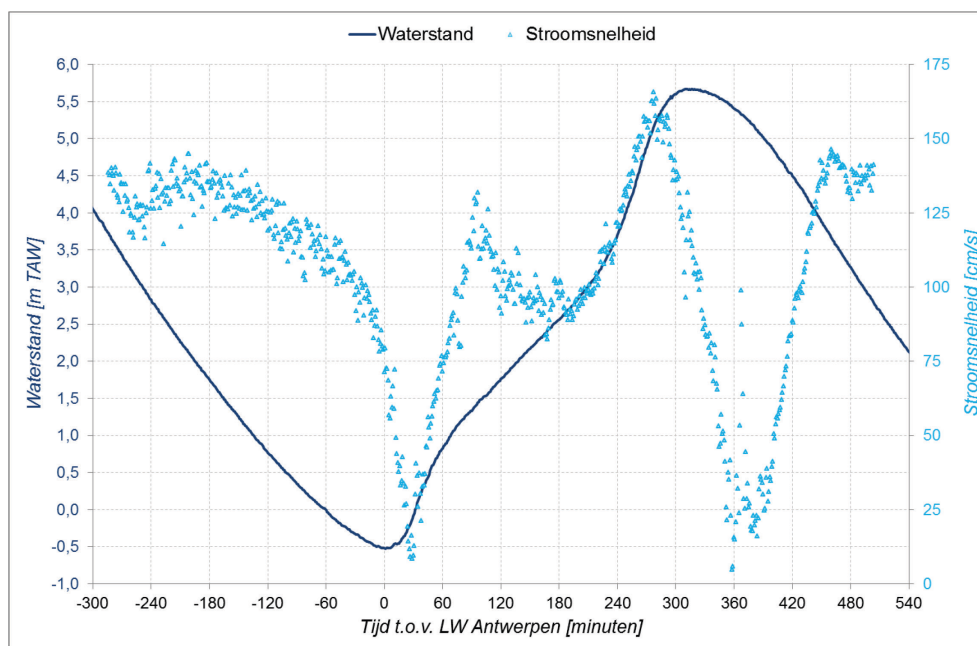
Tabel C 1 – Karakteristieke korreldiameters t.h.v. Liefkenshoek bij vloed en eb over de verticale (in μm)

	D10		D35		D50		D65		D90	
DBF (Delftse fles op frame)	8	21	46	101	62	140	80	182	133	311
DBH (Delftse fles hangend)	9	14	46	60	61	77	77	96	121	149
SUSP	4	4	14	15	22	26	35	42	84	98
BODEM	3		27		52		77		168	

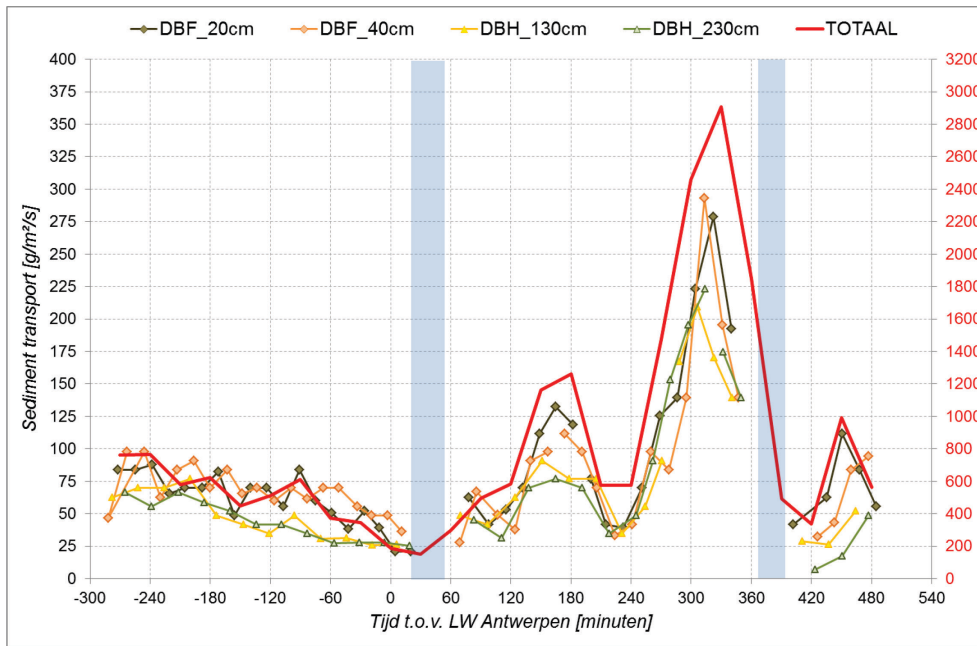
Tijdens deze meting werd omwille van sterke wind bij vloed gemeten ter hoogte van linkeroever en bij eb ter hoogte van rechteroever.

7.2.1 Oosterweel

Figuur C 3 geeft de waterstand en stroomsnelheid weer, Figuur C 4 het gemeten en totaal berekende sedimenttransport en Tabel C 2 de karakteristieke korreldiameters ter hoogte van Kruibekke.



Figuur C 3 – Overzicht waterstanden en stroomsnelheden Aenderaa t.h.v. Oosterweel



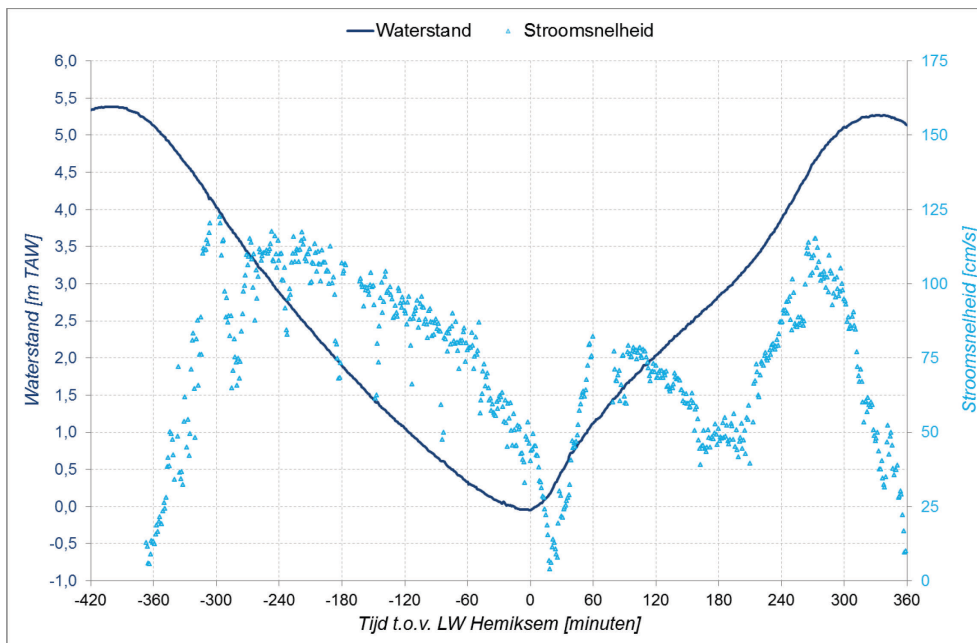
Figuur C 4 – Overzicht gemeten sediment transport en berekend totaal transport t.h.v. Oosterweel

Tabel C 2 – Karakteristieke korrel diameters t.h.v. Oosterweel bij vloed en eb over verticale (in μm)

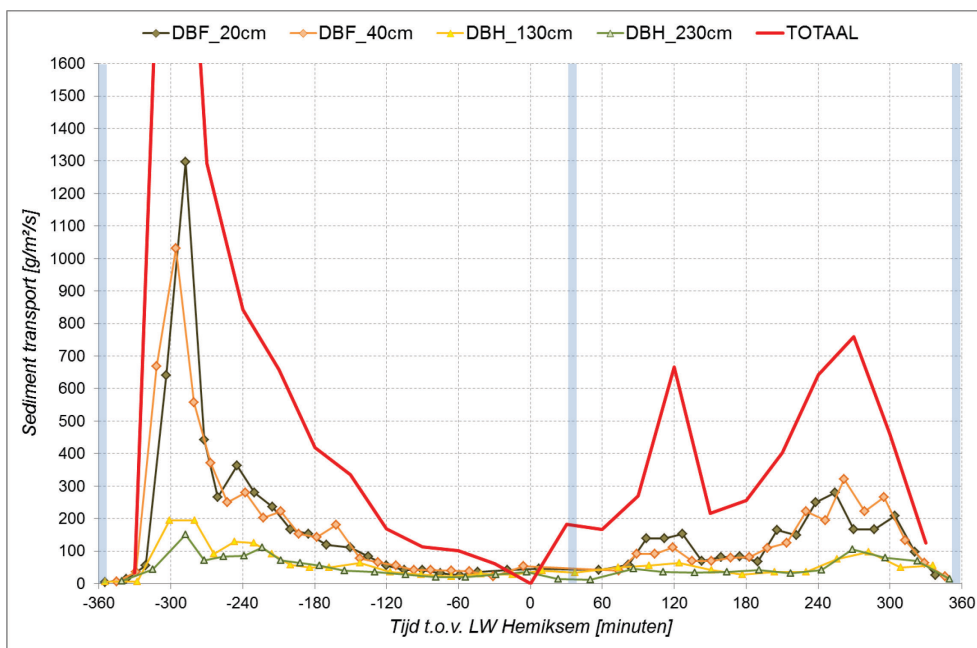
	D10		D35		D50		D65		D90	
DBF	22	19	69	66	88	83	110	103	172	159
DBH	27	20	68	63	85	79	104	97	158	148
SUSP	4	4	13	12	21	18	33	29	83	72
BODEM	16		106		139		178		327	

7.2.2 Kruikeke

Figuur C 5 geeft de waterstand en stroomsnelheid weer, Figuur C 6 het gemeten en totaal berekende sedimenttransport en Tabel C 3 de karakteristieke korrel diameters ter hoogte van Kruikeke.



Figuur C 5 – Overzicht waterstanden en stroomsnelheden Aanderaa t.h.v. Kruikeke



Figuur C 6 – Overzicht gemeten sediment transport en berekend totaal transport t.h.v. Kruibeke

Tabel C 3 – Karakteristieke korrel diameters t.h.v Kruibeke bij vloed en eb over de verticale (in µm)

	D10		D35		D50		D65		D90	
DBF	7	12	48	69	73	96	101	125	192	239
DBH	7	11	42	64	64	86	88	112	162	186
SUSP*	3		9		13		20		54	
BODEM	18		115		145		178		268	

*Door een tekort aan metingen werd hier een gemiddelde waarde berekend over het volledige getij

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

