



Vlaanderen
is wetenschap



23_084_1
WL rapporten

Sedimentbalans 2019-2022

Deelrapport 1 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme
voor de periode 2019-2022

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Sedimentbalans 2019-2022

Deelrapport 1 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2019-2022

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 2025
D/2025/3241/014

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vos, G.; Plancke, Y.; Meire, D. (2025). Sedimentbalans 2019-2022: Deelrapport 1 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme voor de periode 2019-2022. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_084_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

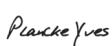
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2025R23_084_1
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.):	40	Bijlagen (p.):	24
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire, D.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2025-03-10 11:05:17 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2025-03-10 08:48:51 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2025-03-07 10:30:31 +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 2019-2022. 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 fluviatiele aanvoer van sediment beschouwd bij het opstellen van de balans.

De zandbalans over de periode 2019-2022 toont een afwaarts gericht transport over de volledige Beneden-Zeeschelde met uitzondering van OMES-segmenten 9, 10 en 14, waar het zandtransport opwaarts gericht is. Dit is een trendbreuk met de voorgaande periodes waarvoor de zandbalans werd berekend en waar het zandtransport opwaarts gericht was over bijna de volledige Zeeschelde.

De slibbalans over de periode 2019-2022 toont een afwaarts gericht slibtransport over de volledige Zeeschelde. Dit is gelijkaardig aan de voorgaande periodes 2001-2011 en 2011-2016.

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	6
3.1 De balans, het concept.....	6
3.2 De ruimte: rekencellen.....	7
3.3 De tijd: rekenperiode	8
3.4 De basis: topo-bathymetrische opnames	9
3.4.1 Verschilgrid topo-bathymetrieën	9
3.4.2 Lithologische samenstelling.....	10
3.4.3 De porositeit van zand-slib-mengsels.....	12
3.4.4 Van volume naar massa.....	14
3.5 Antropogene invloeden	15
3.5.1 Baggeren en storten ten behoeve van de maritieme toegankelijkheid	15
3.5.2 Baggeren en storten (overig).....	19
3.5.3 Zandwinning	20
3.6 Uitwisseling met de havendokken	21
3.7 Fluviatiele aanvoer van sediment	22
4 Resultaten.....	24
4.1 Topo-bathymetrie	24
4.2 Lithologie.....	25
4.3 De sedimentbalans.....	28
5 Discussie	30
5.1 Basisgegevens	30
5.1.1 Fluviatiele aanvoer.....	30
5.1.2 Menselijke ingrepen	31
5.1.3 Lithologie	32

5.2	Sedimentbalans.....	33
5.3	De afwaartse uitkomst.....	36
6	Conclusies en aanbevelingen	37
6.1	Conclusies.....	37
6.2	Aanbevelingen.....	38
7	Referenties	39
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	8
Tabel 2 – Overzicht beschouwde ecotoopklassen	10
Tabel 3 – Overzicht van Stort- en Baggerzones die binnen 2 OMES-rekencellen liggen	15
Tabel 4 – Overzicht van de totale massa gebaggerd en gestort zand en slib per rekencel voor de periode 2019 – 2022 (bron: aMT)	16
Tabel 5 – Overzicht van de massa gebaggerd zand en slib per rekencel in de periode 2019 -2022 (bron: DVW)	20
Tabel 6 – Overzicht van de massa zand onttrokken door zandwinning per rekencel (bron: aMT)	20
Tabel 7 – Overzicht slibfluxen doorheen sluiscomplexen over periode 1/1/2019-1/1/2022	21
Tabel 8 – Overzicht van de fluviatiele sedimentaanvoer voor de verschillende rivieren over de periode 2019-2021	22
Tabel 9 – Slibgehalte van het fluviatiele sediment in de rivieren Bovenschelde, Rupel en Dender.	23
Tabel 10 – Volumeveranderingen [Mm ³] per OMES-segment over de periode 2019-2022	24
Tabel 11 – Volumeverandering/oppervlakte [m] per OMES-segment over de periode 2019-2022	24
Tabel 12 – Overzicht van fluviatiele aanvoer [TDS/jaar] voor de slibbalans over verschillende periodes	30
Tabel 13 – Overzicht van de jaarlijkse baggervolumes voor zand over verschillende periodes	31
Tabel 14 – Overzicht van de jaarlijkse stortvolumes voor zand over verschillende periodes	31
Tabel 15 – Overzicht van de jaarlijkse zandwinvolumes over verschillende periodes	32

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Sedimentbalans Westerschelde voor de periode 2010-2019 in Mm^3 [Bron: Schrijver (2020)]	2
Figuur 2 – Slib- (boven) en zandbalans (onder) voor de Zeeschelde over de periode 2001-2011 (waarden in Mm^3) Oranje pijlen stellen de fluviatiele aanvoer van slib resp. zand voor aan de opwaartse randen	3
Figuur 3 – Schematische voorstelling van het zand-(boven) en slib-(onder) transport in MTDS (gele pijlen) over de periode 2011-2016	4
Figuur 4 – Schematische voorstelling van het zand-(boven) en slib-(onder) slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019.	5
Figuur 5 – Het concept van de sedimentbalans	6
Figuur 6 – Opdeling Zeeschelde en bijrivieren volgens de OMES segmenten	7
Figuur 7 – De geaggregeerde ecotoopenkaart van 2019	11
Figuur 8 – “Ideal packing model”: voorspelde porositeit als een functie van het volumetrisch slibpercentage. Bron: (Koltermann et al., 1995).	12
Figuur 9 – Gebruikte porositeit voor intertidale en subtidale ecotoopklassen	13
Figuur 10 – Baggerlocaties in de Beneden-Zeeschelde	17
Figuur 11 – Stortlocaties in de Beneden-Zeeschelde	18
Figuur 12 – Baggerlocaties in de Boven-Zeeschelde (afwaarts (boven) en opwaarts (onder))	19
Figuur 13 – Schematische voorstelling van de rekencellen met aanduiding van de randen voor fluviatiele sedimentaanvoer.	23
Figuur 14 – Verschilkaart op basis van de bathymetrieën van 2022 en 2019.	24
Figuur 15 – Areaal aan ecotopen per Omes-segment.	25
Figuur 16 – Relatieve verhouding aan ecotopen per Omes-segment.	25
Figuur 17 – 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).	26
Figuur 18 – Aandeel slibfractie (P50) voor verschillende OMES-segmenten: subtidale (boven) en intertidale (onder) ecotoopklassen Volle lijn geeft de mediaan weer per ecotoopklasse voor volledige dataset over de gehele Zeeschelde	27
Figuur 19 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2019-2022 (referentiescenario).	29
Figuur 20 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2019-2022 (referentiescenario).	29
Figuur 21 – Aandeel van de slibfractie per ecotoopklasse voor periode 2019-2021 (oranje) en periode 2016-2019 (geel)	32
Figuur 22 – Zandbalans voor de periode 2019-2022 (boven), periode 2016-2019, 2011-2016 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	34

Figuur 23 – Slibbalans voor de periode 2019-2022 (boven), periode 2016-2019, 2011-2016 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	35
Figuur 24 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 9 en 10	B1
Figuur 25 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 11 en 12	B2
Figuur 26 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 13	B3
Figuur 27 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel Rupel	B4
Figuur 28 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 14	B5
Figuur 29 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel Durme	B6
Figuur 30 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 15	B7
Figuur 31 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 16	B8
Figuur 32 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 17	B9
Figuur 33 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 18	B10
Figuur 34 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 19	B11
Figuur 35 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 19 traject Gentbrugge-Melle	B12
Figuur 36 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 9 en 10	B13
Figuur 37 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 11 en 12	B14
Figuur 38 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 13	B15
Figuur 39 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Rupel	B16
Figuur 40 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 14	B17
Figuur 41 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Durme	B18
Figuur 42 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 15	B19
Figuur 43 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 16	B20
Figuur 44 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 17	B21
Figuur 45 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 18	B22
Figuur 46 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19	B23
Figuur 47 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19 traject Gentbrugge – Melle	B24

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 onderscheid in sedimentfractie 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) en 2016-2019 (Vos *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 zand- en slibbalans voor het Vlaamse deel van het Schelde-estuarium (Zeeschelde, Rupel en Durme), waarbij dezelfde methodiek gebruikt wordt als bij de balans van 2011-2016 en 2016-2019. De berekening werd ditmaal uitgevoerd voor de periode 2019-2022, aangezien voor beide jaren een quasi volledige bodemopname beschikbaar was.

2 Eerdere studies

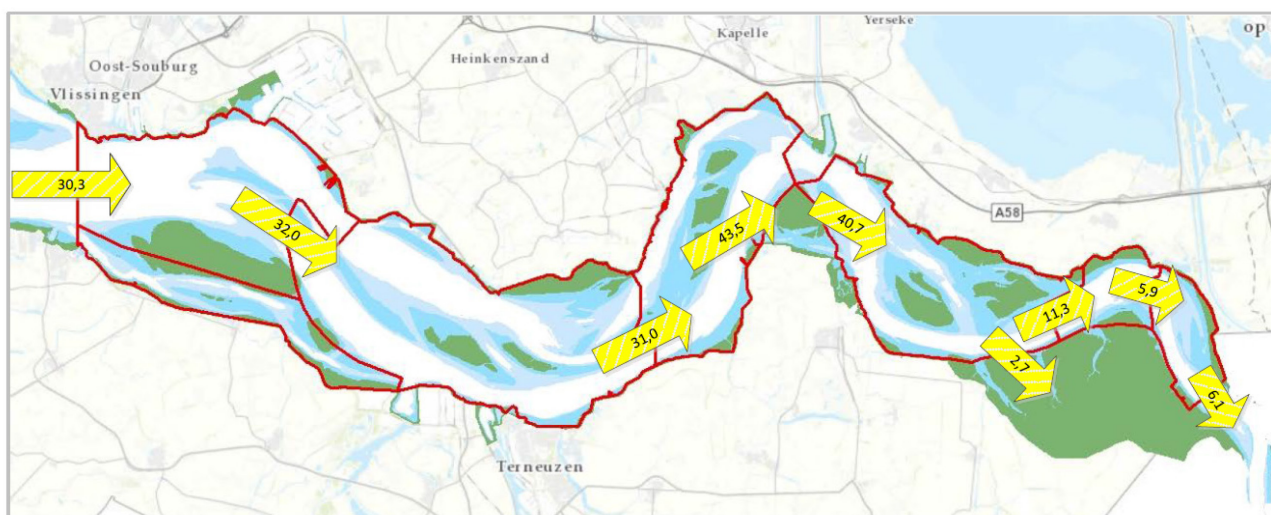
In het verleden werden reeds verschillende studies omtrent sediment en sedimentbalans gepubliceerd. In wat volgt wordt een kort overzicht gegeven van de meest recente van deze studies.

2.1 Westerschelde

Door Rijkswaterstaat wordt op regelmatige basis een sedimentbalans voor de Westerschelde opgemaakt (de Jong, 2000; Nederbragt & Liek, 2004). De meest recente gepubliceerde 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.

Haecon (2006) voerde een berekening van de sedimentbalans uit waarbij de opwaartse rand van de berekening verschoven werd van de grens naar Schelle. Ter hoogte van de opwaartse grens te Schelle werd de op basis van metingen bepaalde fluviatiele aanvoer van sediment als randvoorwaarde opgelegd. Op deze manier kon ter hoogte van de grens een sedimentuitwisseling berekend worden, die goed overeenstemt met de aanname die door Rijkswaterstaat wordt gedaan.

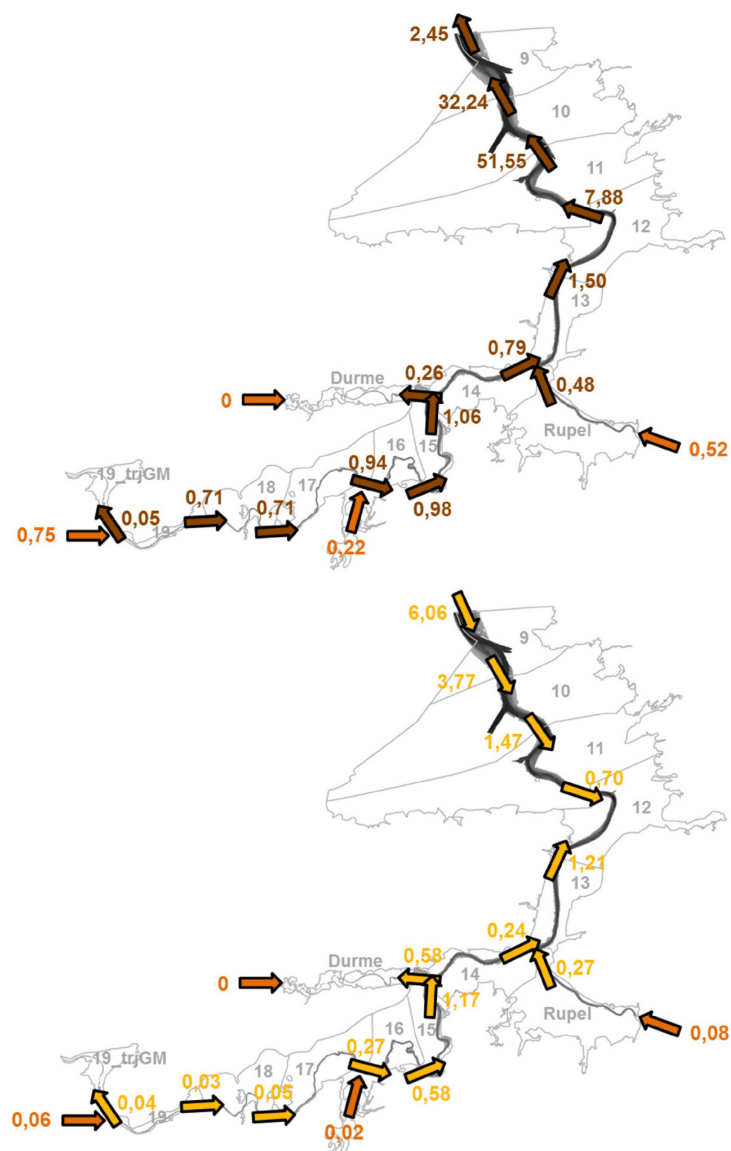
In het kader van het VNSC-onderzoeksprogramma Veiligheid & Toegankelijkheid, werd door Arcadis (IMDC *et al.*, 2013) de sedimentbalans voor de Westerschelde opgesplitst in een balans voor de zand- en slibfractie. De opsplitsing tussen zand en slib gebeurde op basis van de slibhoeveelheid in de bodem, bepaald volgens de McLaren kartering (McLaren, 1993). De opwaartse rand lag hierbij opnieuw ter hoogte van grens, waardoor voor deze randvoorwaarde een aanname (50% zand, 50% slib) werd gedaan voor zowel het zand- als slibtransport ter hoogte van de grens.



Figuur 1 – Sedimentbalans Westerschelde voor de periode 2010-2019 in Mm³ [Bron: Schrijver (2020)]

2.2 Zeeschelde

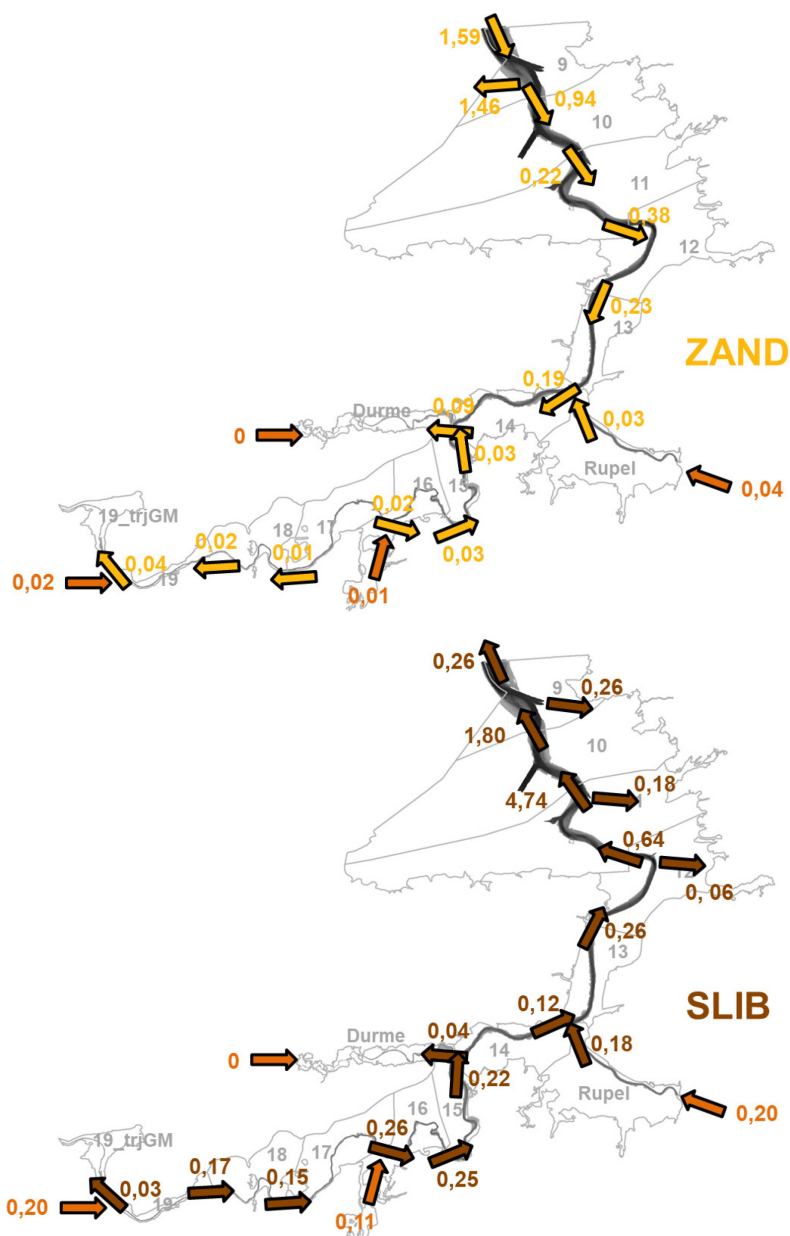
In het kader van het project “Integraal plan Boven-Zeeschelde” werd in Vandenbruwaene *et al.* (2017) de sedimentbalans berekend voor de Zeeschelde en haar bijrivieren waarbij een onderscheid gemaakt werd tussen de zand- en slibfractie. De berekening gebeurde niet per jaar maar voor de periode 2001-2011, 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).



Figuur 2 – Slib- (boven) en zandbalans (onder) voor de Zeeschelde over de periode 2001-2011 (waarden in Mm³)
Oranje pijlen stellen de fluviatiele aanvoer van slib resp. zand voor aan de opwaartse randen

Ook over de periode 2011-2016 (Plancke *et al.*, 2021) werd een zand- en slibbalans opgemaakt. Deze toont voor zand een opwaarts gericht transport over de volledige Beneden-Zeeschelde en het opwaartse deel van de Boven-Zeeschelde. Het afwaartse deel ter hoogte van de van de Boven-Zeeschelde wordt gekenmerkt door een afwaarts gericht zandtransport. De berekende zandtransporten zijn zeer gelijkwaardig 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.

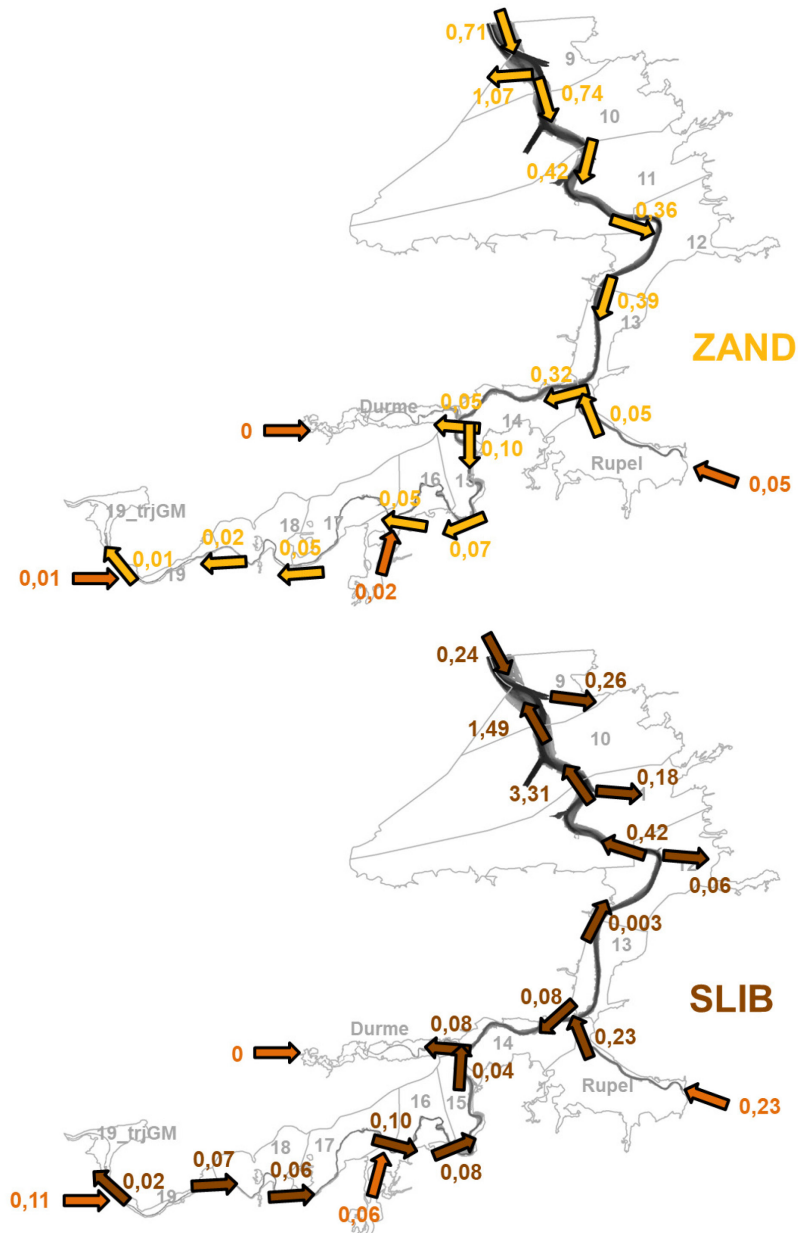
De slibbalans over de periode 2011-2016 toont een afwaarts gericht transport over de volledige Zeeschelde. De berekende slibtransporten zijn opnieuw zeer gelijkwaardig aan de berekende slibtransporten over de periode 2001-2011, ondanks de aangepaste berekeningsmethodiek.



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

De sedimentbalans over de periode 2016-2019 wordt in Figuur 4 weergegeven (Vos *et al.*, 2023). De slibbalans voor deze periode toont een afwaarts gericht transport over bijna de volledige Zeeschelde. Tussen de Rupel en de Durme is er een opwaarts gericht transport, en vanuit de Beneden-Zeeschelde richting de Westerschelde is het transport opwaarts gericht.

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.

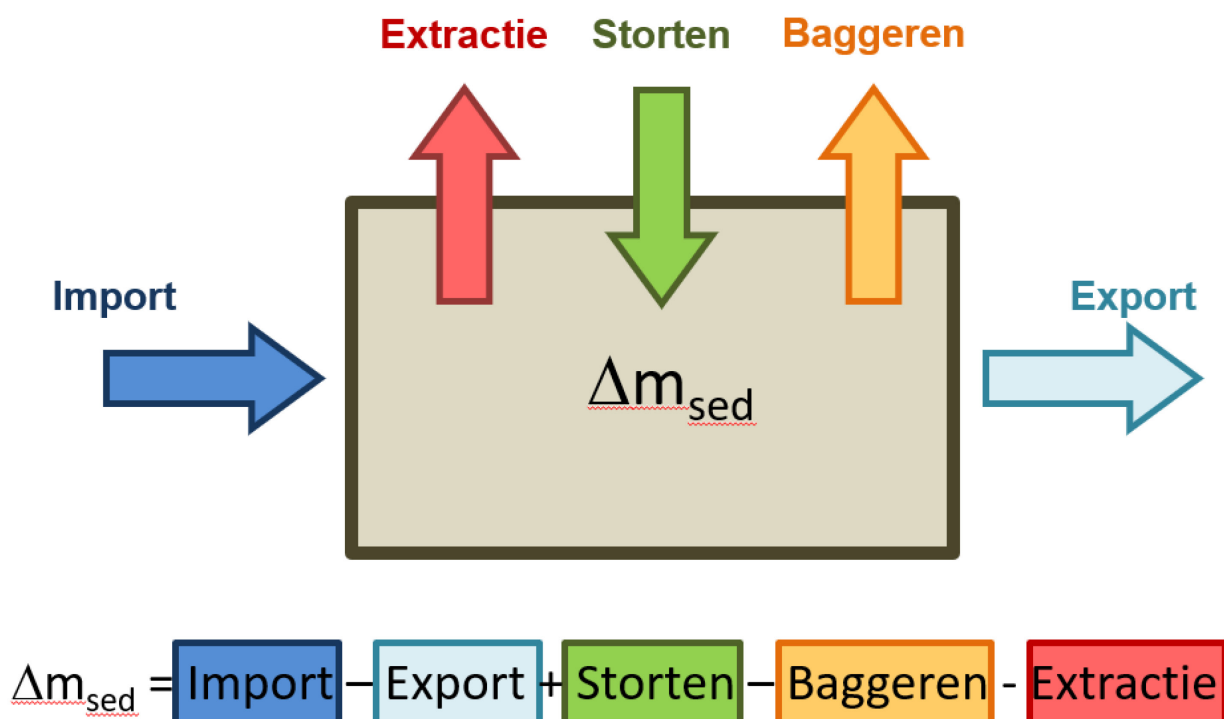


Figuur 4 – Schematische voorstelling van het zand-(boven) en slib-(onder) slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2016-2019.

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 5, waar het principe van de sedimentbalans terug te vinden is.

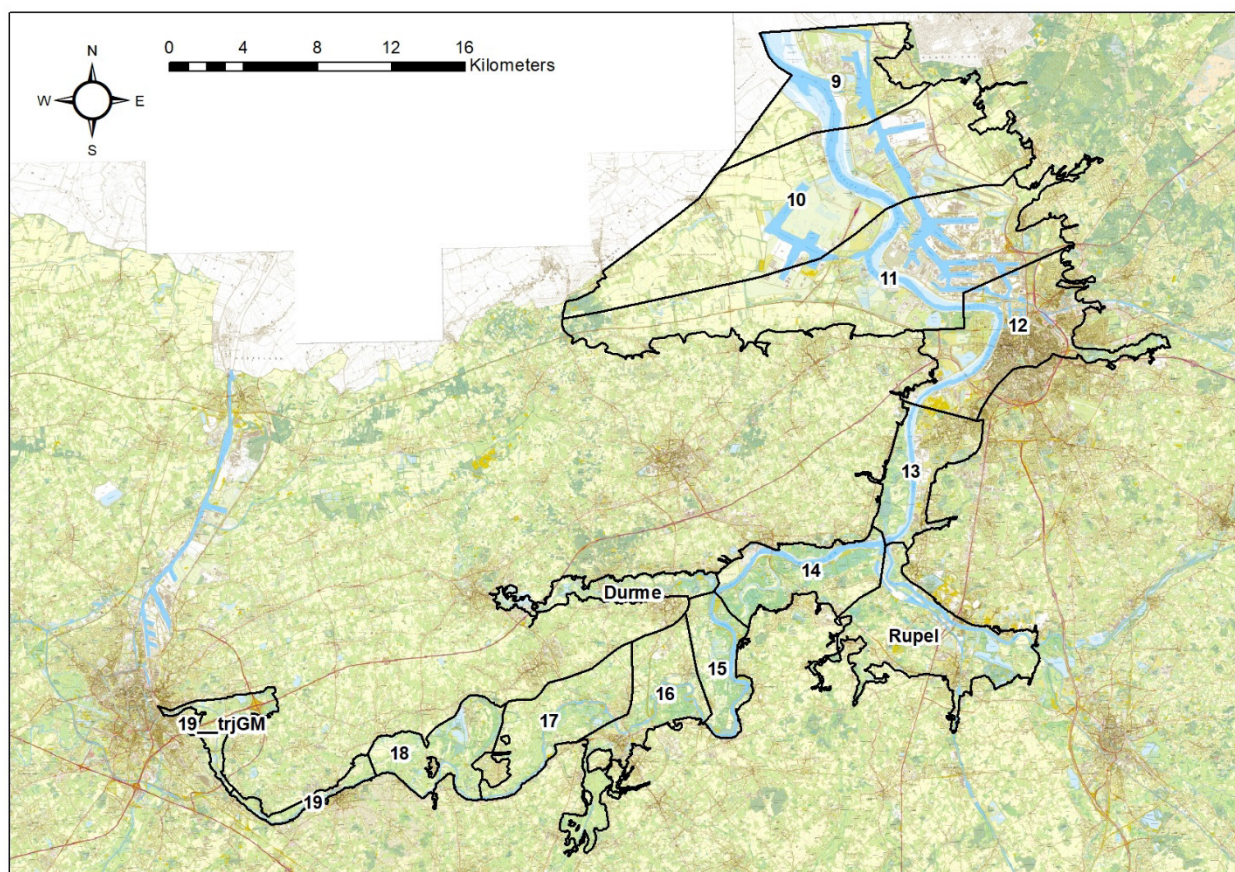


Figuur 5 – Het concept van de sedimentbalans

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) en 2016-2019 (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 baggeren 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 6.



Figuur 6 – Opdeling Zeeschelde en bijrivieren volgens de OMES segmenten

3.3 De tijd: rekenperiode

De eerste sedimentbalans voor de Zeeschelde is opgesteld voor de periode 2001-2011. Vervolgens werd een volgende sedimentbalans opgemaakt voor 2011-2016 en 2016-2019. Voorliggende sedimentbalans bouwt hierop verder en beslaat de periode 2019-2022. 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 2019-2022. Voor de Durme is er geen gebiedsdekkende opname beschikbaar voor 2019. In plaats daarvan werd een bathymetrie 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
"2022"	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022

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 2019-2022. 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 2019 en 2022 werd allereerst een verschilgrid berekend (verschilgrid = 2022-2019). Een positieve waarde in het verschilgrid duidt op accumulatie van sediment tussen 2019 en 2022, 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 4 jaar. (Tabel 1).

3.4.2 Lithologische samenstelling

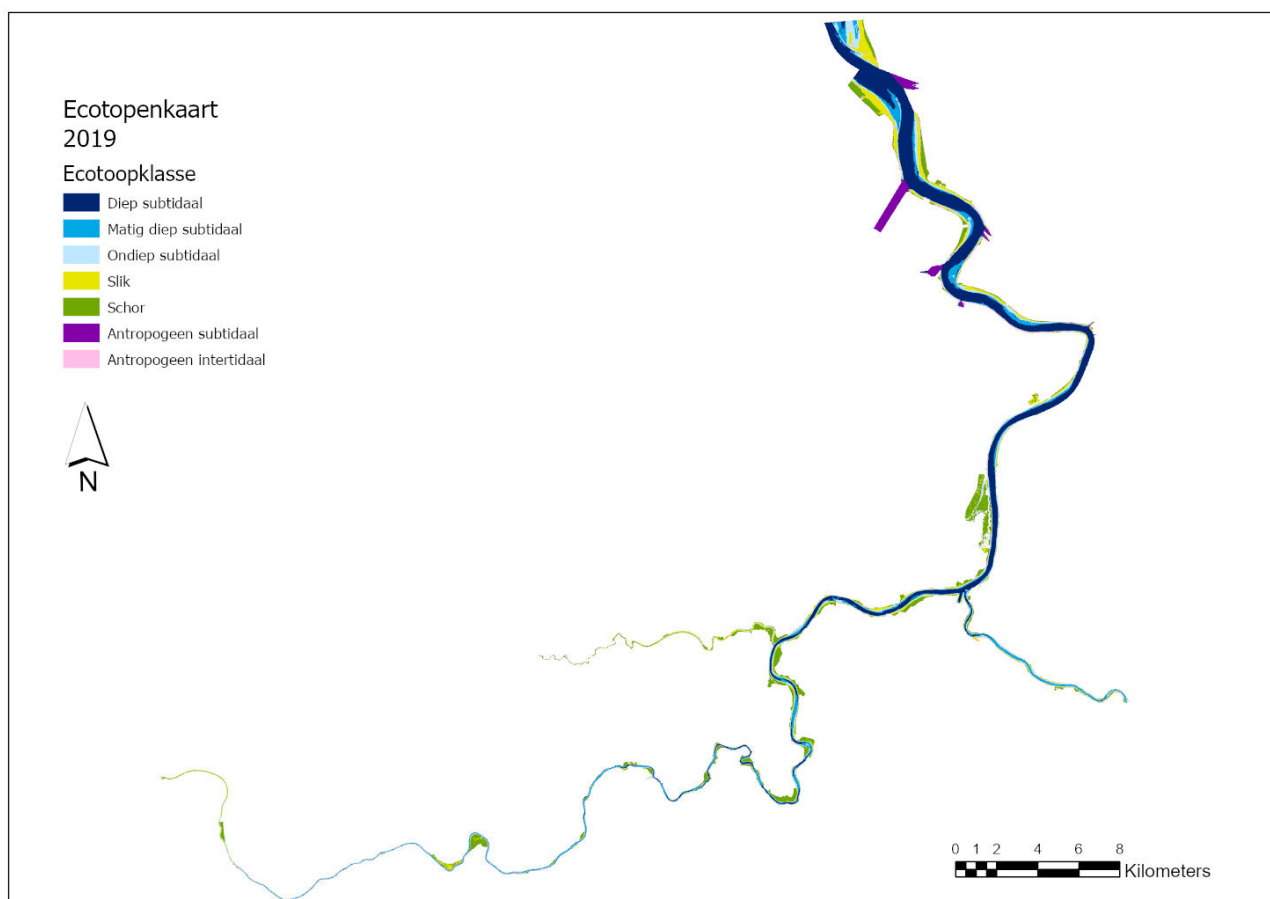
Aangezien de sedimentbalans expliciet opgesplitst wordt voor de zand- en slibfractie, is het noodzakelijk om het relatieve aandeel van de zand- ($63 \mu\text{m} - 2000 \mu\text{m}$) en slibfractie ($< 63 \mu\text{m}$) te kennen. In Vandenbruwaene *et al.* (2017) en Plancke *et al.* (2023) is ervoor gekozen 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 beschikbaar zijn. Voor een overzicht van de locaties wordt verwezen naar Bijlage 2 – Locatie staalnamepunten.

In deze studie werd als basis om kaarten te onderscheiden de ecotopenkaart uit 2019 (Van Ryckegem *et al.*, 2021). Ecotopenkaarten zijn 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 2019 wordt als representatief beschouwd voor de tijdsperiode 2019-2022. 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, 2011-2016 en 2016-2019 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 ecotopenkaart is weergegeven in Figuur 7.

De beschikbare bodemstalen uit de periode 2019-2022 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	39%
2	Matig diep subtidaal	15%
3	Ondiep subtidaal	8%
4	Intertidaal – slik	12%
5	Intertidaal – schor	19%
6	Antropogeen subtidaal	4%
7	Antropogeen intertidaal	4%



Figuur 7 – De geaggregeerde ecotopenkaart van 2019

3.4.3 De porositeit van zand-slib-mengsels

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 “ideal packing model” zoals weergegeven in Figuur 8. 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 (grove 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%, wanneer het volumetrisch slibpercentage gelijk is aan de porositeit van de zandcomponent (Koltermann et al., 1995).

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

Voor $\phi_v < 0.4$

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

Voor $\phi_v \geq 0.4$

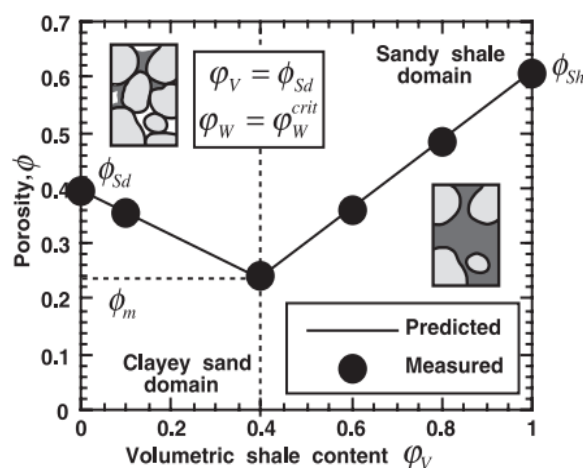
$$\phi = \phi_m + \frac{(\phi_v - \phi_m)}{(1 - \phi_m)} * (\phi_{sh} - \phi_m) \quad (4)$$

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

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

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

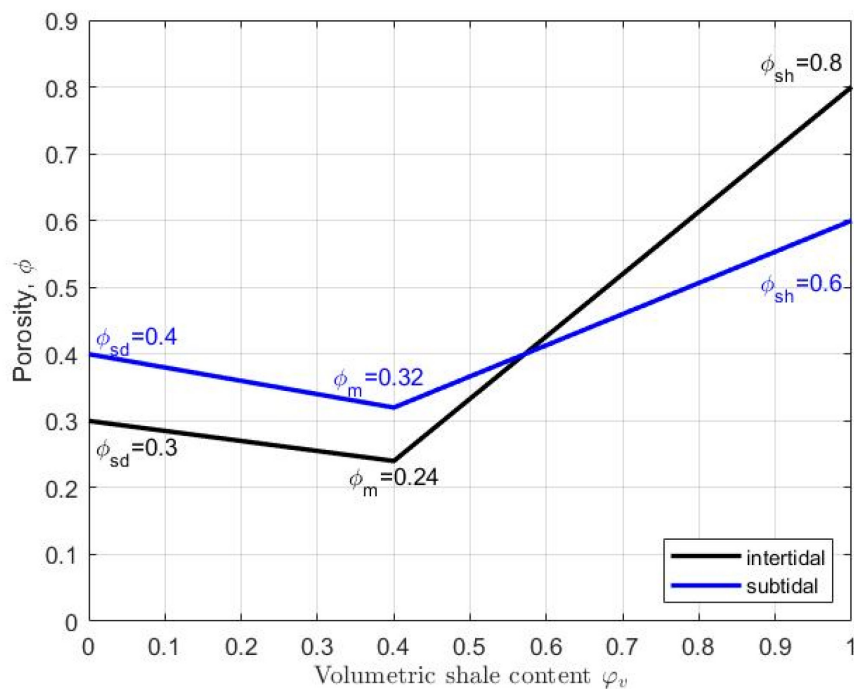
ϕ_m : minimale porositeit [-], treedt op bij relatief aandeel slib van 40% = 0.24



Figuur 8 – “Ideal packing model”: voorspelde porositeit als een functie van het volumetrisch slibpercentage.

Bron: (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 8). 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 9.



Figuur 9 – Gebruikte porositeit 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:

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

Voor slib:

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

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 opgemeten worden, is ervoor gekozen de ingreepgegevens te beschouwen van de periode 1/1/2019 – 1/1/2022. Dit leidt tot een kleine overschatting van de ingreepgegevens in 2019 en analoog, een onderschatting voor 2022. 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 10 en Figuur 11.

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%)	10 (34,6%)
Oosterweel	11 (78,8%)	12 (21,2%)
Vlakte van Hoboken ¹	13(68,6%)	12 (31,4%)
Baggerzone	OMES-rekencel	
Drempel van Frederik	10 (69,2%)	9 (30,8%)
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 2019 - 2022 werd dan ook gebruik gemaakt van deze gedetailleerde gegevens, waarbij op basis van de geregistreeerde densiteit van het sedimentmengsel en het beunvolume de massa van het gebaggerde sediment werd berekend.

¹ In de vergunning die sinds 2021 geldt, is deze stortlocatie niet meer opgenomen.

Dit verliep als volgt:

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

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

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

Waarbij $\rho_{sediment}$ de densiteit van puur sediment is (2,65 t/m³), ρ_{water} de densiteit van water is (1,00² 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 2019-2022), 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).

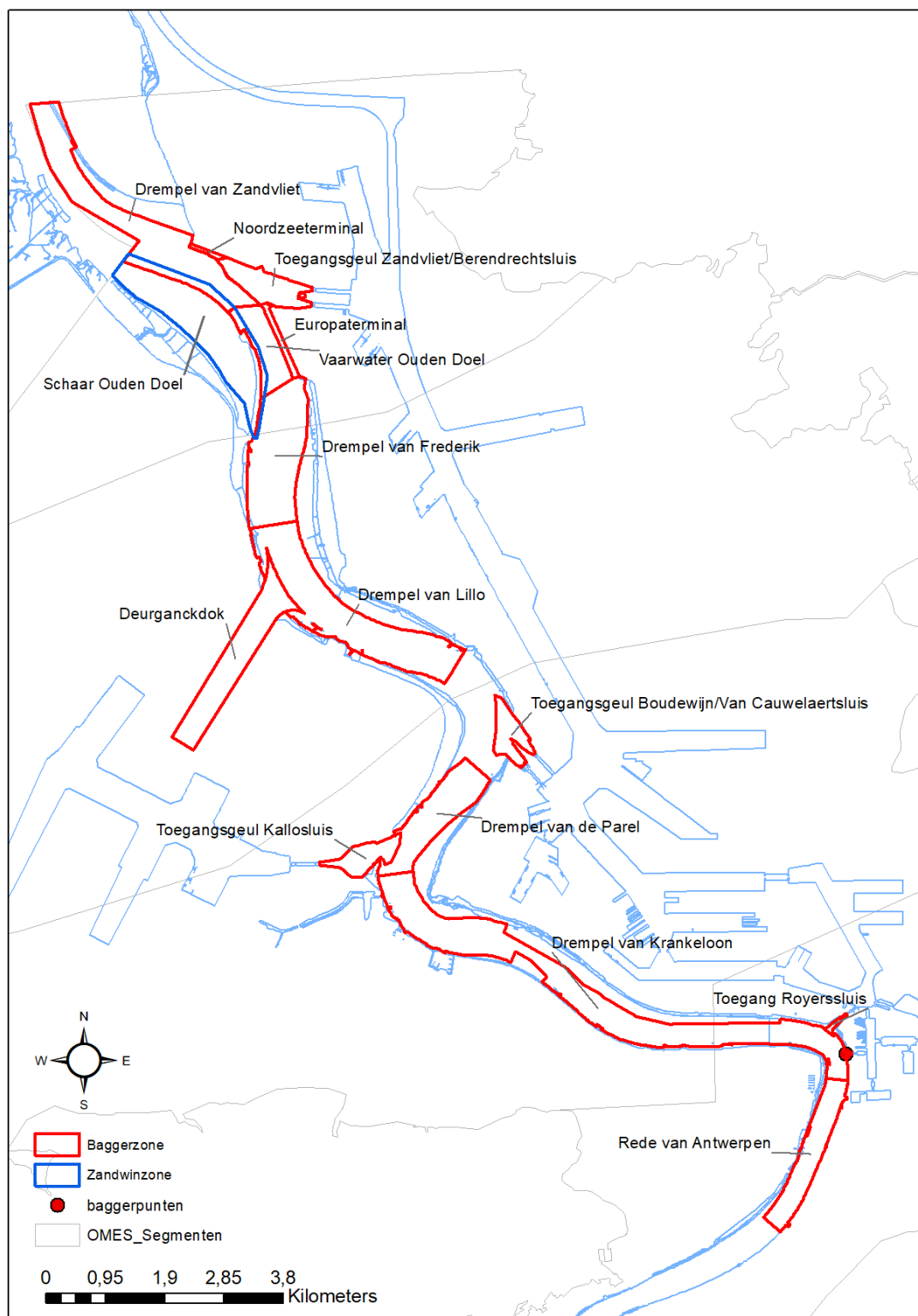
Merk op dat de hier gevolgde methodiek (massabalans) voor de ingreepgegevens het voordeel geeft dat er geen specifieke aannames dienen te gebeuren rond verschillen in beunvolume vs. in situ volume voor deze ingreepgegevens en dat de gebruikte massa rechtstreeks uit de registraties werden afgeleid.

Tabel 4 geeft een overzicht van de gebaggerde en gestorte massa's zand en slib per rekencel voor de periode 1/1/2019 – 1/1/2022.

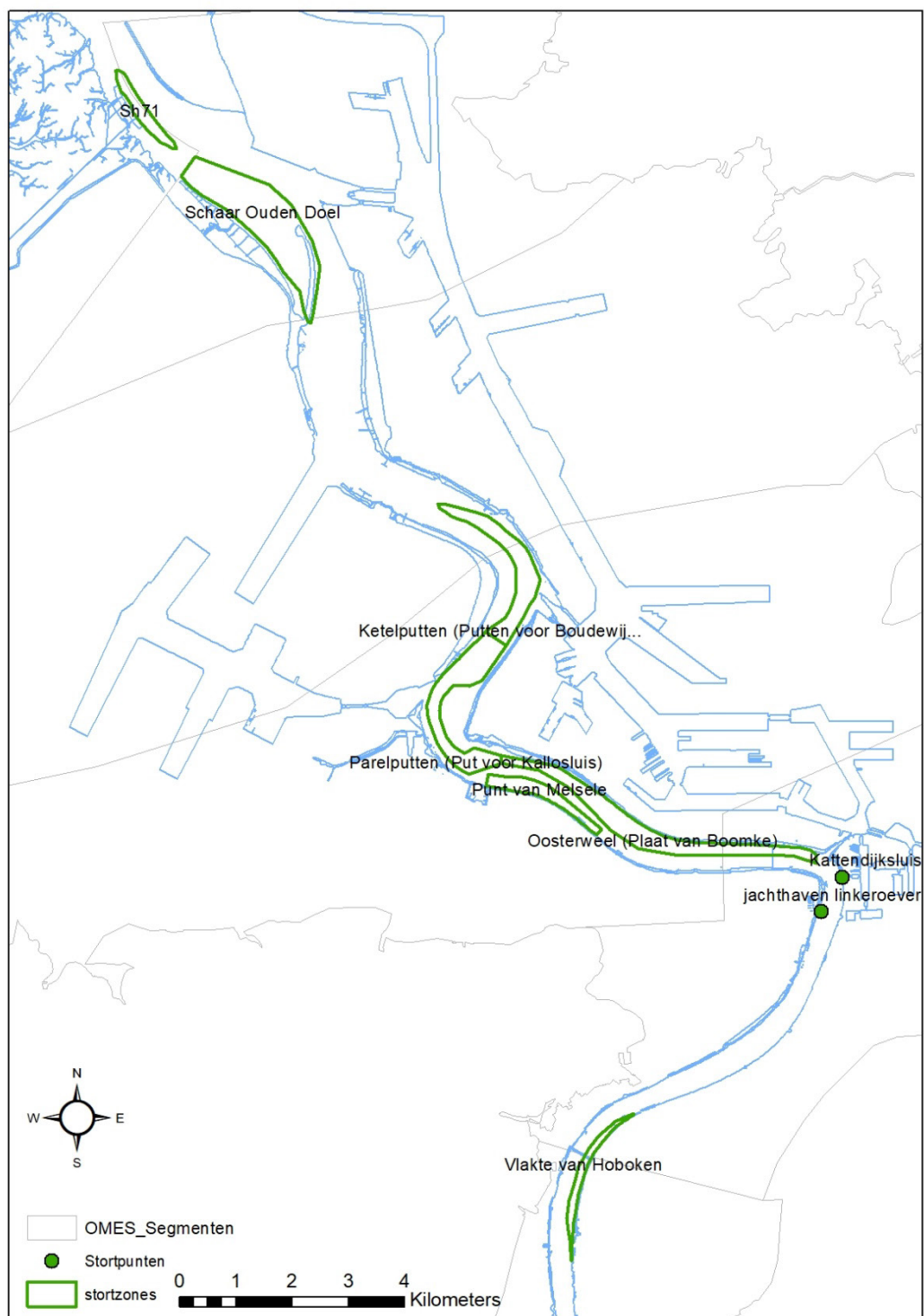
Tabel 4 – Overzicht van de totale massa gebaggerd en gestort zand en slib per rekencel voor de periode 2019 – 2022 (bron: aMT)

ZAND		
Rekencel	Baggeren [MTDS]	Storten [MTDS]
9	3,60	5,70
10	1,37	-
11	1,30	1,21
12	0,09	-
13	0,14	
14	0,41	
SLIB		
Rekencel	Baggeren [MTDS]	Storten [MTDS]
9	4,16	-
10	5,03	1,03
11	2,30	9,39
12	< 0,01	1,08

² 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.



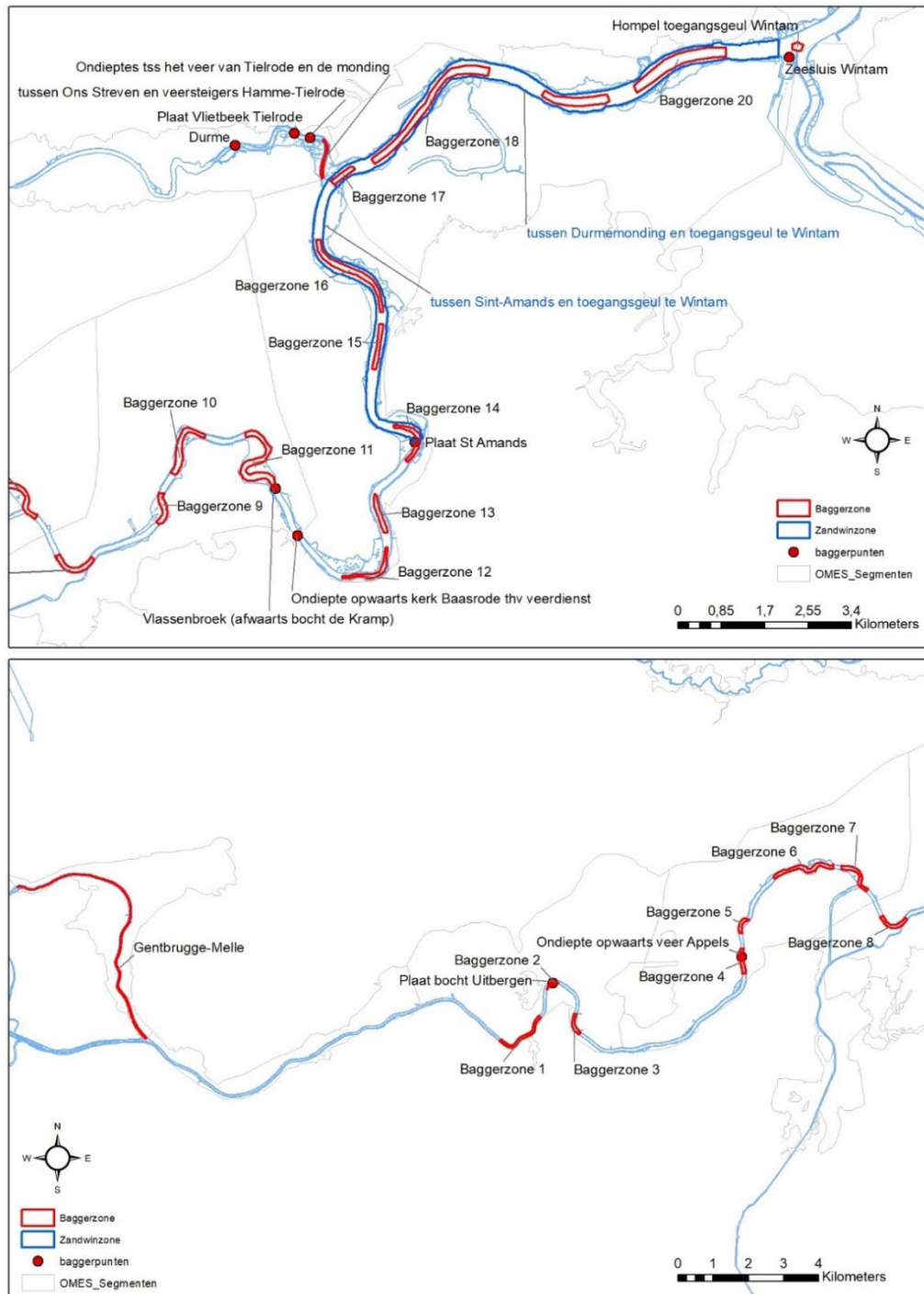
Figuur 10 – Baggerlocaties in de Beneden-Zeeschelde



Figuur 11 – 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 12.



Figuur 12 – 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 1/1/2019 – 1/1/2022. 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.

Tabel 5 – Overzicht van de massa gebaggerd zand en slib per rekencel in de periode 2019 -2022 (bron: DVW)

Rekencel	Zand [MTDS]	Slib [MTDS]
14	-	-
15	0,024	0,026
16	0,002	0,001
17	-	-
18	-	-
19 trGM	-	-
Durme	0,044	0,035

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) en de Durme.

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 1/1/2019 – 1/1/2022.

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

Rekencel	Zand [MTDS]
9	3,89
13	0,03
14	0,26
Rupel	0,02
Durme	<0,01

3.6 Uitwisseling met de havendokken

De niet-getijgebonden havendokken in het Antwerps havengebied zijn van het estuarium gescheiden door sluizen. Bij het openen van de sluizen 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 sluizen. 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 sluizen op rechteroever, kan deze aanname in vraag gesteld worden. In verder onderzoek 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 sluizen 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 en 2019-2022. 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 sluizen voor de verschillende sluiscomplexen, uitgaande van een jaarlijkse aanvoer van 500 000 TDS naar de dokken.

Tabel 7 – Overzicht slibfluxen doorheen sluiscomplexen over periode 1/1/2019-1/1/2022

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 13) 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 (Grobendonk), 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 (om de 15 minuten) en sedimentconcentraties (via automatische pompstalen om de 7 uur of afgeleid uit de om de 15 minuten gemeten 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 EWI-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 2019 tot en met 2021 (Vandenbruwaene *et al.*, 2022).

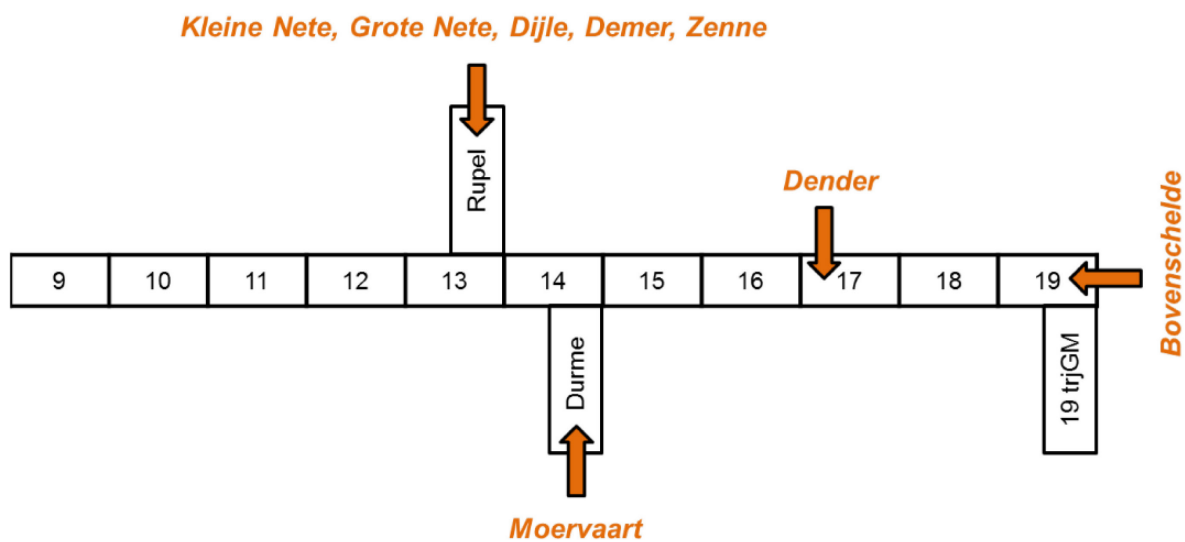
Tabel 8 – Overzicht van de fluviatiele sedimentaanvoer voor de verschillende rivieren over de periode 2019-2021

	Totale sedimentlading [TDS]					
Jaar	Grote Nete (Itegem)	Demer (Aarschot)	Zenne (Epegem)	Rupel	Boven-Zeeschelde (Melle)	Dender (Appels)
2019	6.277	38.218	186.117	245.562	74.317	57.028
2020	6.175	60.437	194.512	279.297	117.631	70.660
2021	32.988	83.341	423.183	571.768	230.678	153.072
Totaal	45.440	181.996	803.812	1.096.627	422.626	280.760

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 (Bovenschedde), 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 2021, 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 2019-2021 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 fluviatiele sediment in de rivieren Bovenschelde, Rupel en Dender.

Rivier	Station	Aantal Stalen	Slibgehalte [%]
Bovenschelde	Gavere	26	89
Rupel	Aarschot, Itegem, Eppegem	77	84
Dender	Appels	23	89

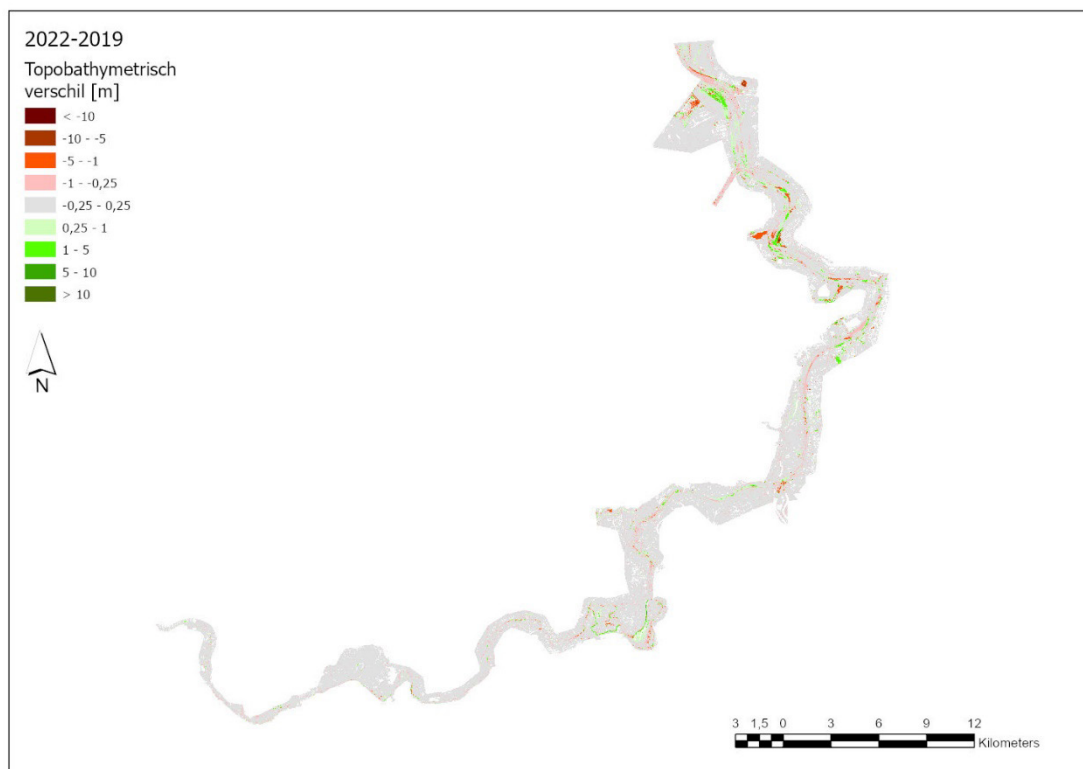


Figuur 13 – Schematische voorstelling van de rekencellen met aanduiding van de randen voor fluviatiele sedimentaanvoer

4 Resultaten

4.1 Topo-bathymetrie

Figuur 14 geeft de verschilkaart weer van de topo-bathymetrische veranderingen over de periode 2019-2022. Een meer gedetailleerde voorstelling is opgenomen in Bijlage 1 – Verschilkaarten. Groene kleuren duiden op een accumulatie van sediment tussen 2019 en 2022, 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. Het meest afwaartse segment 9 en de Rupel worden gekenmerkt door verondieping in de periode 2019-2022, in de overige segmenten wordt verdieping waargenomen.



Figuur 14 – Verschilkaart op basis van de bathymetrieën van 2022 en 2019.

Tabel 10 – Volumeveranderingen [Mm³] per OMES-segment over de periode 2019-2022

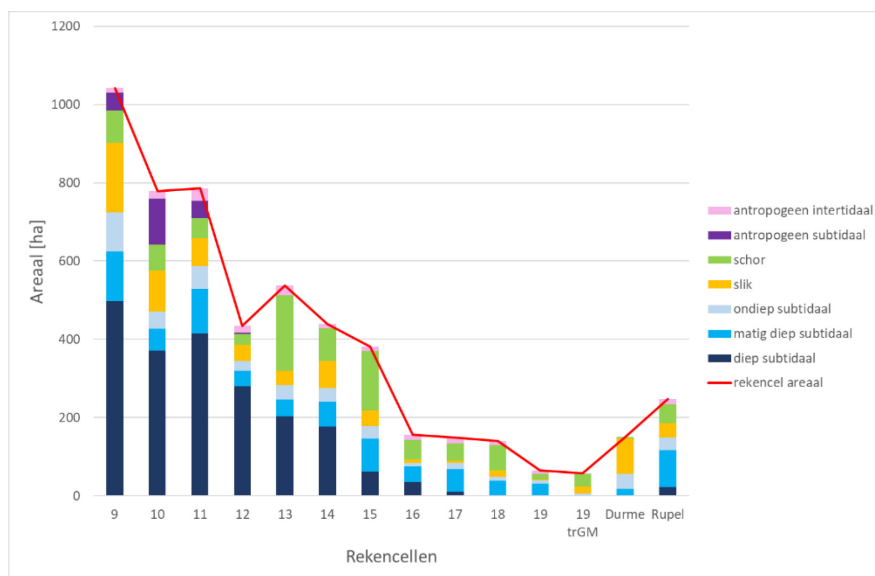
OMES-segment														19 trGM	Durme	Rupel
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19						
0,36	-0,06	-0,39	-0,33	-0,42	0,08	-0,33	-0,10	-0,14	-0,06	-0,09				0,01	0,21	-0,01

Tabel 11 – Volumeverandering/oppervlakte [m] per OMES-segment over de periode 2019-2022

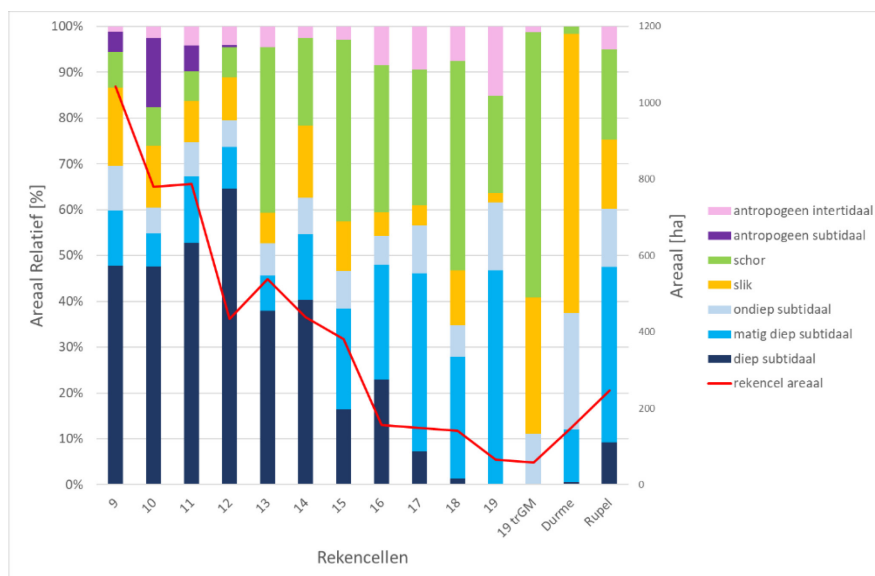
OMES-segment														19 trGM	Durme	Rupel
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19						
0,03	-0,01	-0,05	-0,08	-0,08	0,02	-0,09	-0,06	-0,10	-0,04	-0,13				0,02	0,14	0,00

4.2 Lithologie

Figuur 15 en Figuur 16 geven respectievelijk het areaal aan ecotopen per OMES-segment en het relatieve aandeel van de ecotopen per OMES-segment weer. In Figuur 15 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. 20% (OMES-segment 11 en 12) tot ca. 50% (segment 13 en t.e.m. 18). Voor de Oude Tijarm en de Durme is het aandeel intertidaal nog groter (tot bijna 90% in de oude tijarm). 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 15 – Areaal aan ecotopen per Omes-segment

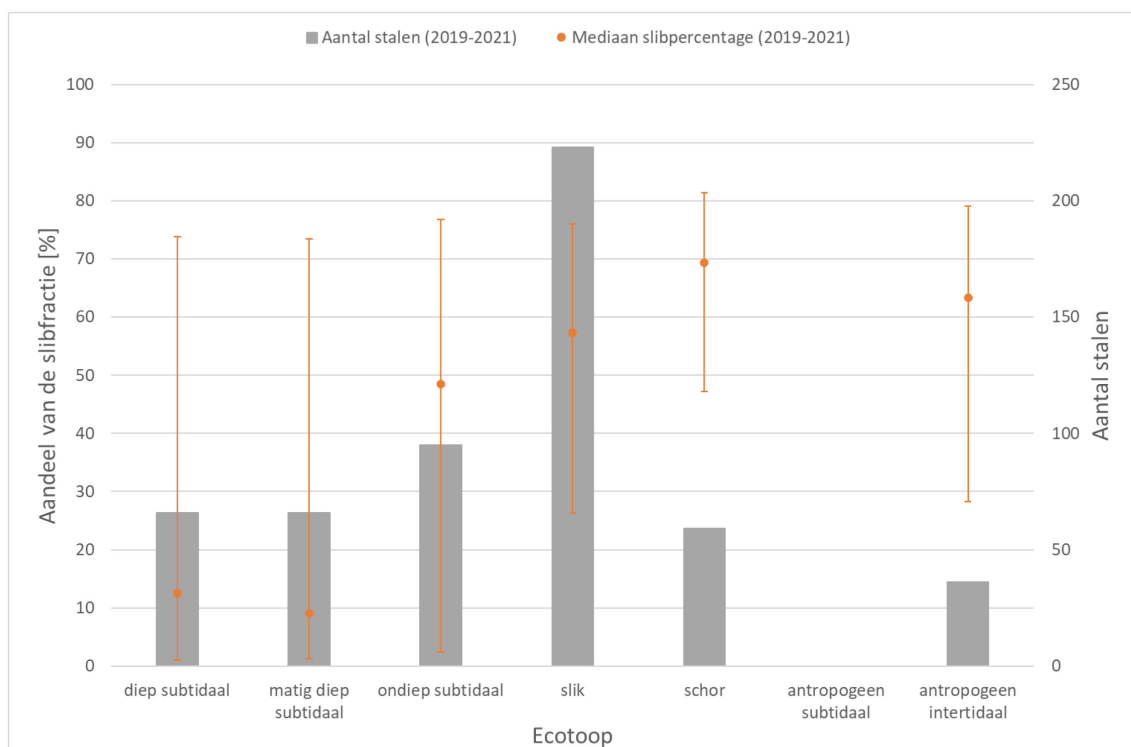


Figuur 16 – Relatieve verhouding aan ecotopen per Omes-segment

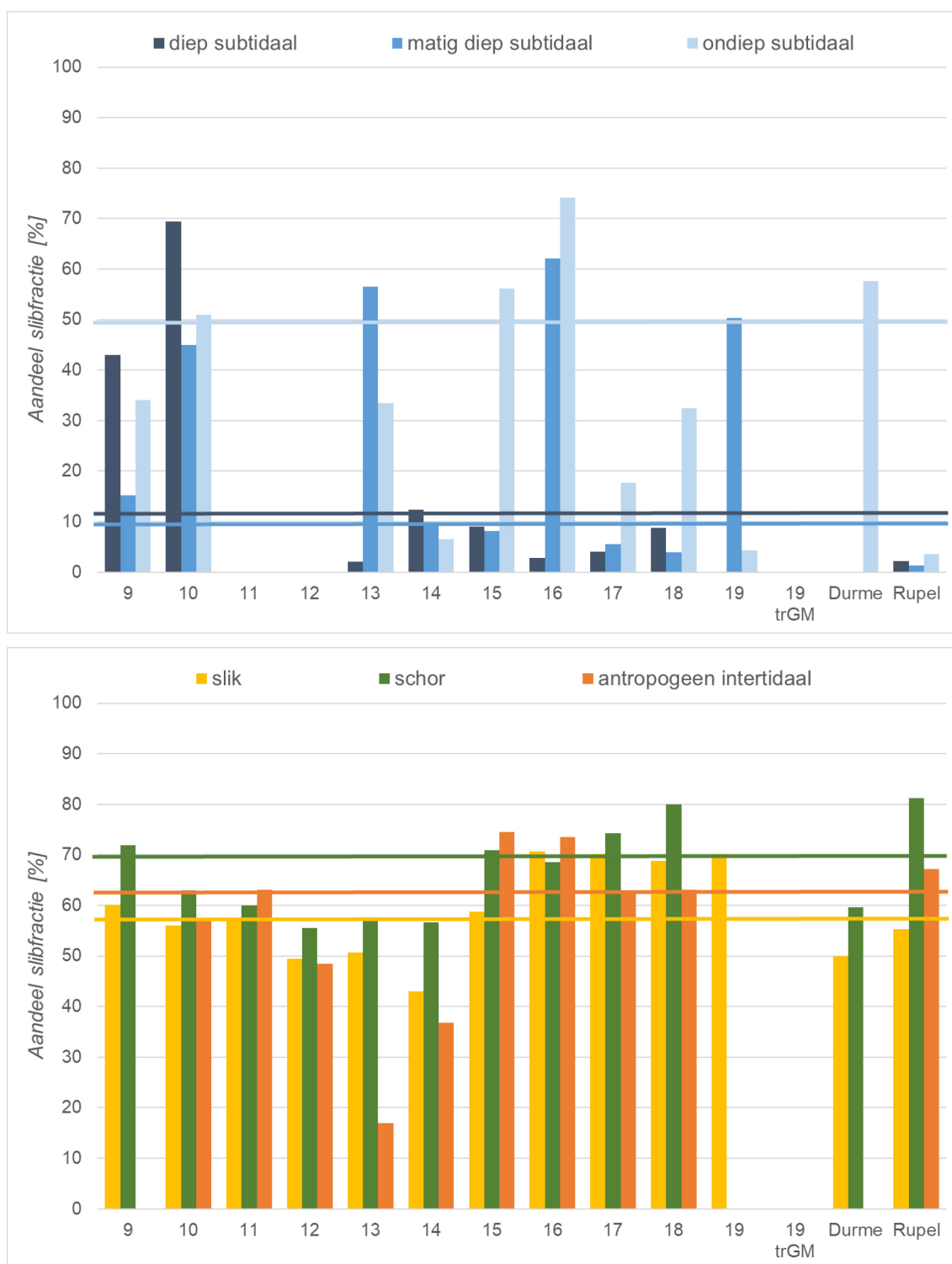
Figuur 17 geeft een overzicht van het aantal beschikbare bodemstalen per ecotoopklasse voor de periode 2019-2021, alsook de mediaan van het aandeel slib voor de bodemstalen. Met uitzondering van het antropogeen subtidaal en intertidaal bevat elke ecotoopklasse 50 of meer stalen, wat leidt tot een representatief beeld van de bodemsamenstelling van de verschillende ecotoopklassen. De mediaan van het aandeel slib varieert van 13% (diep subtidaal) tot 69% (schor). 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 subtidale gebieden 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 18 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 subtidaal blijkt het aandeel slibfractie OMES-cel 9 en 10 hoger te liggen dan de mediane waarde van de volledige dataset, terwijl deze meer opwaarts (OMES 13-19) lager ligt. Voor het matig diep en ondiep subtidaal is er geen uitgesproken ruimtelijke patroon aanwezig.

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



Figuur 17 – 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 18 – Aandeel slijbfractie (P50) voor verschillende OMES-segmenten: subtidale (boven) en intertidale (onder) ecotoopklassen
Volle lijn geeft de mediaan weer per ecotoopklasse voor volledige dataset over de gehele Zeeschelde

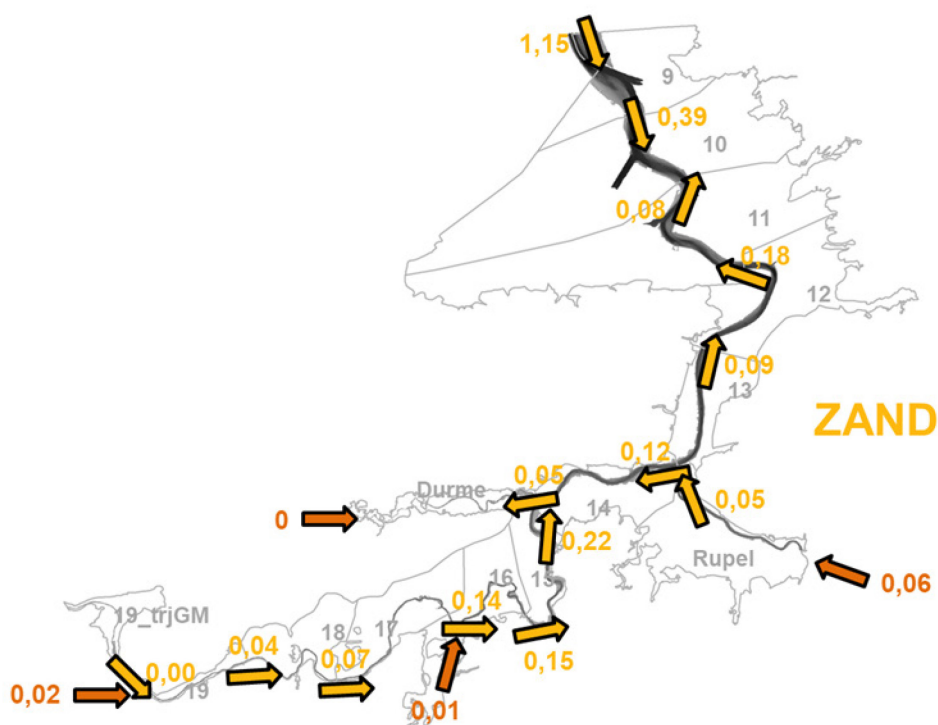
4.3 De sedimentbalans

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 19) en slibbalans (Figuur 20) voor de periode 2019-2022 berekend.

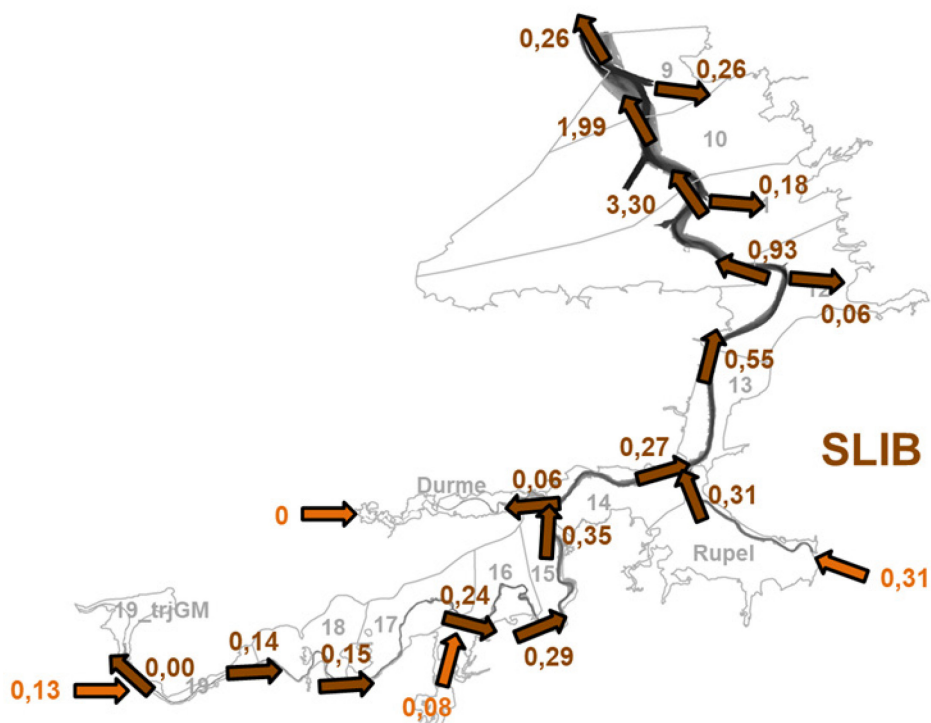
Het zandtransport (Figuur 19) is afwaarts gericht over de gehele Boven-Zeeschelde, met uitzondering van segment 14 waar het transport opwaarts gericht is, in de Beneden-Zeeschelde is het zandtransport ook afwaarts gericht tot OMES-segment 10. Over de Belgisch-Nederlandse grens en tussen segment 9 en 10 is het transport opwaarts gericht (vloed-gedomineerd). 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 de volledige Zeeschelde een afwaarts gericht transport (Figuur 20). 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, afnemend van ca. 0,30 MTDS/jaar tussen Durme en Rupel tot 0,15 MTDS/jaar in segmenten 18 en 19.



Figuur 19 – Schematische voorstelling van het zandtransport in MTDS/jaar over de periode 2019-2022 (referentiescenario)



Figuur 20 – Schematische voorstelling van het slibtransport in MTDS/jaar over de periode 2019-2022 (referentiescenario)

5 Discussie

Vandenbruwaene *et al.* (2017) heeft de zand- en slibbalans berekend voor de periode 2001-2011, Plancke *et al.* (2023) voor de periode 2011-2016 en Vos *et al.* (2023) voor de periode 2016-2019. In voorliggend rapport werd een vergelijkbare berekening uitgevoerd voor de periode 2019-2022. In de volgende paragrafen zal een vergelijking gemaakt worden tussen de resultaten voor de verschillende periodes.

5.1 Basisgegevens

5.1.1 Fluviatiele aanvoer

Tabel 12 geeft een overzicht van de aanvoer van fluviaal sediment voor de verschillende periodes. Hieruit blijkt dat de variatie over de verschillende periodes eerder beperkt is. De aanvoer van slib naar de Boven-Zeeschelde lag in de periode 2011-2016 wel aanzienlijk hoger dan in de andere periodes. Voor de aanvoer vanuit de Rupel was dan weer de meest recente periode hoger qua aanvoer van slib.

Tabel 12 – Overzicht van fluviatiele aanvoer [TDS/jaar] voor de slibbalans over verschillende periodes

		2019-2022	2016-2019	2011-2016	2001-2011
Boven-Zeeschelde	slib	0,13	0,11	0,20	0,12
	zand	0,02	0,01	0,02	0,01
Dender	slib	0,08	0,06	0,11	0,03
	zand	0,01	0,02	0,01	0,00
Rupel	slib	0,31	0,23	0,20	0,08
	zand	0,06	0,06	0,04	0,01

5.1.2 Menselijke ingrepen

Tabel 13 t.e.m. Tabel 15 geeft een overzicht van de jaarlijkse bagger-, stort- en zandwinvolumes per OMES-segment.

Tabel 13 – Overzicht van de jaarlijkse baggervolumes voor zand over verschillende periodes

OMES-segment	2001-2011	2011-2016	2016-2019	2019-2022
9	1026786	1367999	964149	1199065
10	544766	910905	4076612	458301
11	315221	158049	378254	434855
12	41086	18426	30065	29375
13	0	0,00	2973	45364
14	119926	197161	2050	136091
15	7845	1504	18743	8742
16	0	1302	10288	447
17	0	3667	11662	0
18	0	5233	271	0
19	0	0	0	0
19 trGM	4509	47456	0	0
Durme	39486	236910	13401	11719
Rupel	0	0	0	0

Tabel 14 – Overzicht van de jaarlijkse stortvolumes voor zand over verschillende periodes

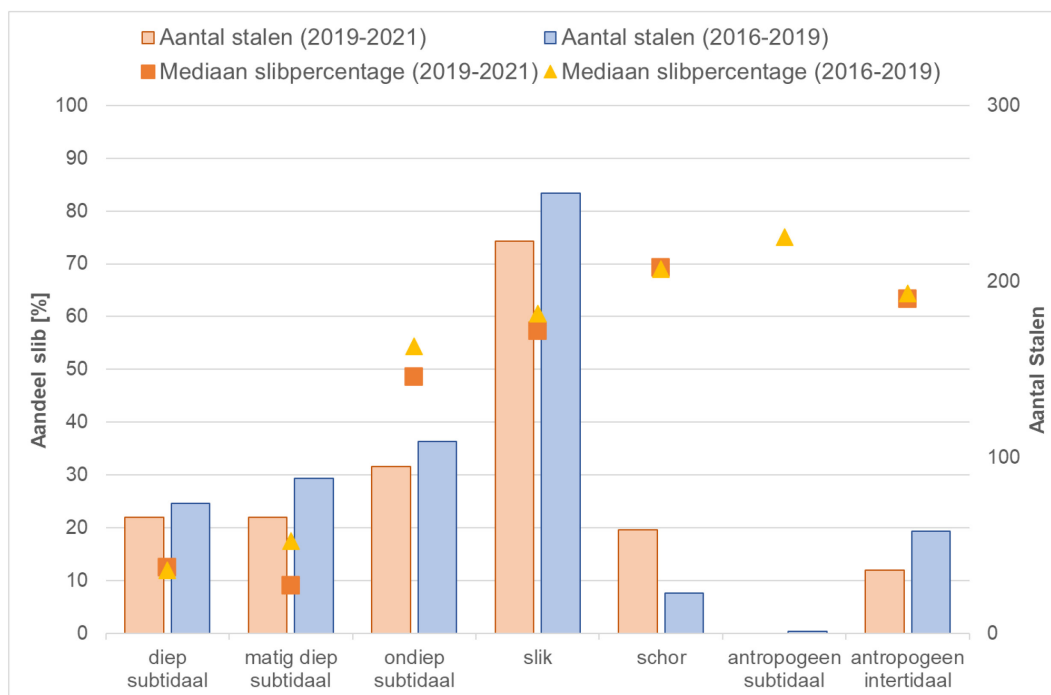
OMES-segment	2001-2011	2011-2016	2016-2019	2019-2022
9	1505455	2348676	1520410	1901332
10	0	0	0	0
11	30400	0	297723	401719
12	37829	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
19 trGM	0	0	0	0
Durme	0	0	0	0
Rupel	0	0	0	0

Tabel 15 – Overzicht van de jaarlijkse zandwinvolumes over verschillende periodes

OMES-segment	2001-2011	2011-2016	2016-2019	2019-2022
9	1043433	2912664	1074571	1295285
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	181533	0	0	0
13	0	40033	13547	10449
14	0	8533	2887	87673
15	0	0	6940	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
19 trGM	0	0	0	0
Durme	0	0	0	558
Rupel	0	20508	0	5353

5.1.3 Lithologie

Figuur 21 toont het aantal bodemstalen en het aandeel (P50) van de slibfractie dat voor de stalen binnen eenzelfde ecotoopklasse werd berekend voor de periode 2016-2019 en 2019-2021. Het aandeel van de slibfractie is in elke ecotooptype quasi gelijk gebleven, met uitzondering van het matig diep subtidaal en het ondiep subtidaal waar het slibpercentage licht gedaald is. De daling is echter minder dan 10%. Er kan geconcludeerd worden dat de lithologische samenstelling niet wezenlijk veranderd is tussen beide beschouwde periodes.



Figuur 21 – Aandeel van de slibfractie per ecotoopklasse voor periode 2019-2021 (oranje) en periode 2016-2019 (geel)

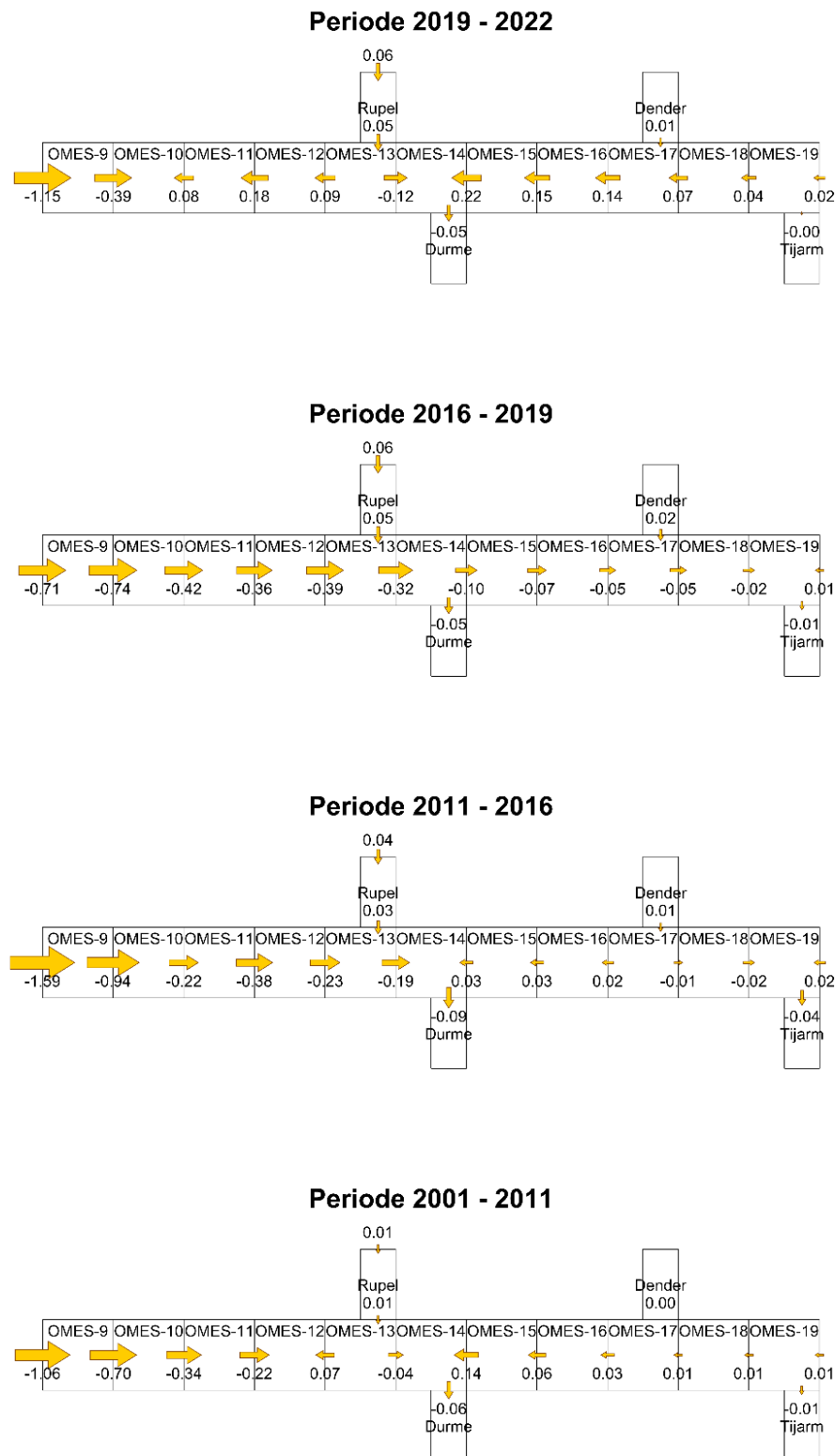
5.2 Sedimentbalans

Figuur 22 geeft de zandbalans weer voor de periode 2019-2022, 2016-2019, 2011-2016 en de periode 2001-2011. Uit de figuur blijkt dat, waar voor de 3 eerste periodes het zandtransport in de Beneden-Zeeschelde opwaarts gericht was, dit niet langer het geval is voor de periode 2019-2022. De 2 meest afwaartse segment (9 en 10) van de Beneden-Zeeschelde zijn nog wel importerend voor zand, maar de segmenten 11-13 vertonen een exporterend gedrag. Tussen segment 13 en 14 is het zandtransport ook opwaarts gericht. Voor de rest van de Zeeschelde is het zandtransport afwaarts gericht terwijl voor de periode 2016-2019 het zandtransport over de volledige Zeeschelde opwaarts gericht was. 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. Waar deze omslag echter in het verleden steeds meer opwaarts leek te verschuiven is in deze laatste periode de overgang van opwaarts naar afwaarts transport meer naar afwaarts verschoven.

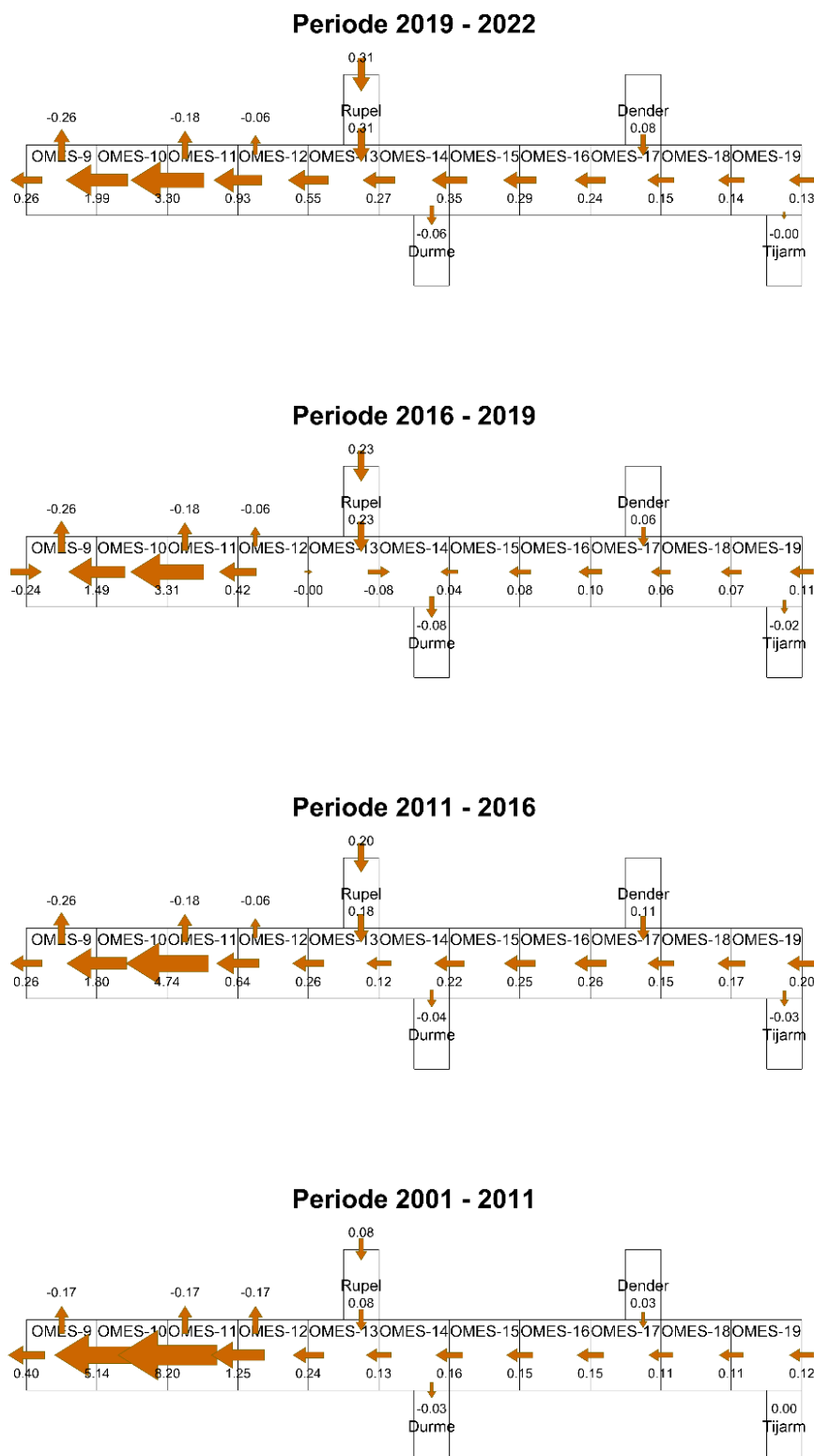
Door de trechtervorm van het estuarium dalen de residuele transporthoeveelheden naarmate men meer opwaarts gaat. De Zeeschelde neemt in breedte af van ca. 1500 m aan de grens tot ca. 50 m aan de meest opwaartse grens. De Durme importeert zand, terwijl de Rupel, met een continue influx van zoet water,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

Figuur 23 geeft de slibbalans weer voor de verschillende periodes. Uit deze 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 segment 13 en segment 14. Op de overgang tussen segment 12 en 13 is er quasi geen transport. De slibtransporten in de periode 2019-2022 zijn sterk gelijkend aan de transporten in de periode 2011-2016. De Durme blijft slib importeren uit de Zeeschelde.

Waar in de eerdere slibbalansen de residuele transporten enkel in het meest afwaartse deel van de Zeeschelde hoger waren dan in de rest van het estuarium en in de overige segmenten quasi gelijk bleven, is er nu een graduele stijging van de grootte van de slibtransporten van opwaarts naar afwaarts. Vervolgonderzoek is nodig om enerzijds de belangrijkste sinks en sources beter in beeld te brengen en anderzijds een onderbouwing te geven voor de vastgestelde verschillen.



Figuur 22 – Zandbalans voor de periode 2019-2022 (boven), periode 2016-2019, 2011-2016 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



Figuur 23 – Slibbalans voor de periode 2019-2022 (boven), periode 2016-2019, 2011-2016 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

5.3 De afwaartse uitkomst

Voor het berekenen van de sedimentbalans 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 $675 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, in opwaartse richting. Omgerekend naar sedimentmassa komt dit overeen met een opwaarts gericht transport van 1,07 MTDS/jaar.

De berekende zand- en slibtransporten ter hoogte van de grens (i.e. afwaartse rand van voorliggende sedimentbalans) over de periode 2019-2022 bedragen resp. -1,15 MTDS/jaar (zand) en 0,26 MTDS/jaar (slib). Wanneer beide fracties opgeteld worden, resulteert dit in een jaarlijks transport van 0,89 MTDS/jaar in opwaartse richting, wat ca. 15% lager ligt dan de aanname voor de Westerschelde.

Wanneer we de waarden vergelijken met deze uit eerdere sedimentbalans kunnen we enige variatie voorstellen. Over de periode 2016-2019 bedroeg het transport in opwaartse richting 0,95 MTDS/jaar, over de periode 2011-2016 1,33 MTDS/jaar en over de periode 2011-2011 0,66 MTDS/jaar. De transporten over de grens zijn echter in elke sedimentbalans opwaarts gericht.

Concluderend kan gesteld worden dat de door RWS gehanteerde opwaartse randvoorwaarde voor het berekenen van de sedimentbalans voor de Westerschelde niet steeds 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 we 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)) en 2016-2019 ((Plancke *et al.*, 2023), werd de zand- en slibbalans voor de Zeeschelde en haar bijrivieren berekend voor de periode 2019-2022. Hiervoor werden topo-bathymetrische gegevens gecombineerd met ecotopenkaarten en de zand-slibfractie uit een groot aantal bodemstalen om het zand- en slibbudget voor het Vlaams deel van het Schelde-estuarium te berekenen. Verschillende ecotopen vertoonden belangrijke verschillen in sedimentsamenstelling, waarbij diepe subtidale habitats overwegend zanderig zijn, terwijl intergetijdengebieden een veel meer uitgebalanceerde zand-slibsamenstelling hebben. Aangezien zand en slib gekenmerkt worden door een verschillend gedrag bij sedimenttransport werd er methodologisch voor 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.

De zandbalans over de periode 2019-2022 toont een afwaarts gericht transport over al de OMES-segmenten van de Zeeschelde met uitzondering de 2 meest afwaarts gelegen OMES-segmenten. Voor de eerdere zandbalansen van 2016-2019, 2011-2016 en 2001-2016 was het zandtransport eveneens opwaarts gericht in de meest afwaartse macrocellen. Opwaarts van OMES-segment 11 was er echter van 2001 tot 2019 een verschuiving van het punt waar het transport van afwaarts naar opwaarts omslaat, dit punt bewoog zich bij elke nieuwe sedimentbalans meer naar opwaarts. Bij deze laatste sedimentbalans zien we echter dat dit omslagpunt zich opnieuw meer richting afwaarts bevindt. Verder blijkt dat de transporthoeveelheden wat betreft zand hoger worden in de meer afwaarts gelegen segmenten. In deze zone zijn bagger- en stortwerkzaamheden een belangrijke factor binnen het residueel zandtransport. Voor het verschuiven van het omslagpunt van opwaarts naar afwaarts transport is de bovenafvoer hoogstwaarschijnlijk de bepalende factor.

De slibbalans over de periode 2019-2022 toont een afwaarts gericht transport over de volledige Zeeschelde. Dit is gelijkaardig aan de voorgaande periodes 2001-2011 en 2011-2016. Het slibtransport wordt enerzijds sterk beïnvloed door de fluviatiele aanvoer, maar ook de baggeren en storten hebben een belangrijke invloed, aangezien de huidige strategie het gebaggerde slib vanaf de baggerlocatie opwaarts verplaatst, wat tegen de natuurlijke transportrichting in werkt.

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 2019-2022 blijkt het berekende sedimenttransport 15% lager te zijn dan de aanname, voor de periode 2016-2019 11% lager, voor de periode 2011-2016 24% hoger te zijn dan de aanname, terwijl dit voor de periode 2001-2011 38% lager was. Hoewel de berekende transporten steeds opwaarts gericht zijn, wijkt de grootte van het transport in sommige periodes af ten opzichte van de ingeschatte waarden die gebruikt worden voor de Westerschelde. Daarom 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 en de Royerssluis die sinds oktober 2021 buiten gebruik is omwille van een totaal-renovatie, 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 en 2016-2019) 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 (zie Plancke et al., 2023), 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, het (vooral slib) transport op seizoenale tijdschaal (e.g. lopend onderzoek om invloedsfactoren te bepalen en trachten te kwantificeren) of effecten van infrastructuurprojecten (bv. werken Oosterweel-verbinding voor de komende periode).

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.
- 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. 64 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). Fluviatiele 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>

Van Hooydonk, H.; Govers, G.; Plancke, Y. (2022) Analyse van de porositeit en begin van beweging bij gesimuleerd Schelde-sediment - Stage Waterbouwkundig Laboratorium, Stagerapport, 28 pp.

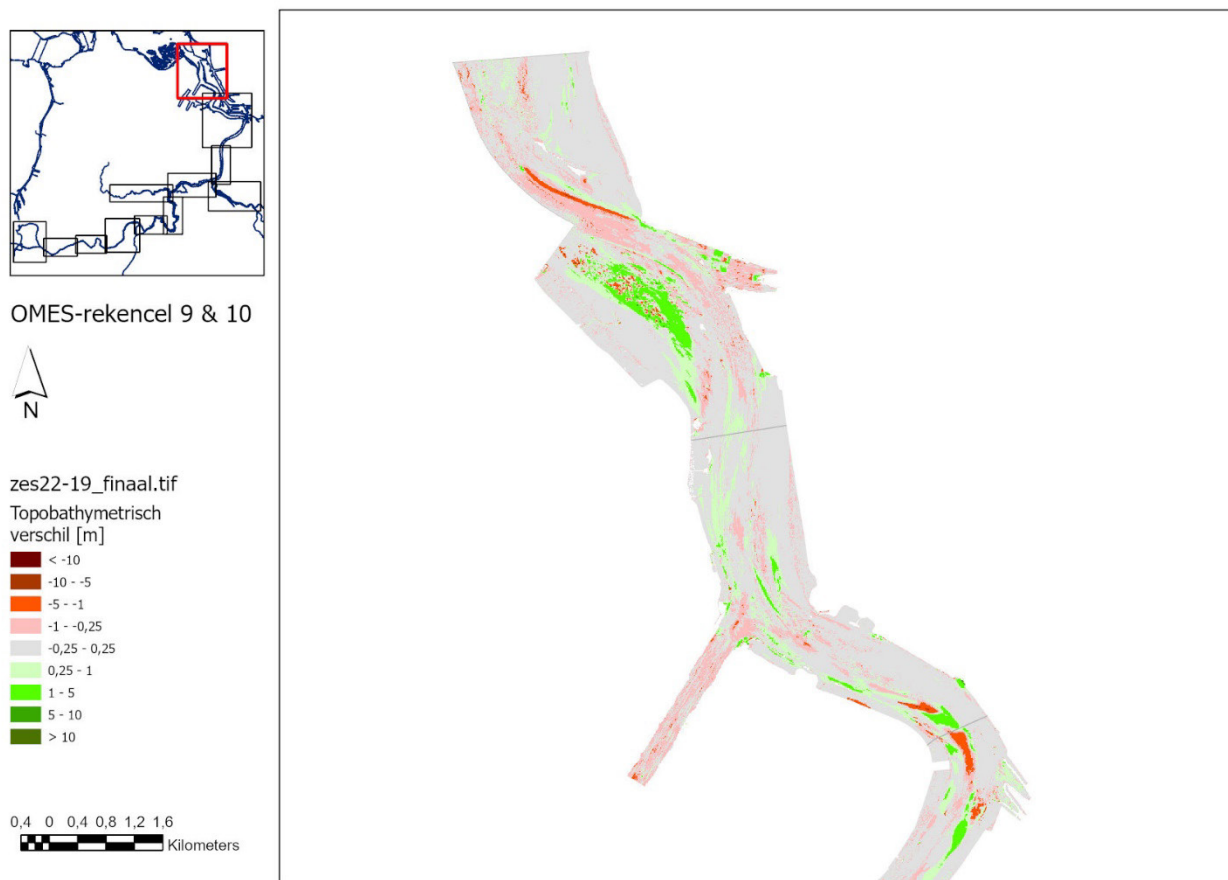
Vos, G.; Bastiaensen, E.; De Bruyn, L.; De Schutter, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2011). Lithologische kaart Beneden Zeeschelde: resultaten korrelanalyse sedimentstalen. *WL Rapporten*, 736_56. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Vos, G.; Plancke, Y.; Meire, D. (2023). Sedimentbalans 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. Available at: <https://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=381225>

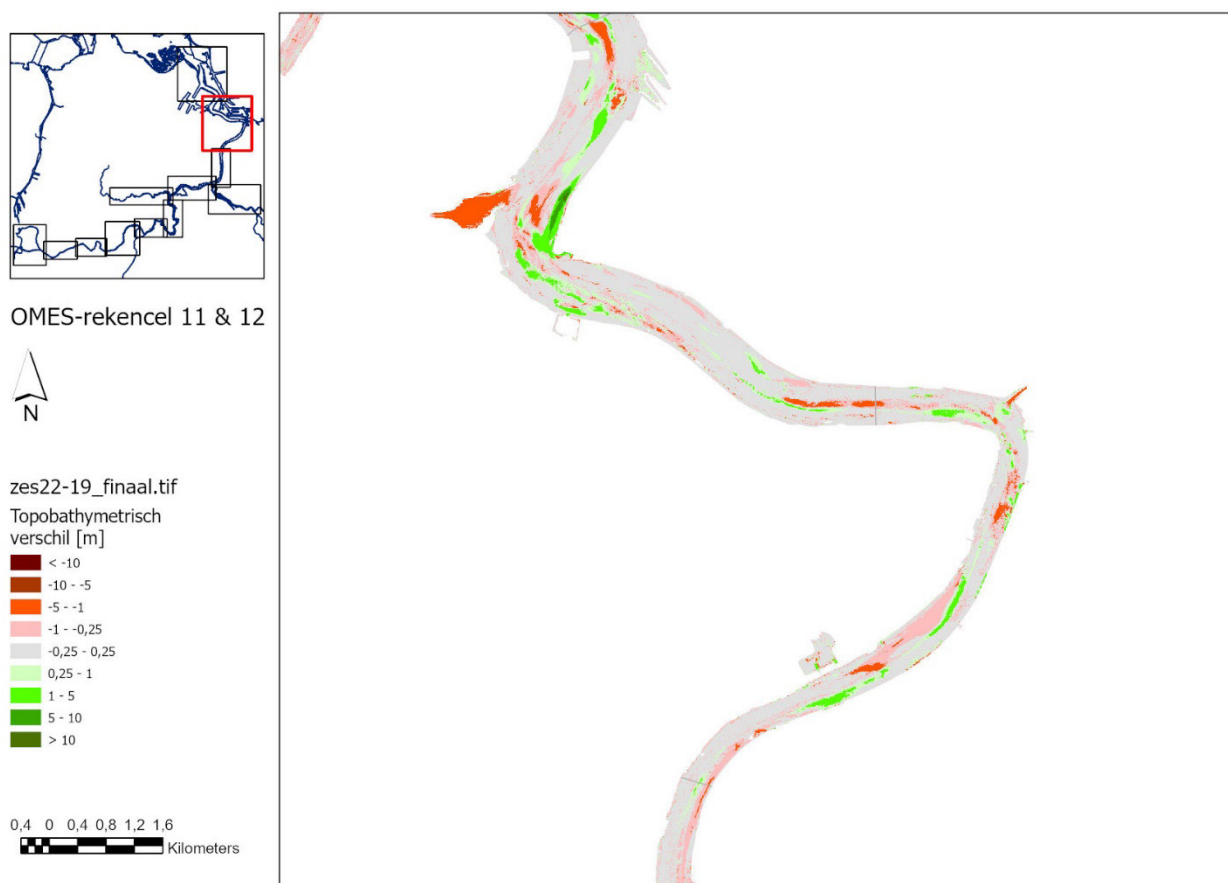
Vos, G.; Van De Moortel, I.; Meire, D.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2019). Validatie fysische parameters: optimalisatie methodologie voor het bepalen van sedimentaanvoer naar het Schelde-estuarium. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 12_076_13. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <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

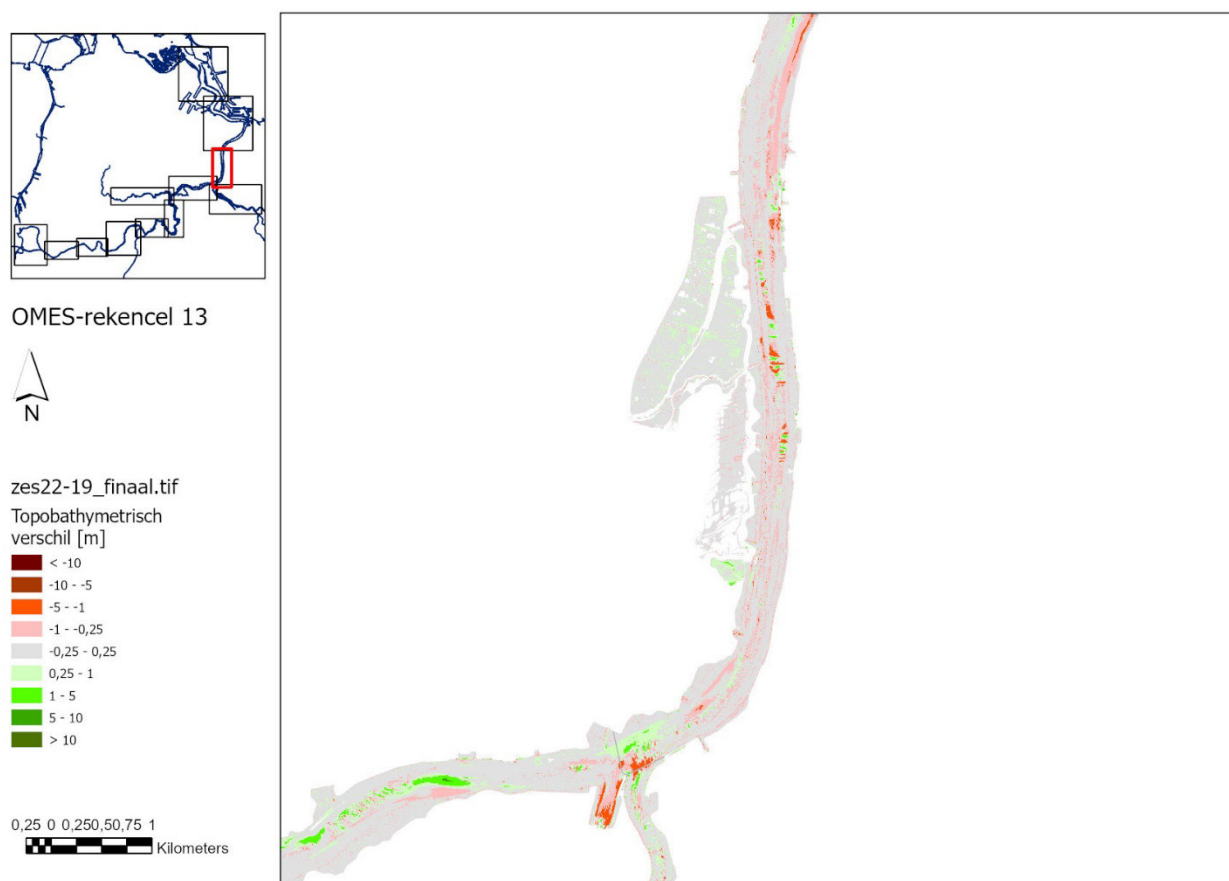
8 Bijlage 1 – Verschilkaarten



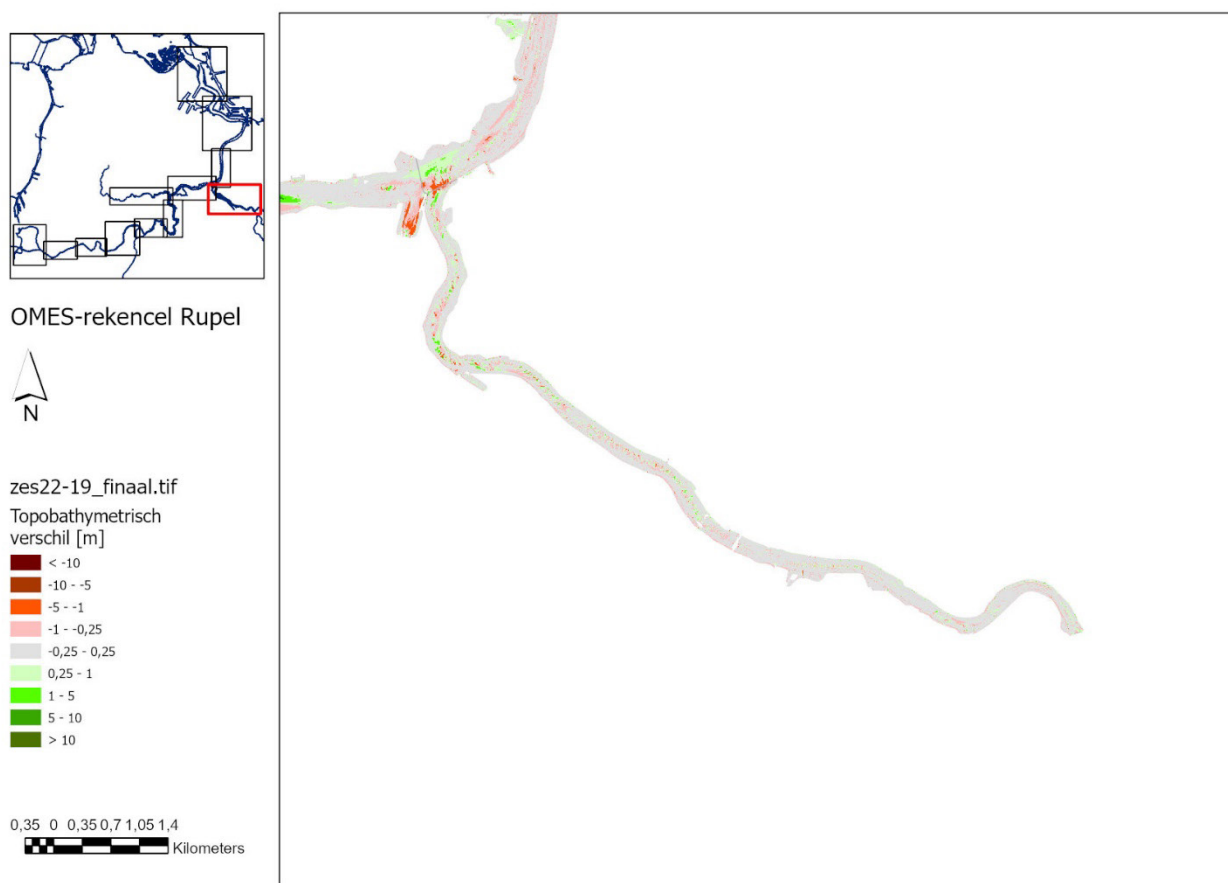
Figuur 24 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 9 en 10



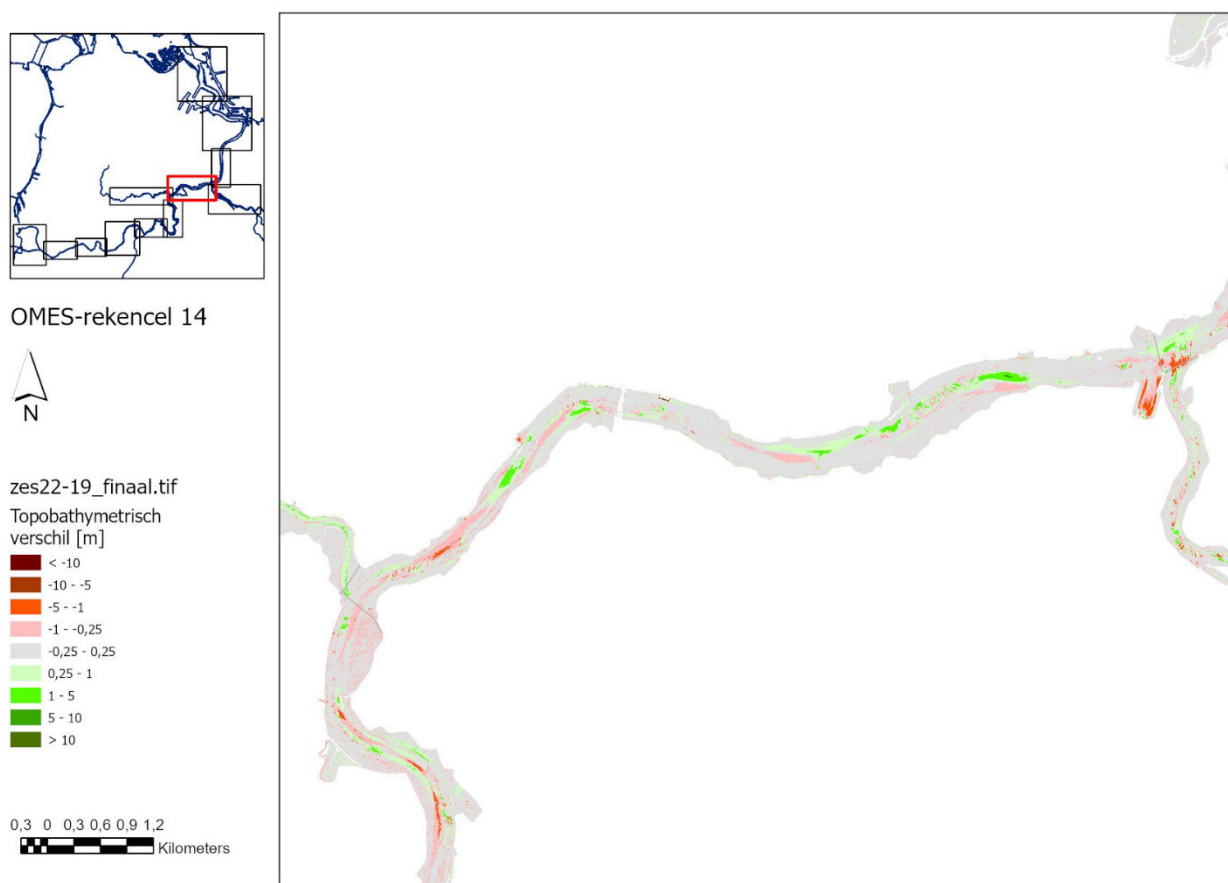
Figuur 25 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 11 en 12



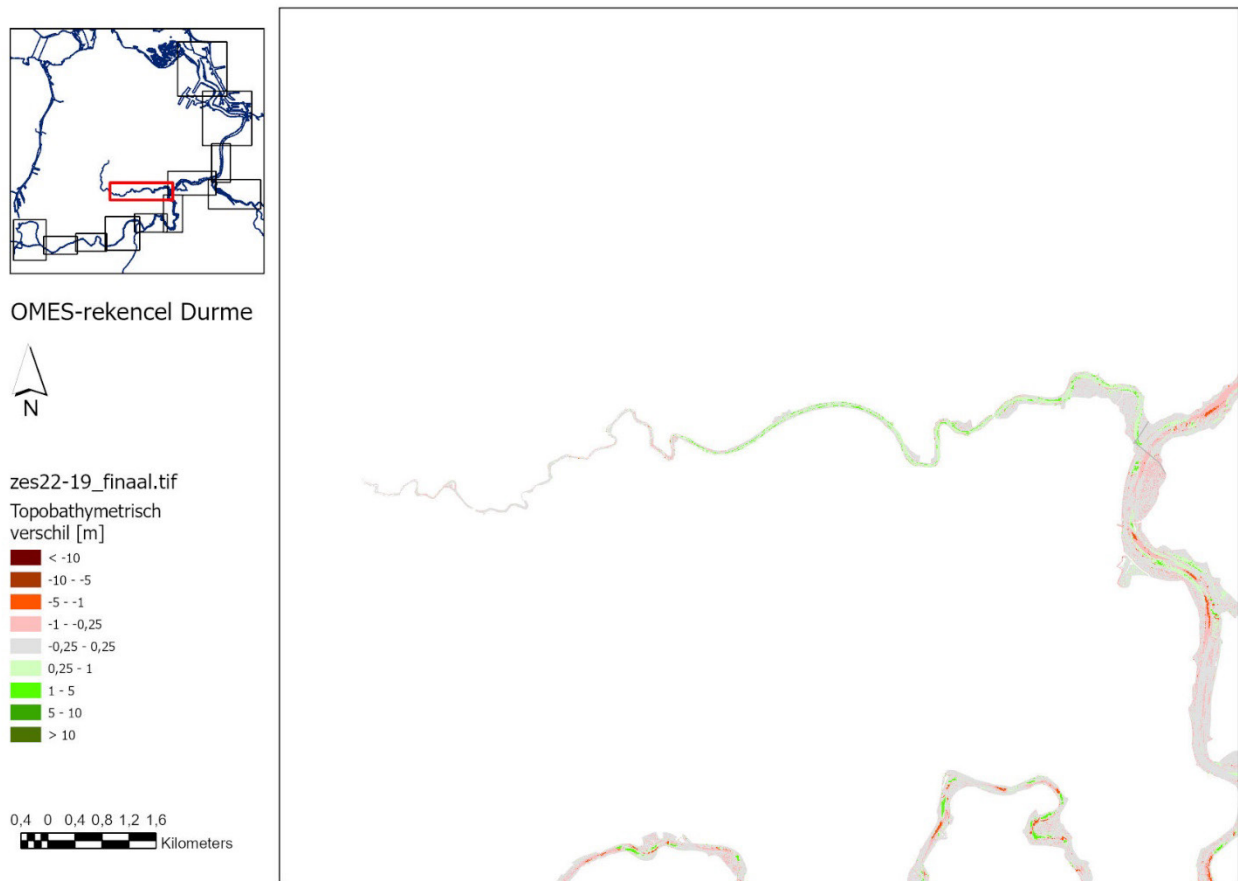
Figuur 26 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel 13



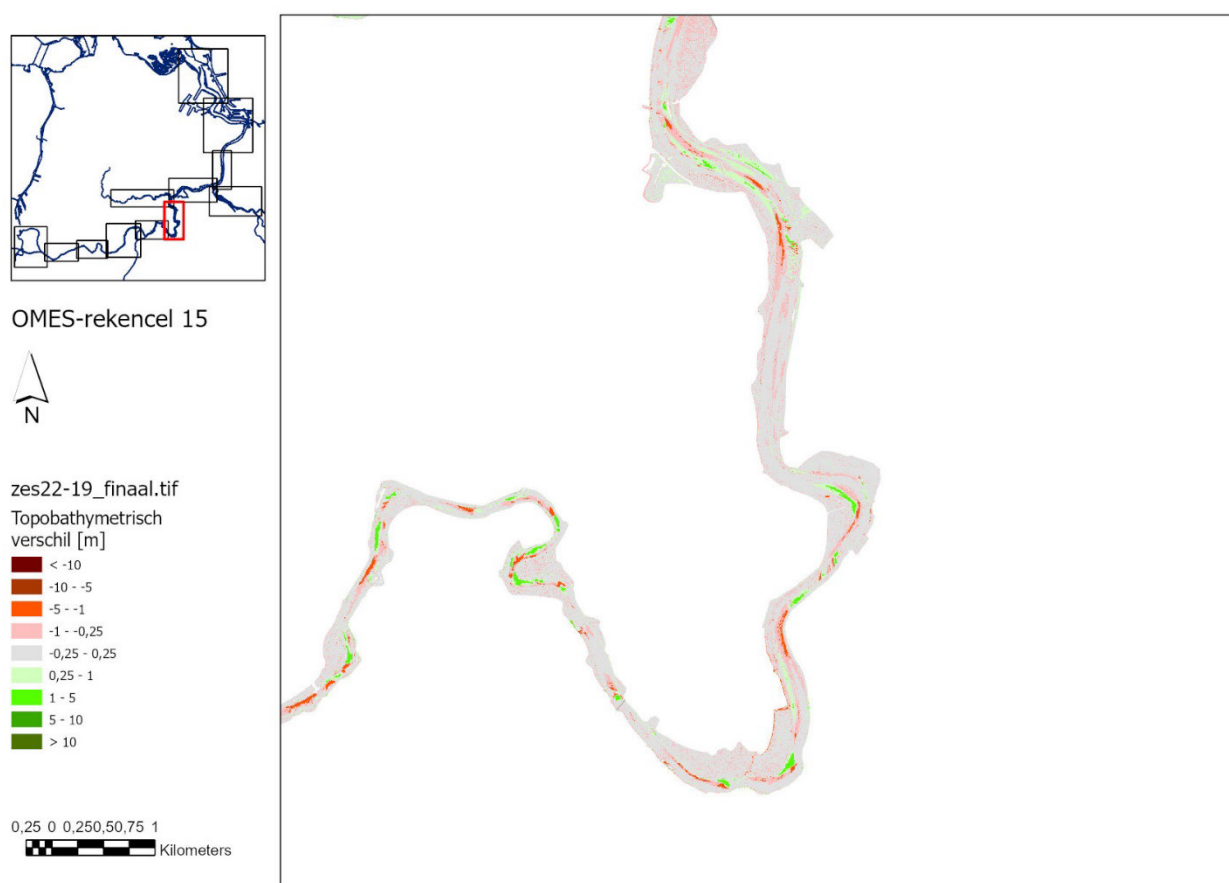
Figuur 27 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel Rupel



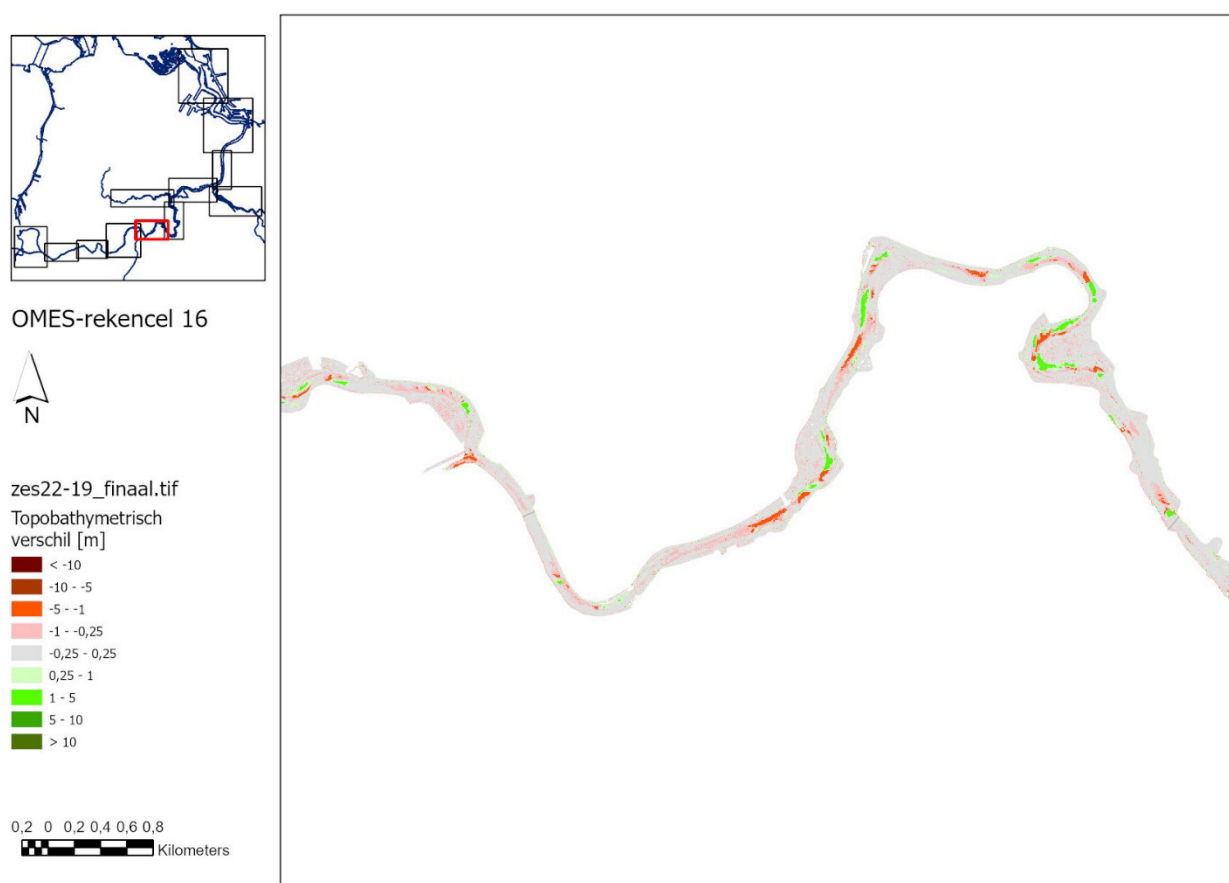
Figuur 28 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekenel 14



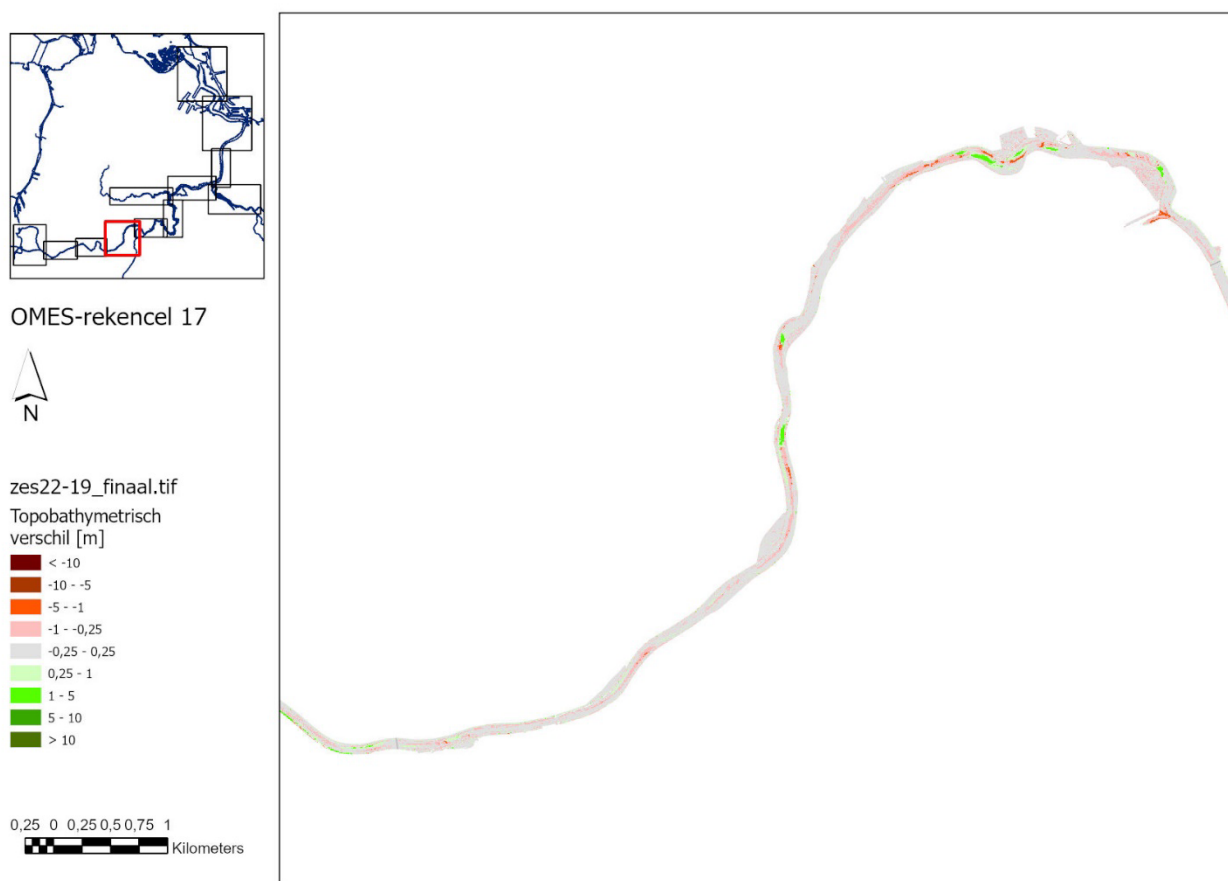
Figuur 29 – Verschilkaart 2019-2022 voor rekencel Durme



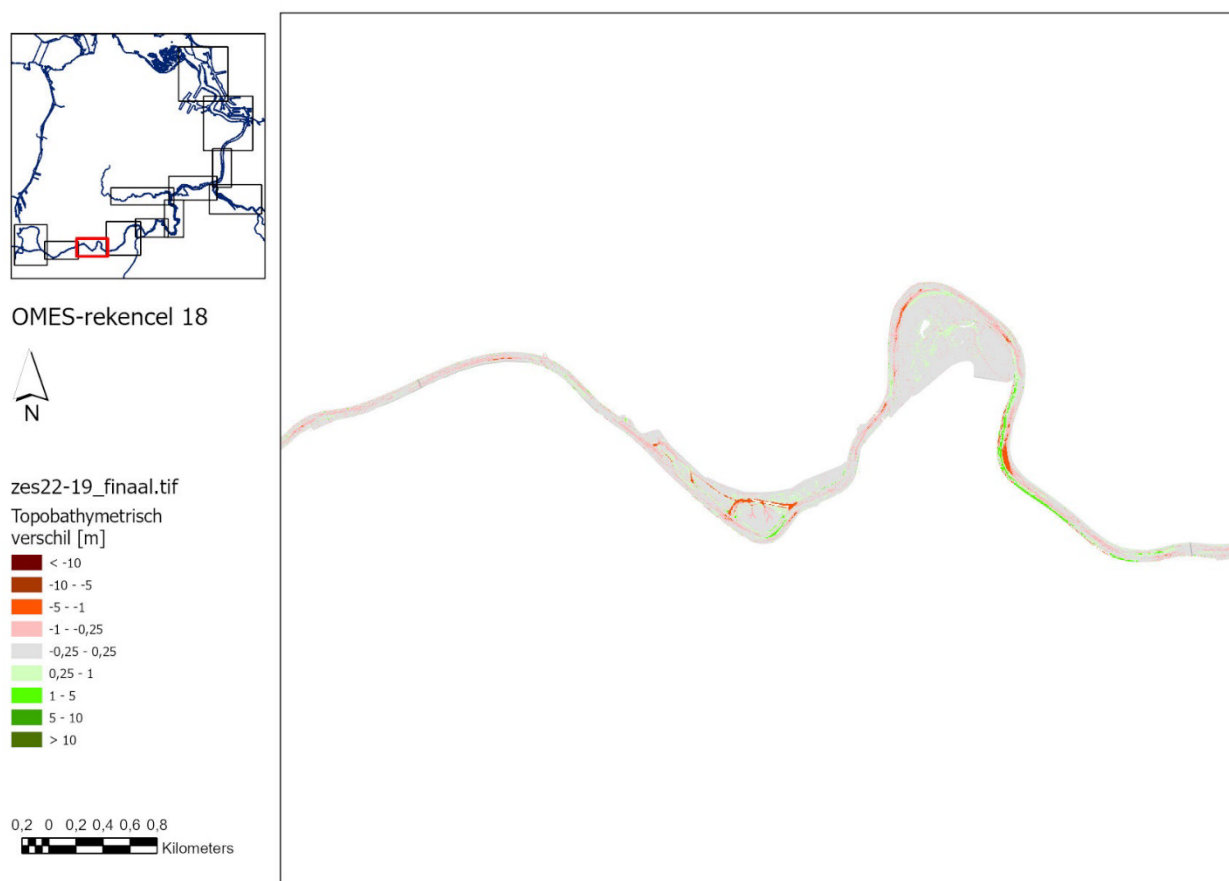
Figuur 30 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 15



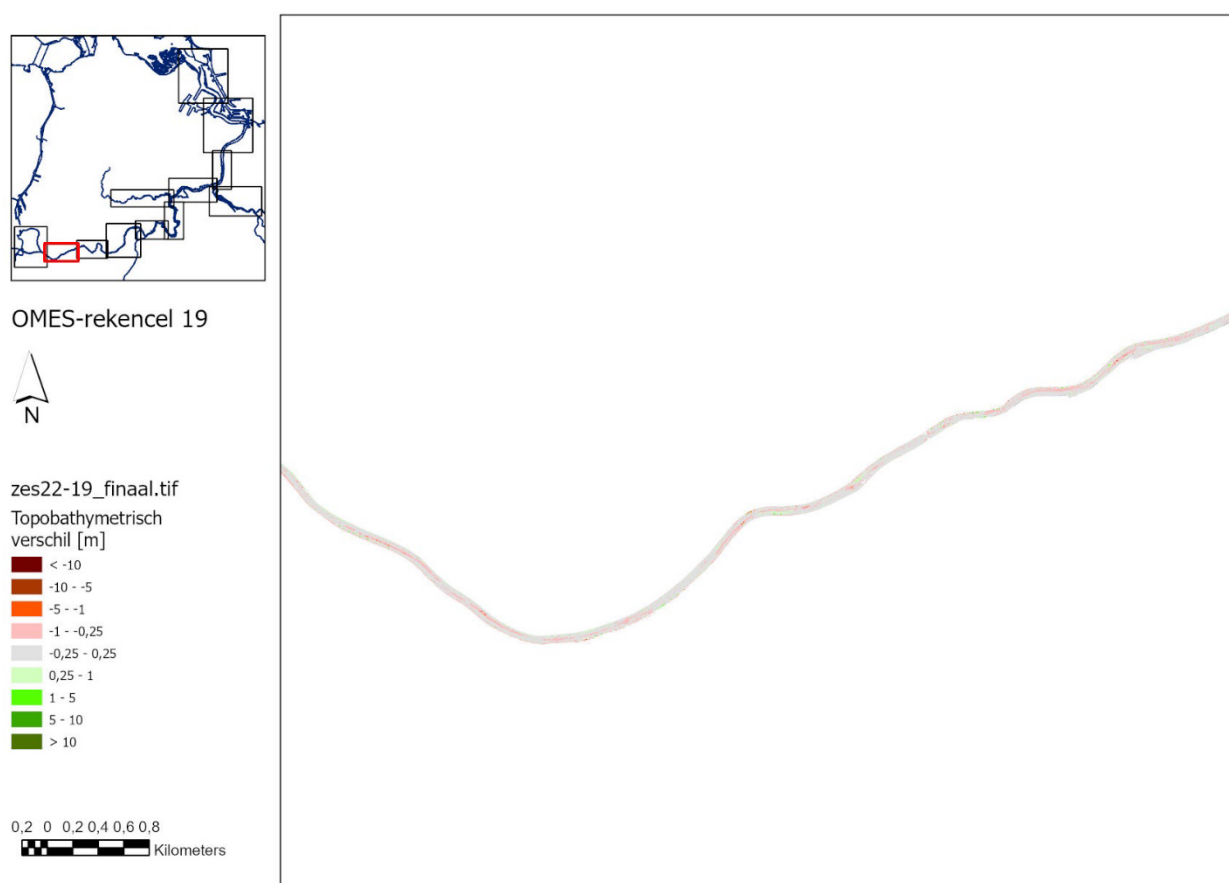
Figuur 31 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 16



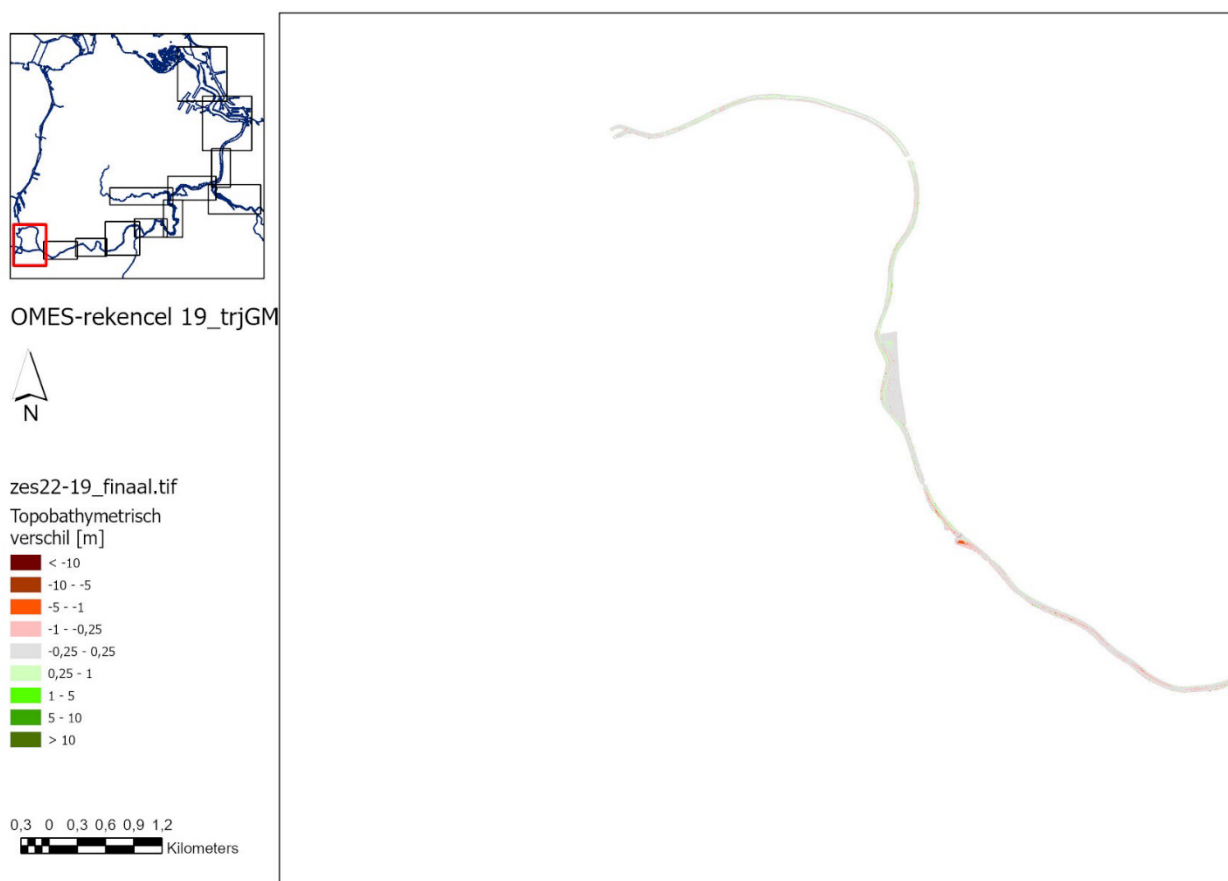
Figuur 32 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 17



Figuur 33 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekenel 18

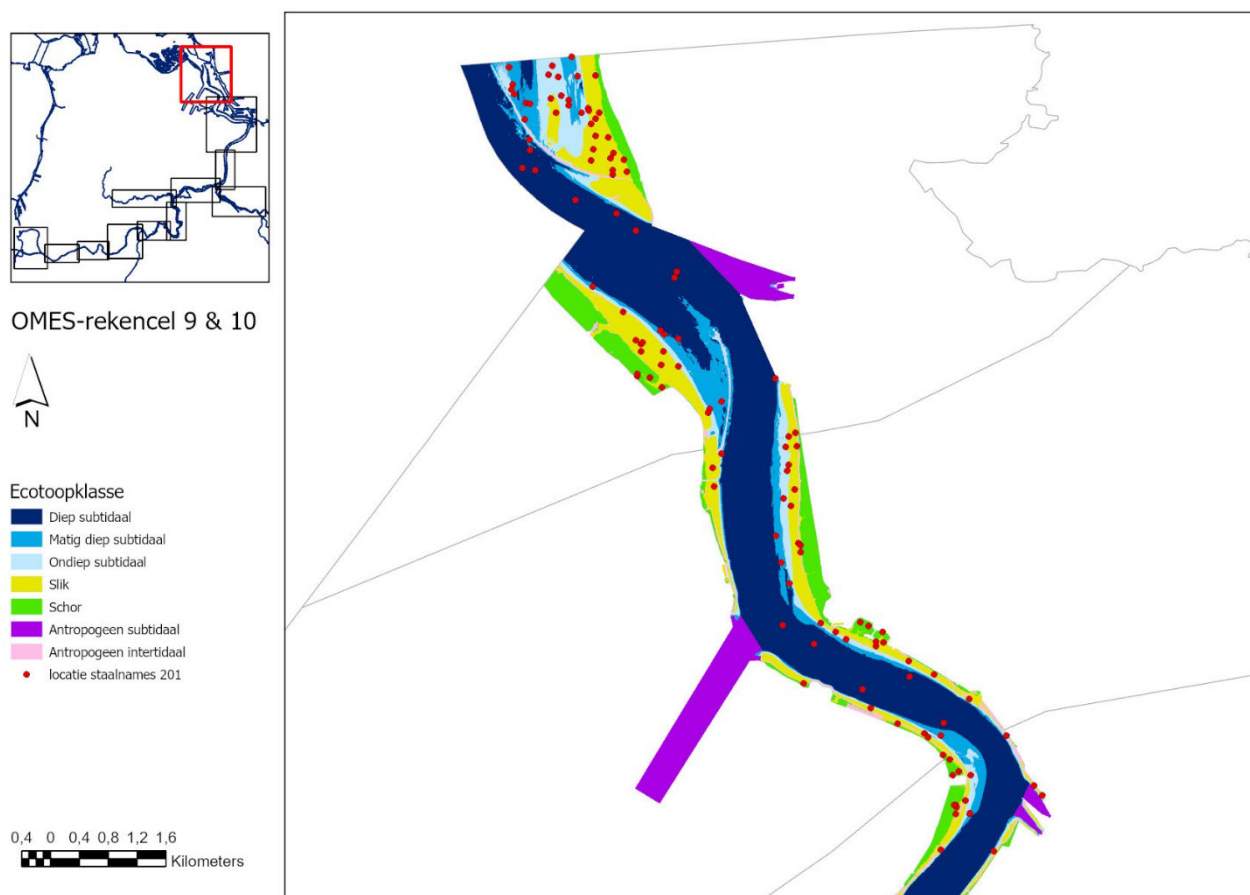


Figuur 34 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekenel 19

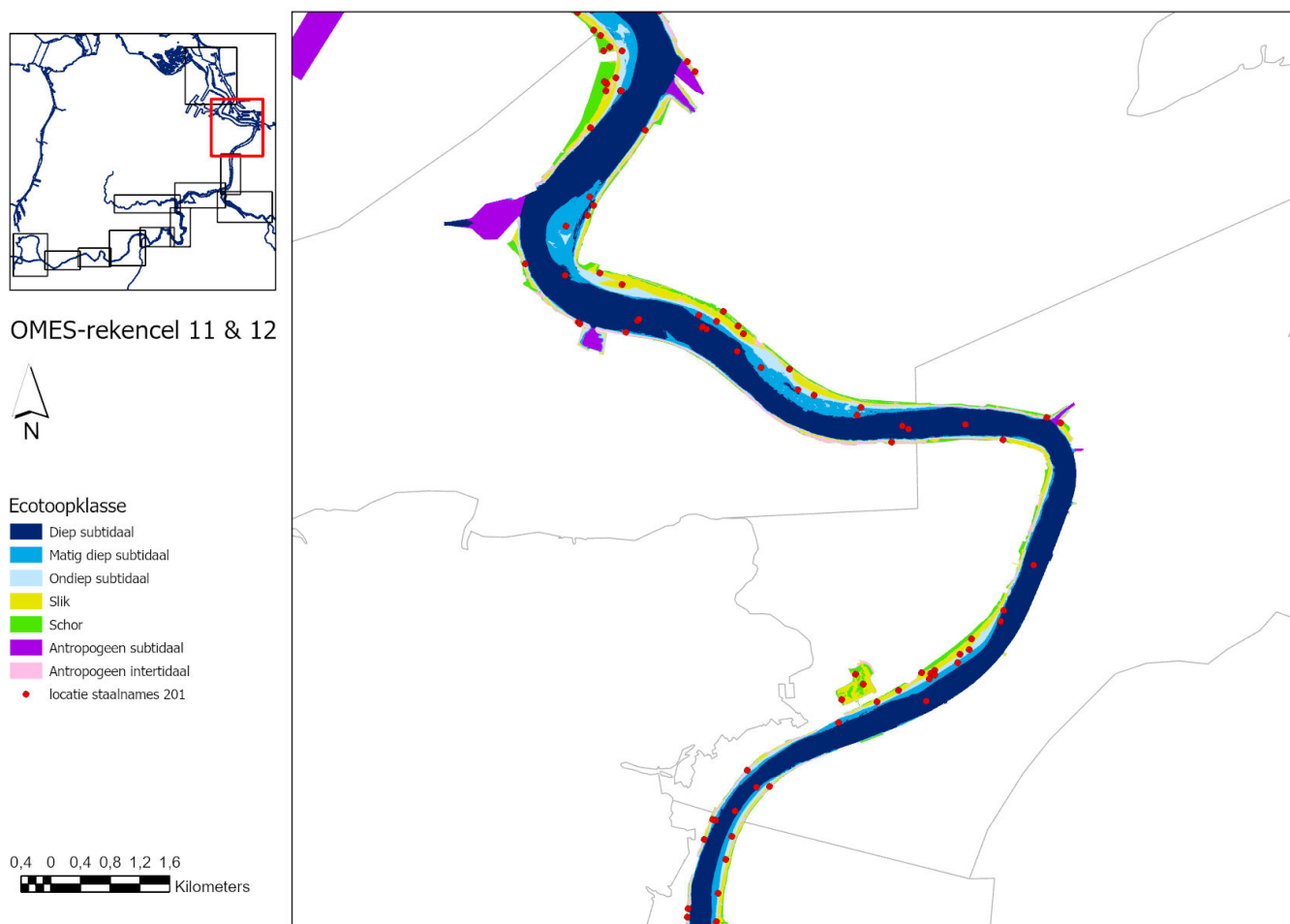


Figuur 35 – Verschilkaart 2022-2019 voor rekencel 19 traject Gentbrugge-Melle

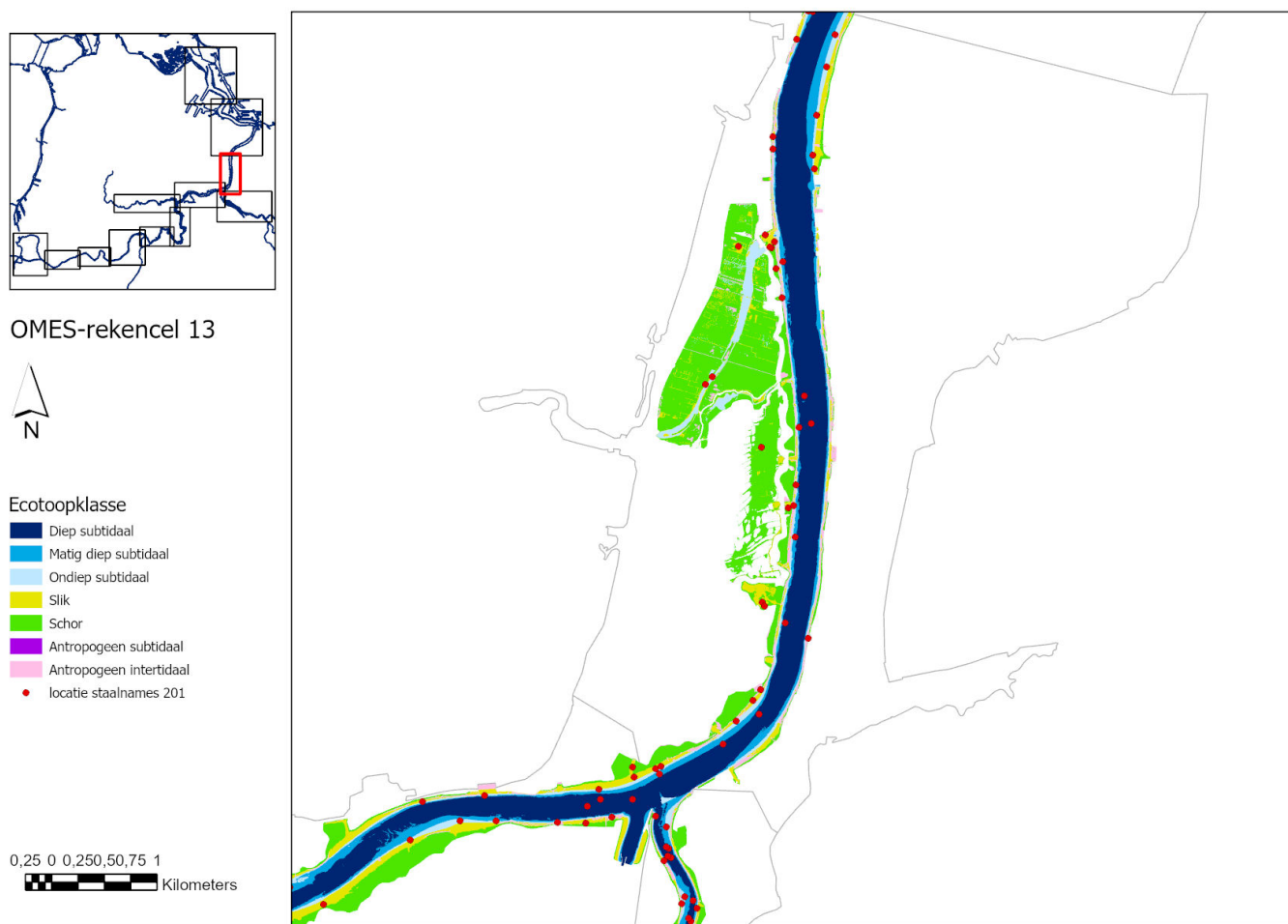
9 Bijlage 2 – Locatie staalnamepunten



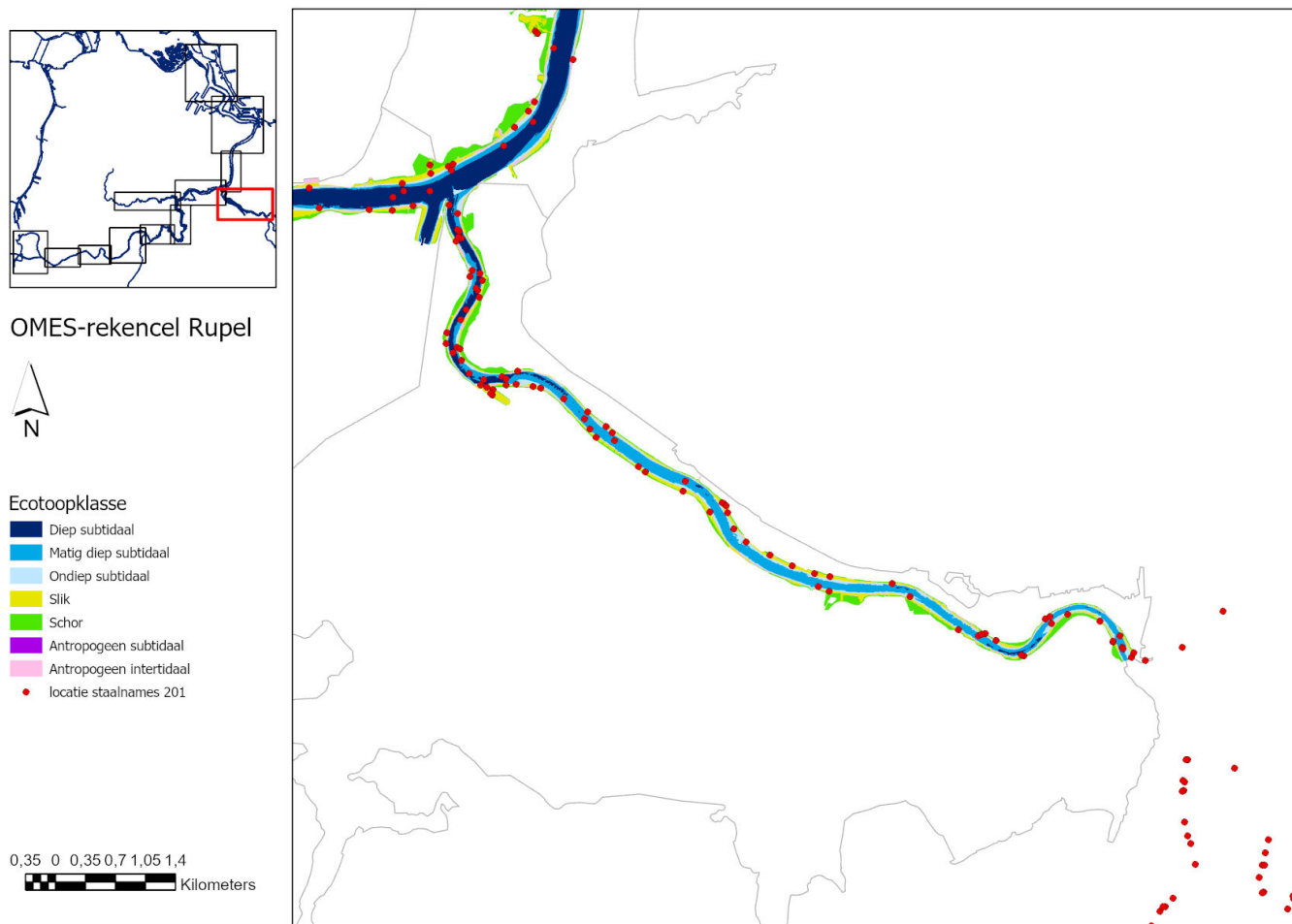
Figuur 36 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 9 en 10



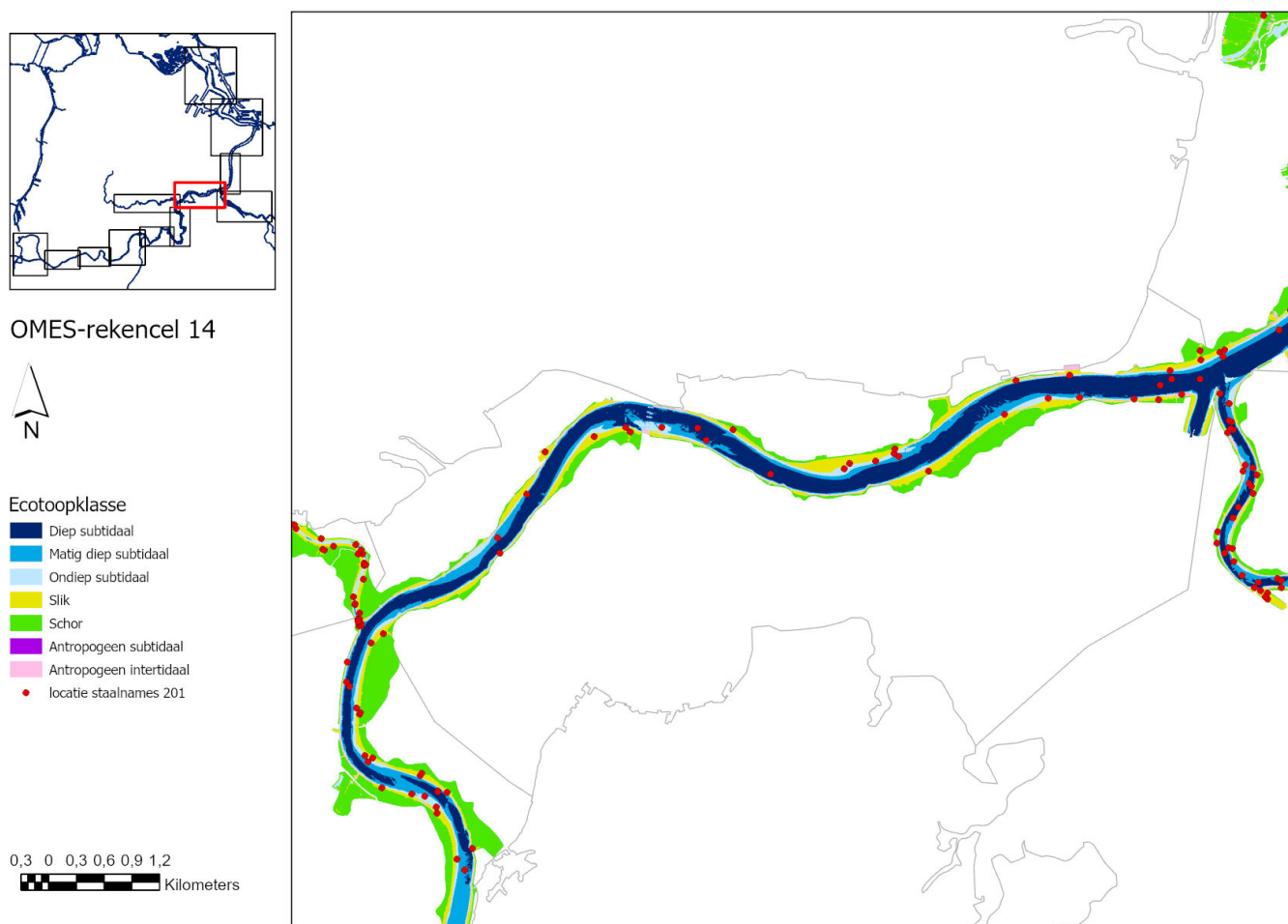
Figuur 37 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 11 en 12



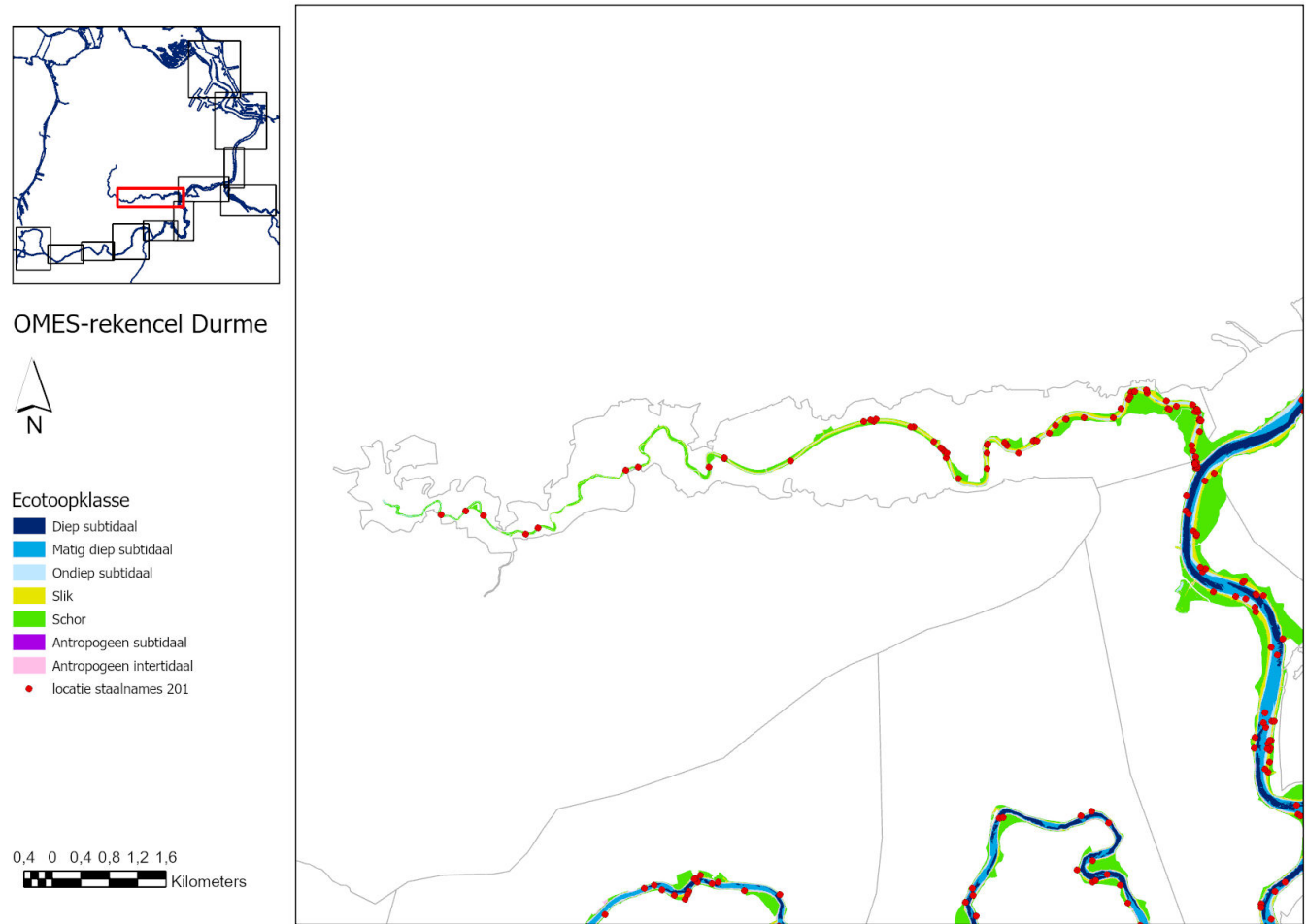
Figuur 38 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 13



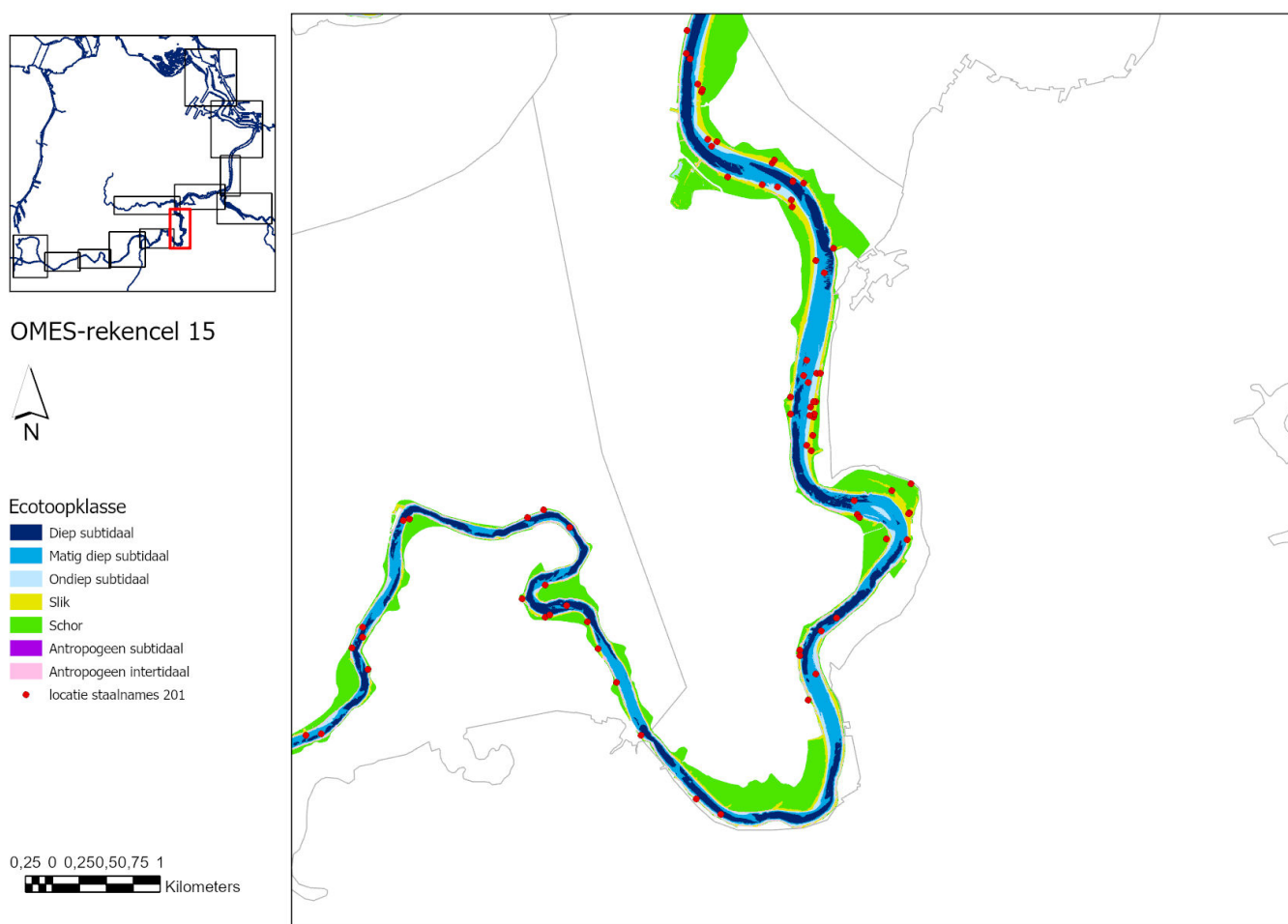
Figuur 39 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Rupel



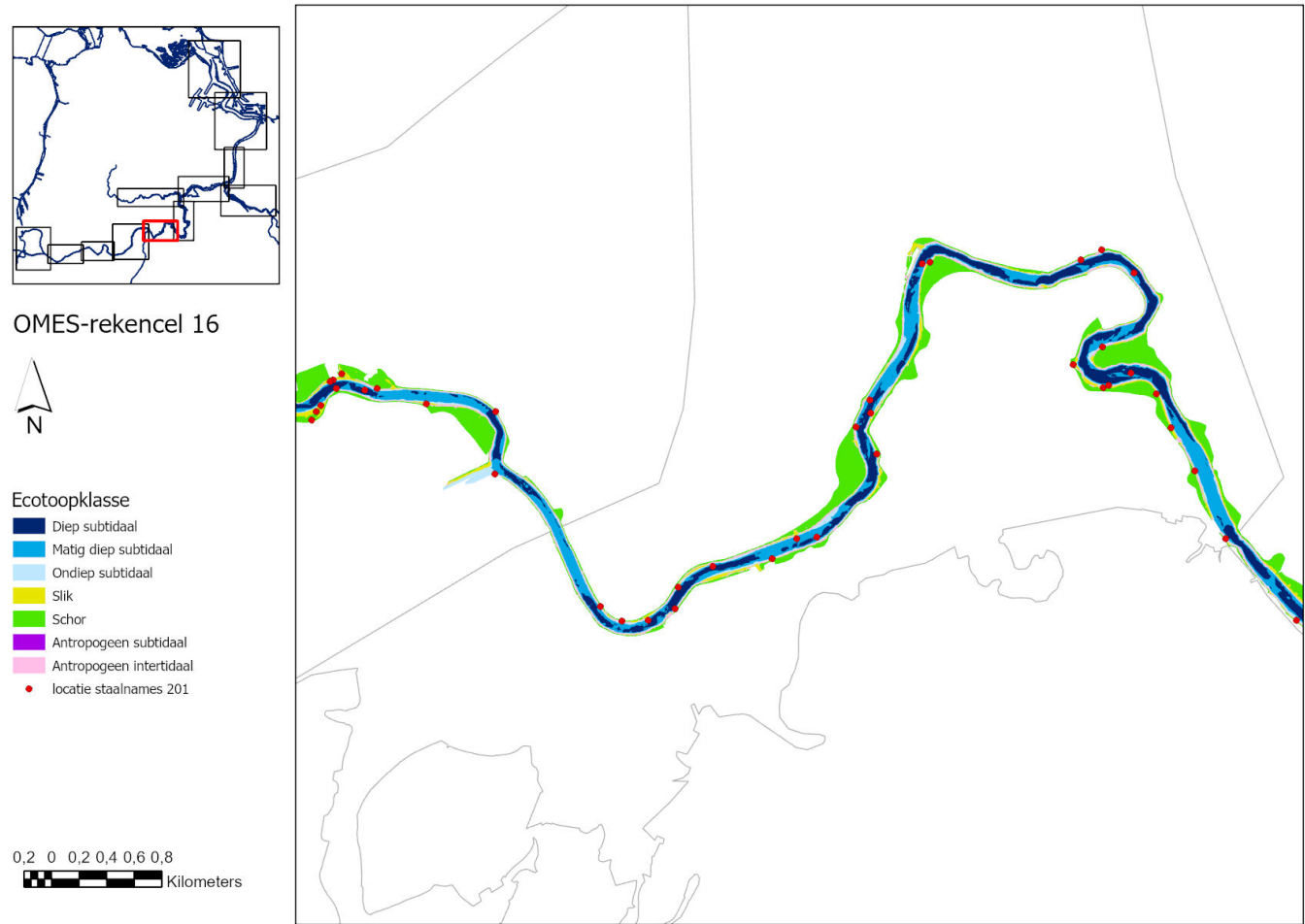
Figuur 40 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 14



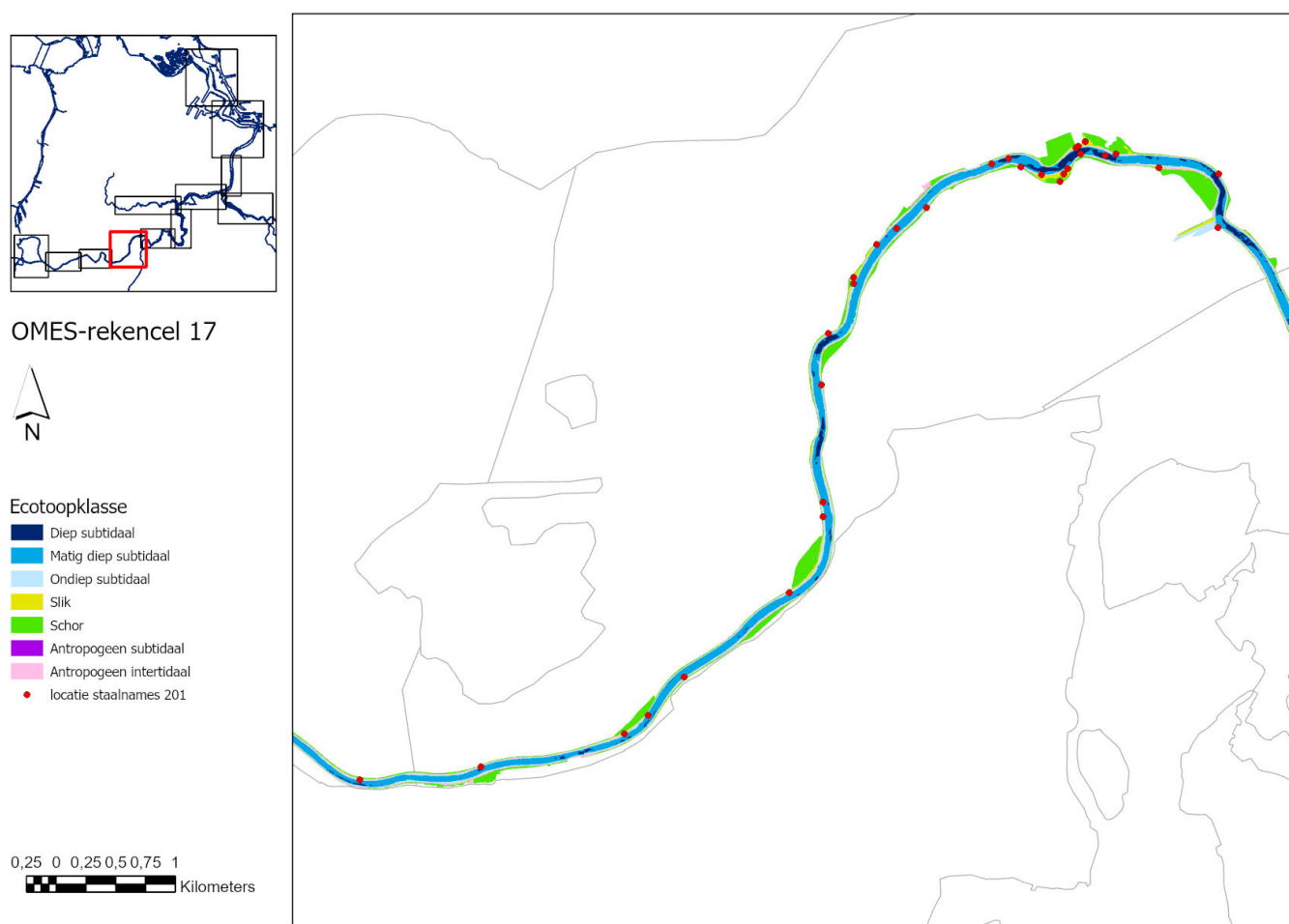
Figuur 41 – Locatie staalnamepunten voor rekencel Durme



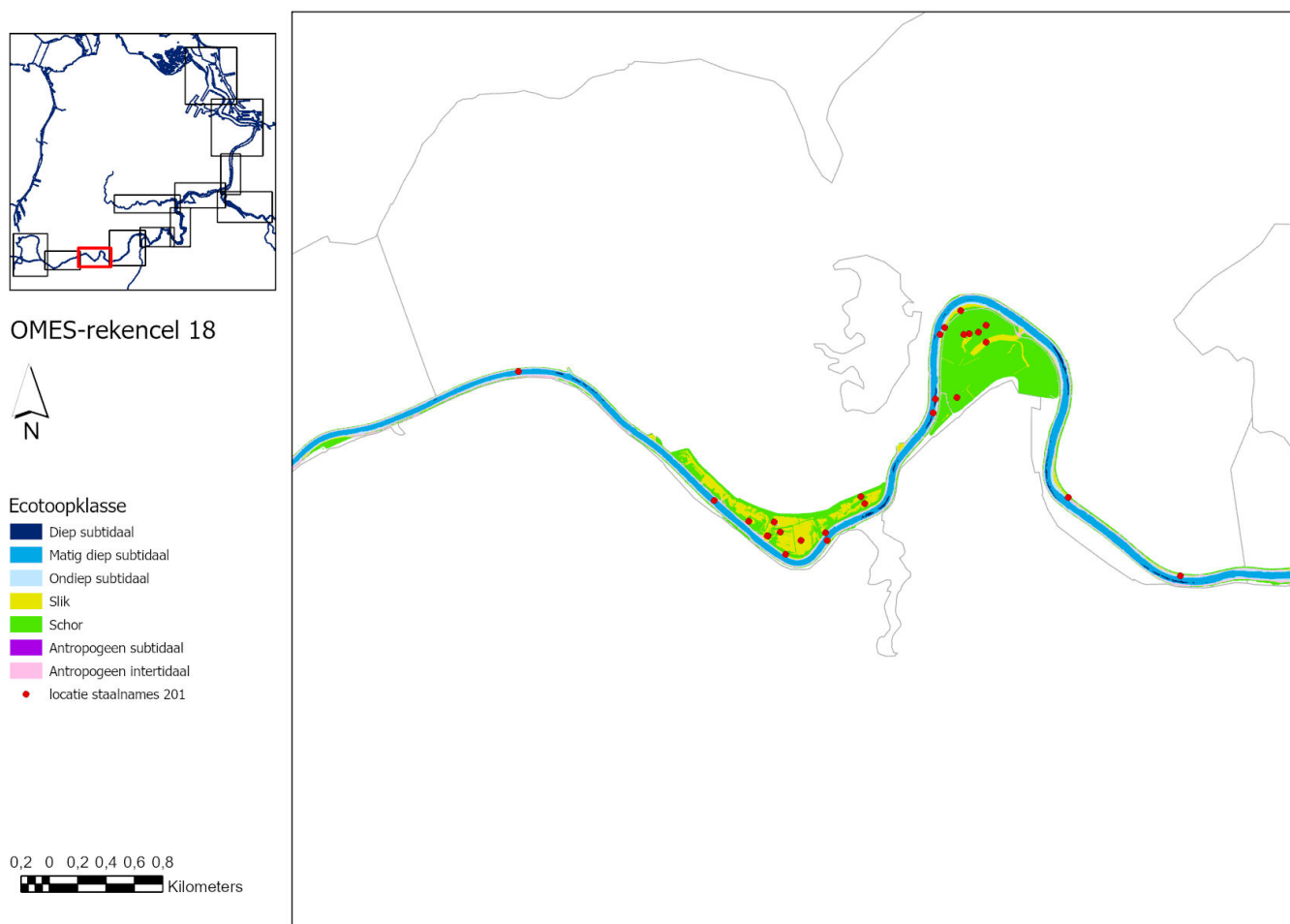
Figuur 42 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 15



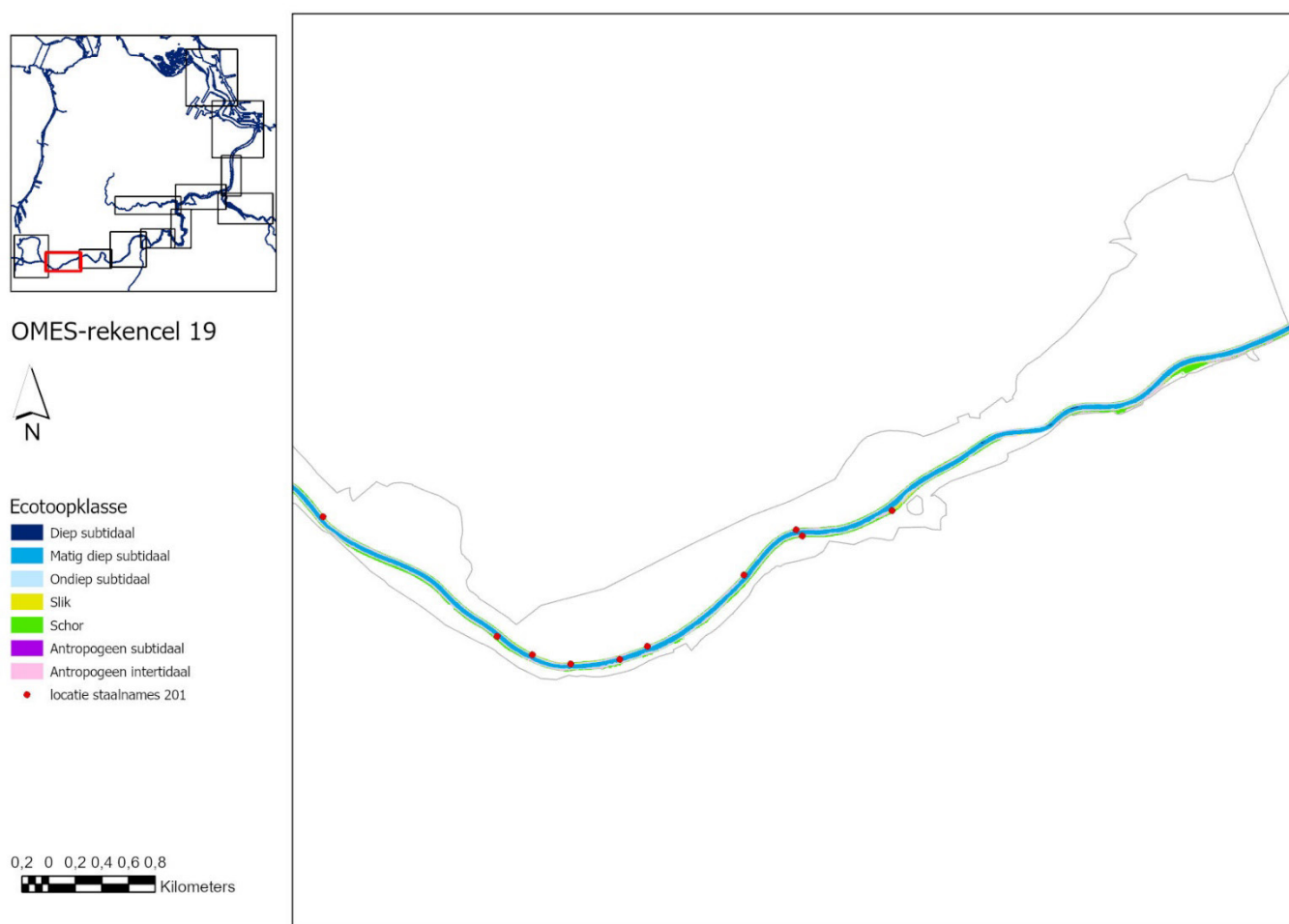
Figuur 43 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 16



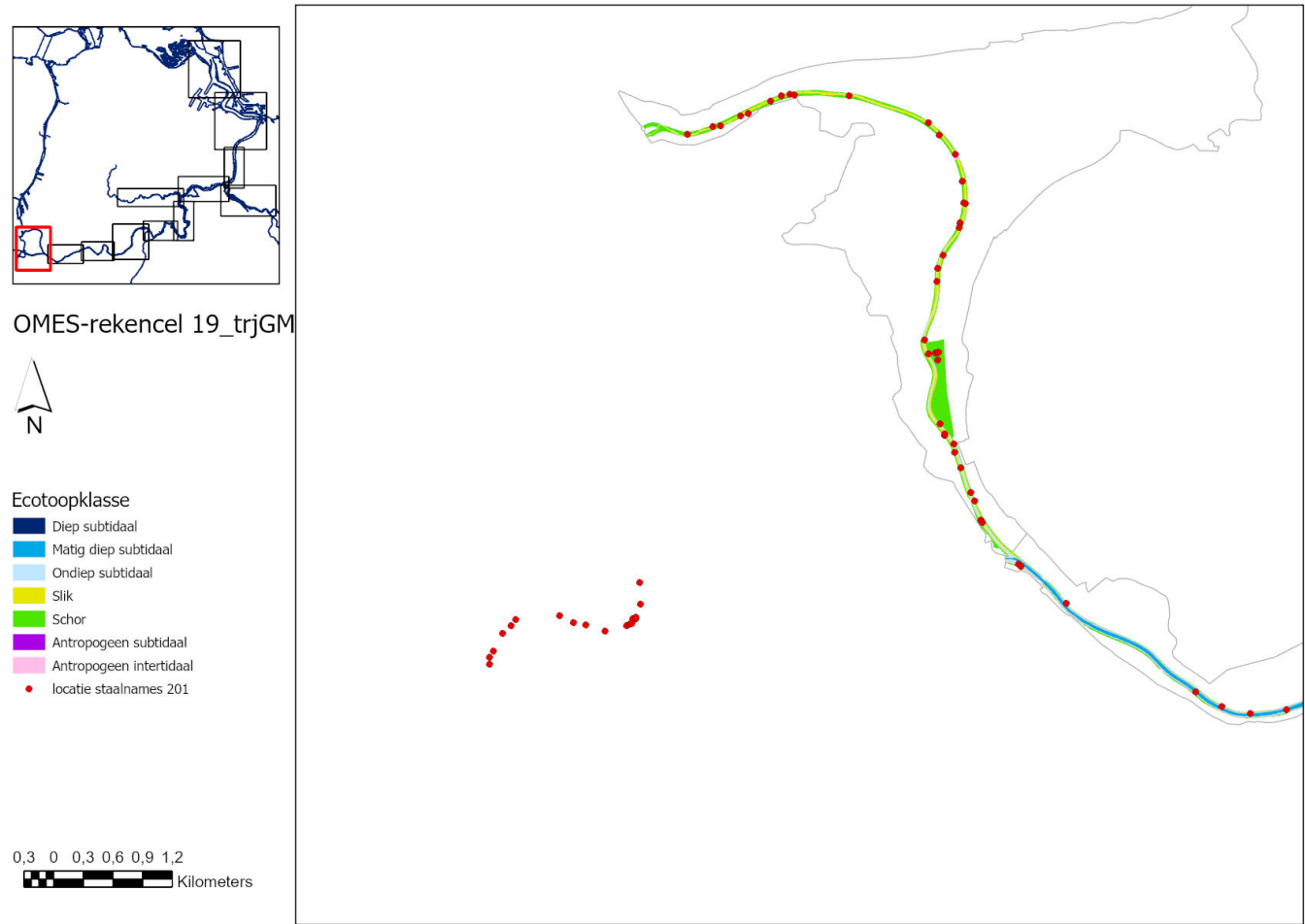
Figuur 44 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 17



Figuur 45 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 18



Figuur 46 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19



Figuur 47 – Locatie staalnamepunten voor rekencel 19 traject Gentbrugge – Melle

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