



Vlaanderen
is wetenschap

19_076_6
WL rapporten

Sedimentstrategie Schelde-estuarium

Deelrapport 6
Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme
voor de periode 2016-2019

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Sedimentstrategie Schelde-estuarium

Deelrapport 6 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2016-2019

Vos, G.; Plancke, Y.; Meire, D.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2023
D/2023/3241/319

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vos, G.; Plancke, Y.; Meire, D. (2023). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Deelrapport 6 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2016-2019. Versie 4.0. WL Rapporten, 19_076_6. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen





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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2023R19_076_6
Trefwoorden (3-5):	Sedimentbalans, zand, slib, Schelde-estuarium		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Morfologie > Sedimentbalans > Literatuur- en desktoponderzoek Hydraulica en sediment > Morfologie > Erosie/sedimentatie > Literatuur- en desktoponderzoek Hydraulica en sediment > Sediment > Cohesief sediment > Literatuur- en desktoponderzoek Hydraulica en sediment > Sediment > Niet-cohesief sediment > Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	36	Bijlagen (p.):	26
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vos, G.; Plancke, Y.
------------	----------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire, D.	Getekend door:Dieter Meire (Signature) Getekend op:2024-01-17 09:44:46 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door:Yves Plancke (Signature) Getekend op:2023-12-20 16:16:03 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op:2023-12-20 18:55:01 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	--

Abstract

In voorliggend rapport werd de sedimentbalans berekend voor de Zeeschelde, Rupel en Durme over de periode 2016-2019. Deze sedimentbalans maakt onderscheid tussen de transporten voor de zand- en de slibfractie. De balans werd opgemaakt als massabalans, waarbij expliciet rekening gehouden werd met de invloed van de sedimentsamenstelling op de porositeit, die bepalend is bij de omrekening van volumes naar massa's. Daarnaast werden ook de antropogene invloeden (baggeren, storten, zandwinning), de uitwisseling van sediment met de havendokken en de fluviaatiele aanvoer van sediment beschouwd bij het opstellen van de balans.

De zandbalans over de periode 2016-2019 toont een opwaarts gericht transport over de volledige Beneden-Zeeschelde en het opwaartse deel van de Boven-Zeeschelde. De berekende zandtransporten zijn zeer gelijkaardig aan de berekende zandtransporten over de periode 2011-2016.

De slibbalans over de periode 2016-2019 toont een afwaarts gericht transport over bijna de volledige Zeeschelde. Tussen de Rupel en de Durme is er een opwaarts gericht transport, en ook richting de Westerschelde is het transport – in tegenstelling tot bij de sedimentbalans van 2011-2016 - opwaarts gericht.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Eerdere studies.....	2
2.1 Westerschelde	2
2.2 Zeeschelde.....	3
3 Methodiek	5
3.1 De balans, het concept	5
3.2 De ruimte: rekencellen	6
3.3 De tijd: rekenperiode.....	7
3.4 De basis: topo-bathymetrische opnames.....	7
3.4.1 Verschilgrid topo-bathymetrieën	8
3.4.2 Lithologische samenstelling.....	8
3.4.3 De porositeit van zand-slib-mengsels.....	10
3.4.4 Van volume naar massa.....	12
3.5 Antropogene invloeden.....	13
3.5.1 Baggeren en storten ten behoeve van de maritieme toegankelijkheid.....	13
3.5.2 Baggeren en storten (overig).....	17
3.5.3 Zandwinning	18
3.6 Uitwisseling met de havendokken	19
3.7 Fluviatiele aanvoer van sediment.....	20
4 Resultaten.....	22
4.1 Topo-bathymetrie.....	22
4.2 Lithologie	23
4.3 De sedimentbalans	26
5 Discussie	28
5.1 Vergelijking met eerdere sedimentbalansen	28
5.1.1 Lithologie	28
5.1.2 Sedimentbalans	29

5.2	De afwaartse uitkomst	32
6	Conclusies en aanbevelingen	33
6.1	Conclusies	33
6.2	Aanbevelingen	33
7	Referenties	35
8	Bijlage 1 – Verschilkaarten	B1
9	Bijlage 2 – Locatie staalnamepunten.....	B13

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht beschikbare gebiedsdekkende opnames voor Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme	7
Tabel 2 – Overzicht beschouwde ecotoopklassen	9
Tabel 3 – Overzicht van Stort- en Baggerzones die binnen 2 OMES-rekencellen liggen	13
Tabel 4 – Overzicht van de totale massa gebaggerd en gestort zand en slib per rekencel voor de periode 2016 – 2019 (bron: aMT)	14
Tabel 5 – Overzicht van de massa gebaggerd zand en slib per rekencel in de periode 2016 -2019 (bron: DVW)	18
Tabel 6 – Overzicht van de massa zand onttrokken door zandwinning per rekencel (bron: aMT)	18
Tabel 7 – Overzicht slibfluxen doorheen sluiscomplexen over periode 1/1/2016-1/1/2019	19
Tabel 8 – Overzicht van de fluviatiele sedimentaanvoer voor de verschillende rivieren over de periode 2016-2019	20
Tabel 9 – Slibgehalte van het fluviatiele sediment in de rivieren Bovenschelde, Rupel en Dender.	21
Tabel 10 – Volumeveranderingen [Mm ³] per OMES-segment over de periode 2016-2019	22
Tabel 11 – Volumeverandering/oppervlakte [m] per OMES-segment over de periode 2016-2019	22

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Sedimentbalans Westerschelde voor de periode 2010-2019 in Mm^3 [Bron: Schrijver (2020)]	2
Figuur 2 – Zand- (boven) en slibbalans (onder) voor de Zeeschelde over de periode 2001-2011 (waarden in Mm^3)	3
Figuur 3 - Schematische voorstelling van het zand-(boven) en slib-(onder) transport in MTDS over de periode 2011-2016.....	4
Figuur 4 – Het concept van de sedimentbalans	5
Figuur 5 – Opdeling Zeeschelde en bijrivieren volgens de OMES segmenten	6
Figuur 6 – De geaggregeerde ecotopenkaart van 2016	10
Figuur 7 – “Ideal packing model”: voorspelde porositeit als een functie van het volumetrisch slibpercentage. Een porositeitsminimum treedt op wanneer het volumetrisch slibpercentage gelijk is aan de porositeit van de zandcomponent (Koltermann et al., 1995).	11
Figuur 8 – Gebruikte porositeitswaardes voor intertidale en subtidale ecotoopklassen	12
Figuur 9 – Baggerlocaties in de Beneden-Zeeschelde	15
Figuur 10 – Stortlocaties in de Beneden-Zeeschelde	16
Figuur 11 – Baggerlocaties in de Boven-Zeeschelde (afwaarts (boven) en opwaarts (onder))	17
Figuur 12 – Schematische voorstelling van de rekencellen met aanduiding van de randen voor fluviatiele sedimentaanvoer.....	21
Figuur 13 – Verschilkaart op basis van de bathymetrieën van 2019 en 2016.....	22
Figuur 14 – Areaal aan ecotopen per Omes-segment.....	23
Figuur 15 – Relatieve verhouding aan ecotopen per Omes-segment.....	23
Figuur 16 – Zand en slib (in %) per geaggregeerde ecotoopklasse over alle segmenten in de Zeeschelde, voorgesteld aan de hand van mediaanwaardes (bolletjes) en de 10 ^e en 90 ^{ste} percentielwaardes (foutenvlaggen).	24
Figuur 17 – Aandeel slibfractie (P50) voor verschillende OMES-segmenten: subtidale (boven) en intertidale (onder) ecotoopklassen Volle lijn geeft de mediaan weer per ecotoopklasse voor volledige dataset	25
Figuur 18 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (referentiescenario).....	27
Figuur 19 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (referentiescenario).....	27
Figuur 20 – Aandeel van de slibfractie per ecotoopklasse voor periode 2016-2019 (oranje) en periode 2001-2016 (geel).....	28
Figuur 21 – Zandbalans voor de periode 2016-2019 (boven), periode 2011-2016 (midden) en periode 2001-2011 (onder) Weergegeven waarden (MTDS/jaar) zijn de berekende waarden (positief = afwaarts-gericht zandtransport, negatief = opwaarts-gericht zandtransport) pijlen geven de werkelijke richting weer van dit berekende transport en werden geschaald volgens de grootte van het zandtransport	30
Figuur 22 – Slibbalans voor de periode 2016-2019 (boven), periode 2011-2016 (midden) en periode 2001-2011 (onder) Weergegeven waarden (MTDS/jaar) zijn de berekende waarden (positief = afwaarts-gericht	

slibtransport, negatief = opwaarts-gericht slibtransport) pijlen geven de werkelijke richting weer van dit berekende transport en werden geschaald volgens de grootte van het slibtransport	31
Figuur 23 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 9 en 10.....	B1
Figuur 24 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 11 en 12.....	B2
Figuur 25 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 13.....	B3
Figuur 26 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel Rupel	B4
Figuur 27 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 14.....	B5
Figuur 28 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel Durme.....	B6
Figuur 29 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 15.....	B7
Figuur 30 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 16.....	B8
Figuur 31 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 17.....	B9
Figuur 32 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 18.....	B10
Figuur 33 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 19.....	B11
Figuur 34 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 19 traject Gentbrugge-Melle.....	B12
Figuur 35 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 9 en 10	B13
Figuur 36 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 11 en 12	B14
Figuur 37 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 13	B15
Figuur 38 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Rupel.....	B16
Figuur 39 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 14	B17
Figuur 40 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Durme	B18
Figuur 41 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 15	B19
Figuur 42 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 16	B20
Figuur 43 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 17	B21
Figuur 44 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 18	B22
Figuur 45 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19	B23
Figuur 46 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19 traject Gentbrugge - Melle	B24
Figuur 47 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P10).....	B25
Figuur 48 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P10).....	B25
Figuur 49 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P90).....	B26
Figuur 50 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P90).....	B26

1 Inleiding

In het kader van het project “Integraal plan Boven-Zeeschelde” werd een eerste sedimentbalans opgemaakt voor het Vlaamse deel van het Schelde-estuarium voor de periode 2001-2011 (Vandenbruwaene *et al.*, 2017). Bij de opmaak van deze sedimentbalans van de Zeeschelde, Rupel en Durme werd expliciet onderscheid gemaakt tussen de zand- en de slibfractie. Dit wijkt af van de klassieke benadering die door Rijkswaterstaat wordt gevolgd bij het opmaken van de sedimentbalans voor de Westerschelde (Schrijver, 2020), waar dit expliciet onderscheid niet wordt gemaakt.

Naar analogie van de sedimentbalans voor het Schelde-estuarium van 2001-2011 werd een sedimentbalans opgemaakt voor 2011-2016 (Plancke *et al.*, 2023). Ook hier werd een onderscheid gemaakt tussen de zand- en slibbalans, maar werd de balans opgemaakt als massabalans (i.t.t. de volumebalans van 2001-2011).

In voorliggend rapport worden de resultaten gepresenteerd van de sedimentbalans voor het Vlaamse deel van het Schelde-estuarium (Zeeschelde, Rupel en Durme), waarbij dezelfde methodiek gebruikt wordt als bij de massabalans van 2011-2016. De berekening werd ditmaal uitgevoerd voor de periode 2016-2019, aangezien voor beide jaren een quasi volledige bodemopname beschikbaar was.

2 Eerdere studies

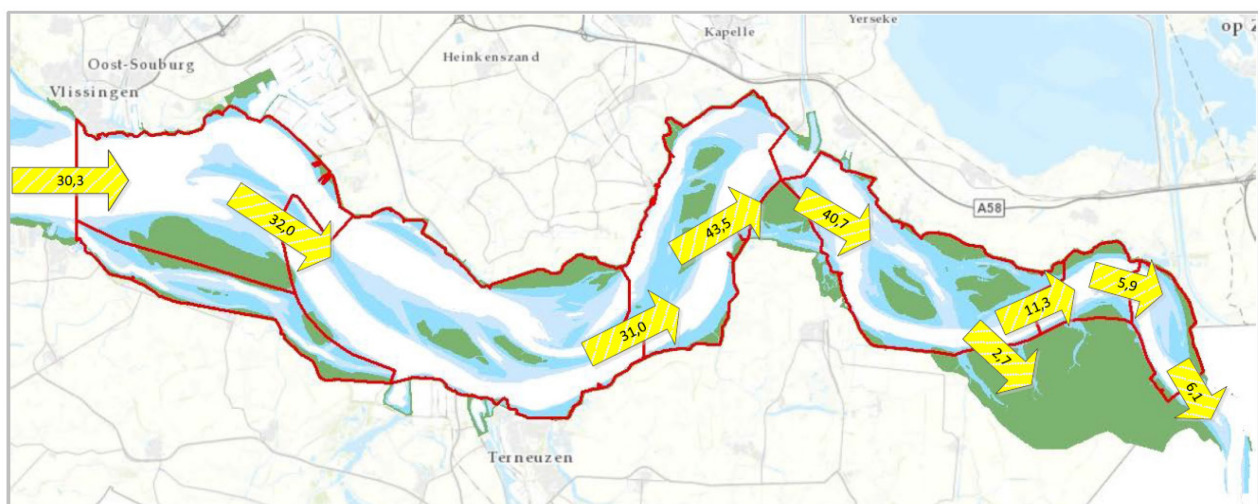
In het verleden werden reeds verschillende studies omtrent sediment en sedimentbalans gepubliceerd. In wat volgt wordt een kort overzicht gegeven van de meest recente van deze studies.

2.1 Westerschelde

Door Rijkswaterstaat (RWS) wordt op regelmatige basis een sedimentbalans voor de Westerschelde opgemaakt (de Jong, 2000; Nederbragt & Liek, 2004). De meest recente sedimentbalans voor de Westerschelde is beschreven in (Schrijver, 2020) en het eindresultaat ervan is weergegeven in Figuur 1. De ruimtelijke indeling die gehanteerd wordt voor het berekenen van de balans is deze van de macrocellen. Op temporeel vlak is het, dankzij de beschikbaarheid van jaarlijkse gebiedsdekkende topo-bathymetrische opnames, mogelijk de sedimentbalans te berekenen op jaarbasis. De sedimentbalans kent 2 belangrijke aannames: (1) er wordt geen onderscheid gemaakt in de verschillende sedimentfracties (zand en slib) en (2) als opwaartse randvoorwaarde ter hoogte van de grens wordt een bepaald transport aangenomen. In 2 studies werd in het verleden reeds ingegaan op deze 2 aannames.

Haecon (2006) voerde een berekening van de sedimentbalans waarbij de opwaartse rand van de berekening verschoven werd van de grens naar Schelle. Ter hoogte van Schelle werd vervolgens de gemeten fluviaal aanvoer van sediment als randvoorwaarde opgelegd. Op deze manier kon ter hoogte van de grens een sedimentuitwisseling van gemiddeld $0,8 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ berekend worden, die goed overeenstemt met de aanname die door Rijkswaterstaat wordt gedaan ($0,68 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$).

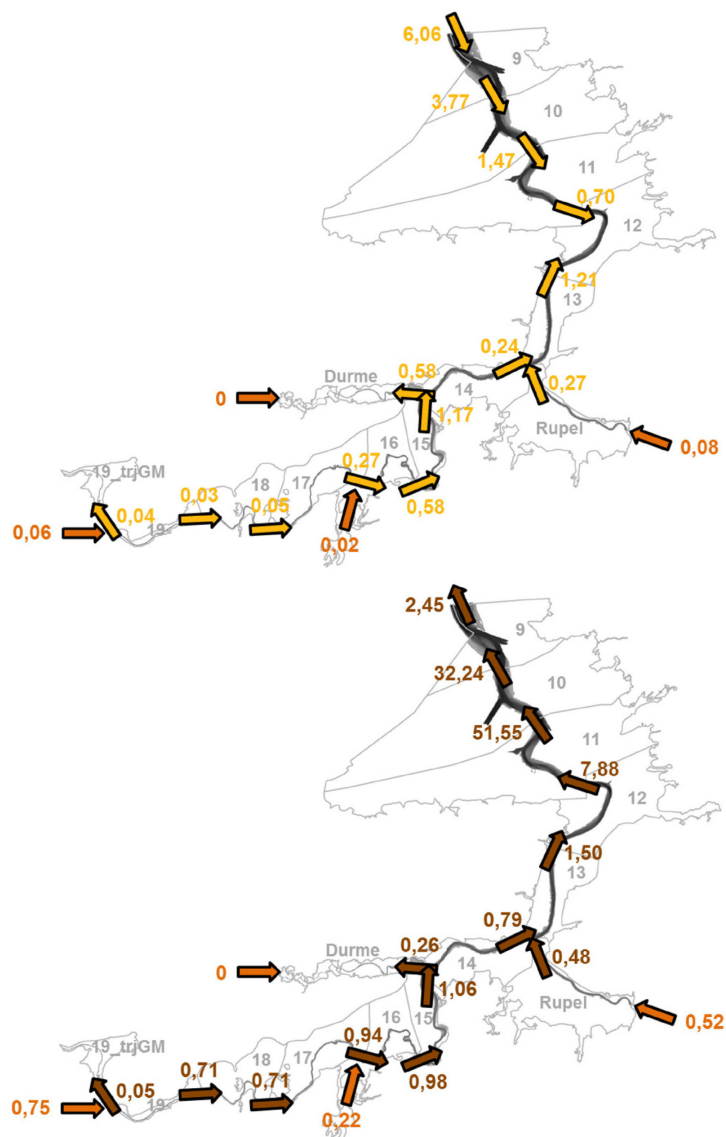
In het kader van het VNSC-onderzoeksprogramma Veiligheid & Toegankelijkheid, werd door Arcadis (IMDC *et al.*, 2013) – in tegenstelling tot de reguliere berekening door RWS – de sedimentbalans voor de Westerschelde opgesplitst in een balans voor de zand- en slibfractie. De opsplitsing tussen zand en slib gebeurde op basis van de slibhoeveelheid in de bodem, bepaald volgens de McClaren kartering (McClaren, 1993). De opwaartse rand lag hierbij ter hoogte van grens, en de auteurs maakten een aanname voor zowel het zand- als slibtransport ter hoogte van de grens.



Figuur 1 – Sedimentbalans Westerschelde voor de periode 2010-2019 in Mm^3 [Bron: Schrijver (2020)]

2.2 Zeeschelde

In het kader van het project “Integraal plan Boven-Zeeschelde” werd in Vandenbruwaene *et al.* (2017) de sedimentbalans berekend voor de Zeeschelde en haar bijrivieren waarbij een onderscheid gemaakt werd tussen de zand- en slibfractie. De berekening gebeurde voor de periode 2001-2011, aangezien het aantal gebiedsdekkende topo-bathymetrische opname voor de Zeeschelde en haar bijrivieren aanzienlijk beperkter is dan voor de Westerschelde. De ruimtelijke indeling gebeurde op basis van de OMES compartimentering (Meire *et al.*, 1997). Het onderscheid tussen de zand- en slibfractie gebeurde op basis van de beschikbare metingen van de bodemsamenstelling van de Zeeschelde, die zowel in het kader van de reguliere MONEOS-metingen gebeuren (e.g. Van Ryckegem *et al.*, 2017), als vanuit bepaalde projecten (IMDC *et al.*, 2010; Vos *et al.*, 2011). De fluviatiele aanvoer van sediment ter hoogte van de opwaartse randen is gebaseerd op de hoog-frequente metingen (Van Hoestenbergh *et al.*, 2014). Figuur 2 geeft de resultaten van deze zand- en slibbalans weer, voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar Vandenbruwaene *et al.* (2017).

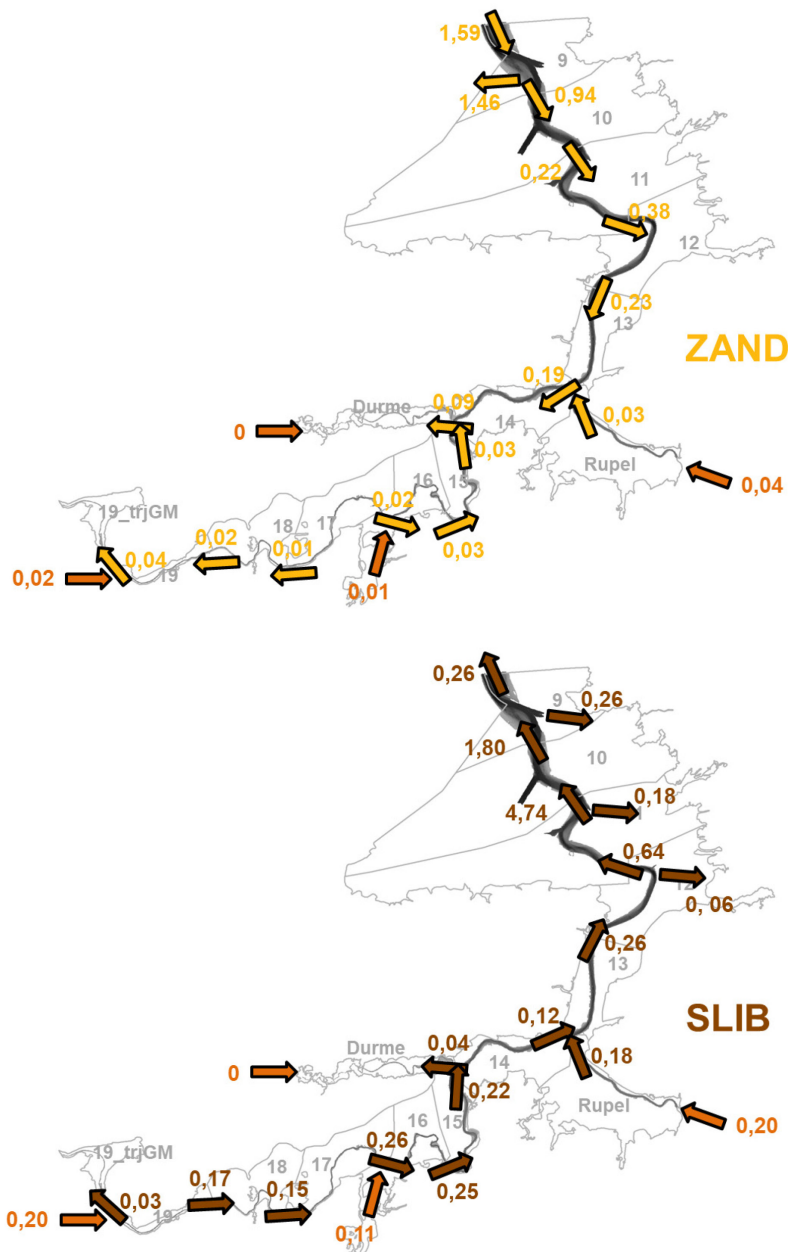


Oranje pijlen stellen de fluviatiele aanvoer van slib resp. zand voor aan de opwaartse randen

Figuur 2 – Zand- (boven) en slibbalans (onder) voor de Zeeschelde over de periode 2001-2011 (waarden in Mm³)

Ook over de periode 2011-2016 (Plancke *et al.*, 2023) werd een zandbalans opgemaakt. Deze toont een opwaarts gericht transport over de volledige Beneden-Zeeschelde en het opwaartse deel van de Boven-Zeeschelde. Het afwaartse deel van de Boven-Zeeschelde wordt gekenmerkt door een afwaarts gericht zandtransport. De berekende zandtransporten zijn zeer gelijkaardig aan de berekende zandtransporten over de periode 2001-2011, ondanks de aangepaste berekeningsmethodiek waarbij gebruik gemaakt werd van een massabalans in plaats van een volumebalans.

De slibbalans over de periode 2011-2016 toont een afwaarts gericht transport over de volledige Zeeschelde. De berekende slibtransporten zijn opnieuw zeer gelijkaardig aan de berekende slibtransporten over de periode 2001-2011, ondanks de aangepaste berekeningsmethodiek.

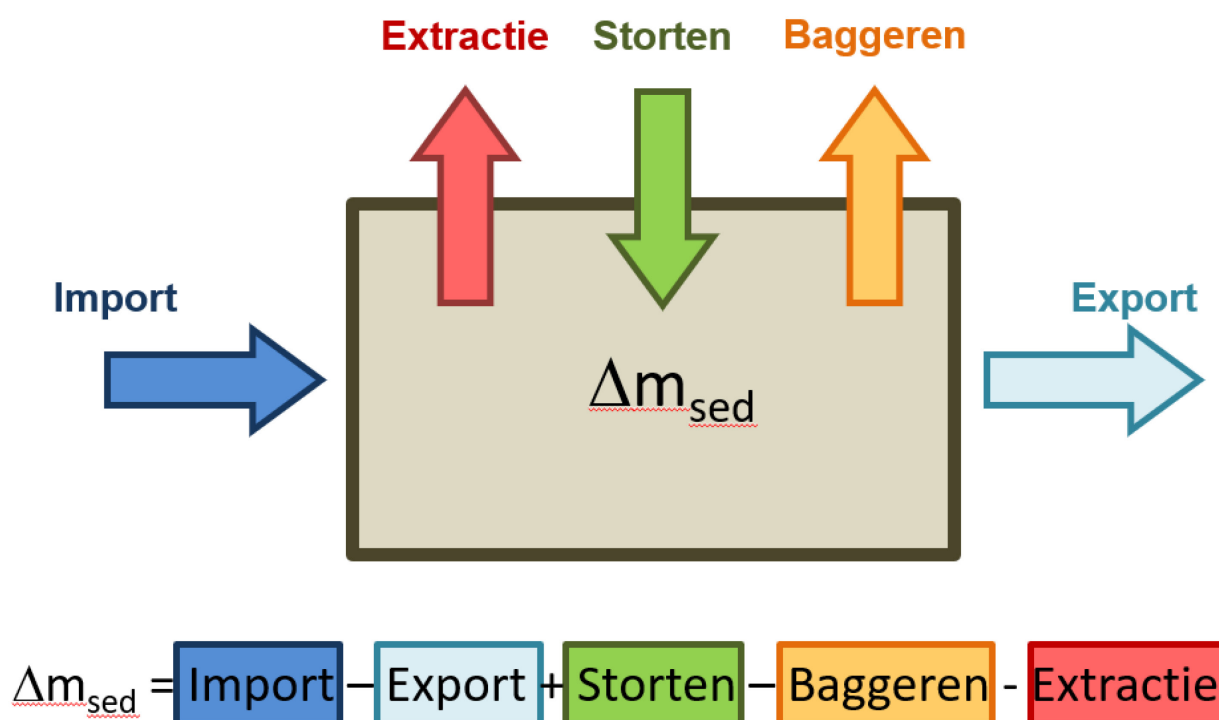


Figuur 3 - Schematische voorstelling van het zand-(boven) en slib-(onder) transport in MTDS over de periode 2011-2016

3 Methodiek

3.1 De balans, het concept

Het vertrekpunt voor het opmaken van een sedimentbalans zijn de morfologische veranderingen op een bepaalde ruimtelijke schaal (rekencel). Deze veranderingen zijn het gevolg van de sedimenttransporten over de randen van de rekencel (op- en afwaarts, maar ook zijwaarts wanneer er laterale connecties zijn) en de menselijke ingrepen. Deze aspecten zijn weergegeven in Figuur 4, waar het principe van de sedimentbalans terug te vinden is. In de volgende paragrafen worden de verschillende aspecten besproken die noodzakelijk zijn voor het opmaken van de sedimentbalans.

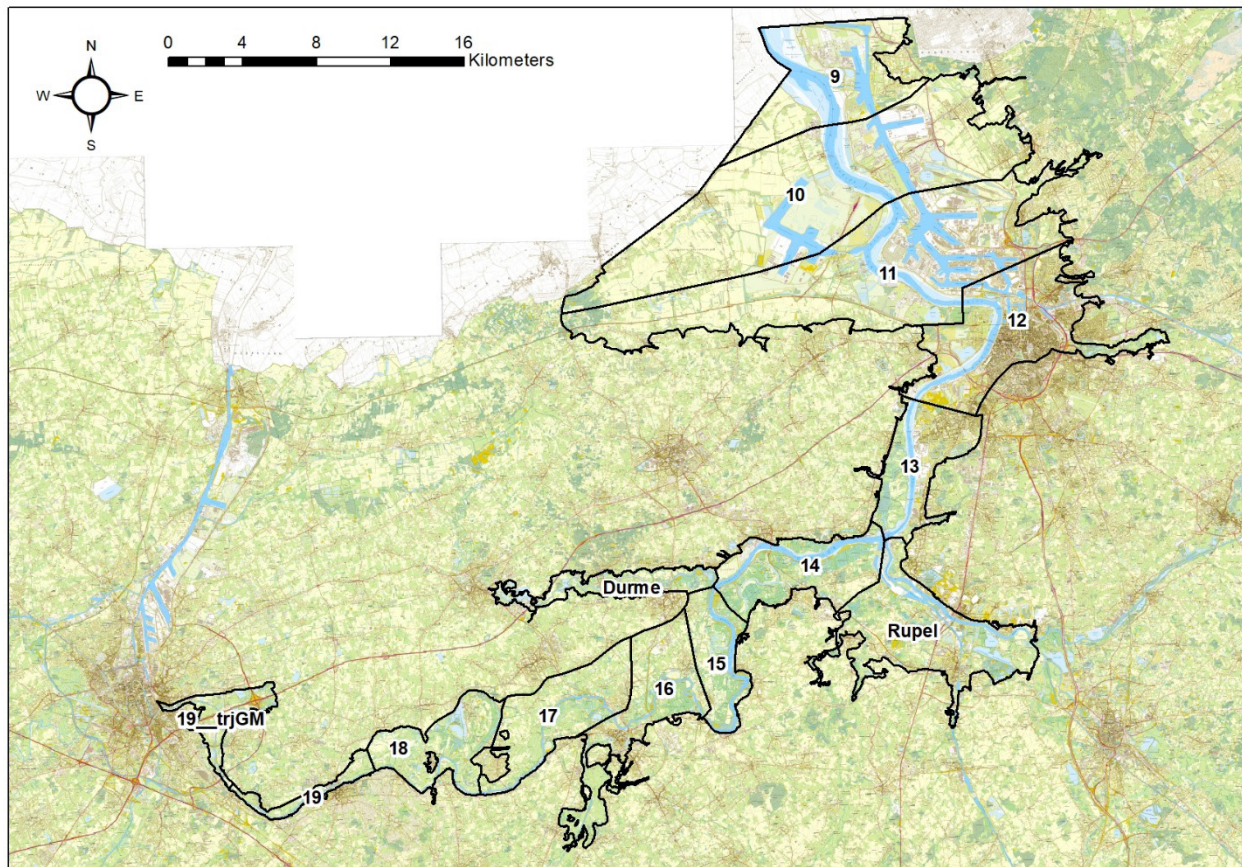


Figuur 4 – Het concept van de sedimentbalans

Een keuze die dient te gebeuren is de eenheid waarin de sedimentbalans wordt opgemaakt. Door Rijkswaterstaat en in Vandenbruwaene *et al.* (2017) is telkens gekozen om een volumetrische sedimentbalans op te maken (in m³). Echter, voor systemen waarin het systeem bestaat uit mengsel van zand en slib, die beiden in aanzienlijke (> 20%) relatieve hoeveelheden voorkomen, zal het verschil in compactie een invloed hebben. Dit wordt geïllustreerd door het feit dat 1 m³ zand een grotere massa zal bevatten dan 1 m³ slib, omwille van de grotere porositeit van het slibmengsel. Voor de Zeeschelde is het dus opportuun om de balans massagewijs op te maken, wat voor de sedimentbalans van 2011-2016 (Plancke *et al.*, 2023) reeds gebeurde en opnieuw werd toegepast in voorliggend rapport. Dit biedt het voordeel dat zowel de opwaartse fluviatiele aanvoer, gemeten als massa (in TDS), als de bagger- en storthoeveelheden, eveneens beschikbaar als massa (in TDS) zonder conversie (op basis van een aangenomen densiteit) in de sedimentbalans kunnen meegenomen worden. Het nadeel is dat de gemeten volumeveranderingen uit de topo-bathymetrie moeten geconverteerd worden van volume naar massa. Dit wordt beschreven in § 3.4.4.

3.2 De ruimte: rekencellen

De ruimtelijke afbakening van de rekencellen voor de berekening van sedimentbalans in de Zeeschelde zijn de OMES segmenten (Meire *et al.*, 1997). De grenzen van de OMES segmenten zijn zo gekozen dat de saliniteit en het getijregime binnen één segment quasi uniform zijn. De OMES segmentering werd reeds toegepast in tal van eerdere studies (e.g. 6-jaarlijkse evaluatie van het Schelde-estuarium (Maris *et al.*, 2014)) en vormt op die manier een goede uitgangsbasis voor de begrenzing van de rekencellen. Een overzicht van de OMES segmenten (rekencellen) wordt gegeven in Figuur 5.



Figuur 5 – Opdeling Zeeschelde en bijrivieren volgens de OMES segmenten

3.3 De tijd: rekenperiode

De eerste sedimentbalans voor de Zeeschelde gebeurde voor de periode 2001-2011. Vervolgens werd een volgende sedimentbalans opgemaakt voor 2011-2016. Voorliggende sedimentbalans bouwt hierop verder en beslaat de periode 2016-2019. In tegenstelling tot de Westerschelde waar de sedimentbalans op jaarlijkse basis wordt gemaakt, is dit voor de Zeeschelde niet mogelijk door het ontbreken van jaarlijkse gebiedsdekkende topo-bathymetrische opnames. De beschikbaarheid van deze opnames is bepalend voor de periode waarover de sedimentbalans kan worden opgemaakt. In het kader van MONEOS (Meire & Maris, 2008) werd voorgesteld de opnamefrequentie op te hogen naar jaarlijkse voor de Beneden-Zeeschelde, minstens 3-jaarlijks voor de Boven-Zeeschelde en minstens 6-jaarlijkse voor de bijrivieren. Dit heeft ertoe geleid dat er in het laatste decennium aanzienlijk meer opnames beschikbaar zijn dan voorheen, waardoor ook de sedimentbalans kan worden opgemaakt voor kortere periodes. In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van beschikbare bathymetrische opnames in het laatste decennium voor de Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme. Op basis van de beschikbare opnames is ervoor gekozen om de sedimentbalans te berekenen over de periode 2016-2019. Voor de Durme is er geen gebiedsdekkende opname beschikbaar voor 2019. In plaats daarvan werd een meting van 2018 gebruikt.

Tabel 1 – Overzicht beschikbare gebiedsdekkende opnames voor Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme

Referentie-jaar	Beneden-Zeeschelde		Boven-Zeeschelde		Rupel		Durme	
	Bathymetrie	Lidar	Bathymetrie	Lidar	Bathymetrie	Lidar	Bathymetrie	Lidar
“2001”	2000-2001	2001	2001	2001	1995	2001	1997	2001
“2011”	2011	2011	2011-2012	2011	2010	2011	2011	2011
“2016”	2016	2016	2016	2016	2016	2016	2013-2014	2016
“2019”	2019	2019	2019	2019	2019	2019	2018	2019

3.4 De basis: topo-bathymetrische opnames

Het vertrekpunt voor het berekenen van de sedimentbalans zijn de veranderingen in topo-bathymetrie. Op basis van de beschikbare gebiedsdekkende opnames (§ 3.3) is ervoor gekozen de berekening uit te voeren voor de periode 2016-2019. Het bekomen van de veranderingen per rekencel wordt in de volgende paragraaf beschreven. Om de waargenomen veranderingen door te rekenen naar de verandering voor de zand- en slibfractie zal op basis van de beschikbare lithologische gegevens het aandeel van beide fracties bepaald worden. Aangezien dit aandeel niet constant is over de verschillende ecotopen, wordt bij de omrekening expliciet rekening gehouden met de verschillende ecotopen (§ 3.4.2). Daarnaast zal voorliggende sedimentbalans opgesteld worden als een massabalans, in tegenstelling tot eerdere volumebalansen. Aangezien uit de topo-bathymetrische opnames volumeveranderingen worden afgeleid, dienen deze volumeveranderingen omgerekend te worden naar veranderingen in sedimentmassa. Hiervoor werd een methodiek gevolgd (§ 3.4.3) die expliciet rekening houdt met het relatieve aandeel van zand en slib, aangezien deze verhouding de porositeit beïnvloedt, en alzo het relatieve aandeel van water en sediment.

3.4.1 Verschilgrid topo-bathymetrieën

De bathymetrische gegevens zijn afkomstig uit de sectiekaarten voor de Zeeschelde die opgemeten worden via multibeam echo soundings door Vlaamse Hydrografie. Deze werden gecombineerd met topometrische data die met behulp van LIDAR verzameld worden, om ook de ondiepere (en moeilijk peilbaar vanop het water) delen mee op te kunnen nemen in de sedimentbalans. Deze metingen worden door afdeling Maritieme Toegang omgezet naar gebiedsdekkende grids met een resolutie van 1x1 m. Voor de Durme is er geen meting beschikbaar voor 2019, daarom werd de meting van 2018 gebruikt (zie Tabel 1).

Voor het bepalen van de volumeverschillen tussen de bathymetrie van 2016 en 2019 werd allereerst een verschilgrid berekend (verschilgrid = 2019-2016). Een positieve waarde in het verschilgrid duidt op accumulatie van sediment tussen 2016 en 2019, een negatieve waarde duidt op erosie van sediment. Vervolgens werd per OMES-zone (indeling rekencellen) en ecotoopklasse (lithologische indeling) op basis van deze verschilgrids via de ArcGIS-functie 'Focal Statistics' het sedimentatievolume en erosievolume berekend. Het verschil tussen beide volumes is uiteindelijk de netto-volumeverandering en kan geschreven worden als:

$$\Delta V_t = V_s - V_e \quad (1)$$

Met: ΔV_t = netto-volumeverandering in een bepaalde rekencel & ecotoop over tijdsinterval t [m³]

V_s = het sedimentatievolume over tijdsinterval t [m³]

V_e = het erosievolume over tijdsinterval t [m³]

Indien $\Delta V_t > 0$ dan heeft er over het betreffende tijdsinterval in de specifieke rekencel meer sedimentatie dan erosie plaatsgevonden. Indien $\Delta V_t < 0$ dan heeft er meer erosie dan sedimentatie plaatsgevonden.

Voor de Durme stelt zich het probleem dat de topo-bathymetrische gegevens minder frequent beschikbaar zijn. Voor de Durme waren enkel bathymetrische gegevens beschikbaar uit 2018. De topografische gegevens echter dateren wel uit 2019. Om dit verschil in periode tussen beide peiling in rekening te brengen, werden de volumeveranderingen telkens verrekend naar jaarlijkse veranderingen en vervolgens opgeschaald naar de beschouwde tijdsperiode (in casu 3 jaar). Vergelijking 1 kan dan geschreven worden als:

$$\Delta V = \frac{V_s - V_e}{\Delta t} N \quad (2)$$

Met: ΔV = de netto-volumeverandering over het tijdsinterval N [m³]

N = het tijdsinterval waarnaar de volumeveranderingen worden verrekend, in dit geval is N = 3 (tijdsinterval 2016-2019)

Δt = aantal jaar tussen 2 topo-bathymetrische opnames

Voor de Zeeschelde is Δt gelijk aan 3 jaar, voor de Durme is Δt gelijk aan 2 jaar. (Tabel 1).

3.4.2 Lithologische samenstelling

Aangezien de sedimentbalans expliciet opgesplitst wordt voor de zand- en slibfractie, is het noodzakelijk om het relatieve aandeel van de zand- (63 μm – 2000 μm) en slibfractie (< 63 μm) te kennen. In Vandenbruwaene *et al.* (2017) en Plancke *et al.* (2023) is ervoor gekozen het aandeel zand en slib te beschouwen per ecotoopklasse. Deze methodiek wordt eveneens in voorliggend rapport gevolgd. Voor het bepalen van de zand- en slibfractie werd gebruik gemaakt van de bodemstalen die in het kader van o.a. MONEOS (Van Ryckegem *et al.*, 2020) beschikbaar zijn. Voor een overzicht van de bodemstaallocaties wordt verwezen naar Bijlage 2 – Locatie staalnamepunten

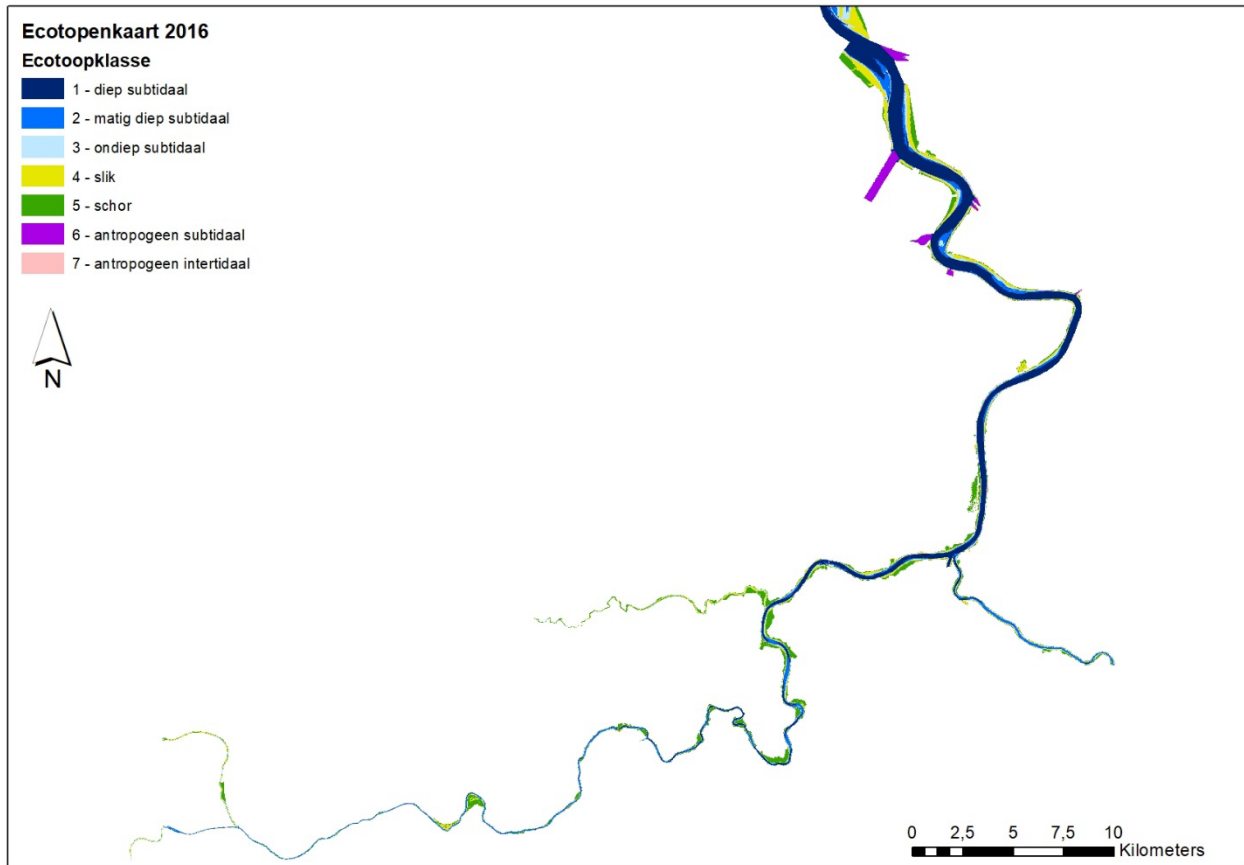
In deze studie werd als basis om kaartenheden te onderscheiden de ecotopenkaart uit 2016 gebruikt, die eveneens gebruikt werd in de sedimentbalans voor de periode 2011-2016 (Plancke *et al.*, 2023). Ecotopenkaarten zijn immers gebaseerd op fysiotopenkaarten en geomorfologische kaarten (Van Ryckegem *et al.*, 2017), en zijn op die manier sterk gekoppeld aan de lithologische samenstelling van de bodem.

De ecotopenkaart van 2016 wordt als representatief beschouwd voor de tijdsperiode 2016-2019. De gedetailleerde ecotopenkaart omvat een groot aantal (~20) ecotopen, waarbij verschillende ecotopen slechts een zeer klein areaal bestrijken waarvoor geen bodemstalen beschikbaar zijn. Hierdoor is het niet mogelijk om een exacte lithologische samenstelling van deze ecotopen te bepalen. Daarom werd besloten, naar analogie met de sedimentbalans van 2001-2011 en 2011-2016 de ecotopen te aggregeren in 7 ecotoopklassen (Tabel 2). Bij het aggregeren wordt op basis van systeemkennis gekozen om ecotopen te combineren met gelijkaardige fysische kenmerken. Zo wordt het subtidaal gezien de hogere stroomsnelheden voornamelijk gedomineerd door een zandige bodem, hebben de slikken een intermediaire samenstelling tussen zand en slib, en bestaat de bodemsamenstelling van de schorren gezien de lage stroomsnelheden voornamelijk uit slibrijk sediment. De geaggregeerde ecotopenkaart is weergegeven in Figuur 6.

De beschikbare bodemstalen uit de periode 2016-2019 werden opgedeeld volgens enerzijds de OMES-segmenten en anderzijds per ecotoopklasse. Op basis van alle bodemstalen die binnen een bepaalde ecotoopklasse in het betreffende OMES-segment vallen, werd voor elke ecotoopklasse de mediaan van het aandeel zand- en slibfractie (indien ook een aandeel grind aanwezig was, werd dit niet beschouwd en werd het aandeel zand en slib herleid zodat de som 100% bedroeg) bepaald.

Tabel 2 – Overzicht beschouwde ecotoopklassen

Klasse ID	Beschrijving ecotoopklasse	% van totale oppervlakte
1	Diep subtidaal	40
2	Matig diep subtidaal	15
3	Ondiep subtidaal	8
4	Intertidaal - slik	12
5	Intertidaal - schor	16
6	Antropogeen subtidaal	4
7	Antropogeen intertidaal	4



Figuur 6 – De geaggregeerde ecotopenkaart van 2016

3.4.3 De porositeit van zand-slib-mengsels

Om een meer robuuste bepaling van het getransporteerde materiaal te bekomen, wordt deze sedimentbalans uitgevoerd als massabalans. Bij de bepaling van getransporteerde volumes wordt immers voorbijgegaan aan de porositeit van het getransporteerde materiaal. Uit onderzoek (e.g. Beard & Weyl, 1973; Kozeny, 1927) blijkt dat de porositeit functie is van de korrelgrootteverdeling. Afhankelijk van de verhouding fijn ten opzichte van grof materiaal, zal de sortering en dus ook de porositeit veranderen. In de literatuur zijn verschillende modellen ontwikkeld om op basis van een volume materiaal en de zand-slibverhouding binnen dat volume, de massa van dit materiaal te bepalen. Binnen voorliggende rapport is ervoor gekozen de formulering van Koltermann et al. (1995) te volgen. Deze ontwikkelde een “ideaal packing model” zoals weergegeven in Figuur 7. Met “ideaal” wordt bedoeld dat slechts een type van packing (grof/zandig of fijn) tegelijkertijd voorkomt, en het ene type sediment verstoort de packing van het andere type niet. Dit wil zeggen dat de verhouding voor de porositeit van mengsels met 2 componenten uitgaat van een ideale rangschikking van de korrels waarbij de fijne korrels volledig binnen de ruimtes tussen de grove korrels passen (groe packing) of de grovere korrels verspreid voorkomen binnen een matrix van fijnere korrels (fijne packing). De minimale porositeit komt volgens dit model voor bij een slibgehalte van 40%.

Om de porositeit van een sedimentmengsel van zand en slib te bepalen geldt dan:

Voor $\varphi_v < 0.4$

$$\phi = \phi_{sd} - \frac{\varphi_v}{\varphi_m} * (\phi_{sd} - \phi_m) \quad (3)$$

Voor $\phi_v \geq 0.4$

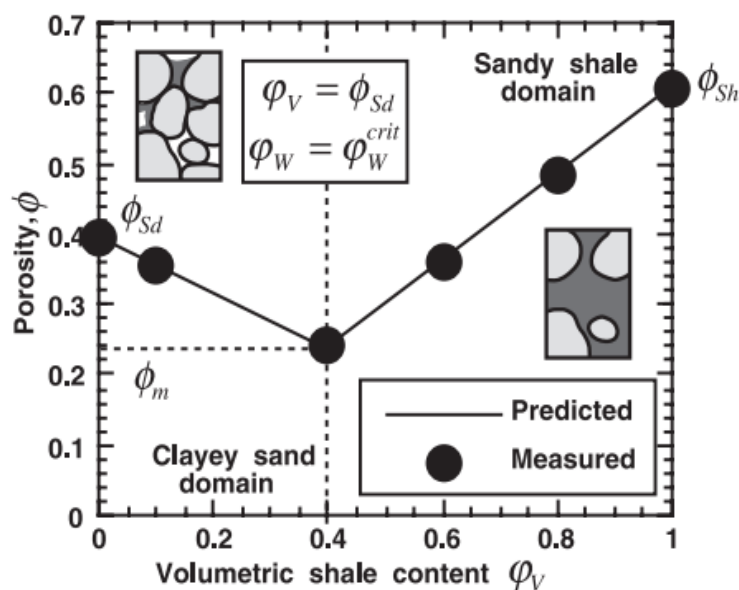
$$\phi = \phi_m + \frac{(\phi_v - \phi_m)}{(1 - \phi_m)} * (\phi_{Sh} - \phi_m) \quad (4)$$

Met: ϕ_v : relatieve aandeel van de slib fractie [-]

ϕ_{Sd} : porositeit van zuiver zand [-]

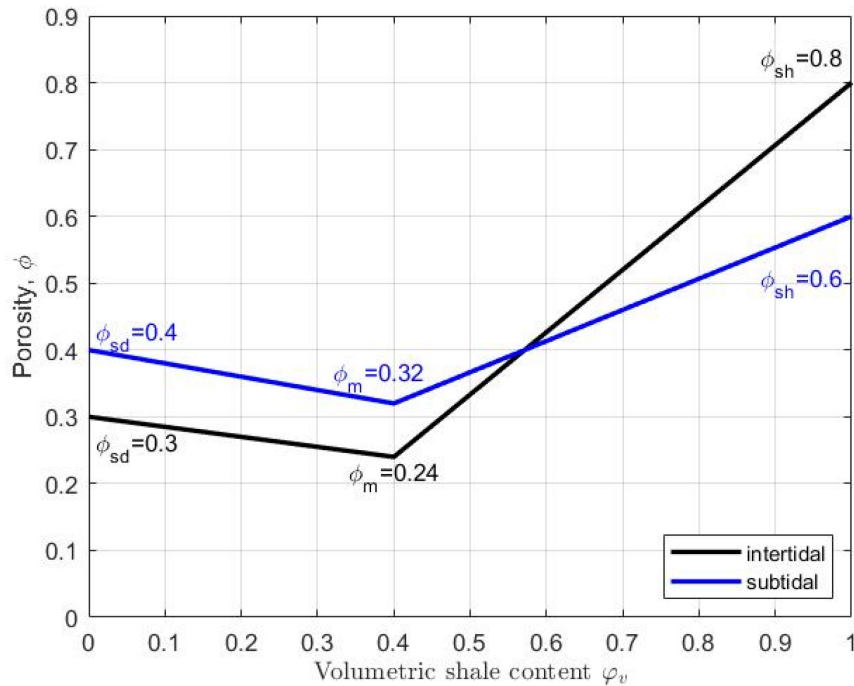
ϕ_{Sh} : porositeit van zuiver slib [-]

ϕ_m : minimale porositeit [-], treedt op bij relatief aandeel slib van 40% = 0.24



Figuur 7 – “Ideal packing model”: voorspelde porositeit als een functie van het volumetrisch slibpercentage. Een porositeitsminimum treedt op wanneer het volumetrisch slibpercentage gelijk is aan de porositeit van de zandcomponent (Koltermann et al., 1995).

Voor de intertidale ecotoopklassen (slik en schor) is het aandeel slib aanzienlijk hoger dan bij subtidale klassen. In Wang *et al.* (2015) wordt een uitgebreide beschrijving gegeven van de waarde van de droge bulk densiteit die in het Schelde-estuarium is gemeten. Voor slib monsters wordt een waarde van $500 \pm 100 \text{ kg/m}^3$ gevonden, terwijl voor zand monsters de waarde aanzienlijk hoger ligt ($1200\text{-}1500 \text{ kg/m}^3$). Wanneer deze waarden van de droge bulk densiteit omgerekend worden naar een bijbehorende porositeit, resulteert dit (na afronding) in een porositeit $\phi_{Sh}=0,8$ voor zuivere slibstalen op het intertidaal en een porositeit $\phi_{Sd}=0,4$ voor zuivere zandstalen (zie ook Figuur 7 – “Ideal packing model”: voorspelde porositeit als een functie van het volumetrisch slibpercentage. Een porositeitsminimum treedt op wanneer het volumetrisch slibpercentage gelijk is aan de porositeit van de zandcomponent (Koltermann et al., 1995). Figuur 7). Aangezien de compactie van zuiver slib in het intertidaal afwijkt van dit in het subtidaal, is er voor gekozen voor het subtidaal een porositeit $\phi_{Sh}=0,6$ te hanteren voor zuivere slibstalen (o.b.v. Wang et al., 2015) en 0,3 voor zuivere zandstalen. Dit resulteert in een minimale porositeit $\phi_m=0,32$ voor het intertidaal (bij 40% klei) en $\phi_m=0,24$ voor het subtidaal. Deze aangepaste waarden worden weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8 – Gebruikte porositeitswaarden voor intertidale en subtidale ecotoopklassen

3.4.4 Van volume naar massa

Met behulp van bovenstaande stappen, waarbij expliciet rekening gehouden wordt met de variatie van porositeit op basis van het relatieve aandeel zand- en slibfractie, kunnen de uit de topo-bathymetrische opnames afgeleide volumeveranderingen omgerekend worden naar veranderingen in massa:

Voor zand:

$$\Delta m_{zand} = \rho_{zand} \cdot [\Delta V_{tb} \cdot (1 - \phi) \cdot (1 - \phi_v)] \quad (5)$$

Voor slib:

$$\Delta m_{slib} = \rho_{slib} \cdot [\Delta V_{tb} \cdot (1 - \phi) \cdot \phi_v] \quad (6)$$

Met: Δm_{zand} : de verandering van de massa zand [kg]

Δm_{slib} : de verandering van de massa slib [kg]

ρ_{zand} : de dichtheid van zuiver zand [kg/m³] (= 2650 kg/m³)

ρ_{slib} : de dichtheid van zuiver slib [kg/m³] (= 2650 kg/m³)

ΔV_{tb} : de volumeverandering bepaald uit de topo-bathymetrie [m³]

ϕ : de porositeit van het zand-slibmengsel [-]

ϕ_v : het relatieve aandeel van de slibfractie [-] (verschillend per ecotoopklasse)

3.5 Antropogene invloeden

Doordat de sectiekaarten telkens in het voorjaar (februari – maart) opgemeten worden, is ervoor gekozen de ingreepgegevens te beschouwen van de periode 1/1/2016 – 1/1/2019. Dit leidt tot een kleine overschatting van de ingreepgegevens in 2016 en analoog, een onderschatting voor 2019. De keuze van 1 januari is gemaakt omwille van het feit dat bepaalde ingreepgegevens slechts op jaarbasis beschikbaar zijn, en is dan ook toegepaste op alle ingreepgegevens, ook wanneer deze met een hogere resolutie beschikbaar waren.

3.5.1 Baggeren en storten ten behoeve van de maritieme toegankelijkheid

Om de maritieme toegankelijkheid te garanderen worden door de afdeling Maritieme Toegang (aMT) quasi continu onderhoudsbaggerwerken uitgevoerd. Deze baggerwerken vinden plaats op verschillende drempels in de Beneden-Zeeschelde (deel grens tot sluis van Wintam) en omvatten zowel zanderige als slibrijke specie. De gebaggerde specie wordt volledig teruggestort op specifieke stortlocaties, waarbij eveneens een onderscheid gemaakt wordt in het type specie (zand vs. slib). Een overzicht van de bagger- en stortlocaties in de Beneden-Zeeschelde wordt gegeven in respectievelijk Figuur 9 en Figuur 10.

Een aantal bagger- en stortzones liggen uitgespreid over 2 verschillende rekencellen. Zo ligt stortlocatie Oosterweel voor een deel in rekencel 11, en een deel in rekencel 12 (Figuur 7). Aangezien bij de opmaak van de sedimentbalans de specie toegewezen wordt aan één rekencel, wordt een opsplitsing van de betreffende sedimentmassa gedaan a rato van het areaal van de zone in de rekencel ten opzichte van het totale areaal van de zone. Tabel 3 geeft een overzicht van de stort- en baggerzones die deel uitmaken van 2 rekencellen en het percentage van deze zones dat zich binnen elk van deze zones bevindt.

Tabel 3 – Overzicht van Stort- en Baggerzones die binnen 2 OMES-rekencellen liggen

Stortzone	OMES-rekencel	
	Ketelputten	11 (65,4%)
Oosterweel	11 (78,8%)	12 (21,2%)
Vlakte van Hoboken	13(68,6%)	12 (31,4%)
Baggerzone	OMES-rekencel	
	Drempel van Frederik	10 (69,2%)
Drempel van Krankeloon	11 (75,2%)	12 (24,8%)
Ketelplaat	11 (67,6%)	10 (32,4%)

De gebaggerde en gestorte sedimentmassa's worden geregistreerd door de afdeling Maritieme Toegang. Sinds 2012 worden deze gegevens geregistreerd op individuele trip-basis (i.e. per cyclus van baggeren – varen – storten – terugvaren). Voor de periode 2016 - 2019 werd dan ook gebruik gemaakt van deze gedetailleerd gegevens, waarbij op basis van de geregistreeerde densiteit van het sedimentmengsel en het beunvolume de massa van het gebaggerde sediment werd berekend. Dit verliep als volgt:

$$\rho_{beun} = \frac{m_{lading}}{V_{beun}} \quad (7)$$

$$n = \frac{\rho_{sediment} - \rho_{beun}}{\rho_{sediment} - \rho_{water}} \quad (8)$$

$$m_{\text{sediment}} = (1 - n) \cdot \rho_{\text{sediment}} \cdot V_{\text{beun}} \quad (9)$$

Waarbij ρ_{sediment} de densiteit van puur sediment is (2,65 t/m³), ρ_{water} de densiteit van water is (1,00¹ t/m³) en n de porositeit is.

De alzo berekende massa's van gebaggerd en gestort sediment per bagger- en stortzone worden vervolgens geaggregeerd tot het niveau van de rekencellen, rekening houdend met eventuele spreiding van zone over 2 rekencellen. Op basis van de gemiddelde verhouding tussen de massa en dit volume (periode 2012-2020), werden de beschikbare bagger- en stortvolumes omgerekend naar de bijbehorende sedimentmassa. Voor slib en niet peilbaar zand werd hiervoor een factor 1,606 toegepast, voor peilbaar zand is dit 1,456 (zie ook Dams et al., 2016).

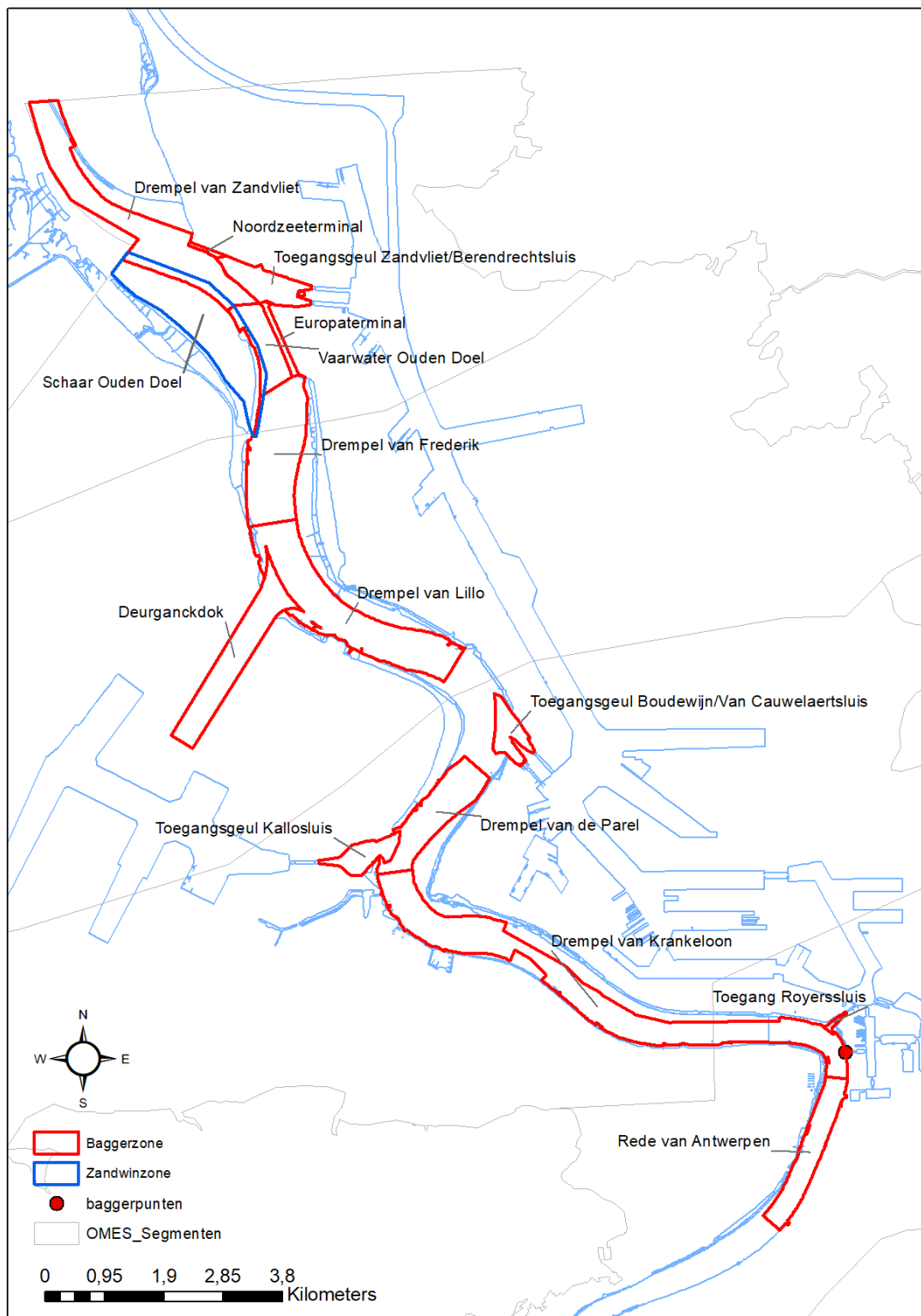
Merk op dat de hier gevolgde methodiek (massabalans) voor de ingreepgegevens het voordeel geeft dat er geen specifieke aannames dienen te gebeuren rond verschillen in beunvolume vs. in situ volume voor deze ingreepgegevens en dat de gebruikte massa rechtstreeks uit de registraties werden afgeleid.

Tabel 4 geeft een overzicht van de gebaggerde en gestorte massa's zand en slib per rekencel voor de periode 1/1/2016 – 1/1/2019.

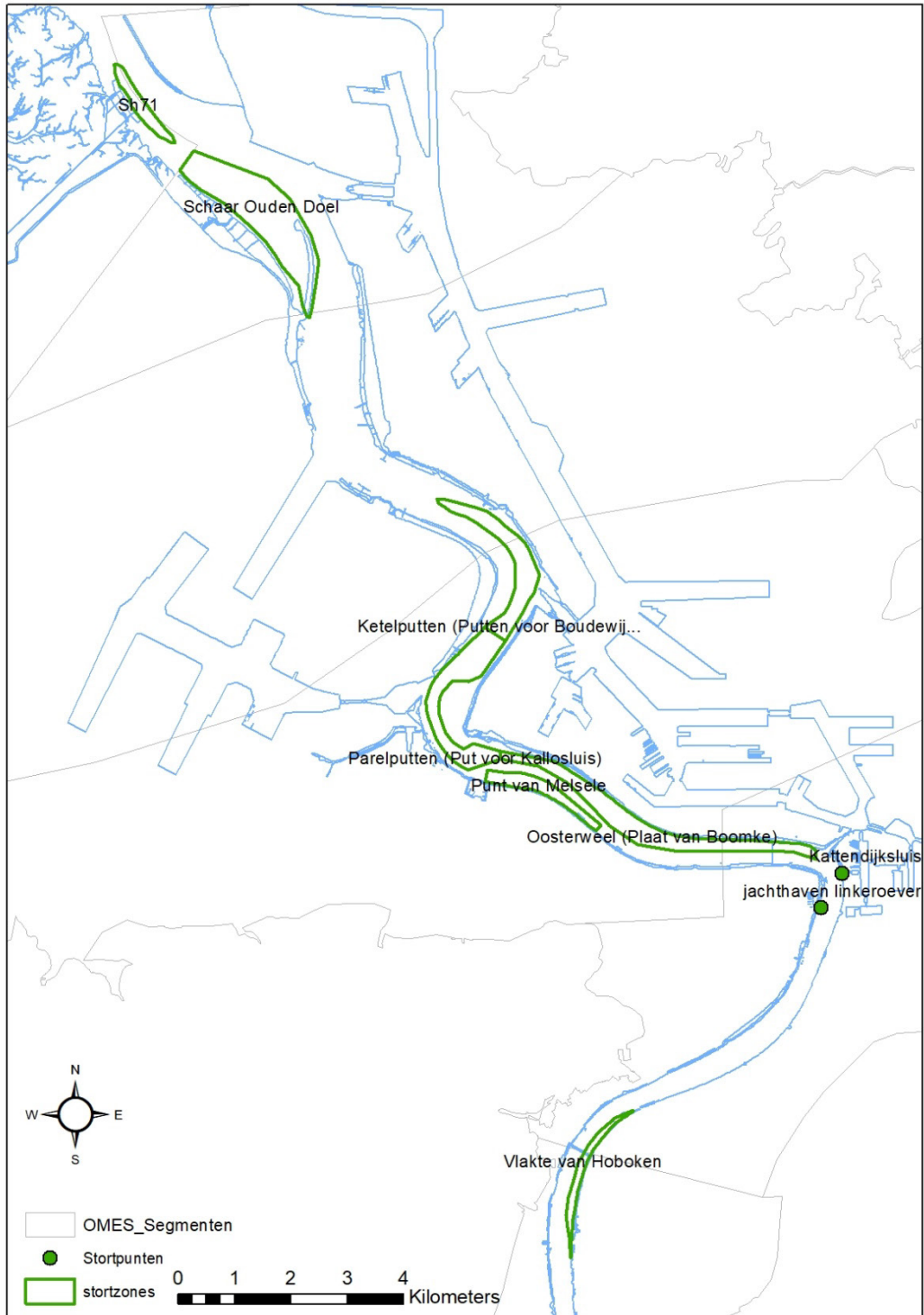
Tabel 4 – Overzicht van de totale massa gebaggerd en gestort zand en slib per rekencel voor de periode 2016 – 2019 (bron: aMT)

ZAND		
Rekencel	Baggeren [MTDS]	Storten [MTDS]
9	2,89	4,56
10	1,22	-
11	1,13	4,67
12	0,09	-
SLIB		
Rekencel	Baggeren [MTDS]	Storten [MTDS]
9	4,96	-
10	6,34	0,66
11	2,25	12,0
12	< 0,01	1,36

¹ Hier wordt uitgegaan van zoetwater, hoewel dit voor de Zeeschelde varieert tussen brak en zoet, waardoor de densiteit van het water zal variëren. De invloed hiervan is echter beperkt in de uiteindelijke berekening van de sedimentbalans.



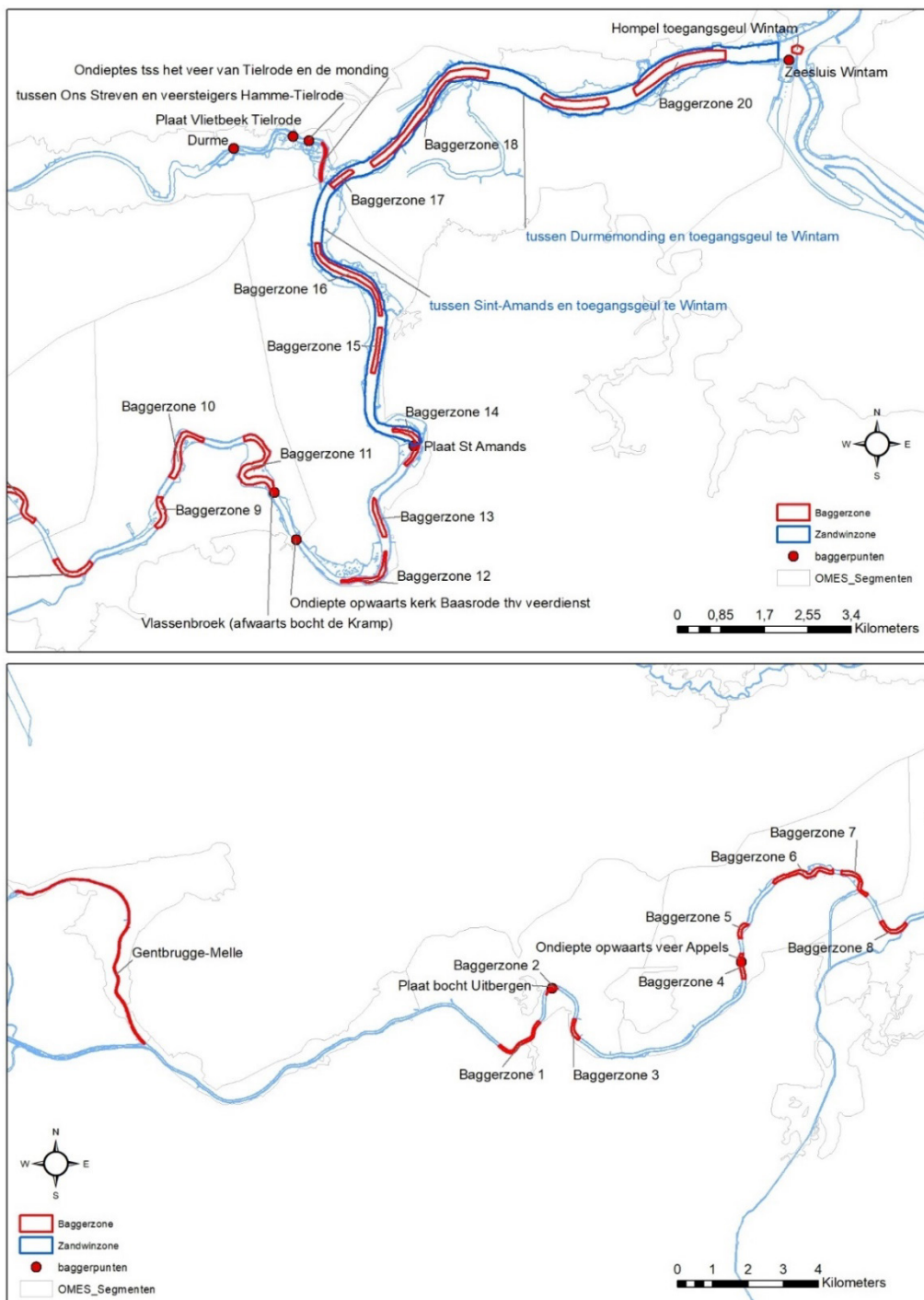
Figuur 9 – Baggerlocaties in de Beneden-Zeeschelde



Figuur 10 – Stortlocaties in de Beneden-Zeeschelde

3.5.2 Baggeren en storten (overig)

Naast de bagger- en stortwerkzaamheden in de Beneden-Zeeschelde om de maritieme toegankelijkheid te garanderen, vinden er in de Boven-Zeeschelde eveneens bagger- en stortactiviteiten plaats. Deze werken gebeuren eveneens ten behoeve van de toegankelijkheid of vinden plaats in het kader van infrastructurele projecten (bv. dijkwerken). De informatie is minder gedetailleerd en wordt door de Vlaamse Waterweg (DVW) ter beschikking gesteld. Het betreft jaarlijkse volumes van bagger- en stortactiviteiten, toegewezen aan een bepaalde locatie in de Boven-Zeeschelde. De ligging van deze zones is terug te vinden op Figuur 11.



Figuur 11 – Baggerlocaties in de Boven-Zeeschelde (afwaarts (boven) en opwaarts (onder))

Aangezien er geen specifieke informatie beschikbaar is omtrent het type gebaggerd sediment, wordt dezelfde methodologie toegepast als bij de topo-bathymetrische volumeveranderingen; op basis van de ligging van de zone wordt deze toegewezen aan een bepaalde ecotoopklasse. De zand-slib-verhouding voor deze ecotoopklasse wordt toegepast bij de omrekening naar de gebaggerde sedimentmassa. Tabel 5 geeft het overzicht van de gebaggerde massa's sediment in de Boven-Zeeschelde voor de periode 1/1/2016 – 1/1/2019. De hoeveelheden zijn aanzienlijk lager dan deze van de Beneden-Zeeschelde, al dient tevens opgemerkt te worden dat de dimensies van de natte sectie sterk afnemen naarmate men meer opwaarts komt. Opvallend zijn de grote hoeveelheden in de Durme, die toe te schrijven zijn aan een grote baggeractie in de beschouwde periode.

Tabel 5 – Overzicht van de massa gebaggerd zand en slib per rekencel in de periode 2016 -2019 (bron: DVW)

Rekencel	Zand [MTDS]	Slib [MTDS]
14	0,06	< 0,01
15	0,03	0,05
16	0,04	0,03
17	< 0,01	0,02
18	-	< 0,01
19 trGM	< 0,01	-
Durme	0,04	0,06

3.5.3 Zandwinning

Naast de onderhoudsbaggerwerken (al dan niet in combinatie met terugstorten van specie), vindt er ook commerciële zandwinning plaats in de Zeeschelde. Deze vindt plaats op 2 locaties in de Zeeschelde: Schaar van Ouden Doel (rekencel 9) en ter hoogte van de monding van de Rupel (rekencellen 13, 14 en Rupel).

Aangezien het hierbij de expliciete bedoeling is louter zand te onttrekken uit het systeem, wordt de fijne fractie (slib) bij het winnen uitgespoeld. Omwille van deze werkwijze worden de onttrokken volumes dan ook volledig als zandfractie beschouwd. De omrekening van volume naar massa gebeurt op basis van de aanname dat het louter om zand gaat (met bijbehorende porositeit $n = 0,4$). Tabel 6 geeft een overzicht van de gewonnen massa's zand per rekencel voor de periode 1/1/2016 – 1/1/2019.

Tabel 6 – Overzicht van de massa zand onttrokken door zandwinning per rekencel (bron: aMT)

Rekencel	Zand [MTDS]
10	3,22
13	0,05
14	0,01
15	0,03

3.6 Uitwisseling met de havendokken

De niet-getijgebonden havendokken in het Antwerps havengebied zijn van het estuarium gescheiden door sluisen. Bij het openen van de sluisen ontstaan er densiteitsstromingen waardoor sediment van en naar de dokken wordt getransporteerd. Het gaat voornamelijk om het transport van slibrijk sediment dat accumuleert in de toegangsgeulen net voor de sluisen. Het getransporteerde sediment zet zich af in de dokken en wordt in een latere fase uitgebaggerd. Voor de periode 2001-2011 bedraagt de jaarlijkse sedimentatiehoeveelheid in de rechteroeverdokken om en bij de 500 000 TDS/jaar (Heylen, 2013).

Sinds de berekening van de vorige sedimentbalans zijn geen nieuwe gegevens beschikbaar gekomen. Voor voorliggende berekening wordt dan ook vastgehouden aan bovenstaand getal, dat reeds in de literatuurstudie in het kader van het project “Slibbalans Zeeschelde” (Dams *et al.*, 2016) werd gerapporteerd.

De totale massa dient verdeeld te worden over de verschillende sluiscomplexen (en dus bijbehorende rekencel). Aangezien de onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de dokken op linkeroever verwaarloosbaar zijn ten opzichte zijn van deze op rechteroever, wordt verondersteld dat de sedimentflux doorheen de Kallosluis zeer klein is en wordt hiervoor de waarde 0 aangenomen. Echter, doordat de processen voor de Kallosluis niet verschillen voor de sluisen op rechteroever, kan deze aanname in vraag gesteld worden. In verder onderzoek binnen dit project, zal getracht worden een nauwkeurigere inschatting te maken voor de uitwisseling naar de dokken (LO en RO), momenteel zijn er echter geen betere inschattingen voorhanden.

In (Vandenbruwaene *et al.*, 2017) werd de massa evenredig over de verschillende complexen verdeeld. Aangezien de grootte van de sluisen aanzienlijk verschillend is, alsook het aantal versassingen per jaar en de lokale sedimentconcentratie verschilt, passen we hier een aangepaste verdeling toe. Er wordt een verdeelsleutel toegepast evenredig met het product van het uitgewisselde watervolume door versassingen en de lokale sedimentconcentratie in de Schelde ter hoogte van het sluiscomplex. De watervolumes werden overgenomen uit de waterbalans voor de haven van Antwerpen (Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen, 2001), terwijl de sedimentconcentratie bepaald werd als de mediane waarde van de oppervlakteconcentratie uit de OMES-dataset voor de periode 2011-2016 (Bron: UAntwerpen i.o.v. De Vlaamse Waterweg). Deze verdeling werd gebruikt voor de sedimentbalans van 2011-2016, evenals voor de sedimentbalans van 2016-2019. Op deze manier wordt een relatieve bijdrage per sluiscomplex bepaald, wat toegepast wordt op de gerapporteerde waarde van 500 000 TDS/jaar. Tabel 7 geeft het overzicht van de slibfluxen doorheen de sluisen voor de verschillende sluiscomplexen, uitgaande van een jaarlijkse aanvoer van 500 000 TDS naar de dokken.

Tabel 7 – Overzicht slibfluxen doorheen sluiscomplexen over periode 1/1/2016-1/1/2019

Sluiscomplex	Reken cel	ΔV [Mm ³]	SSC [mg/L]	Relatief aandeel [%]	Hoeveelheid slib [MTDS]
Berendrecht-Zandvliet (RO)	9	231	45	51%	0,77
Boudewijn-Van Cauwelaert (RO)	11	131	57	37%	0,55
Royers (RO)	12	28	83	12%	0,17
Kallo (LO)	11	-	-	-	-

3.7 Fluviatiele aanvoer van sediment

De fluviatiele sedimentaanvoer vormt de opwaartse randvoorwaarde voor het berekenen van de sedimentbalans. Er zijn 4 opwaartse randen (Figuur 12) waarover een aanvoer van sediment kan plaatsvinden en die door het Waterbouwkundig Laboratorium continu gemeten worden:

- Boven-Zeeschelde te Melle
- Dender te Appels
- Rupel, de combinatie van de verschillende bovenrivieren die samenkomen in de Rupel zijnde de Kleine Nete (Grobbendonk), Grote Nete (Itegem), Demer (Aarschot) en Zenne (Epegem); voor de Dijle worden er door het WL geen metingen uitgevoerd;
- Durme te Lokeren (hier wordt geen sediment aangevoerd vanuit de Moervaart | = 0)

De sedimentaanvoer wordt bepaald op basis van de gemeten debieten en sedimentconcentraties (via staalname of afgeleid uit de turbiditeit). Aangezien de metingen van de sedimentconcentratie gebeuren op één punt in de dwarssectie, dient er nog een correctie te gebeuren om de puntwaarde representatief te maken voor de volledige dwarssectie (via zogenaamde EW-correctie). Voor een uitvoerige beschrijving van de methodiek wordt verwezen naar Vos *et al.* (2019) en Brackx *et al.* (2019).

Tabel 8 geeft een overzicht van de fluviatiele sedimentaanvoer voor de periode 2016 tot en met 2018 (Vandenbruwaene *et al.*, 2022). Voor de Dijle werden er in deze periode geen metingen uitgevoerd en werd een gemiddelde sedimentlading aangenomen van de periode 2001-2011.

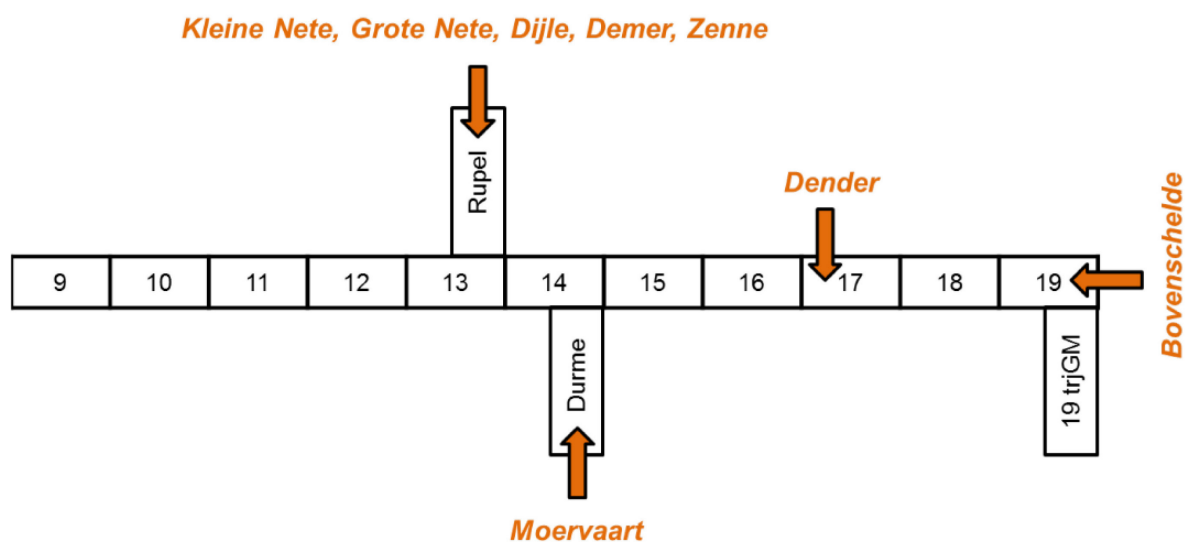
Tabel 8 – Overzicht van de fluviatiele sedimentaanvoer voor de verschillende rivieren over de periode 2016-2019

Jaar	Totale sedimentlading [TDS]					
	Grote Nete (Itegem)	Demer (Aarschot)	Zenne (Epegem)	Rupel (som GN, Demer en Zenne)	Boven-Zeeschelde (Melle)	Dender (Appels)
2016	13.537	169560	38.338	297.042	153.882	107.976
2017	9.739	95812	62.898	231.100	100.063	65.474
2018	9.322	53777	199.972	323.154	102.779	59.598
Totaal	32.599	319.149	301.207	851.295	356.725	233.048

De gerapporteerde sedimentladingen omvatten alle sedimentfracties. Vermits de sedimentbalans een onderscheid maakt tussen zand en slib, werd het aandeel van beide fracties berekend op basis van staalnames die plaatsvinden in de rivieren. Meer specifiek werd gebruik gemaakt van de ISCO stalen en schepstalen te Gavere (Bovenschelde), Appels (Dender), Itegem (Grote Nete), Aarschot (Demer) en Epegem (Zenne). De laatste drie stations werden als representatief beschouwd voor het fluviatiele sediment dat in de Rupel terechtkomt. Er werd gekozen om te werken met de stalen afkomstig uit het jaar 2019, het meest recente jaar in de beschouwde periode voor de sedimentbalansberekening. Uit de analyse van de stalen blijkt dat het sediment in de waterkolom hoofdzakelijk tot de slibfractie behoort (Tabel 9). De totale sedimentlading over de periode 2016-2018 werd per rivier opgesplitst in een hoeveelheid zand en een hoeveelheid slib, gebruik makende van de waardes in Tabel 9.

Tabel 9 – Slibgehalte van het fluviaatiele sediment in de rivieren Bovenschelde, Rupel en Dender.

Rivier	Station	Aantal Stalen	Slibgehalte [%]
Bovenschelde	Gavere	25	88,4
Rupel	Aarschot, Itegem, Epegem	64	81,4
Dender	Appels	25	77,7

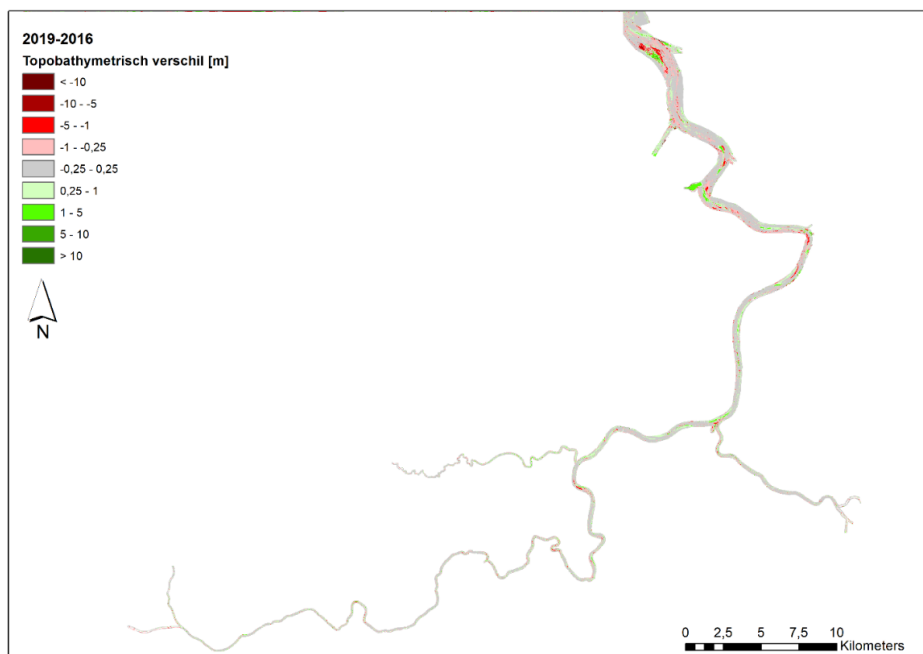


Figuur 12 – Schematische voorstelling van de rekencellen met aanduiding van de randen voor fluviaatiele sedimentaanvoer

4 Resultaten

4.1 Topo-bathymetrie

Figuur 13 geeft de verschilkaart weer van de topo-bathymetrische veranderingen binnen de dijklijnen over de periode 2016-2019. Een meer gedetailleerde voorstelling is opgenomen in Bijlage 1 – Verschilkaarten. Groene kleuren duiden op een accumulatie van sediment tussen 2016 en 2019, rode kleuren duiden op het verdwijnen van sediment. Tabel 10 geeft de volumeveranderingen weer per OMES-segment. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze waarden absoluut zijn, en omwille van de afname in oppervlak van afwaarts naar opwaarts, niet zomaar kunnen vergeleken worden en eerder als een indicatie van de trend dienen bekeken worden. Tabel 11 geeft daarom de hoogteverandering in m per OMES-segment weer. De meest afwaartse segmenten (9-10 en 12) worden hierbij gekenmerkt door verdieping in de periode 2016-2019, vanaf segment 13 is er verondieping.



Figuur 13 – Verschilkaart op basis van de bathymetrieën van 2019 en 2016.

Tabel 10 – Volumeveranderingen [Mm³] per OMES-segment over de periode 2016-2019

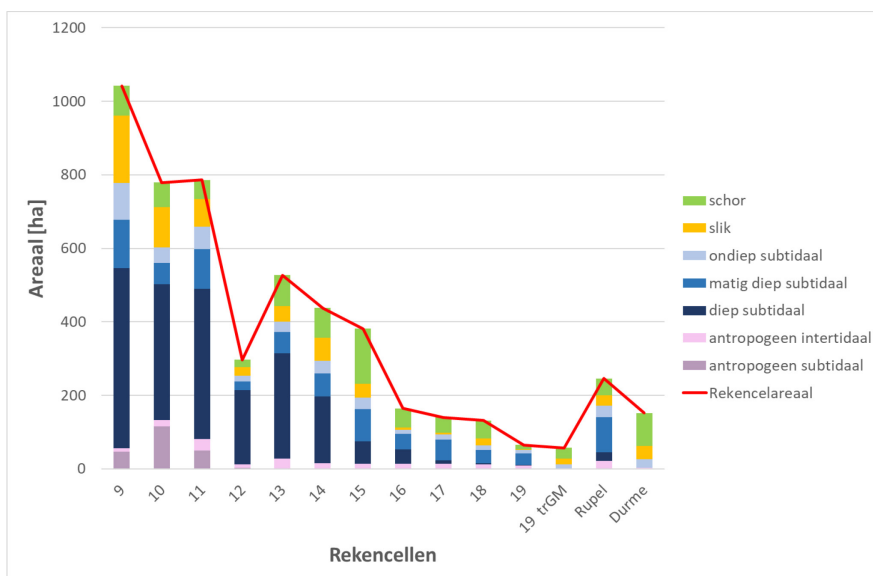
OMES-segment													
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19 trgm	Durme	Rupel
-1.17	-0.21	0.31	-0.14	0.33	0.40	0.07	0.06	0.03	0.06	0.08	0.05	0.19	0.06

Tabel 11 – Volumeverandering/oppervlakte [m] per OMES-segment over de periode 2016-2019

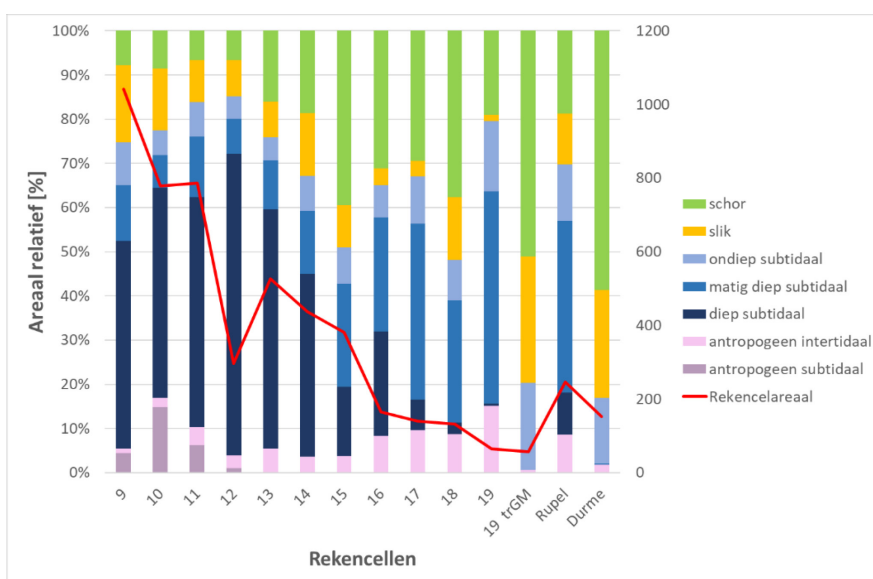
OMES-segment													
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19 trgm	Durme	Rupel
-0.11	-0.03	0.04	-0.05	0.06	0.09	0.02	0.04	0.02	0.05	0.12	0.10	0.12	0.02

4.2 Lithologie

Figuur 14 en Figuur 15 geven respectievelijk het areaal aan ecotopen per OMES-segment en het relatieve aandeel van de ecotopen per OMES-segment weer. In Figuur 14 is duidelijk de afname van de oppervlakte in opwaartse richting zichtbaar. Verder verandert de relatieve verhouding van de ecotopen ook doorheen het estuarium. Het areaal intertidaal varieert van ca. 15% (OMES-segment 11 en 12) tot ca. 50% (segment 15 en 18). Voor de Oude Tijarm en de Durme is het aandeel intertidaal nog groter (tot 80%). Vanaf segment 13 zien we ook een afname in het aandeel diep subtidaal, dit door de afname in dimensie (breedte en diepte) van de dwarssecties in het opwaartse deel van het estuarium.



Figuur 14 – Areaal aan ecotopen per Omes-segment

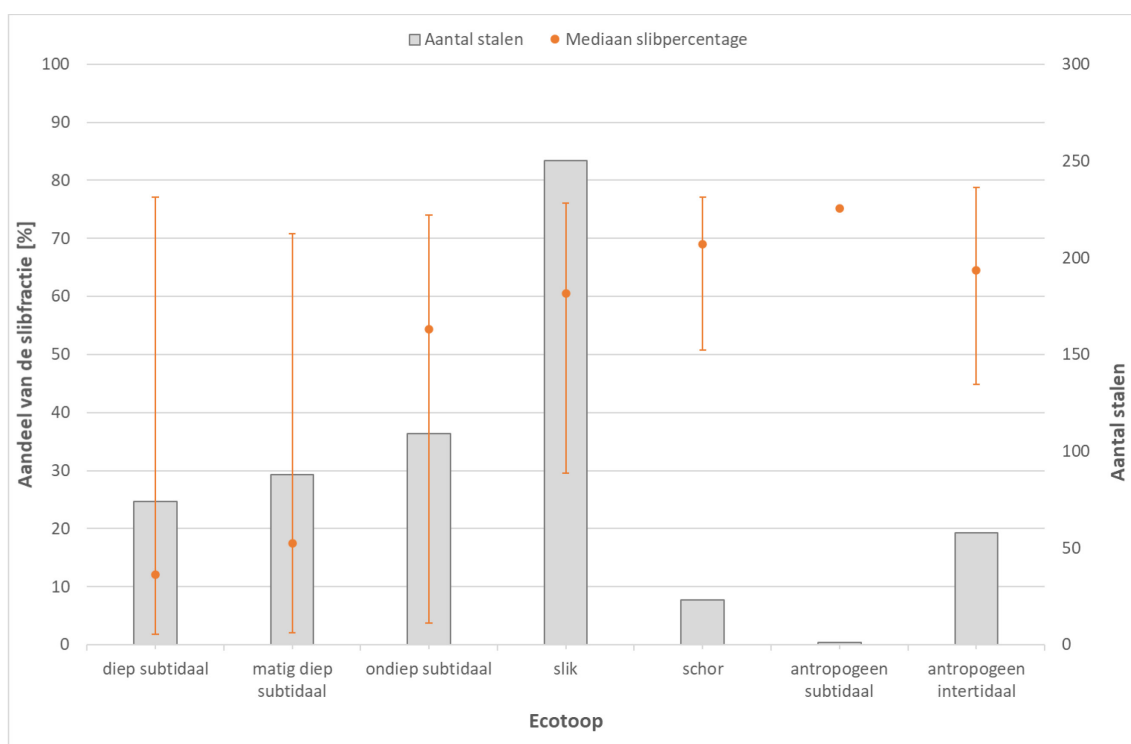


Figuur 15 – Relatieve verhouding aan ecotopen per Omes-segment

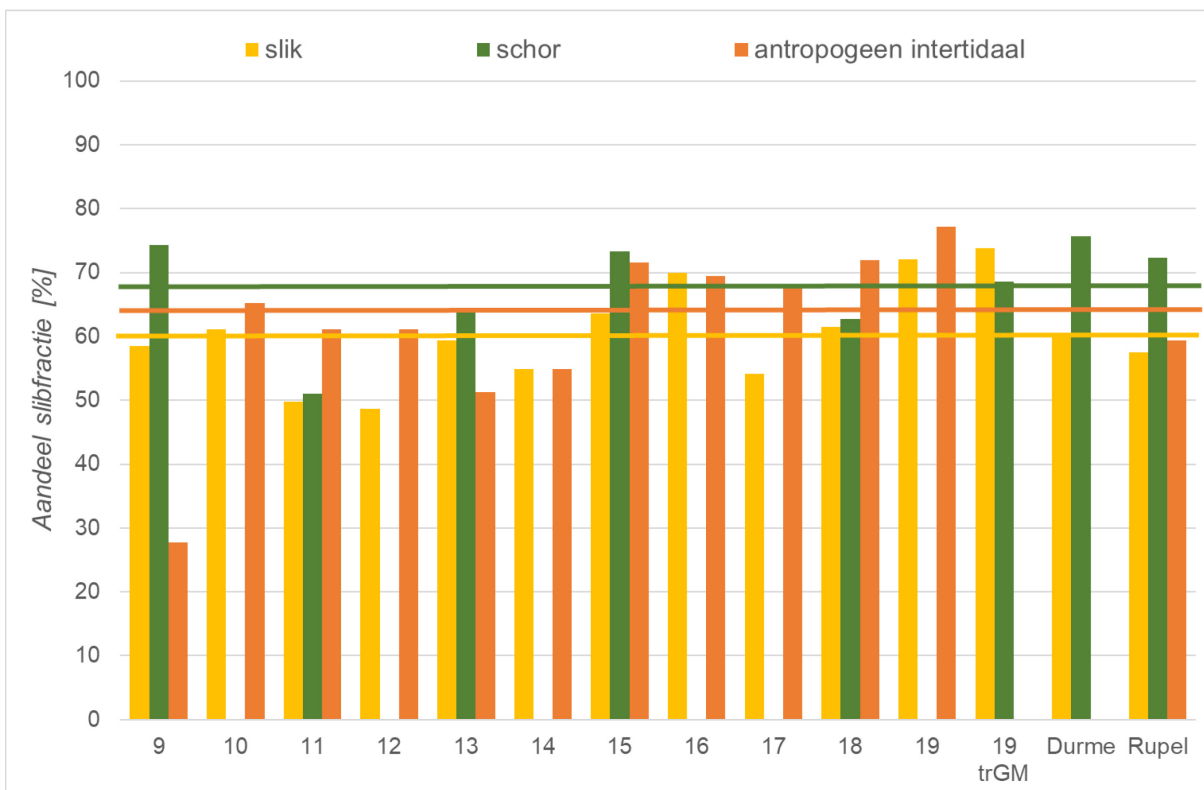
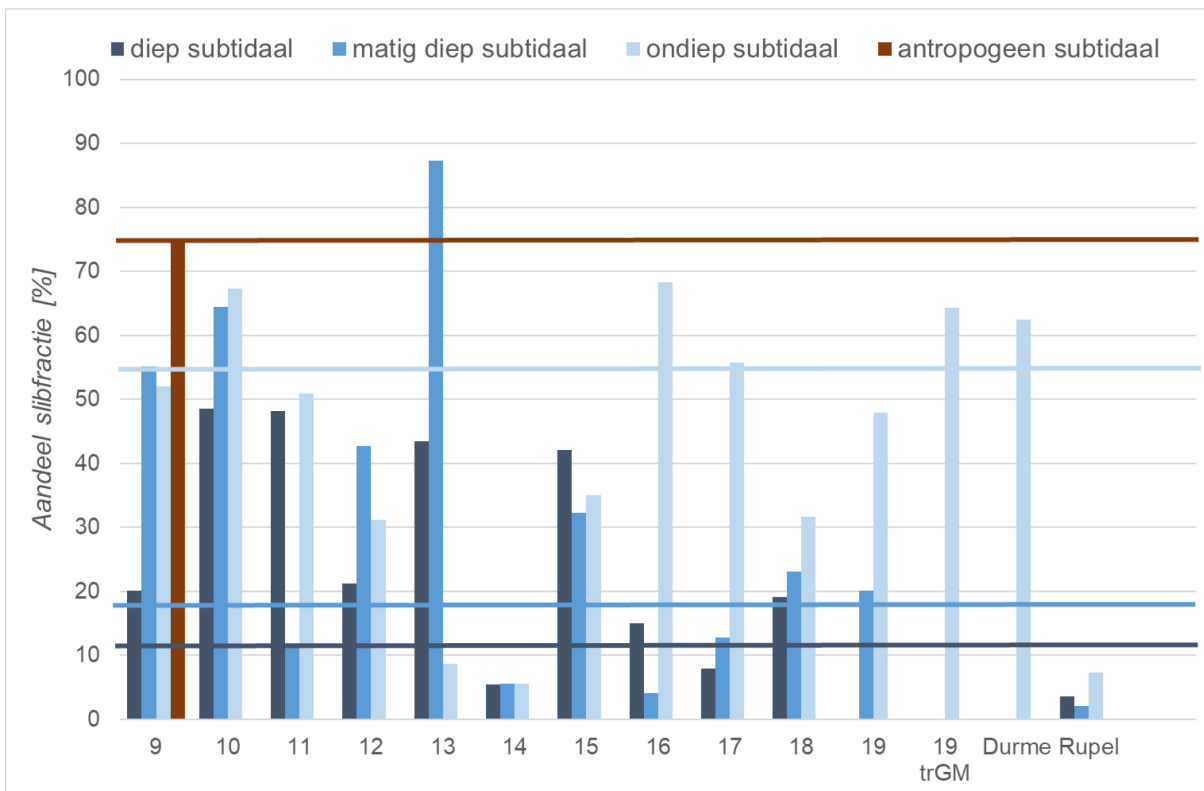
Figuur 16 geeft een overzicht van het aantal beschikbare bodemstalen per ecotoopklasse voor de periode 2016-2019, alsook de mediaan van het aandeel slib voor de bodemstalen. Met uitzondering van het antropogeen subtidaal en schor bevat elke ecotoopklasse 50 of meer stalen, wat leidt tot een representatief beeld van de bodemsamenstelling van de verschillende ecotoopklassen. De mediaan van het aandeel slib varieert van 12% (diep subtidaal) tot 75% (antropogeen subtidaal). Deze variatie hangt samen met het verschil in dynamiek tussen beide ecotoopklassen: de geulen ((matig) diep subtidaal) worden gekenmerkt door hogere stroomsnelheden waardoor het slib niet op de bodem kan bezinken; de antropogene subtidaal gebieden (toegangsgeulen, getijdedokken) worden veelal gekenmerkt door quasi stilstaand water, waardoor de fijne fractie zich hier kan afzetten. Daarnaast kan worden vastgesteld dat ook binnen één bepaalde ecotoopklasse er een aanzienlijke spreiding aanwezig is in het aandeel van de slibfractie, wat te zien is op de foutenbalken, die resp. de P10 en P90 waarde weergeven.

Figuur 17 geeft per ecotoopklasse voor de verschillende OMES-segmenten het aandeel van de slibfractie weer. Tevens wordt de mediaan van de volledige dataset weergegeven (horizontale lijnen). Voor het diep en matig diep subtidaal blijkt het aandeel slibfractie in de Beneden-Zeeschelde (OMES 9-13) hoger te liggen dan de mediane waarde van de volledige dataset, terwijl deze in de Boven-Zeeschelde (OMES 14-19) lager ligt. Voor het ondiep subtidaal is er geen uitgesproken ruimtelijke patroon aanwezig, met uitzondering van de Oude Tijarm en de Durme waar het aandeel van de slibfractie in deze ecotoopklasse hoger ligt dan de mediaan.

Voor de intertidale ecotoopklassen (slik, schor, antropogeen) is de variatie over de verschillende OMES-segmenten minder ten opzichte van de subtidaal ecotoopklassen. Tevens kan voor de intertidale ecotoopklasse geen duidelijk ruimtelijke patroon teruggevonden worden.



Figuur 16 – Zand en slib (in %) per geaggregeerde ecotoopklasse over alle segmenten in de Zeeschelde, voorgesteld aan de hand van mediaanwaarden (bolletjes) en de 10^e en 90^{ste} percentielwaarden (foutenvlaggen).



Figuur 17 – Aandeel slibfractie (P50) voor verschillende OMES-segmenten: subtidaal (boven) en intertidaal (onder) ecotoopklassen. Volle lijn geeft de mediaan weer per ecotoopklasse voor volledige dataset

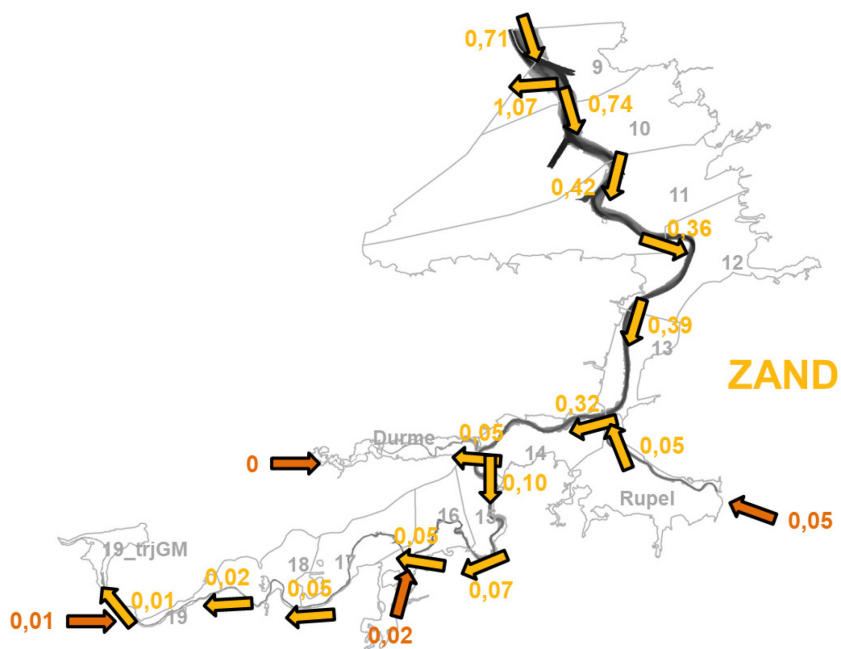
4.3 De sedimentbalans

Op basis van de berekende massaveranderingen per rekencel, de menselijke ingrepen en de opgelegde opwaartse randvoorwaarden voor fluviatiele aanvoer (Tabel 8) werd het sedimenttransport over de rekencellen heen berekend. De basisberekening gaat uit van de mediane waarde van het aandeel van de slibfractie per ecotopenklasse en per OMES-segment. Op basis van deze aanname werd de zand- (Figuur 18) en slibbalans (Figuur 19) voor de periode 2016-2019 berekend.

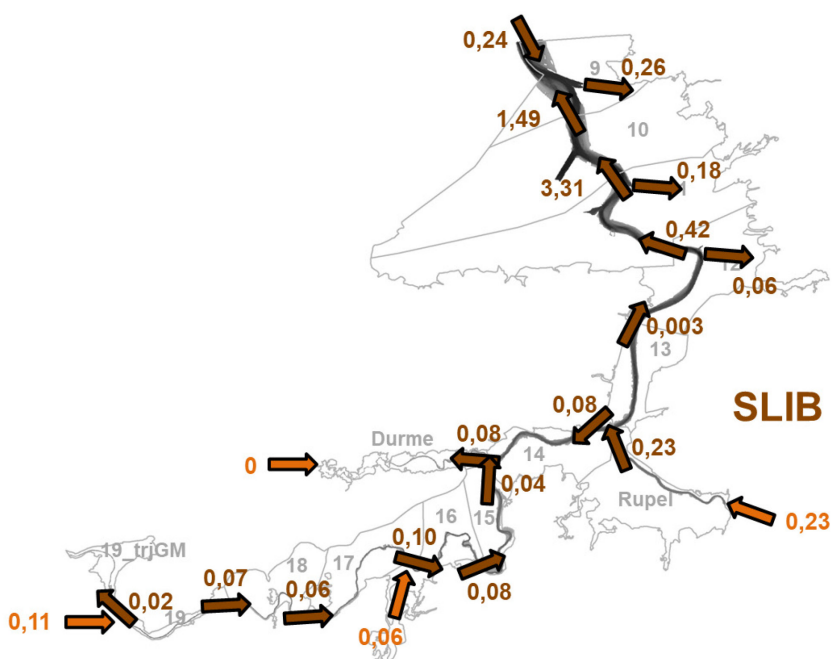
Het zandtransport (Figuur 18) is over de gehele Zeeschelde opwaarts gericht (vloed-gedomineerd). Dit stemt overeen met verwachting aangezien het zandtransport volgens klassieke sedimenttransportformules (e.g. Engelund & Hansen, 1967) evenredig is met de 3^e tot 5^e macht van de snelheid en de maximale vloodsnelheid in de Zeeschelde hoger is dan de maximale ebsnelheid (Vos *et al.*, 2013). Verder kan worden vastgesteld dat de absolute waarde van de transporten afnemen van afwaarts naar opwaarts, wat toegeschreven kan worden aan de reductie van de geuldimensies in deze richting.

Voor slib observeren we langsheen bijna de volledige Zeeschelde een afwaarts gericht transport (Figuur 19). Tussen de Rupel en de Durme is er een opwaarts gericht transport, en ook richting de Westerschelde is het transport – in tegenstelling tot bij de sedimentbalans van 2011-2016 - opwaarts gericht. De hoogste transportwaardes worden waargenomen in de Beneden-Zeeschelde, vooral over de rand van rekencellen 9-10, 10-11 en 11-12. Deze verhoogde transportwaardes kunnen we toeschrijven aan de bagger- en stortstrategie. Slib wordt gebaggerd in rekencellen 9 en 10 en wordt vervolgens gestort in rekencellen 11 en 12. Het afwaarts gericht transport zorgt er voor dat de gestorte specie zich steeds opnieuw in afwaartse richting beweegt, wat aanleiding geeft tot sterk verhoogde slibtransporten over de randen van rekencellen 9 tot en met 12.

In de Boven-Zeeschelde zijn de transportwaardes duidelijk lager, en kleiner dan 0,15 MTDS/jaar. De slibtransporten zijn in dit deel van het estuarium van dezelfde grootteorde als de fluviatiele sedimentaanvoer, wat erop duidt dat het aangevoerde sediment zich doorheen (van op- naar afwaarts) het estuarium verplaatst. In cel 9 is het aandeel baggeren (1,65 MTDS/jaar) groot ten opzichte van de gemeten volumeverandering (afname van 0,2 MTDS/jaar), wat verklaart dat de Zeeschelde hier licht importerend wordt.



Figuur 18 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (referentiescenario)



Figuur 19 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (referentiescenario)

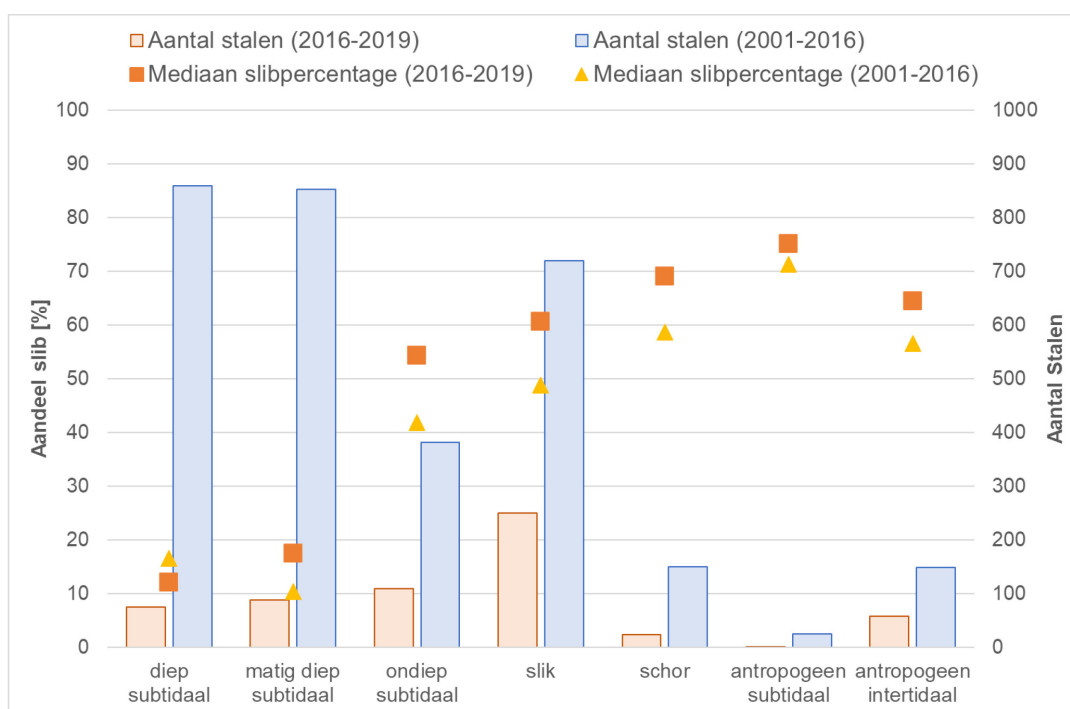
5 Discussie

5.1 Vergelijking met eerdere sedimentbalansen

Vandenbruwaene *et al.* (2017) heeft de zand- en slibbalans berekend voor de periode 2001-2011 en Plancke *et al.* (2023) voor de periode 2011-2016. In voorliggend rapport werd een vergelijkbare berekening uitgevoerd voor de periode 2016-2019. In de volgende paragrafen zal een vergelijking gemaakt worden tussen de resultaten voor de verschillende periodes.

5.1.1 Lithologie

Figuur 20 toont het aantal bodemstalen en het aandeel (P50) van de slibfractie dat voor de stalen binnen eenzelfde ecotoopklasse werd berekend, voor de periode 2001-2016 en 2016-2019. Het aantal beschikbare sedimentstalen ligt logischerwijs hoger bij de berekening voor de periode 2001-2016. Het aandeel van de slibfractie is in de meest recente periode overall licht gestegen, met uitzondering van het diep subtidaal. De grootste afwijking is echter nog steeds minder dan 15%. Er kan geconcludeerd worden dat de lithologische samenstelling niet wezenlijk veranderd is tussen beide beschouwde periodes. Toch blijft de vraag in hoeverre ook minimale lithologische veranderingen een effect hebben op de sedimentbalans. In Vos *et al.* (2019) werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waaruit reeds bleek dat vooral wijzigingen in de slibfractie een significant effect kunnen hebben op de sedimentbalans. Ook nu werd de sedimentbalans berekend met P10 en P90 waarden (zie Figuur 47 t.e.m. Figuur 50), waaruit blijkt dat de absolute waarden van het transport wel veranderen, maar de transportrichtingen behouden blijven voor zowel zand- als slibtransport. Verschillen in sedimentsamenstelling verklaren de veranderingen in sedimenttransport dus slechts gedeeltelijk.



Figuur 20 – Aandeel van de slibfractie per ecotoopklasse voor periode 2016-2019 (oranje) en periode 2001-2016 (geel)

5.1.2 Sedimentbalans

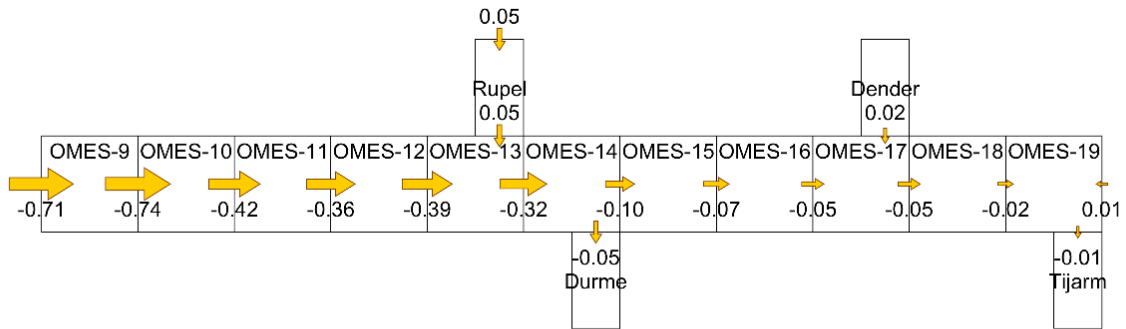
Figuur 21 geeft de zandbalans weer voor de periode 2016-2019, de periode 2011-2016 en de periode 2001-2011. Aangezien de balans over de periode 2001-2011 als volumebalans werd berekend, werden deze volumes omgerekend naar massa's. Hiervoor werd uitgegaan van een vaste porositeit ($n = 0,4$) en een vaste dichtheid van het sediment (2650 kg/m^3). Uit de figuur blijkt dat de balans voor de vier meest afwaartse segmenten gelijkaardig is voor de drie periodes. De transportrichting is opwaarts geïoriënteerd. Voor de periode 2016-2019 is het zandtransport over de volledige Zeeschelde opwaarts gericht. Tussen de monding van de Dender en de monding van de Rupel was het zandtransport in de periode 2011-2016 daarentegen afwaarts gericht, terwijl in de periode 2001-2011 ook de segmenten opwaarts van de Dender gekenmerkt werden door afwaarts transport. De locatie waar het residueel transport verandert van afwaarts naar opwaarts gericht verschuift doorheen de tijd steeds meer afwaarts. In vergelijking met de eerdere periodes is het opwaarts residueel zandtransport in de Beneden-Zeeschelde (OMES 9-13) tijdens de periode 2016-2019 groter geworden.

Door de trechtervorm van het estuarium dalen de residuele transporthoeveelheden naarmate men meer opwaarts gaat. De Zeeschelde neemt in breedte af van ca. 1500 m aan de grens tot ca. 50 m aan de meest opwaartse grens. De Durme en de Tijarm importeren zand over het gehele jaar, terwijl de Rupel, met een continue influx van zoet water, gekarakteriseerd wordt door zand transport ("doorgeefluik"), waarbij de aanvoer naar de Zeeschelde quasi gelijk is aan de fluviaatiele aanvoer.

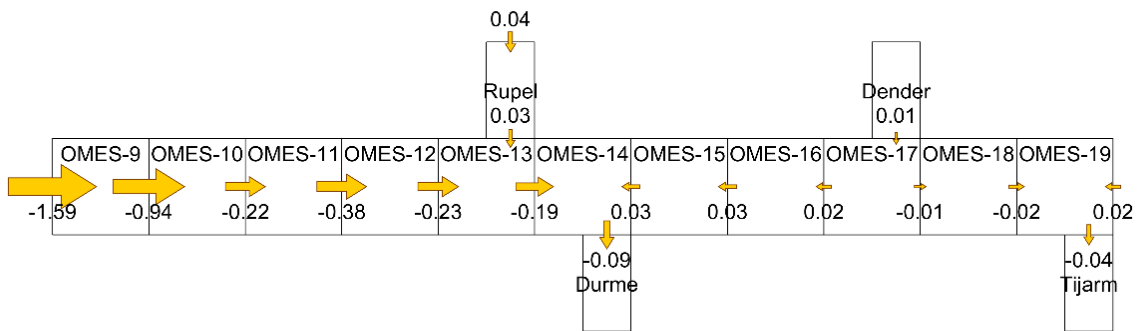
Figuur 22 geeft de slibbalans weer voor de periode 2016-2019, de periode 2011-2016 en de periode 2001-2011. Uit de figuur blijkt dat voor de periode 2001-2011 evenals voor de periode 2011-2016 het slibtransport afwaarts gericht is over de gehele Zeeschelde. Voor de periode 2016-2019 is het transport ook afwaarts gericht met uitzondering van de overgang tussen macrocel 13 en macrocel 14. Op de overgang tussen macrocel 12 en 13 is er quasi geen transport. Ook aan de afwaartse rand is macrocel 9 importerend voor slib. De Durme en de Tijarm zijn slibimporterend, terwijl de Rupel slib exporteert.

In tegenstelling tot het zandtransport blijven de transporthoeveelheden ongeveer gelijk doorheen het estuarium. Enkel in het meest afwaartse deel van de Zeeschelde zijn de residuele transporten hoger dan in de rest van het estuarium. Oorzaak hiervan is het baggeren en storten van slibrijk materiaal in deze regio. In OMES-segment 9 en 10 bevinden zich enkele grote baggerlocaties. Het hier gebaggerde materiaal wordt iets verder opwaarts, in OMES-segment 11 teruggestort. De circulatie van dit sediment is duidelijk zichtbaar in de sedimentbalans.

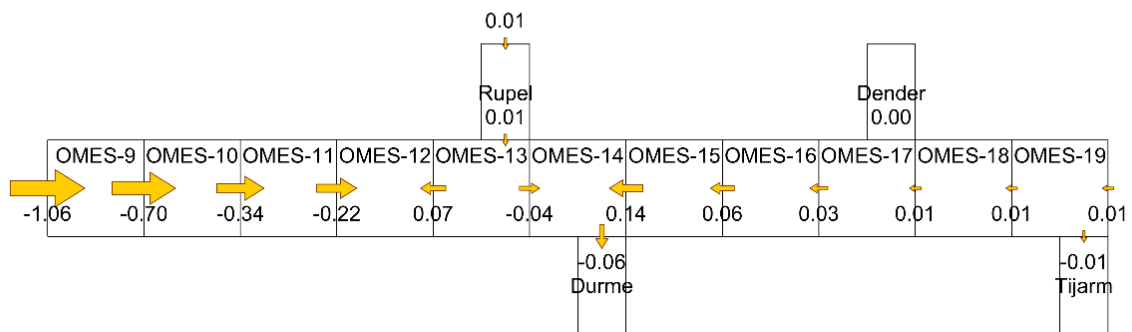
Periode 2016 - 2019



Periode 2011 - 2016

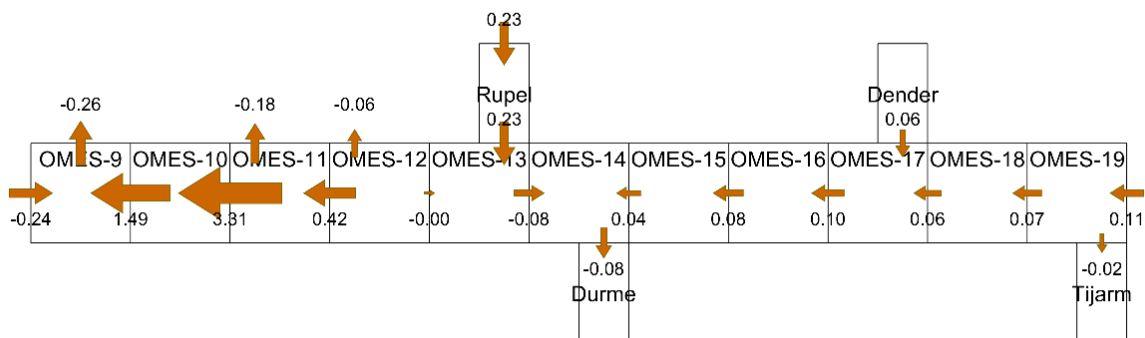


Periode 2001 - 2011

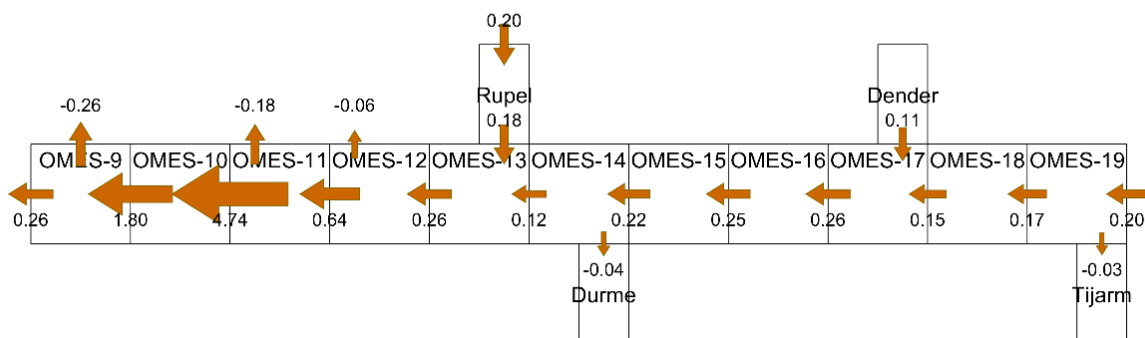


Figuur 21 – Zandbalans voor de periode 2016-2019 (boven), periode 2011-2016 (midden) en periode 2001-2011 (onder)
 Weergegeven waarden (MTDS/jaar) zijn de berekende waarden (positief = afwaarts-gericht zandtransport, negatief = opwaarts-gericht zandtransport) | pijlen geven de werkelijke richting weer van dit berekende transport en werden geschaald volgens de grootte van het zandtransport

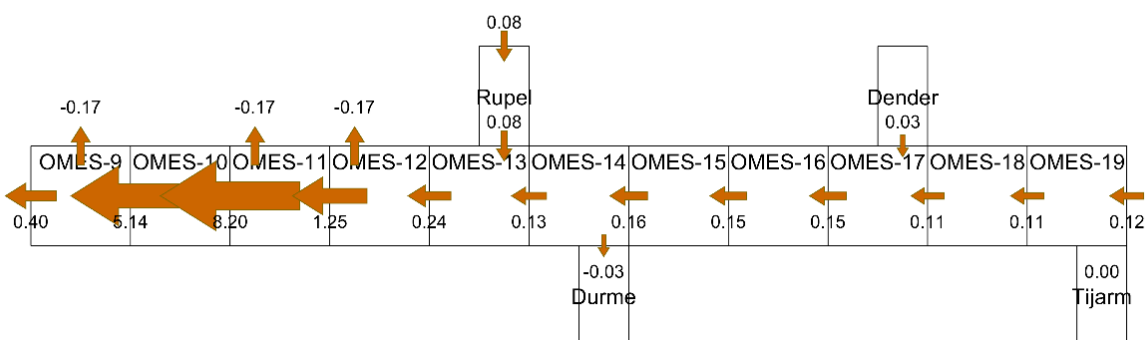
Periode 2016 - 2019



Periode 2011 - 2016



Periode 2001 - 2011



Figuur 22 – Slibbalans voor de periode 2016-2019 (boven), periode 2011-2016 (midden) en periode 2001-2011 (onder)
 Weergegeven waarden (MTDS/jaar) zijn de berekende waarden (positief = afwaarts-gericht slibtransport, negatief = opwaarts-gericht slibtransport) | pijlen geven de werkelijke richting weer van dit berekende transport en werden geschaald volgens de grootte van het slibtransport

5.2 De afwaartse uitkomst

Voor het berekenen van de zandbalans van de Westerschelde wordt aan de stroomopwaartse rand van macrocel 7 (grens Nederland – België) een sedimenttransport opgelegd (Schrijver, 2020). De waarde die wordt opgelegd, is gebaseerd op een vroegere sedimentbalans voor de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde (Haecon, 2006) en bedraagt $675135 \text{ m}^3/\text{jaar}$, in opwaartse richting. Omgerekend naar sedimentmassa komt dit overeen met een opwaarts gericht transport van $1,07 \text{ MTDS}/\text{jaar}$.

De berekende zand- en slibtransporten ter hoogte van de grens (i.e. afwaartse rand van voorliggende sedimentbalans) bedragen resp. $-0,71 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ (zand) en $-0,24 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ (slib). Wanneer beide fractie opgeteld worden, resulteert dit in een jaarlijks transport van $0,95 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ in opwaartse richting. Deze waarde is van dezelfde grootteorde als de waarde die gebruikt werd door RWS.

Wanneer we de waarden vergelijken met deze uit eerdere sedimentbalans kunnen we een variatie van 30 à 40% vaststellen. Over de periode 2011-2016 bedroeg het transport in opwaartse richting $1,33 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ (+40%). Wanneer we de waarden vergelijken met deze uit de sedimentbalans over de periode 2011-2011 vinden we daar een zand- en slibtransport ter hoogte van de grens van resp. $-1,06 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ (zand) en $+0,40 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ (slib), wat gecombineerd leidt tot een jaarlijkse transport van $0,66 \text{ MTDS}/\text{jaar}$ (-31%), opnieuw opwaarts gericht. Deze waarde ligt op haar beurt lager dan de door RWS gehanteerde opwaartse randvoorwaarde.

Concluderend kan gesteld worden dat de door RWS gehanteerde opwaartse randvoorwaarde voor het berekenen van de sedimentbalans voor de Westerschelde redelijk overeenstemt met de berekende residuele sedimenttransporten ter hoogte van de grens uit de berekening van de zand- en slibbalans voor de Zeeschelde. Op kortere termijn zien wel een variatie in de berekende zand- en slibbalansen ter hoogte van de grens. Er wordt dan ook geadviseerd de opwaartse randvoorwaarde voor het berekenen van de sedimentbalans voor de Westerschelde af te stemmen op de berekende waarde uit de zand- en slibbalans voor de Zeeschelde.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In navolging van eerdere berekeningen van de sedimentbalans in ruimte (Westerschelde (Schrijver, 2020)) en tijd (periode 2001-2011 (Vandenbruwaene *et al.*, 2017) en periode 2011-2016 (Plancke *et al.*, 2023)), werd de zand- en slibbalans voor de Zeeschelde en haar bijrivieren berekend voor de periode 2016-2019. Methodologisch is ervoor gekozen om deze balansen op te maken als massabalans waarbij er expliciet een onderscheid wordt gemaakt tussen de zand- en de slibfractie. Door deze optimalisaties wijkt de berekening af van eerdere berekeningen, maar wordt er maximaal rekening gehouden met de aspecten die relevant zijn op het vlak van sedimenttransport in de Zeeschelde.

Uit de resultaten blijkt het verschillend gedrag van beide types sediment. De zandbalans over de periode 2016-2019 toont een opwaarts gericht transport over de volledige Zeeschelde. Voor de eerdere zandbalansen van 2011-2016 en 2001-2016 was het zandtransport eveneens opwaarts gericht in de meest afwaartse macrocellen. Opwaarts is het zandtransport in 2001-2011 en 2011-2016 eerder afwaarts gericht, waarbij het punt waar het transport van afwaarts naar opwaarts omslaat steeds verder naar afwaarts verschuift. Verder blijkt dat de transporthoeveelheden wat betreft zand hoger worden in de meer afwaarts gelegen segmenten.

De slibbalans over de periode 2016-2019 toont een afwaarts gericht transport over de volledige Zeeschelde. Enkel aan de afwaartse rand is de Zeeschelde importerend, wat niet het geval was bij de eerdere balansen, die hier exporterend waren.

Tenslotte werd een validatie uitgevoerd van de opwaartse randvoorwaarde die door RWS aangenomen wordt bij het opmaken van de sedimentbalans van de Westerschelde. Voor de periode 2016-2019 blijkt het berekende sedimenttransport 11% lager te zijn aan de aanname. Voor de periode 2011-2016 bleek het berekende sedimenttransport ca. 24% hoger te zijn dan de aanname, terwijl dit voor de periode 2001-2011 38% lager was. Hoewel de aanname redelijk overeenstemt met de berekende transporten, wordt er geadviseerd de opwaartse randvoorwaarde voor het berekenen van de sedimentbalans voor de Westerschelde af te stemmen op de berekende waarde uit de zand- en slibbalans voor de Zeeschelde.

6.2 Aanbevelingen

Bij het berekenen van voorliggende zand- en slibbalans bleken er nog een aantal aspecten onzeker te zijn. Een eerste aandachtspunt is het transport van sediment doorheen de sluizen ter hoogte van de haven van Antwerpen. In voorliggende berekening werd uitgegaan van een gerapporteerde gemiddelde waarde, echter door een wijziging in het gebruik van de zeesluizen, alsook de Kieldrechtsluis die sinds 2016 operationeel is, verdient het de aanbeveling om met het oog op toekomstige berekening de sedimentuitwisseling tussen het Schelde-estuarium en de dokken via de sluizen beter in beeld te brengen.

Daarnaast werden in de huidige berekening geen rekening gehouden met de Sigmagebieden (GOG's en GGG's) (dit was ook het geval voor de periode 2011-2016) hoewel ook deze een mogelijks significante invloed hebben op de sedimentuitwisseling binnen het estuarium.

Een tweede onzekerheid die tijdens de berekening aan het licht kwam, is de variatie van de lithologie en de invloed ervan op de berekening van de getransporteerde sedimentmassa. Het verdient dan ook de aanbeveling na te gaan of de variatie in bodemsamenstelling verklaard kan worden door bijkomende aspecten te beschouwen, naar de indeling volgens ecotoopklasse. Ook de invloed van de sedimentsamenstelling op de porositeit (en alzo op de doorrekening van volume naar massa) dient verder onderzocht te worden, aangezien hiervoor nu een concept gehanteerd gebruikt werd dat niet gevalideerd werd voor de Zeeschelde. Uit recent onderzoek (Van Hooydonk, 2022) blijkt dat de resultaten voor sediment uit de Zeeschelde afwijken van de gebruikte vergelijkingen van Koltermann (1995). Gezien het belang van deze vergelijkingen voor de doorrekening van volume naar massa, is het aangewezen om dit concept verder te onderzoeken.

Tenslotte is het belangrijk te realiseren dat de berekening van de zand- en slibbalans een beeld geeft van de transporten op langere (in casu 3 jaar) tijdschalen, maar dat zich ook op korte tijdschalen belangrijke processen kunnen voordoen. Hierbij kan o.a. verwezen worden naar het specifieke transport tijdens was-events, springtij-doodtij variaties, of naar de (vooral slib) transport op seizoenale tijdschaal (e.g. lopend onderzoek om invloedsfactoren te bepalen en trachten te kwantificeren).

7 Referenties

- Beard, D.C.; Weyl, P.K.** (1973). Influence of Texture on Porosity and Permeability of Unconsolidated Sand. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 57(349–369). doi:10.1306/819A4272-16C5-11D7-8645000102C1865D
- Brackx, M.; Van De Moortel, I.; Vandenbruwaene, W.; Vereecken, H.; Plancke, Y.; Deschamps, M.; Mostaert, F.** (2019). Validatie fysische parameters: Verwerking EWI-campagnes periode 2012-2017. Versie 3.0. *WL Rapporten*, PA025_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=313923>
- Dams, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Slibbalans-Zeeschelde: deelrapport 3.Literatuurstudie. *WL Rapporten*, 00_029. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- de Jong, J.E.A.** (2000). Zandbalans Westerschelde en monding. periode 1955-1999. 51 pp.
- Engelund, F.; Hansen, E.** (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams: Copenhagen, Denmark. 63 pp. Available at: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:81101b08-04b5-4082-9121-861949c336c9?collection=research>
- Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen.** (2001). Samenvatting Waterhuishouding 2000. 28 pp.
- Haecon.** (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee-en Westerschelde. 90 pp.
- Heylen, A.** (2013). Dredging in the Port of Antwerp: challenges and best practice
- IMDC; Deltares; Svasek; Arcadis.** (2013). LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid: Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde - Basisrapport grootschalige ontwikkeling G-2. 81 pp.
- International Marine and Dredging; Vrije Universiteit Brussel. Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde.** (2010). Lithologische en geomorfologische kaart van de Beneden-Zeeschelde. Analyserapport: opmaak en interpretatie. Versie 3.0. Vlaamse Overheid. Afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen
- Kozeny, M.** (1927). Über kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzber. Akad. Wiss. Wien, Math-naturw* 136: Abt. II a, P. 277
- Maris, T.; Bruens, A.; Duren, L. van; Vroom, J.; Holzhauer, H.; Jonge, M. De; Van Damme, S.; Nolte, A.; Kuijper, K.; Taal, M.; Jeuken, C.; Kromkamp, J.; Van Wesenbeeck, B.; Ryckegem, G. Van; Bergh, E. Van den; Wijnhoven, S.; Meire, P.** (2014). Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium - Update 2014. 356 pp.
- McLaren, P.** (1993). Patterns of sediment transport in the western portion of the Westerschelde. 19 pp.
- Meire, P.; Maris, T.** (2008). MONEOS: geïntegreerde monitoring van het Schelde-estuarium. 173 pp.
- Meire, P.; Starink, M.; Hoffmann, M.** (1997). Integratie van ecologie en waterbouwkunde in de Zeeschelde: aanleiding tot en situering van het Onderzoek Milieueffecten Sigmaplan (OMES). *Tijdschrift Water* (95): 147–165
- Nederbragt, G.J.; Liek, G.-J.** (2004). Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding
- Plancke, Y.; Vos, G.; Meire, D.** (2023). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Deelrapport 4 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2011-2016. 40 pp.
- Schrijver, M.** (2020). De Balans Opgemaakt - De ontwikkelingen in de Westerschelde tot 2019 gezien vanuit de sedimentbalans. 92 pp.
- Van Hoestenbergh, T.; Ferket, B.; De Boeck, K.; Vanlierde, E.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2014). Slibbalans Zeeschelde: deelrapport 2. Sediment load for the river Scheldt and its main tributaries (1972 - 2009). *WL Rapporten*, 00_029. Waterbouwkundig Laboratorium/Antea Group: Antwerpen
- Van Ryckegem, G.; Van Braeckel, A.; Elsen, R.; Speybroeck, J.; Vandevoorde, B.; Mertens, W.; Breine, J.;**

Spanoghe, G.; Buerms, D.; De Beukelaer, J.; De Regge, N.; Hessel, K.; Soors, J.; Terrie, T.; Van Lierop, F.; Van den Bergh, E. (2017). MONEOS – Geïntegreerd datarapport INBO: Toestand Zeeschelde 2016: monitoringsoverzicht en 1ste lijnsrapportage Geomorfologie, diversiteit Habitats en diversiteit Soorten. 215 pp.

Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Integraal plan Boven-Zeeschelde: deelrapport 8. Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme. 42 pp.

Vandenbruwaene, W.; van den Berg, M.; Van De Moortel, I.; Plancke, Y.; Vereecken, H.; Deschamps, M. (2022). Fluviale sedimentaanvoer richting Schelde estuarium: inschatting sedimentaanvoer op basis van APS staalname en turbiditeitsmetingen. Versie 3.0. *WL Rapporten*, PA025_16. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=352843>

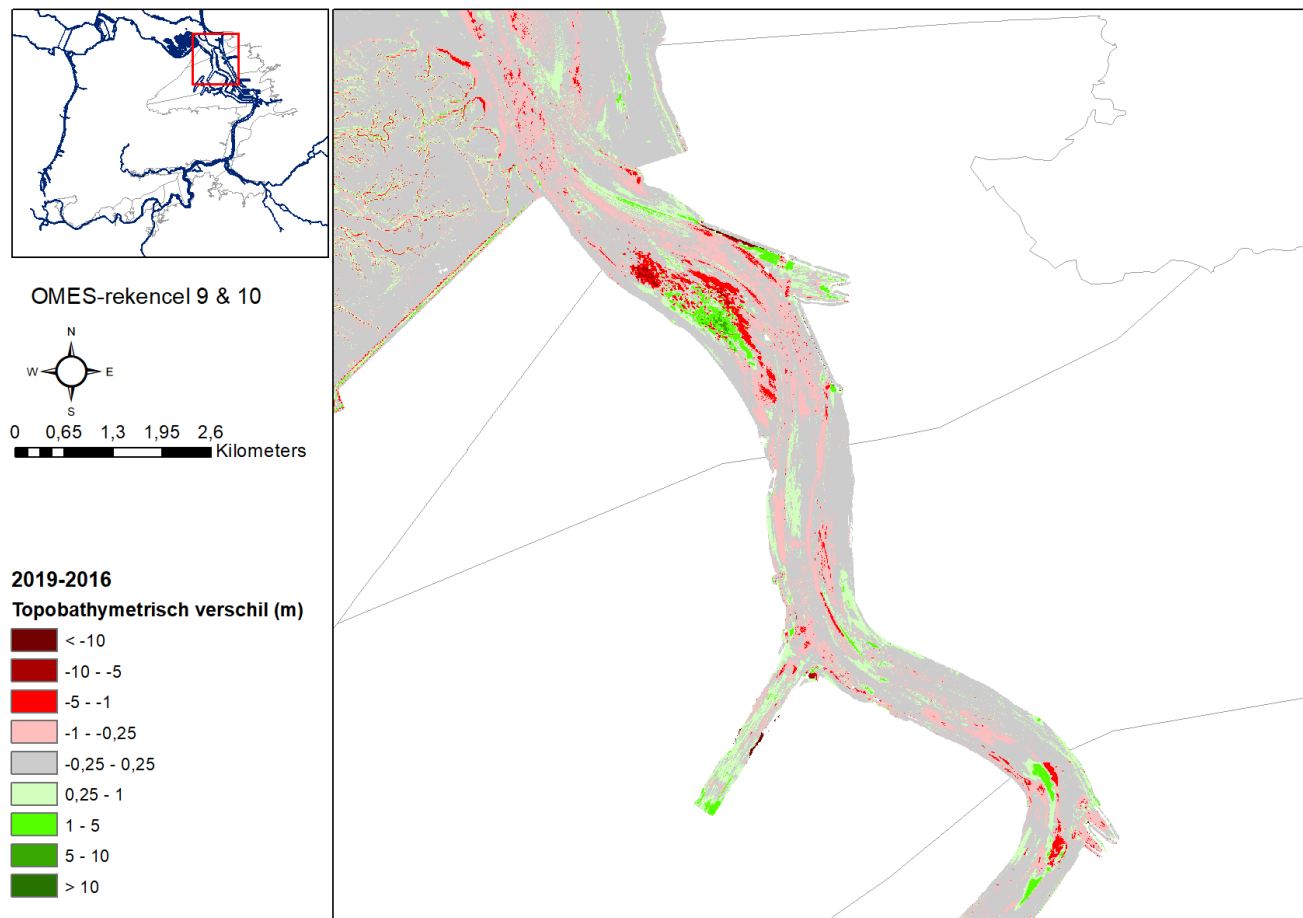
Vos, G.; Bastiaensen, E.; De Bruyn, L.; De Schutter, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2011). Lithologische kaart Beneden Zeeschelde: resultaten korrelanalyse sedimentstalen. *WL Rapporten*, 736_56. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vos, G.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2013). Habitatmapping Zeeschelde: deelrapport 3. Relaties abiotiek. *WL Rapporten*, 00_028. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

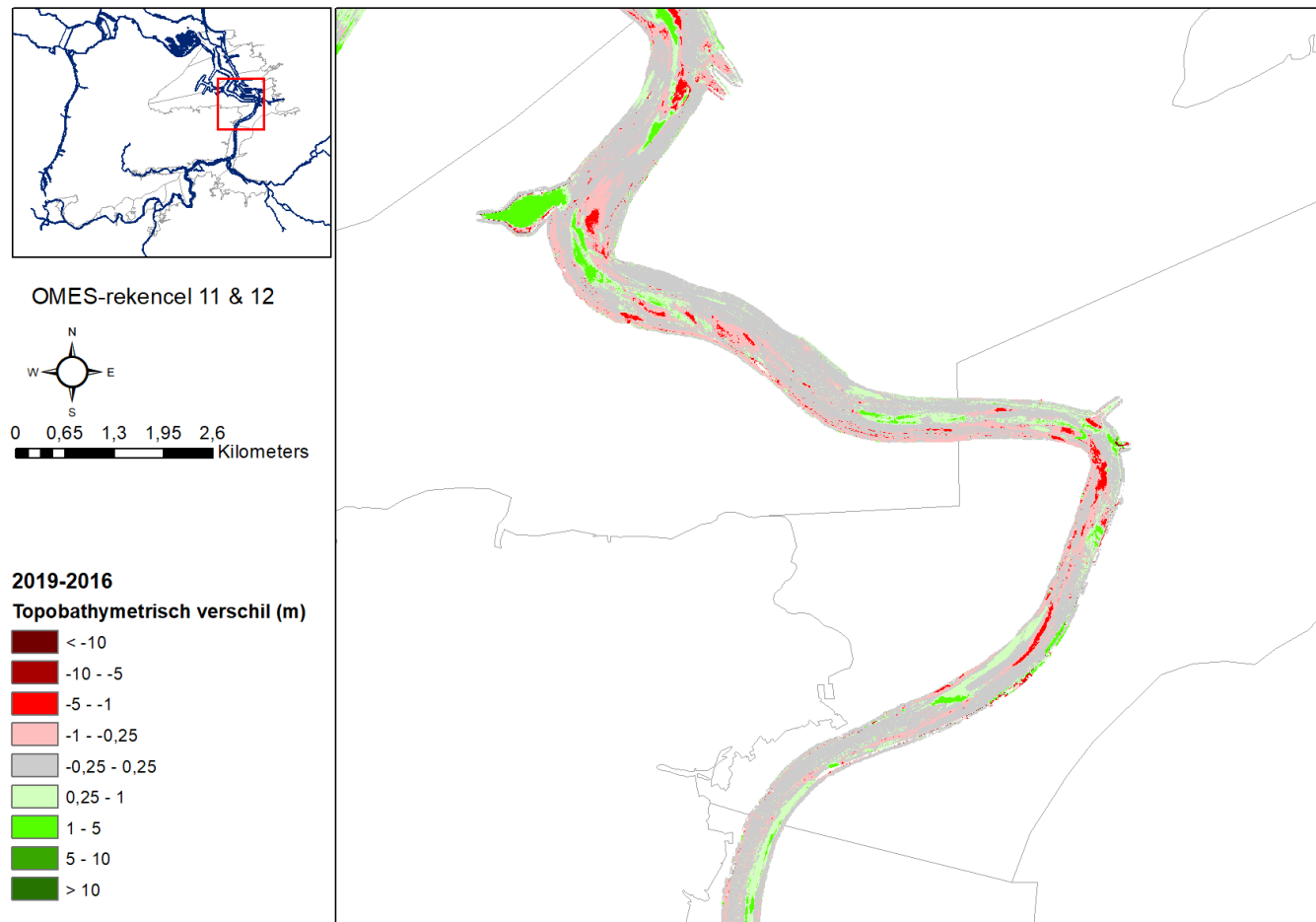
Vos, G.; Van De Moortel, I.; Meire, D.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2019). Validatie fysische parameters: optimalisatie methodologie voor het bepalen van sedimentaanvoer naar het Schelde-estuarium. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 12_076_13. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://www.vliz.be/nl/open-marien-archief?module=ref&refid=305582>

Wang, C.; Temmerman, S.; Vanlede, J.; Vandenbruwaene, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Mud balance Sea Scheldt: subreport 6 - Historical evolution (1930-2011) of mud deposition/erosion in the intertidal areas of the Scheldt estuary. *WL Rapporten*, 00_029. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

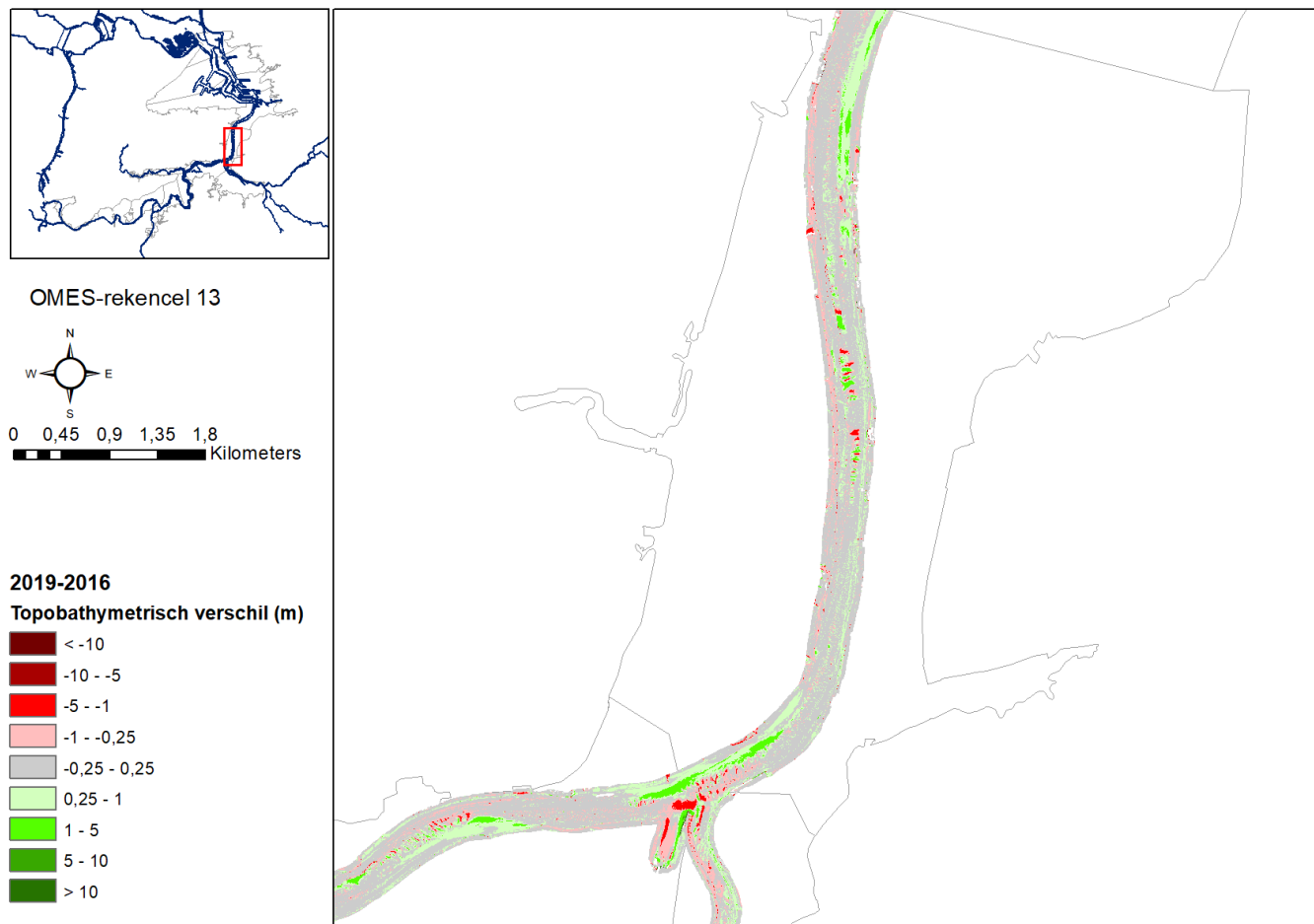
8 Bijlage 1 – Verschilkaarten



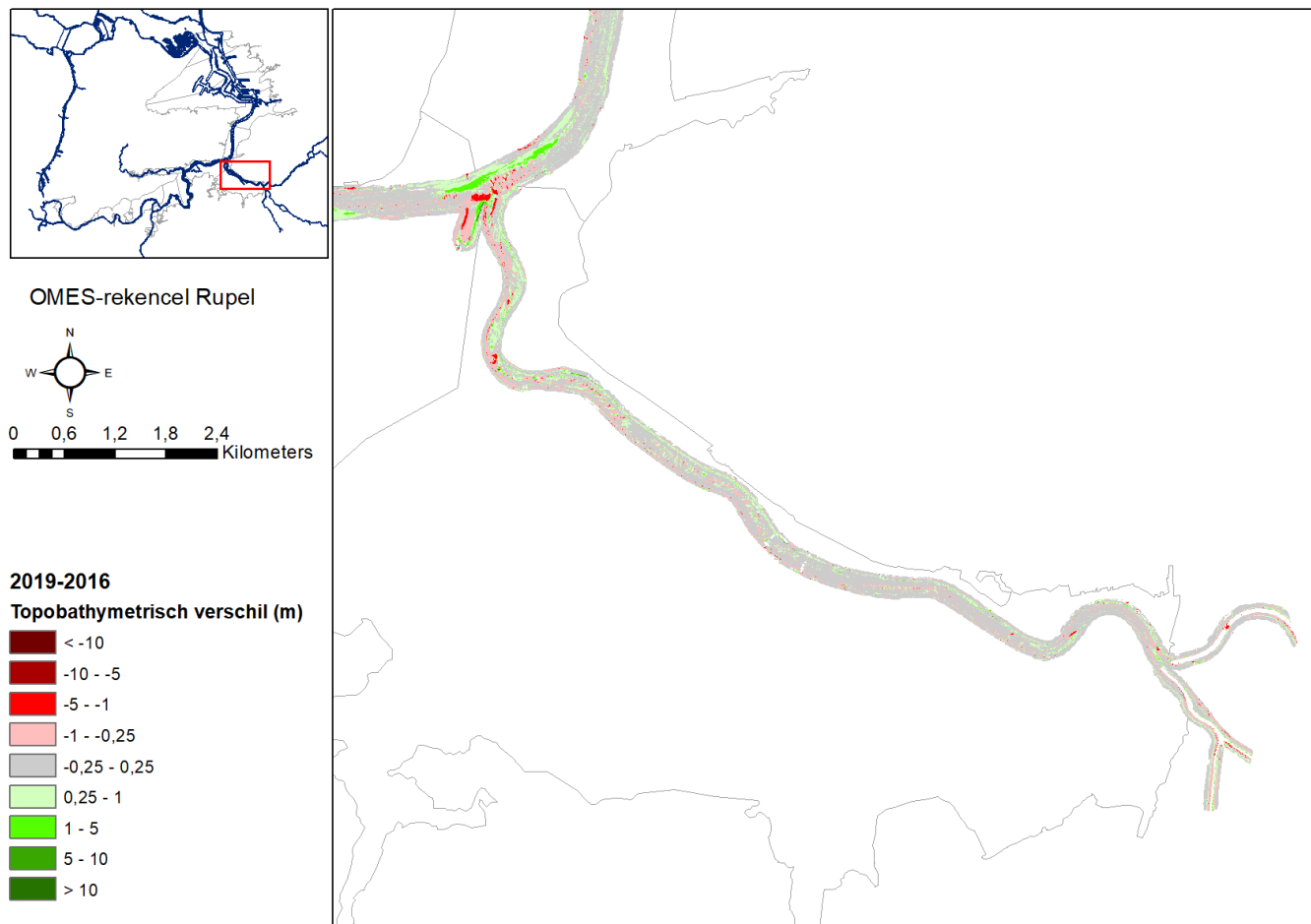
Figuur 23 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 9 en 10



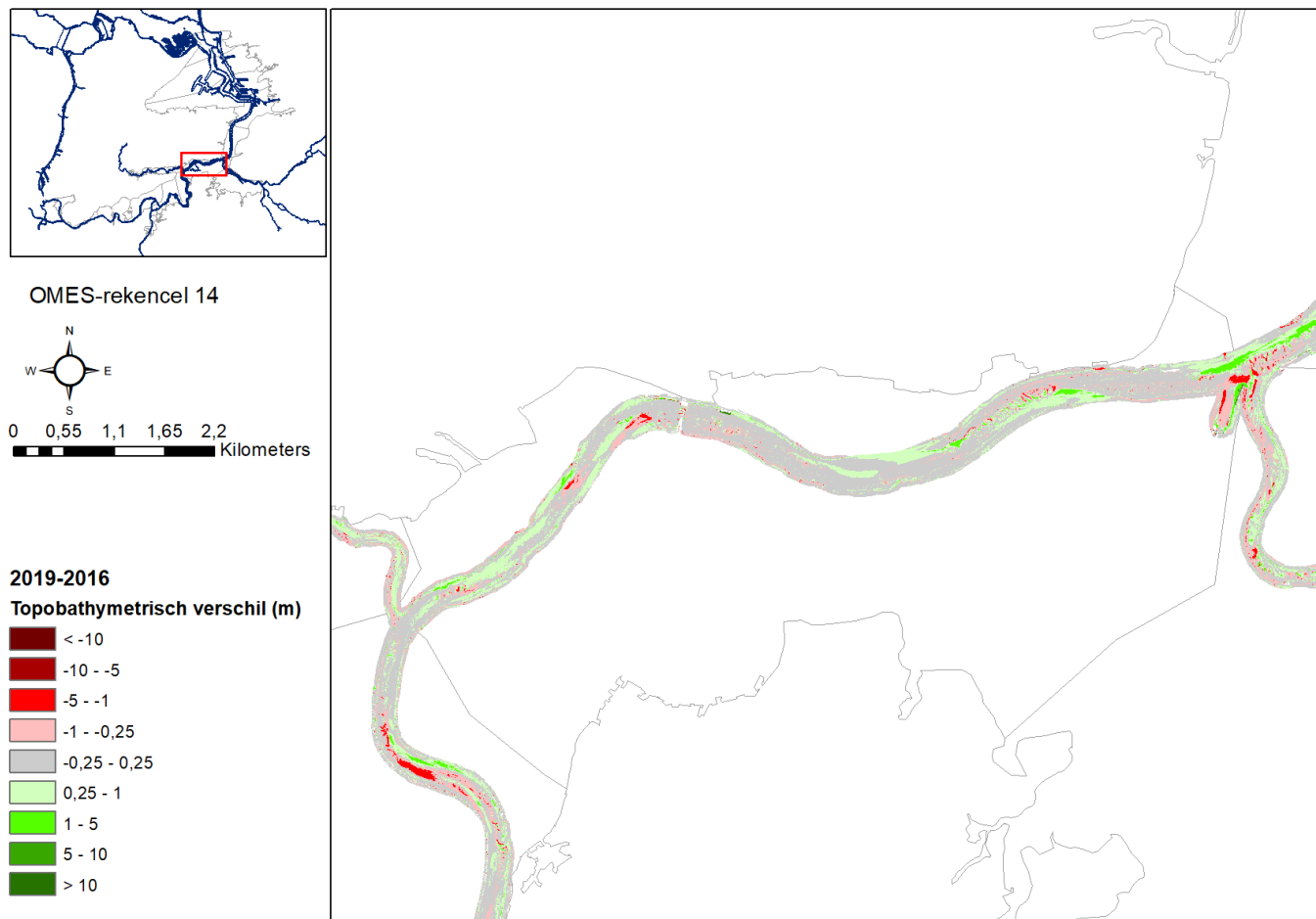
Figuur 24 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekenel 11 en 12



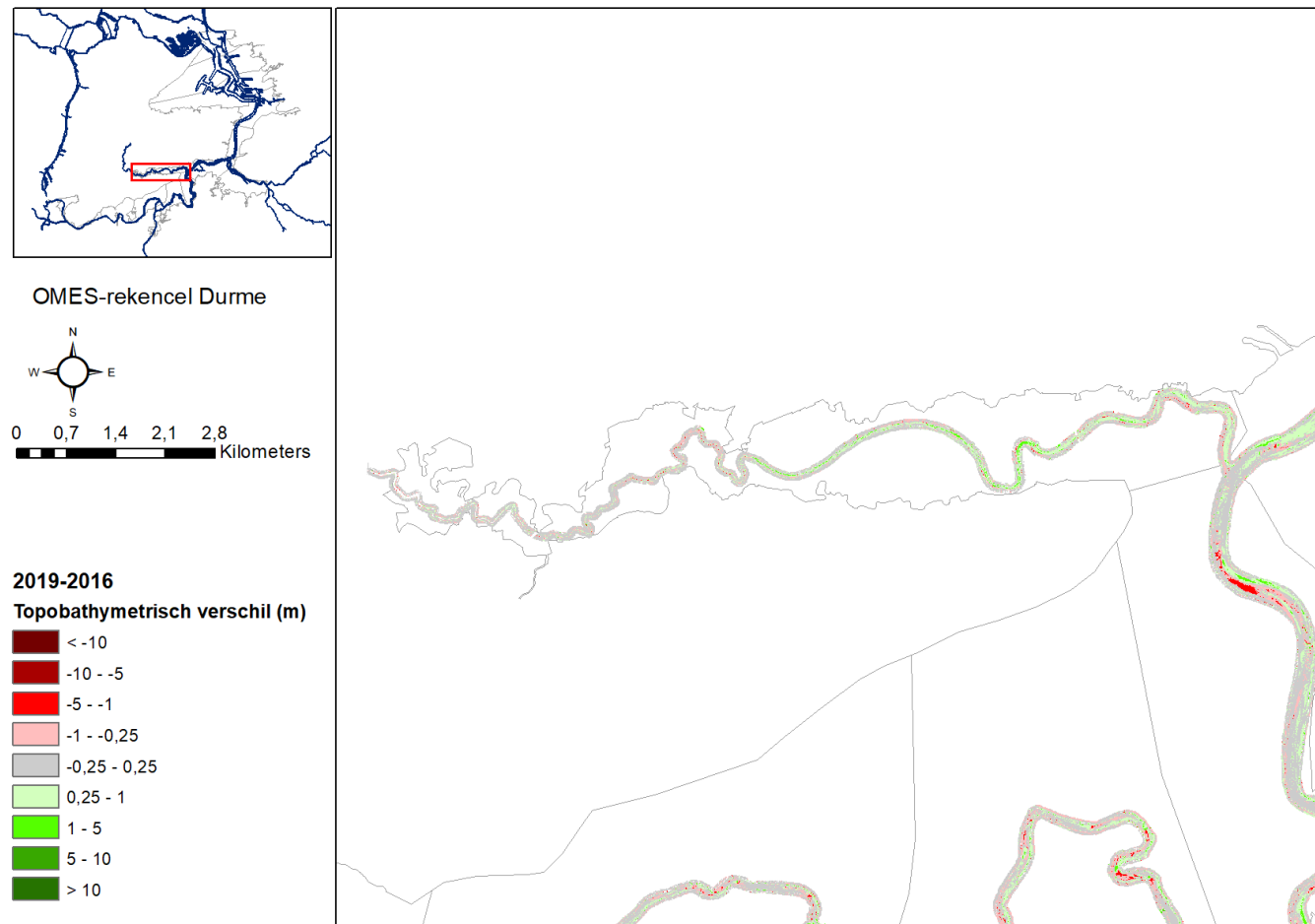
Figuur 25 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 13



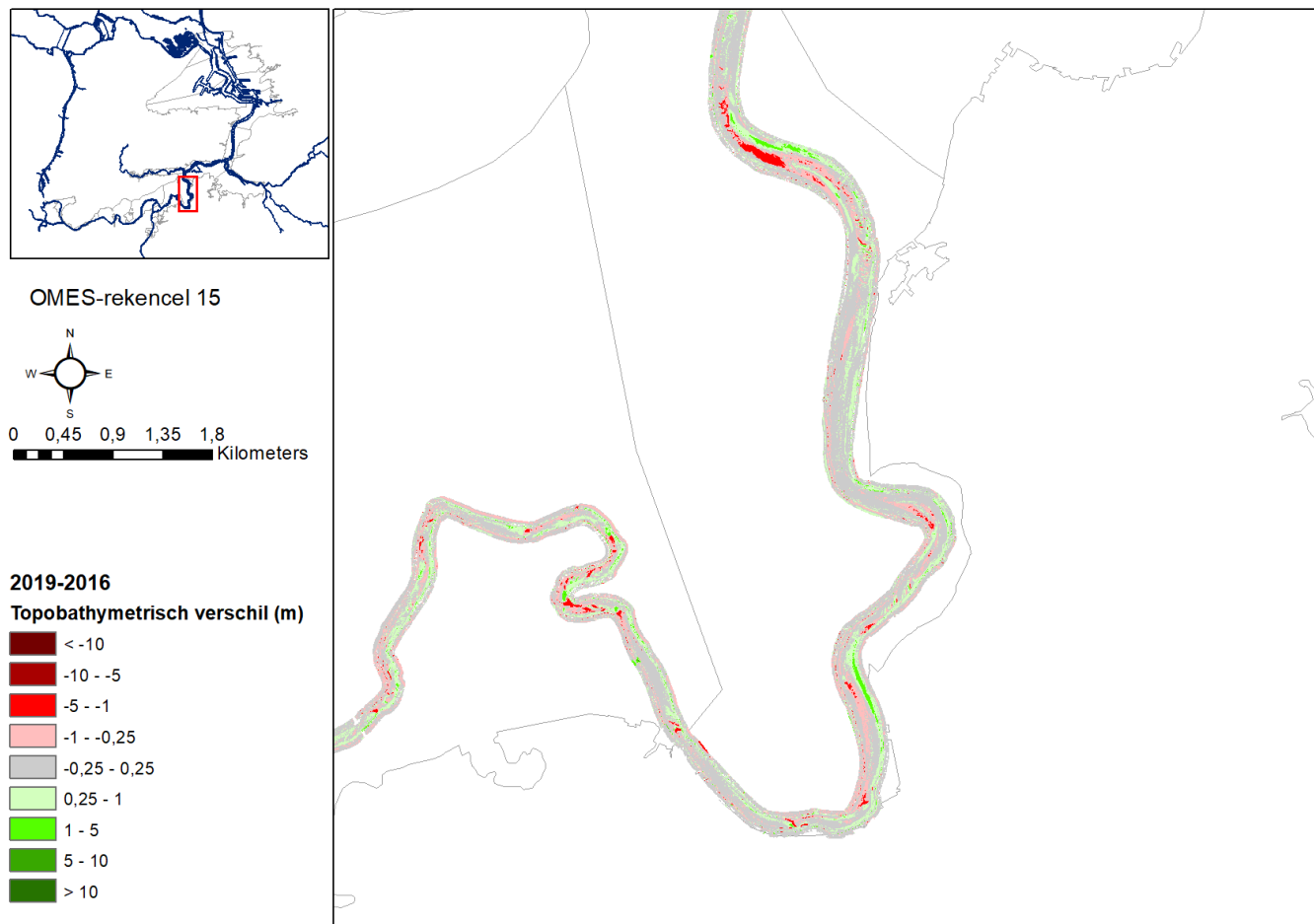
Figuur 26 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel Rupel



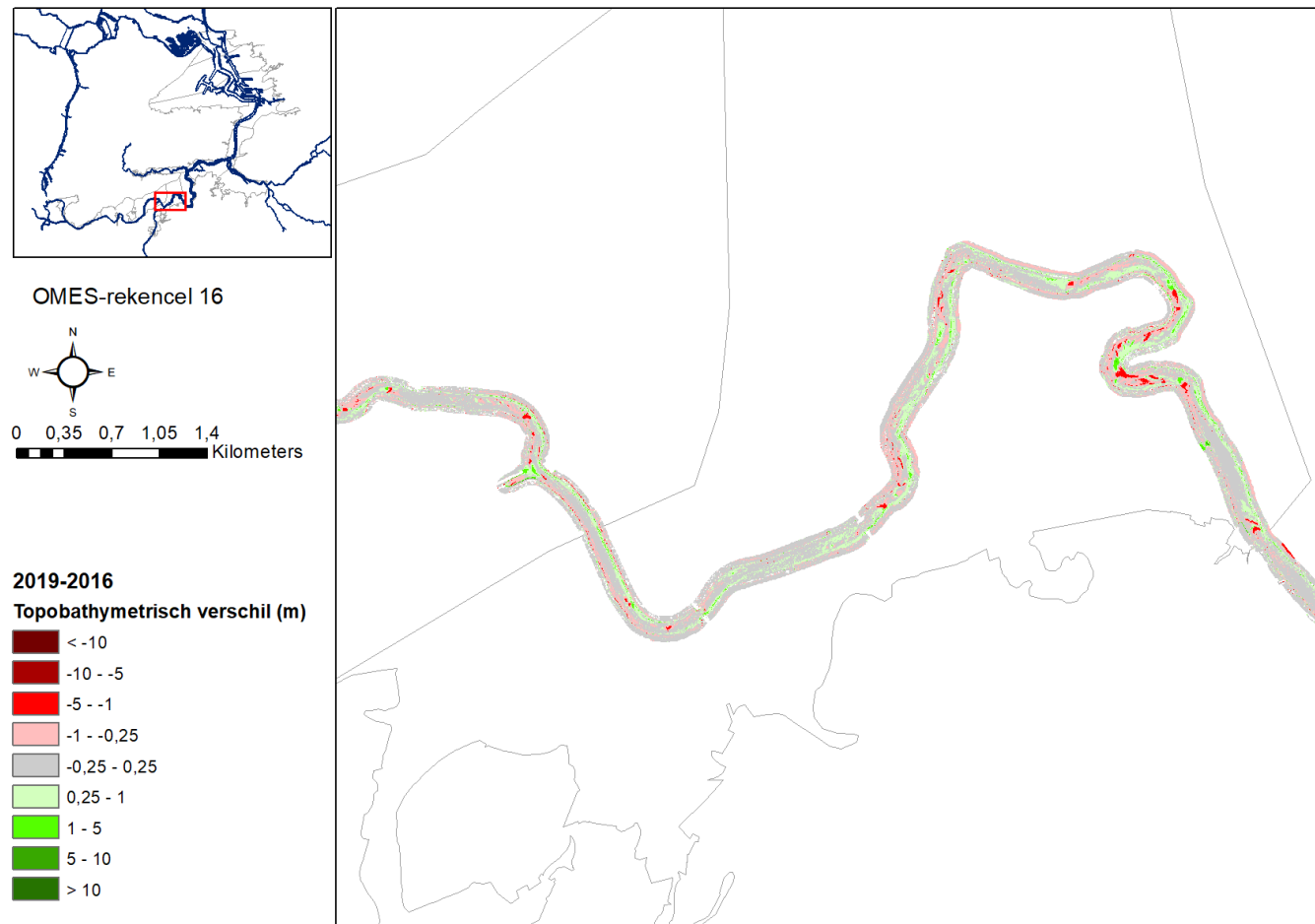
Figuur 27 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 14



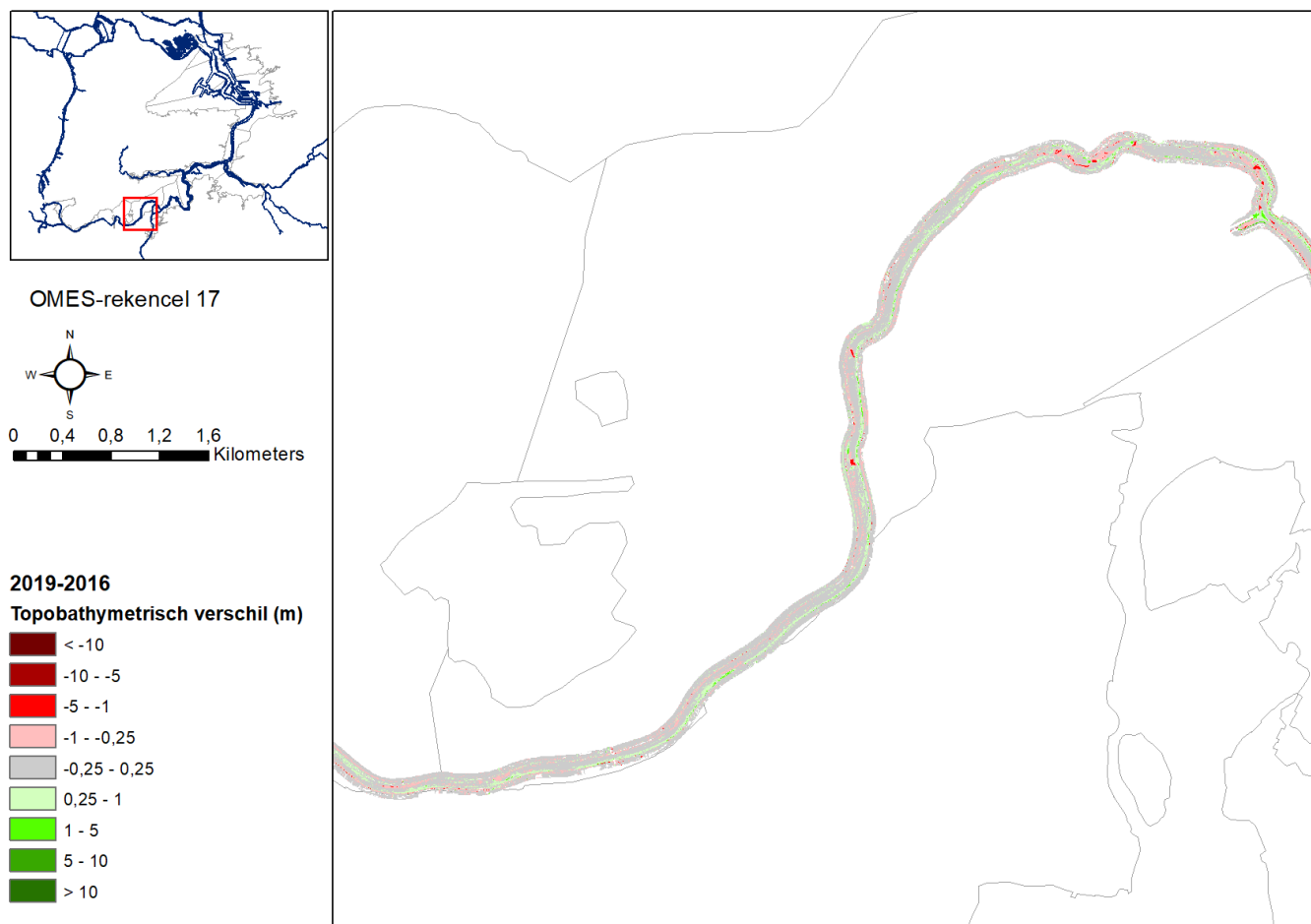
Figuur 28 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel Durme



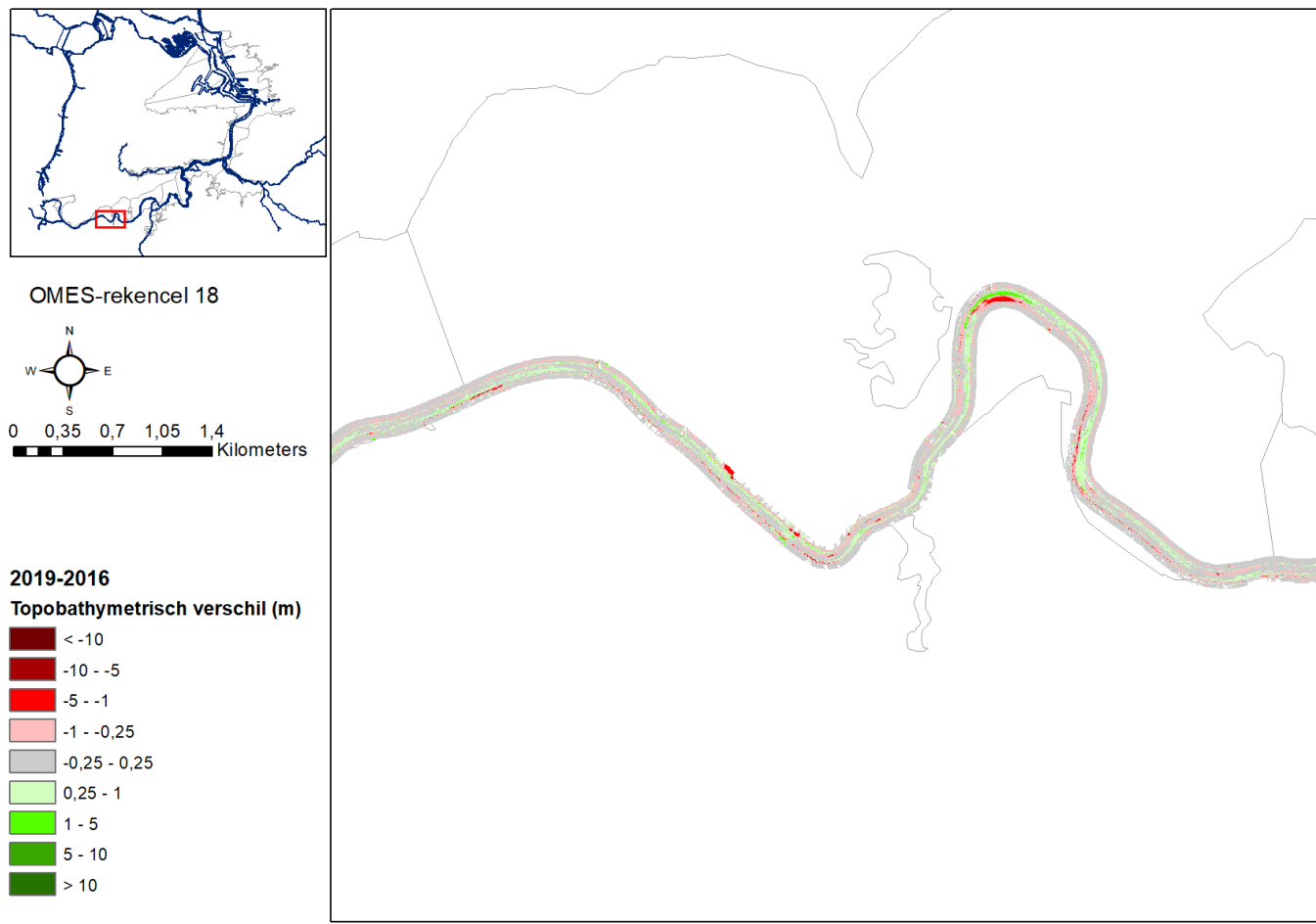
Figuur 29 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekenel 15



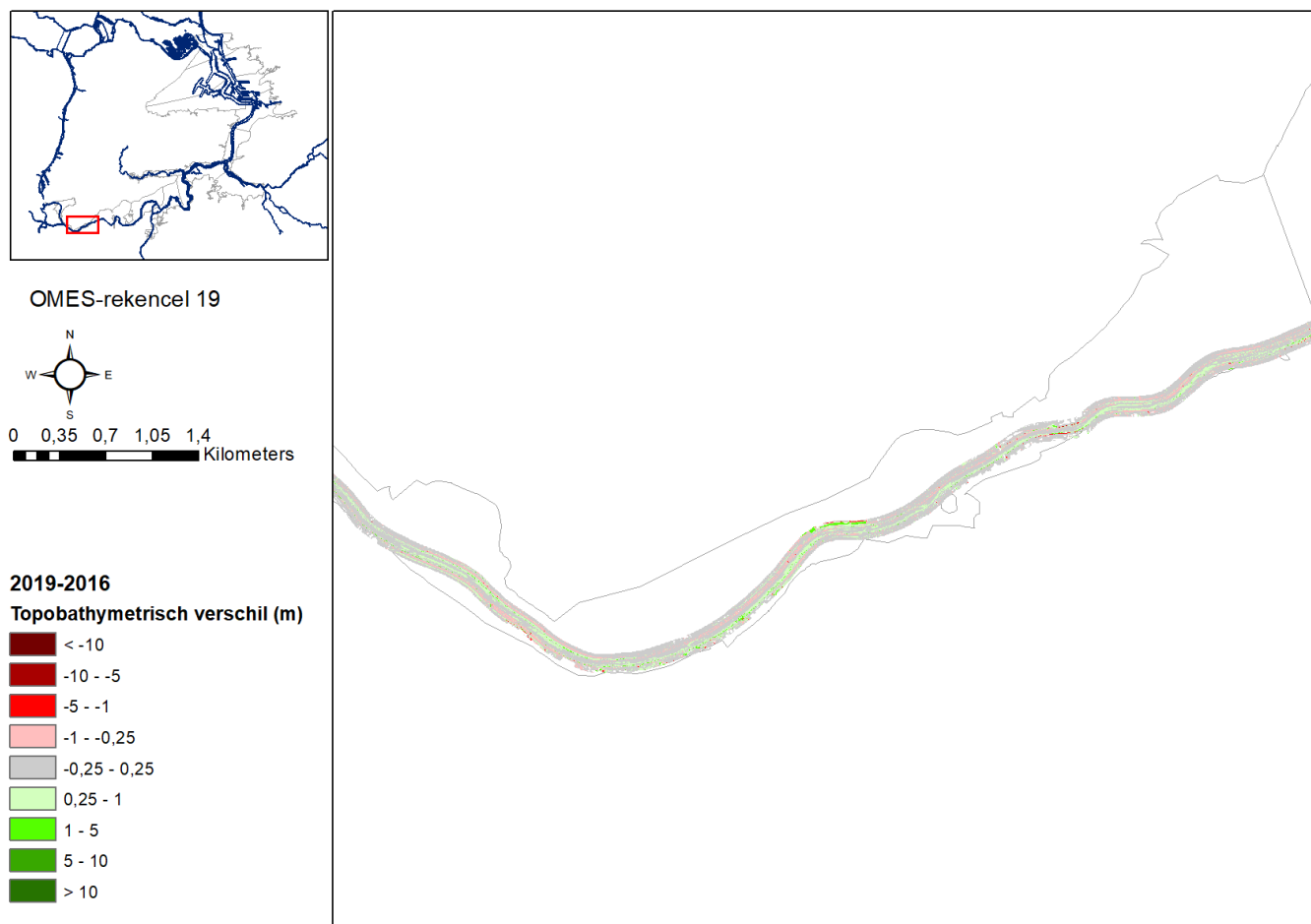
Figuur 30 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekenel 16



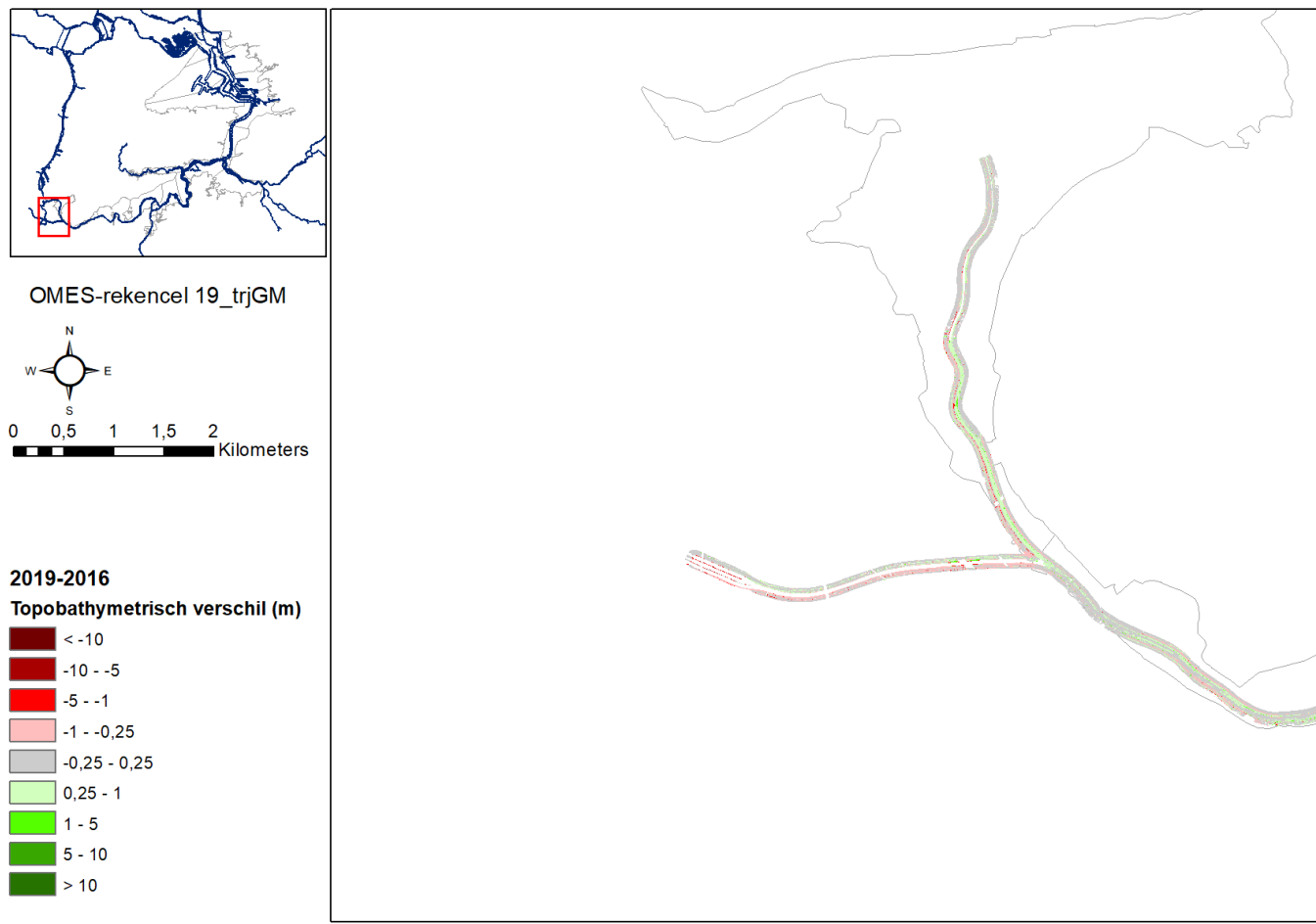
Figuur 31 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 17



Figuur 32 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekenel 18

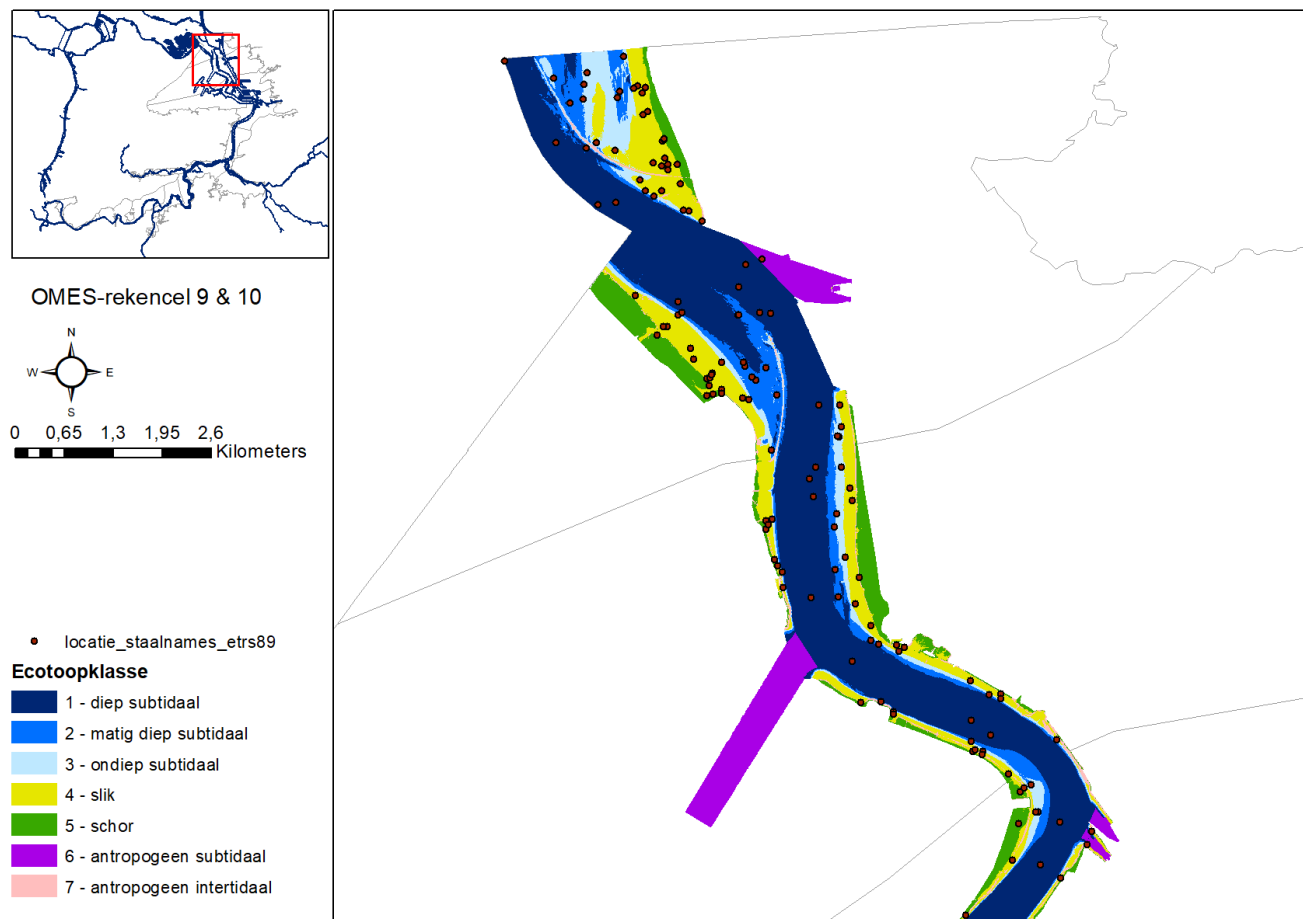


Figuur 33 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekencel 19

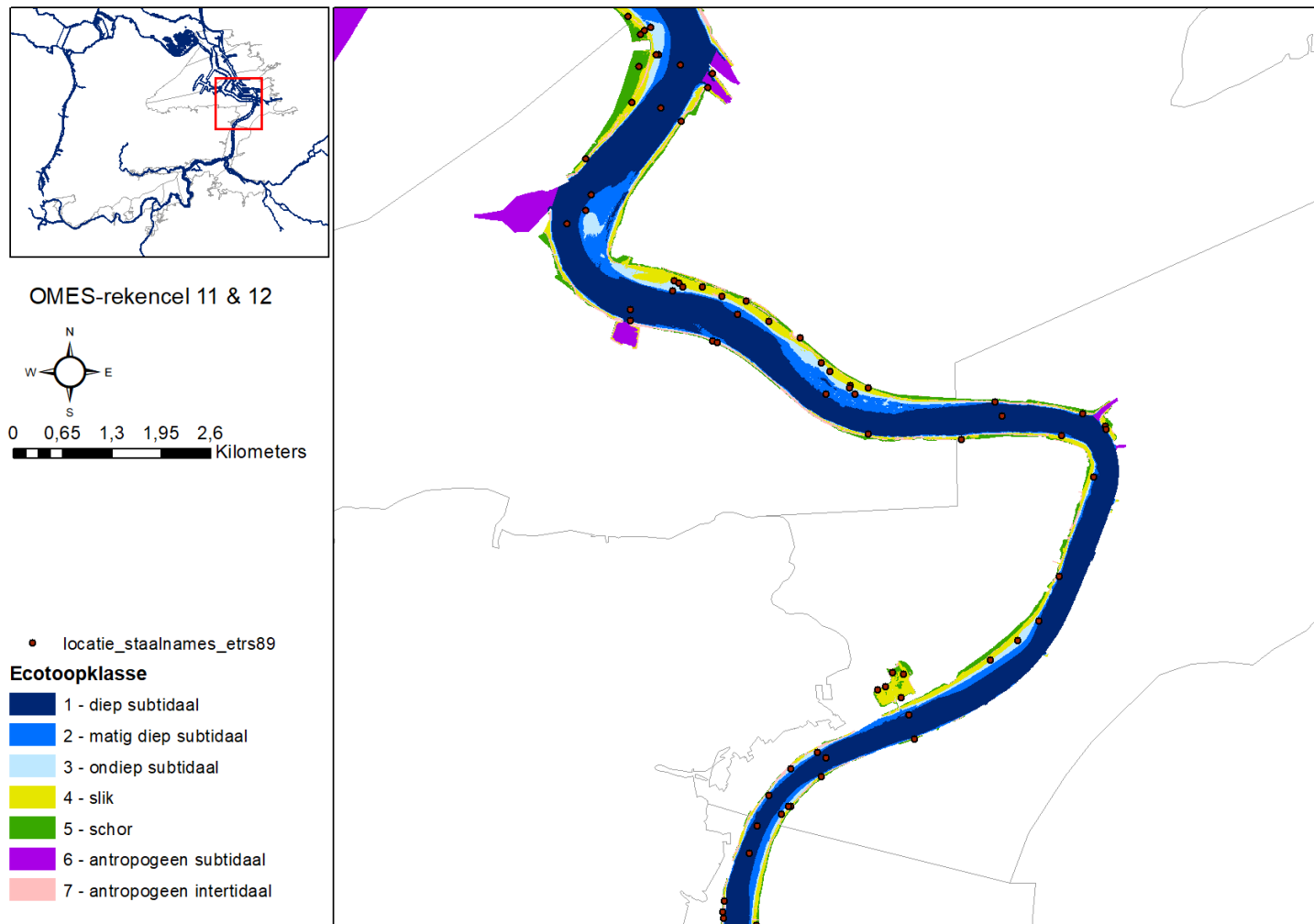


Figuur 34 – Verschilkaart 2016-2019 voor rekenel 19 traject Gentbrugge-Melle

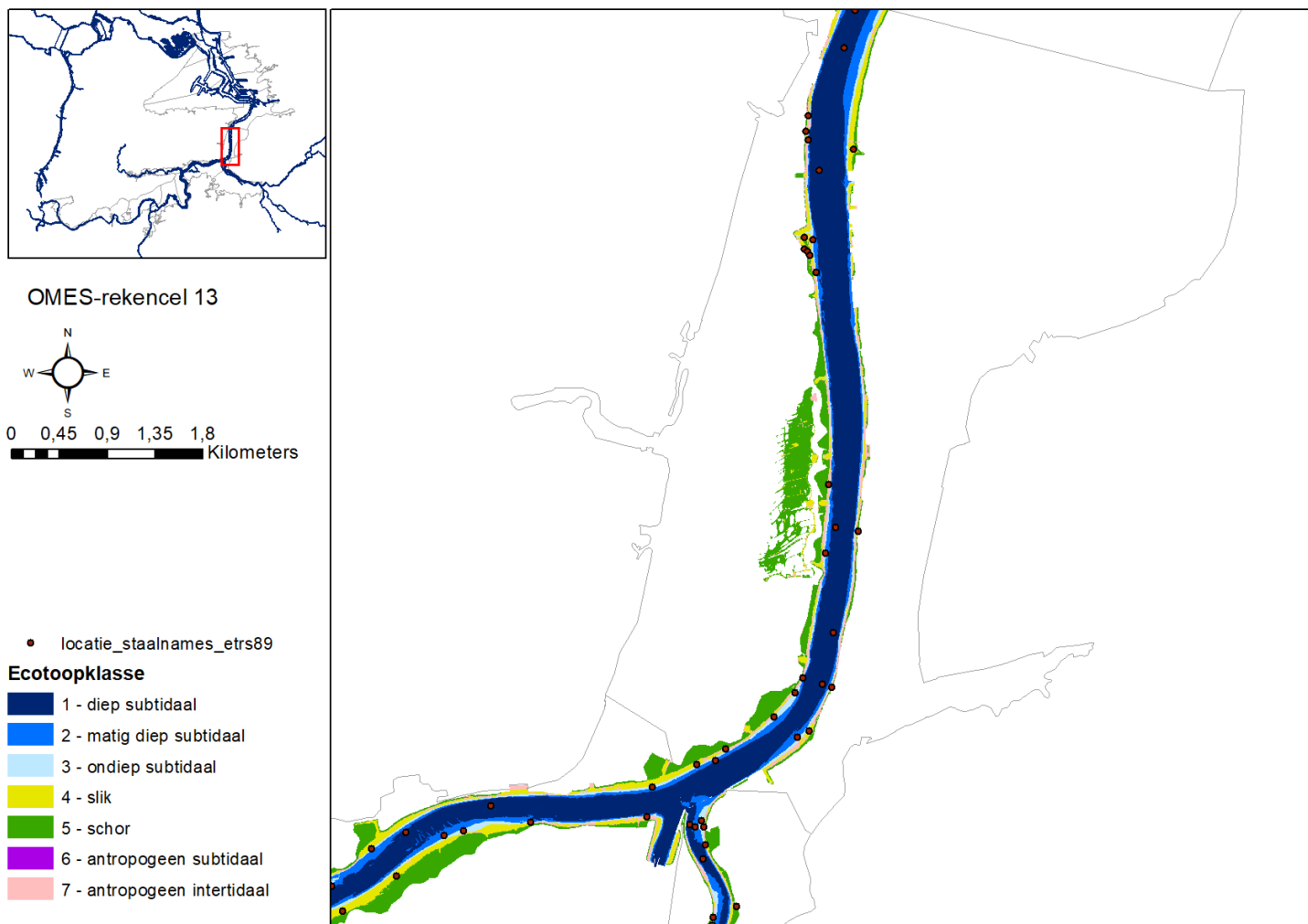
9 Bijlage 2 – Locatie staalnamepunten



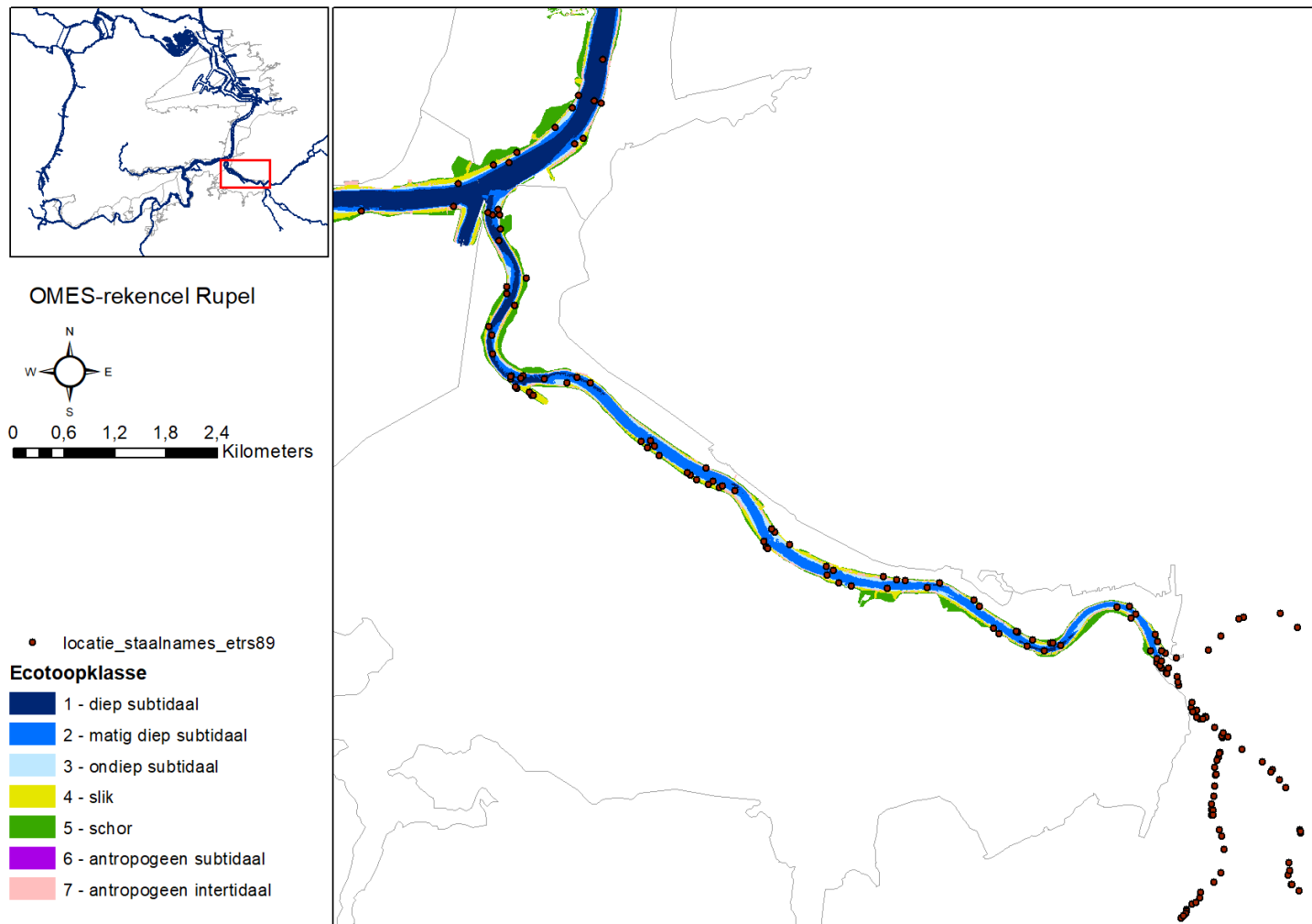
Figuur 35 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 9 en 10



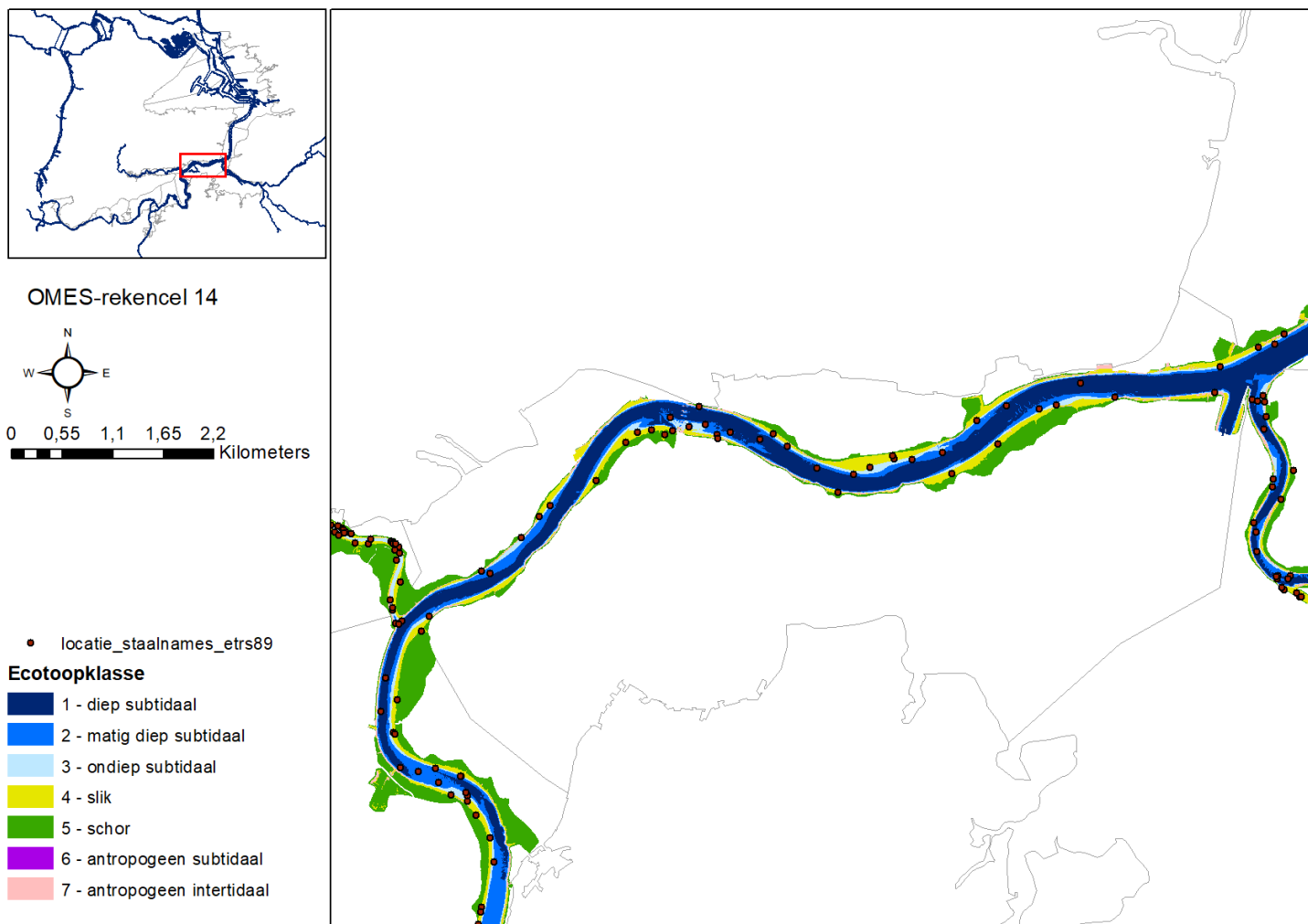
Figuur 36 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 11 en 12



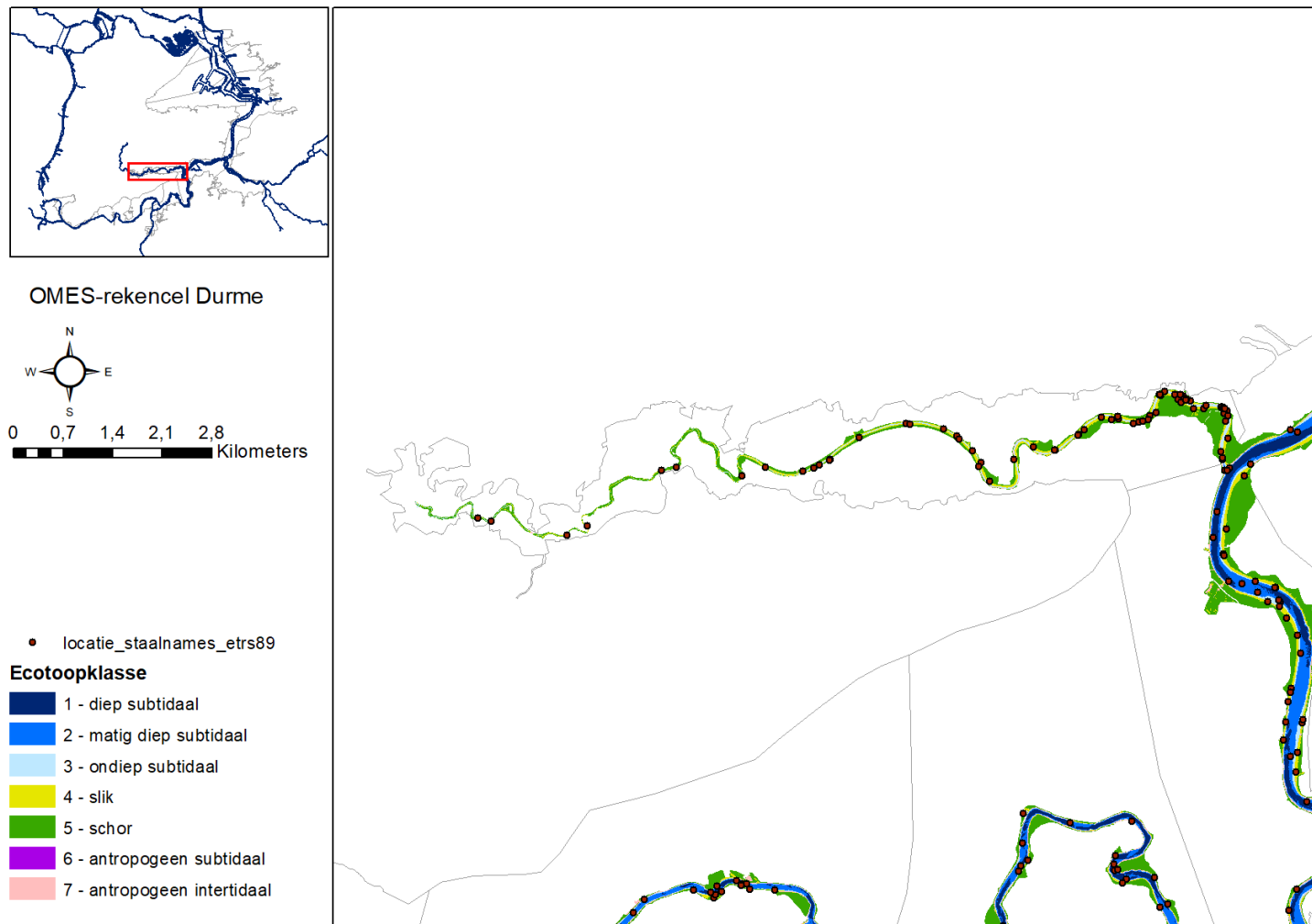
Figuur 37 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 13



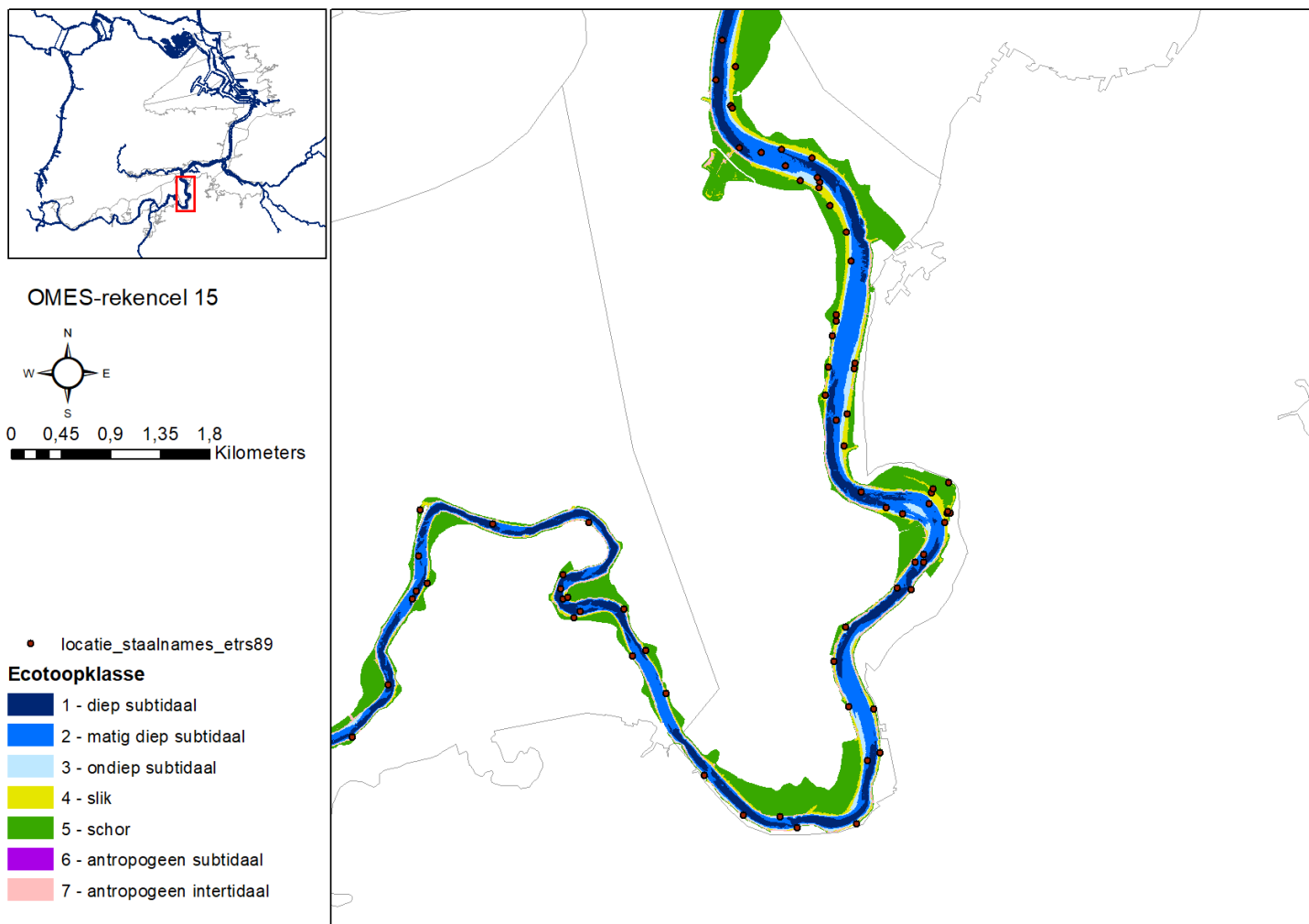
Figuur 38 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Rupel



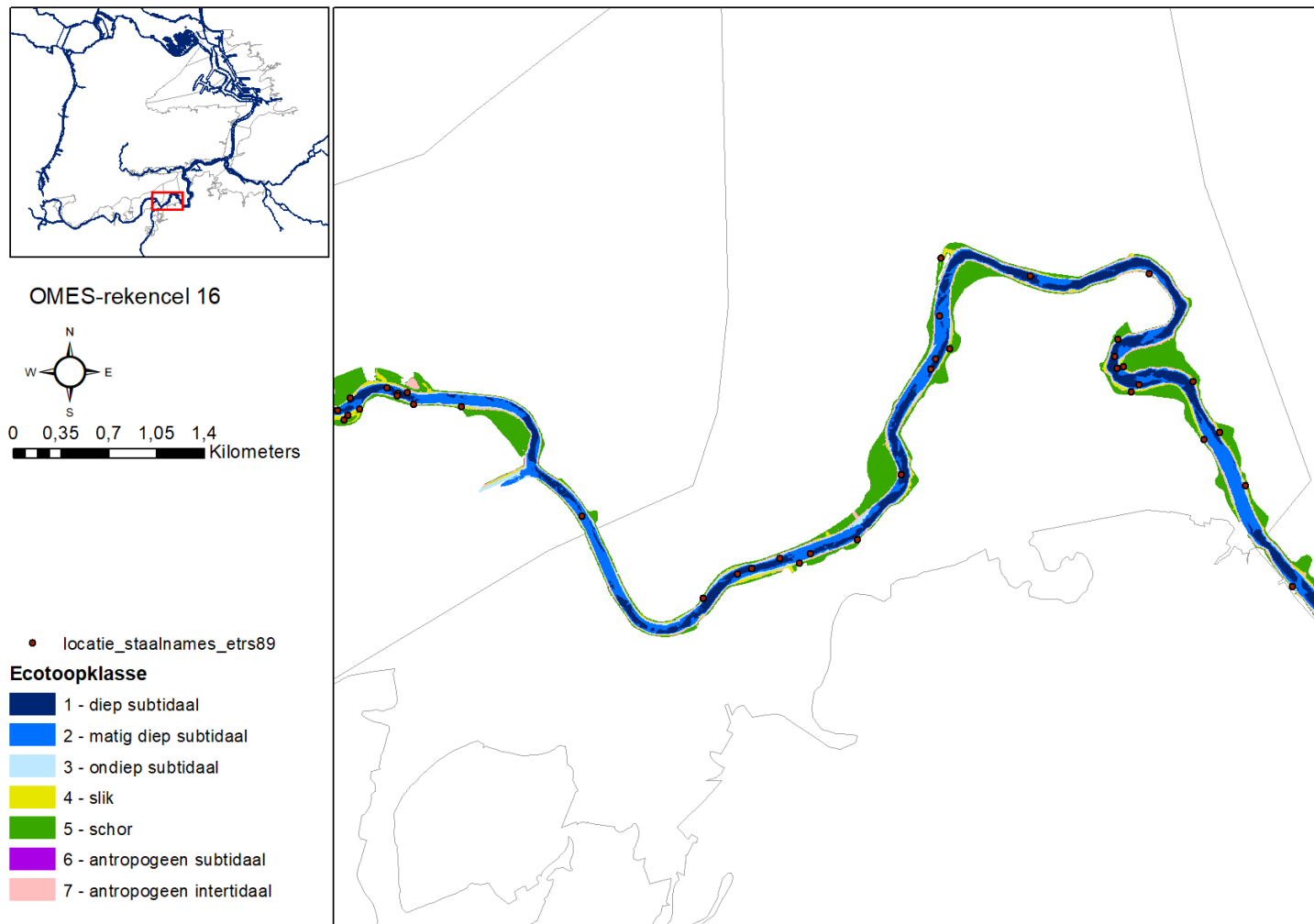
Figuur 39 – Locatie staalnamepunten voor rekenel 14



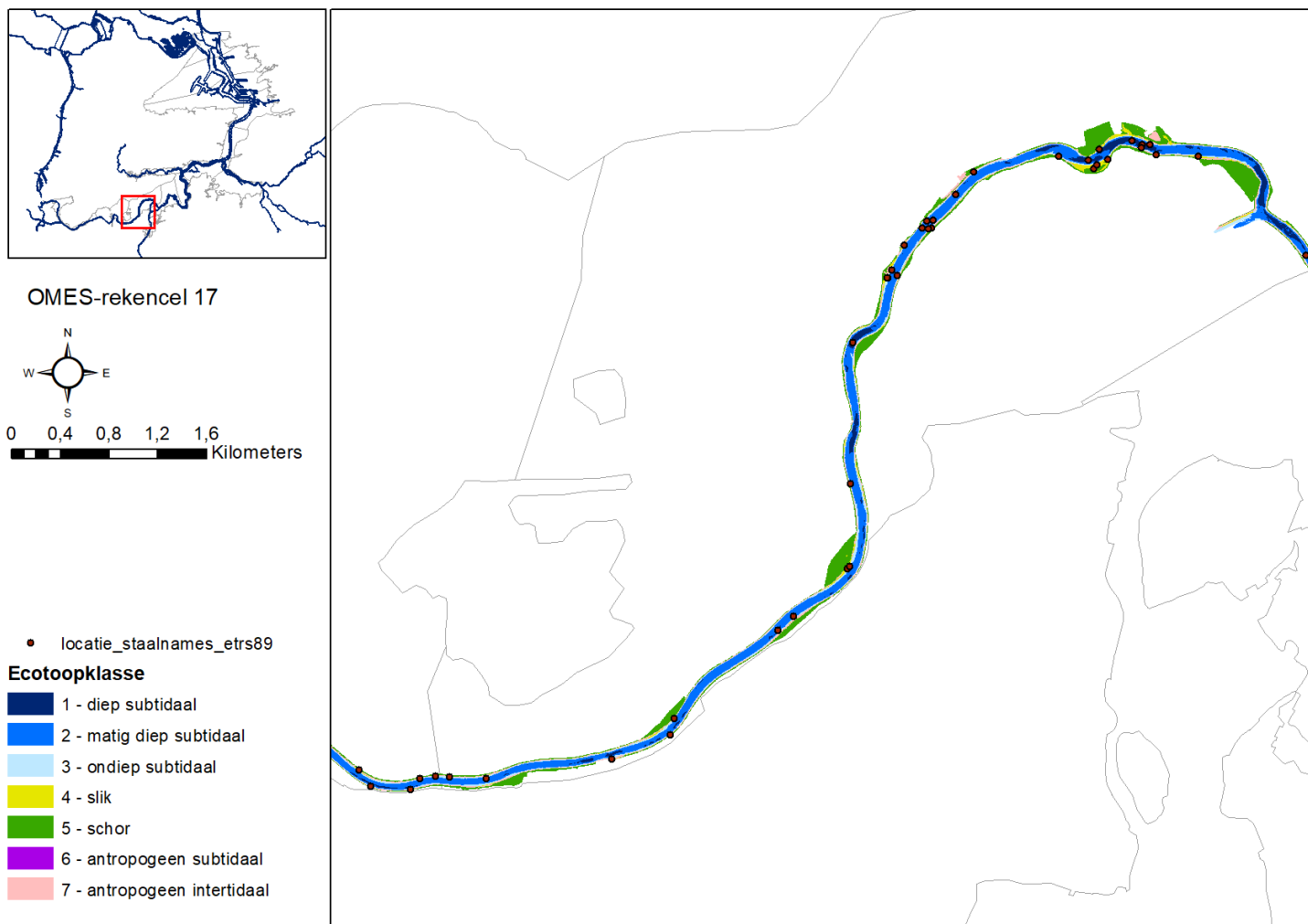
Figuur 40 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Durme



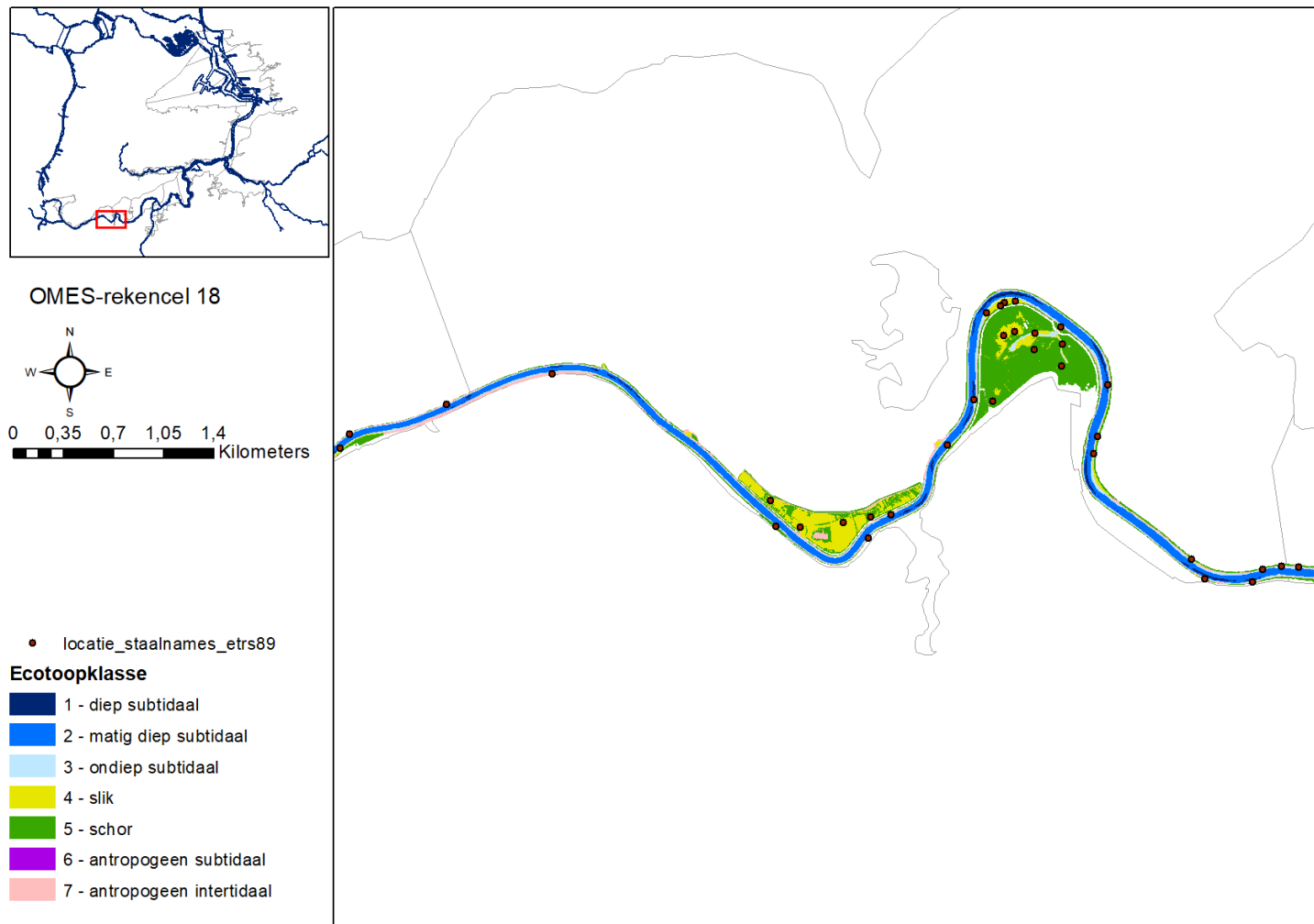
Figuur 41 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 15



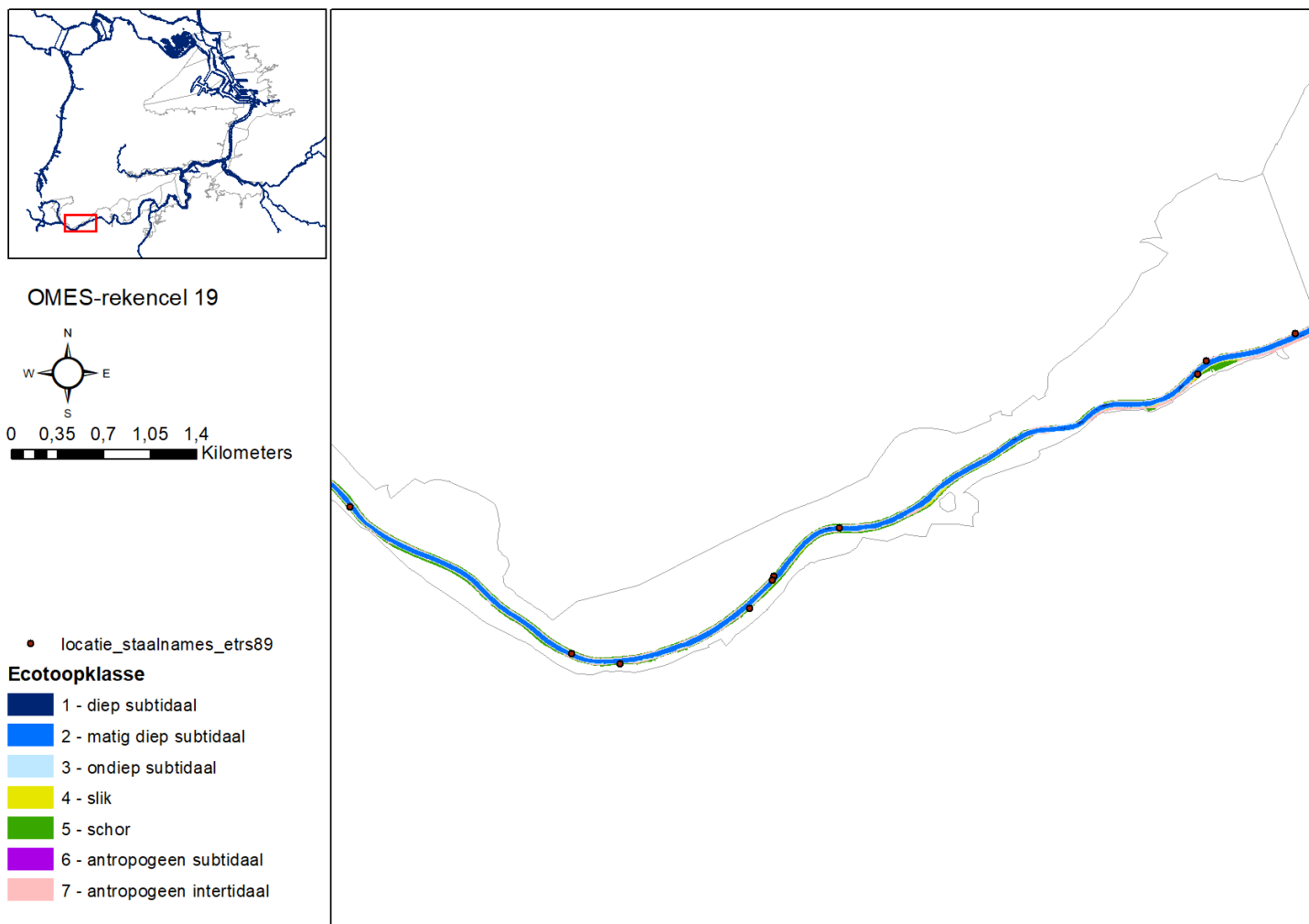
Figuur 42 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 16



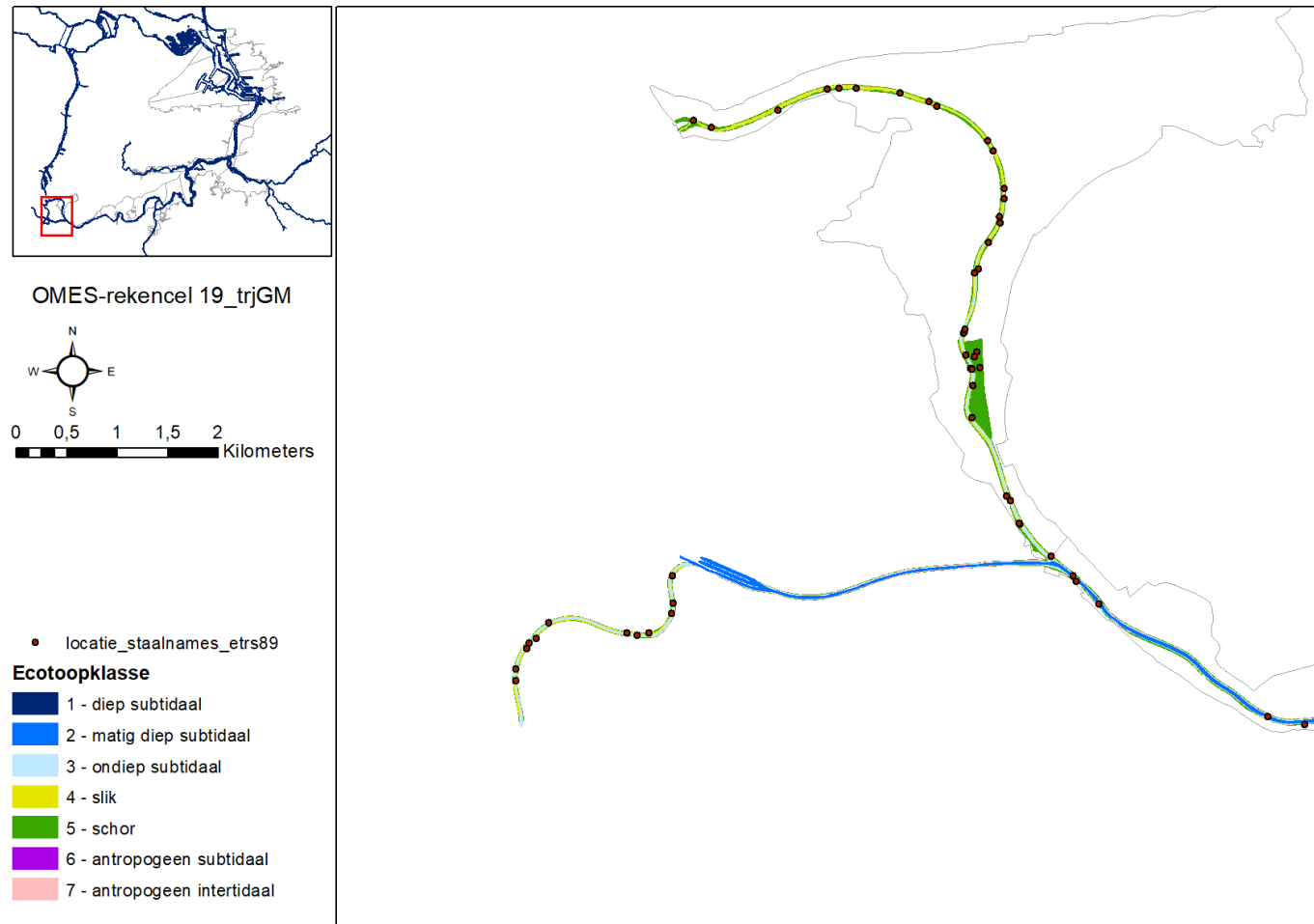
Figuur 43 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 17



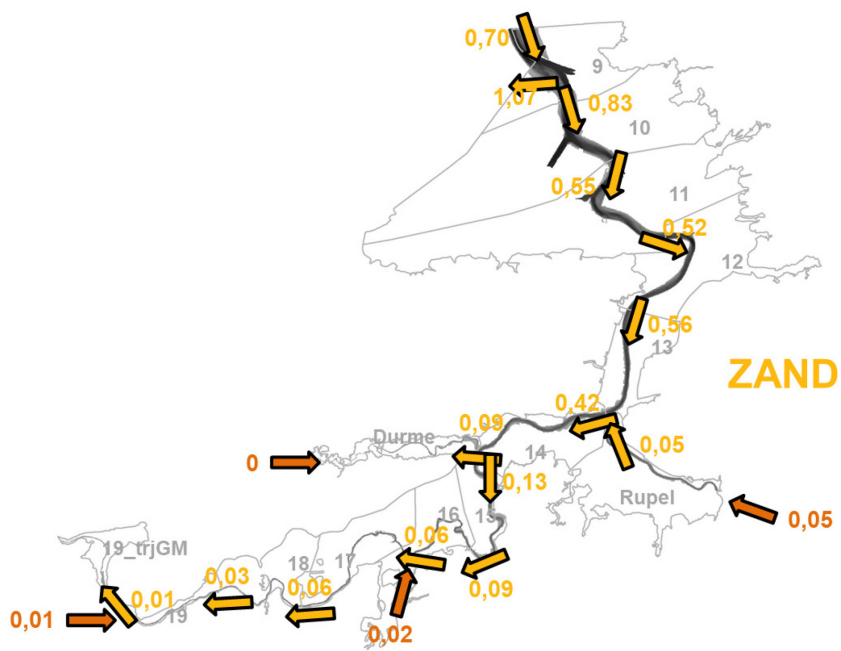
Figuur 44 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 18



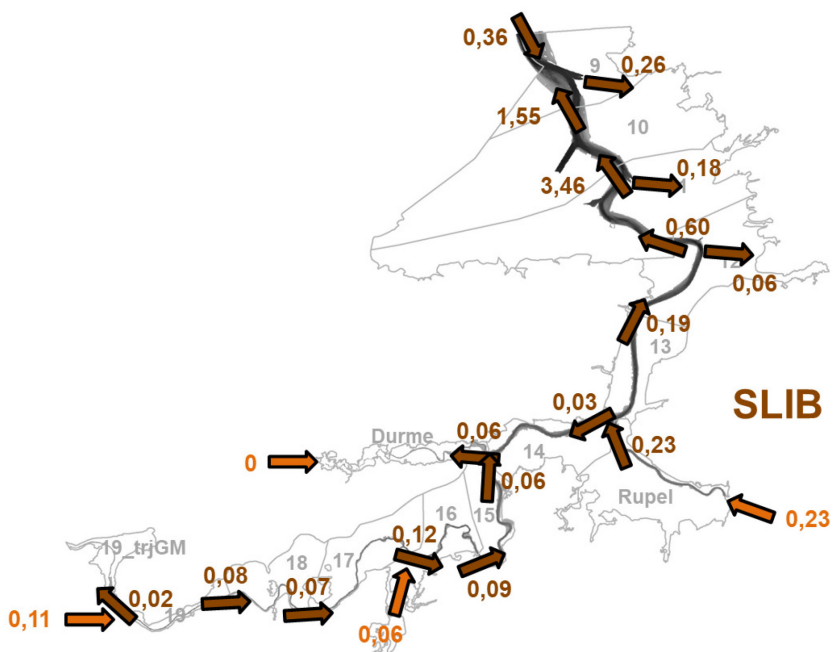
Figuur 45 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19



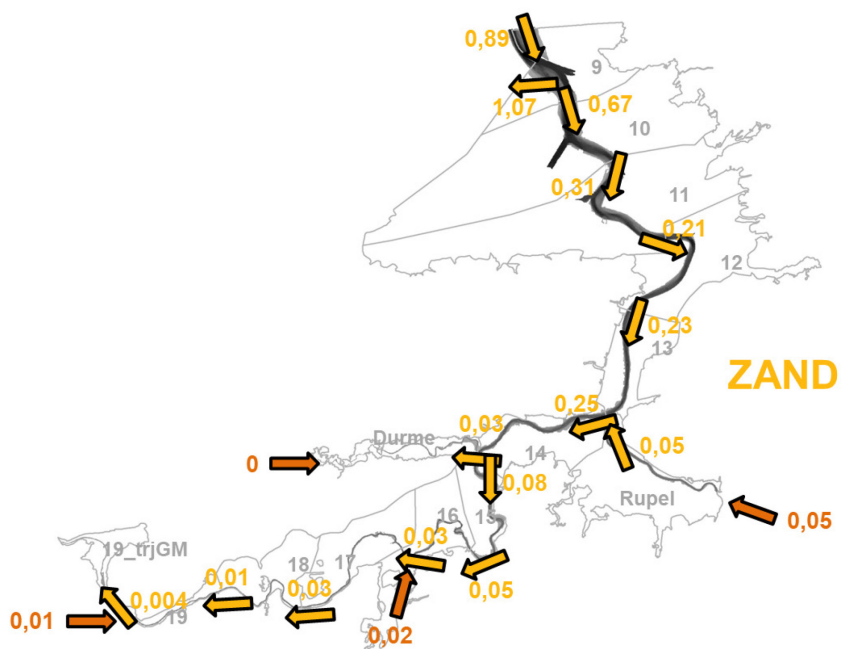
Figuur 46 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19 traject Gentbrugge - Melle



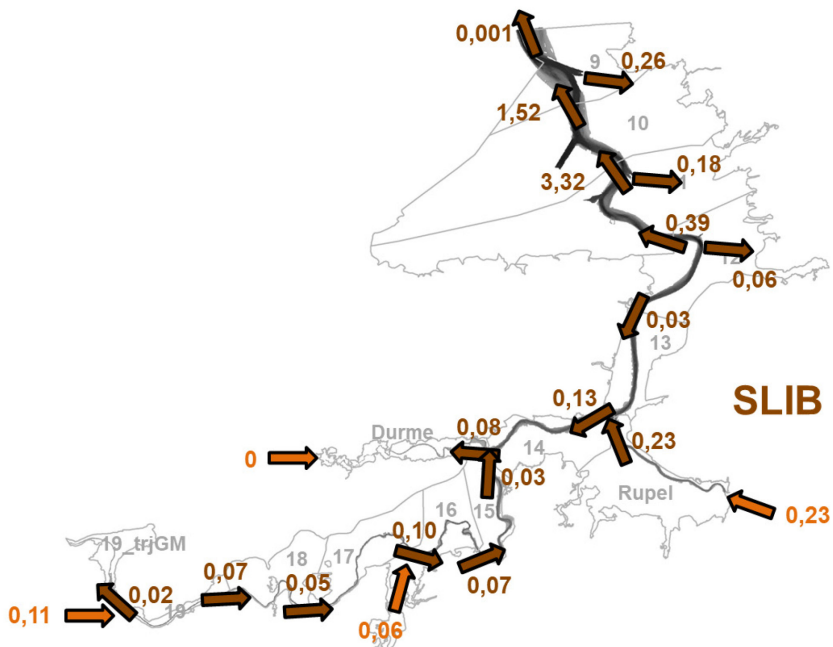
Figuur 47 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P10)



Figuur 48 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P10)



Figuur 49 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P90)



Figuur 50 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019 (scenario P90)

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be