



Vlaanderen
is wetenschap

13_131_8
WL rapporten

Integraal plan Boven-Zeeschelde

Deelrapport 8
Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Integraal plan Boven-Zeeschelde

Deelrapport 8 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme

Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

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 2017
 D/2017/3241/141

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Integraal plan Boven-Zeeschelde: Deelrapport 8 – Sedimentbalans Zeeschelde, Rupel en Durme. Versie 4.0. WL Rapporten, 13_131_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

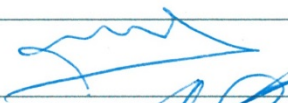

Opdrachtgever:	W&Z Afdeling Zeeschelde	Ref.:	WL2017R 13_131_8
Keywords (3-5):	Sedimentbalans; Sedimenttransport; Zand; Slib; Zeeschelde		
Tekst (p.):	42	Bijlagen (p.):	22
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vandenbruwaene, W.; Levy, Y.
------------	------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Plancke, Y.; Vanlede, J.	
Projectleider:	Vanlede, J.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Verwaest, T.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

In voorliggend rapport werd de sedimentbalans berekend voor de Zeeschelde, Rupel en Durme over de periode 2001-2011. De sedimentbalans werd uitgerekend volgens de rekencellenmethodiek wat toelaat om sedimenttransporten over de randen van de rekencellen heen te berekenen. Er werd een onderscheid gemaakt tussen zand- en slibtransport, gebruik makende van de bodemsamenstelling per ecotopengroep, en de lithologische samenstelling van de fluviatiele sedimentaanvoer (opwaartse rand). De sedimentbalans houdt rekening met antropogene invloeden door volumeveranderingen ten gevolge van baggeren, storten, zandwinning, fluxen naar de havendokken en ontpolderingen te implementeren. Bovendien werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om na te gaan hoe representatief de bekomen transportrichtingen voor het referentiescenario zijn.

Berekening van de sedimentbalans en bijhorende transportrichtingen voor het referentiescenario toont aan dat slibtransport in de Zeeschelde en Rupel afwaarts gericht is over de periode 2001-2011. Voor de Durme en de tij-arm Gentbrugge-Melle is het slibtransport opwaarts gericht. Zand wordt in de Beneden-Zeeschelde (in tegenstelling tot slib) hoofdzakelijk in de opwaartse richting getransporteerd, in de Boven-Zeeschelde is het zandtransport hoofdzakelijk afwaarts. Net zoals voor slib verloopt het zandtransport in de Rupel afwaarts, en in de Durme en de tij-arm Genbrugge-Melle opwaarts. De gevoeligheidsanalyse toont aan dat de bekomen transportrichtingen voor het referentiescenario ook in grote mate bekomen worden voor de overige scenario's.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Methodiek	2
2.1 Relatie tot eerdere studies.....	2
2.2 Tijdsperiodes	3
2.3 Rekencellen	4
2.4 Volumeverschillen	4
2.4.1 Verschilgrid topo-bathymetrieën	4
2.4.2 Zand en slib.....	6
2.5 Bodemsamenstelling per ecotoop.....	7
2.6 Antropogene invloeden.....	9
2.6.1 Baggeren, storten en zandwinning.....	9
2.6.2 Havendokken.....	13
2.6.3 Ontpolderingen	14
2.7 Vastlegging randvoorwaarde sedimentimport rivieren	15
2.8 Berekening zand- en slibtransport over randen rekencellen	17
2.9 Gevoeligheidsanalyse	17
3 Gegevens	19
3.1 Topo-bathymetrie.....	19
3.2 Ecotopenkaart	19
3.3 Bodemstalen en granulometrie.....	20
3.4 Baggergegevens.....	21
4 Resultaten en Bespreking.....	22
4.1 Bodemsamenstelling en ecotopenareaal.....	22
4.2 Sedimentbalans	26
4.2.1 Volumeverschillen op basis van topo-bathymetrie.....	26
4.2.2 Volumes baggeren, storten en zandwinning.....	28
4.2.3 Totale sedimentbalans	30

4.3	Sedimenttransport	34
4.3.1	Referentiescenario	34
4.3.2	Gevoeligheidsanalyse	36
4.3.3	Slibflux naar de waterkolom.....	39
5	Conclusies en aanbevelingen	40
5.1	Conclusies.....	40
5.2	Aanbevelingen.....	40
6	Referenties	41
Appendix A – Verschilkaarten		B1
Appendix B – Ecotopenkaarten en bodemstalen.....		B11

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht synoptische bathymetrieën voor de deelgebieden Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme.....	3
Tabel 2 – Bodemsamenstelling subtidaal (mediaanwaardes op basis van bodemstalen) voor de rekencellen van de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel.....	13
Tabel 3 – Overzicht slibfluxen doorheen sluiscomplexen over periode 2001-2011	14
Tabel 4 – Overzicht ophoging ontpolderingsgebieden 2001-2011	14
Tabel 5 – Zand- en slibgehalte van het fluviaatiele sediment in de rivieren Bovenschelde, Rupel en Dender. p25 = 25 ^{ste} percentiel, p50 = mediaanwaarde, p75 = 75 ^{ste} percentiel.	16
Tabel 6 – Overzicht van de opgelegde randvoorwaarden voor sedimentimport vanuit de rivieren over de periode 2001-2011	16
Tabel 7 – Scenario’s gevoeligheidsanalyse met bijhorende randvoorwaarden.....	18
Tabel 8 – Overzicht bodemstaalgegevens.....	20

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Jaarlijkse zand- en slibtransporten over de randen van de Westerschelde macrocellen, berekend over de periode 1994-2000 op basis van de zand- en slibbalans (Cleveringa, 2013)	3
Figuur 2 – Opdeling Zeescheldbekken volgens de OMES compartimentering	4
Figuur 3 – Verschilkaart op basis van de 2011 en 2001 bathymetrieën (2011 min 2001).....	5
Figuur 4 – De geaggregeerde ecotopenkaart.....	8
Figuur 5 – Zand en slib gehalten (in %) per geaggregeerde ecotopenklasse in de Zeeschelde, voorgesteld aan de hand van mediaanwaardes (bolletjes) en de 25 ^{ste} en 75 ^{ste} percentielwaardes (foutenvlaggen).....	9
Figuur 6 – Overzicht van de baggerlocaties in de Zeeschelde.....	10
Figuur 7 – Overzicht van de stortlocaties in de Zeeschelde	11
Figuur 8 – Schematische voorstelling van de rekencellen met aanduiding van de randen voor fluviaatiele sedimentimport.....	16
Figuur 9 – Berekening sedimenttransport voor 3 fictieve rekencellen met een opgelegde randvoorwaarde van 0,5 Mm ³	17
Figuur 10 – Overzicht van de ecotopen onderscheiden in de kartering van 2010, gerangschikt volgens areaal.....	19
Figuur 11 – Ecotopenkaart 2010 (geaggregeerd) met aanduiding van de bodemstaallocaties opgesplitst per dataset.....	20
Figuur 12 – Bodemsamenstelling van het ecotoop diep subtidaal	22
Figuur 13 – Bodemsamenstelling van het ecotoop matig diep subtidaal	23
Figuur 14 – Bodemsamenstelling van het ecotoop ondiep subtidaal	23
Figuur 15 – Bodemsamenstelling van het ecotoop antropogeen diep subtidaal	24
Figuur 16 – Bodemsamenstelling van het ecotoop slik.....	24
Figuur 17 – Bodemsamenstelling van het ecotoop schor	25
Figuur 18 – Areaal aan ecotopen per rekencel	25
Figuur 19 – Relatieve verhouding aan ecotopen per rekencel.....	26
Figuur 20 – Netto volumeverandering op basis van de topo-bathymetrieën uit 2001 en 2011.	27
Figuur 21 – Netto volumeverandering voor rekencel 9 op basis van de topo-bathymetrieën uit 2001 en 2011, opgesplitst per ecotoop.....	27
Figuur 22 – Gebaggerde profievolumes zand (inclusief zandwinning) en slib over de periode 2001 tot 2011.	28
Figuur 23 – Gestorte profievolumes zand en slib over de periode 2001 tot 2011.	28
Figuur 24 – Schematische voorstelling van de slibfluxen ten gevolge van baggeren en storten (blauwe pijlen) en de slibextracties (rode pijlen), berekend over de periode 2001-2011.....	29
Figuur 25 – Schematische voorstelling van de zandfluxen ten gevolge van baggeren en storten (blauwe pijlen) en de zandextracties (rode pijlen), berekend over de periode 2001-2011.....	30

Figuur 26 – De volledige slibbalans met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie), baggervolumes, fluxen naar havendokken (Hd), fluxen naar ontpolderingen (Op), en stortvolumes.....	31
Figuur 27 – De slibbalans (detail) voor de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme, met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie) en baggervolumes.	31
Figuur 28 – De volledige zandbalans met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie), baggervolumes, zandwinningsvolumes (Zw), fluxen naar ontpolderingen (Op), en stortvolumes.....	32
Figuur 29 – De zandbalans (detail) voor de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme, met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie) en baggervolumes	32
Figuur 30 – De totale slib- en zandbalans.....	33
Figuur 31 – Detail van de totale slib- en zandbalans voor de rekencellen in Boven-Zeeschelde	33
Figuur 32 – Schematische voorstelling van het slibtransport in Mm ³ (bruine pijlen) over de periode 2001-2011 (referentiescenario).....	35
Figuur 33 – Schematische voorstelling van het zandtransport in Mm ³ (gele pijlen) over de periode 2001-2011 (referentiescenario).....	35
Figuur 34 – Richting en grootte slibtransport (in Mm ³) voor de scenario's 'Referentie', 'V _{slib} hoog', 'V _{zand} hoog' en 'Rand 0'.....	37
Figuur 35 – Richting en grootte zandtransport (in Mm ³) voor de scenario's 'Referentie', 'V _{slib} hoog', 'V _{zand} hoog' en 'Rand 0'.....	38
Figuur 36 – Verschilkaart voor rekencel 9 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B1
Figuur 37 – Verschilkaart voor rekencel 10 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B2
Figuur 38 – Verschilkaart voor rekencel 11 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B2
Figuur 39 – Verschilkaart voor rekencel 12 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B3
Figuur 40 – Verschilkaart voor rekencel 13 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B4
Figuur 41 – Verschilkaart voor rekencel 14 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B5
Figuur 42 – Verschilkaart voor rekencel 15 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B6
Figuur 43 – Verschilkaart voor rekencel 16 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B7
Figuur 44 – Verschilkaart voor rekencel 17 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B7
Figuur 45 – Verschilkaart voor rekencel 18 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B8
Figuur 46 – Verschilkaart voor rekencel 19 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B8
Figuur 47 – Verschilkaart voor rekencel 19_trjGM op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën.....	B9
Figuur 48 – Verschilkaart voor rekencel Rupel op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B10
Figuur 49 – Verschilkaart voor rekencel Durme op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën	B10
Figuur 50 – Ecotopenkaart voor rekencel 9 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehalten (%)......	B11
Figuur 51 – Ecotopenkaart voor rekencel 10 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehalten (%)......	B12
Figuur 52 – Ecotopenkaart voor rekencel 11 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehalten (%)......	B13

Figuur 53 – Ecotopenkaart voor rekencel 12 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B14
Figuur 54 – Ecotopenkaart voor rekencel 13 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B15
Figuur 55 – Ecotopenkaart voor rekencel 14 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B16
Figuur 56 – Ecotopenkaart voor rekencel 15 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B17
Figuur 57 – Ecotopenkaart voor rekencel 16 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B18
Figuur 58 – Ecotopenkaart voor rekencel 17 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B19
Figuur 59 – Ecotopenkaart voor rekencel 18 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B19
Figuur 60 – Ecotopenkaart voor rekencel 19 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B20
Figuur 61 – Ecotopenkaart voor rekencel 19trjGM met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B21
Figuur 62 – Ecotopenkaart voor rekencel Rupel met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B22
Figuur 63 – Ecotopenkaart voor rekencel Durme met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).....	B22

1 Inleiding

De opdracht “Integraal plan Boven-Zeeschelde” (bestek 16EI/13/57) heeft betrekking op het opstellen van een duurzaam beheerplan en een integraal plan voor de Boven-Zeeschelde en het Zuidelijk deel van de Ringvaart waarin de functies bevaarbaarheid, natuur en veiligheid naast nevenfuncties dienen te worden bestudeerd en opgenomen. Hiervoor dienen onder andere volgende aspecten te worden uitgevoerd :

- opmaak van een duurzaam beheerplan volgens de huidige klassering van de vaarweg (klasse IV voor de Boven-Zeeschelde en klasse Va voor het Zuidelijk deel van de Ringvaart);
- vergund krijgen van dit beheerplan;
- uitvoeren van literatuurstudie en wetenschappelijk onderzoek om morfologische ingrepen in de rivier te kunnen simuleren en toetsen in samenwerking met het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout;
- uitvoeren van wetenschappelijk onderzoek om het effect van veranderingen in getij en morfologie door te vertalen naar veranderingen in waterkwaliteit, leefomgeving (areaal en kwaliteit) en ecosysteemrespons (productie en verschuivingen in voedselweb) in samenwerking met Universiteit Antwerpen en het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek;
- verder uitwerken van alternatieven rekening houdend met de bovenvermelde functies en nevenfuncties;
- het verder uitbreiden van het onderliggende model van de MKBA om de verschillende functies mee te beoordelen en deze te analyseren;
- opstellen van een strategisch MER voor een integraal plan rekening houdend met toegang voor CEMT klasse Va schepen;
- opstellen van een gedetailleerd implementatieplan voor dit integraal plan;
- ondersteuning tijdens de uitvoering van de studieopdracht;

Het Waterbouwkundig Laboratorium is binnen vast gedeelte 2 van de opdracht (Wetenschappelijk en toegepast onderzoek BZS in nauwe samenwerking met UA en INBO) post 2 verantwoordelijk voor de opmaak van een sedimentbalans van de Zeeschelde, Rupel en Durme.

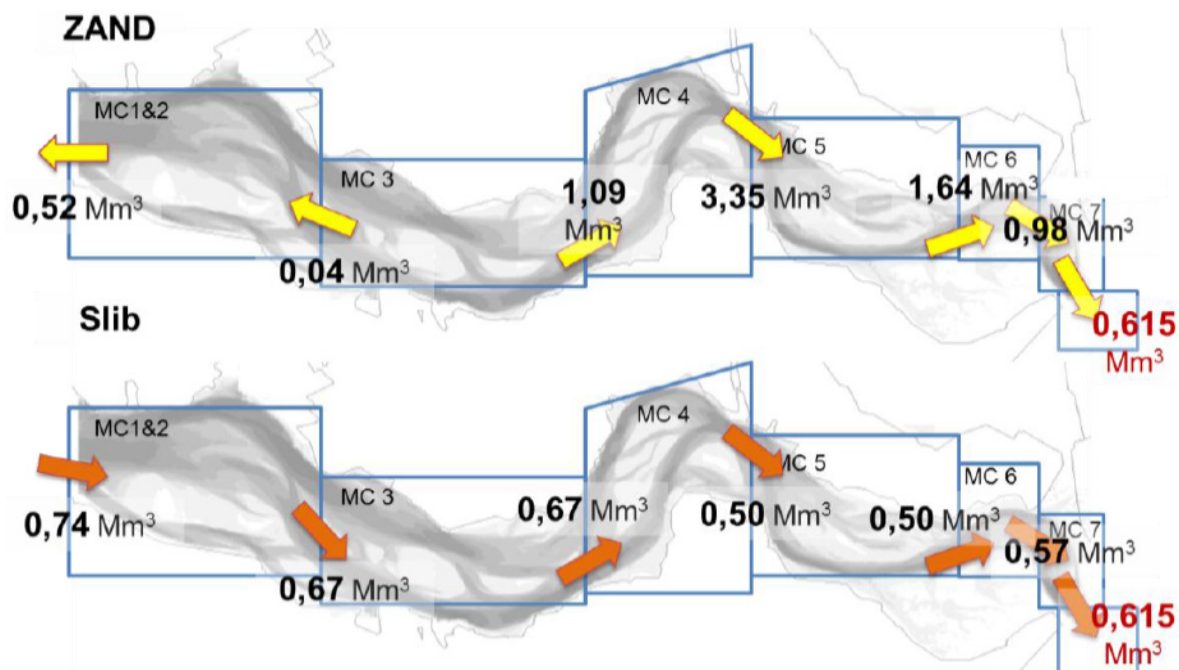
2 Methodiek

2.1 Relatie tot eerdere studies

De Zeeschelde sedimentbalansberekening uitgevoerd in deze studie is vergelijkbaar met de methodiek die werd toegepast voor de Westerschelde. In het geval van de Westerschelde werd het gebied opgedeeld volgens de macrocellen (Figuur 1). Tussen twee geselecteerde tijdstippen werd voor elk van deze macrocellen het volumeverschil in sediment berekend op basis van bathymetrische gegevens. Om de totaaltransporten te kennen diende de berekende volumeverschillen gecorrigeerd te worden voor volumewijzingen ten gevolge van antropogene invloeden (e.g., baggeren, storten, zandonttrekkingen). De opsplitsing tussen zand en slib gebeurde op basis van de slibhoeveelheid in de bodem, bepaald volgens de McClaren kartering (McClaren, 1993). Door vervolgens een opwaartse randvoorwaarde vast te leggen voor het zand- en slibtransport (aan de grens Westerschelde-Zeeschelde) kon door terugrekening van de volumeverschillen de richting en de hoeveelheid van zand- en slibtransport berekend worden over de individuele macrocellen (Figuur 1) (Cleveringa, 2013).

Net zoals voor de Westerschelde wordt de Zeeschelde in deze studie opgedeeld in rekencellen. De begrenzing van de cellen werd bepaald op basis van de OMES compartimentering (Meire et al., 1997) (zie §2.3). De bodemsamenstelling van de Zeeschelde (zand versus slib) is gebaseerd op basis van bodemstalen die genomen werden binnen kaartenheden met een min of meer uniforme lithologie (dit zijn de ecotopen, zie §2.4.2). Door het vastleggen van opwaartse randvoorwaarden voor zand- en slibtransport (zie §2.7), en de berekening van volumeveranderingen (zie §2.4) op basis van de bodems en antropogene invloeden werd het zand- en slibtransport berekend over de individuele rekencellen. Het grote verschil met de Westerschelde sedimentbalans is dat de opwaartse randvoorwaarden voor sedimenttransport in de Zeeschelde gebaseerd zijn op metingen, en dus accuraat kunnen worden ingeschat (zie §2.7). Voor de sedimentbalans van de Westerschelde daarentegen diende de opwaartse randvoorwaarde voor sedimenttransport (grens Westerschelde-Zeeschelde) worden afgeschat (Cleveringa, 2013). Zo werd onder meer aangenomen dat het sedimenttransport voor 50% uit zand en voor 50% uit slib bestaat.

Figuur 1 – Jaarlijkse zand- en slibtransporten over de randen van de Westerschelde macrocellen, berekend over de periode 1994-2000 op basis van de zand- en slibbalans (Cleveringa, 2013)



2.2 Tijdsperiodes

De tijdsperiodes waarover een sedimentbalans kan worden berekend, wordt bepaald door de beschikbaarheid van bathymetrische opnames in de interessezone. In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van beschikbare bathymetrieën die (min of meer) simultaan werden opgemeten voor de Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme.

Tabel 1 – Overzicht synoptische bathymetrieën voor de deelgebieden Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme.

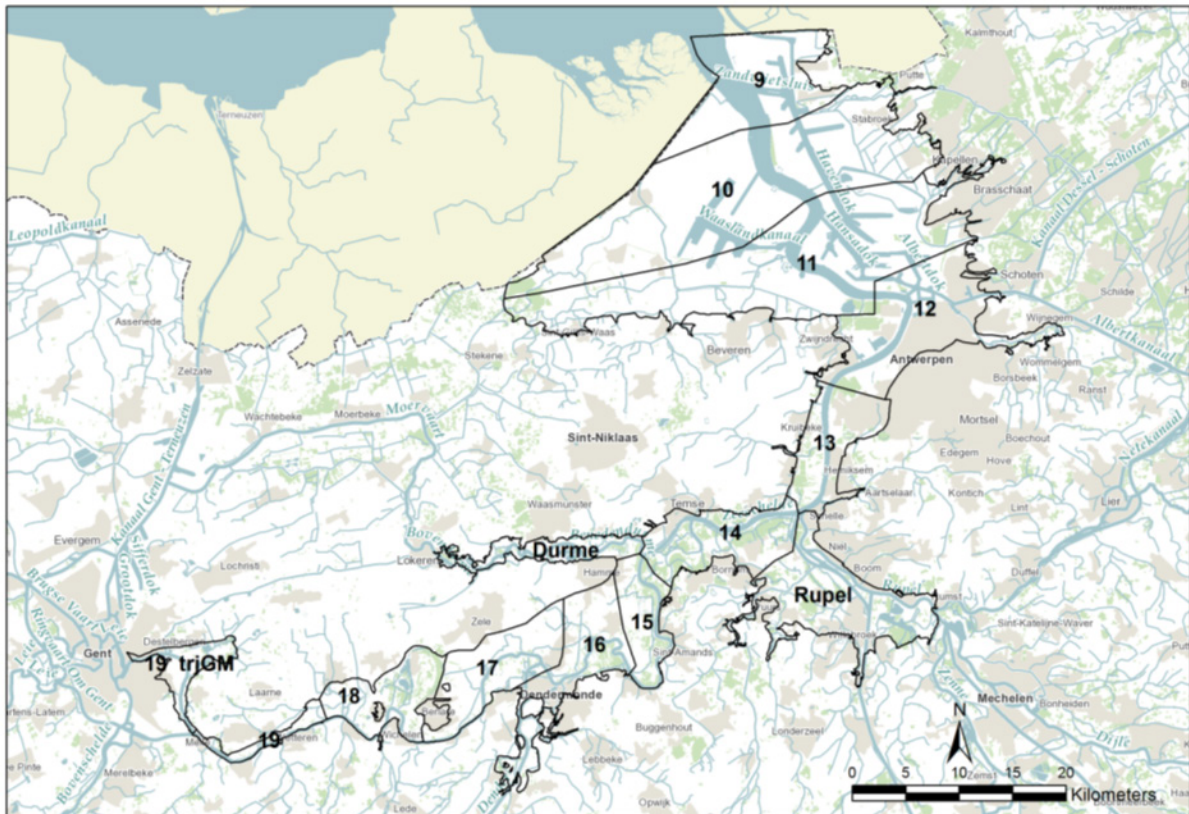
Deelperiode	Beneden-Zeeschelde	Boven-Zeeschelde	Rupel	Durme
1	1930	1930	1928-1933	1927-1928
2	1950	1950	1947-1952	1950
3	1960	1960	1962	1960-1962
4	1980-1981	1980	1976	1977
5	2000-2001	2001	1995	1997
6	2011	2011-2012	2010	2011

In deze studie werd gekozen om de sedimentbalans te berekenen over de periode 2001-2011. Vanaf 2001 zijn er naast de bathymetrische gegevens immers ook topografische gegevens beschikbaar (op basis van LIDAR). Hierdoor is de hoogteligging van het intertidaal gekend en kunnen we een meer accurate sedimentbalans berekenen.

2.3 Rekencellen

De grenzen van de rekencellen zijn gebaseerd op de OMES compartimenten (Meire et al., 1997; Van Damme et al., 1999). De grenzen van de OMES compartimenten zijn zo gekozen opdat de saliniteit en het getijregime binnen één segment uniform zijn. De OMES compartimentering werd reeds toegepast in tal van eerdere studies 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 2.

Figuur 2 – Opdeling Zeescheldebekken volgens de OMES compartimentering



2.4 Volumeverschillen

2.4.1 Verschilgrid topo-bathymetrieën

Algemeen

In een eerste stap om volumeverschillen te bepalen werd een verschilgrid berekend op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën (verschilgrid = 2011 - 2001). Een positieve waarde in het verschilgrid duidt op accumulatie van sediment tussen 2001 en 2011 (Figuur 3, groene kleuren), een negatieve waarde duidt op erosie van sediment (Figuur 3, rode kleuren). Door het verschilgrid in te lezen in de surface volume tool in ArcGIS 10 werd het sedimentatievolume en het erosievolume per rekencel (i.e. OMES segment) berekend. Het verschil tussen beide volumes is uiteindelijk de netto-volumeverandering en kan geschreven worden als:

$$\Delta V_t = V_s - V_e \tag{1}$$

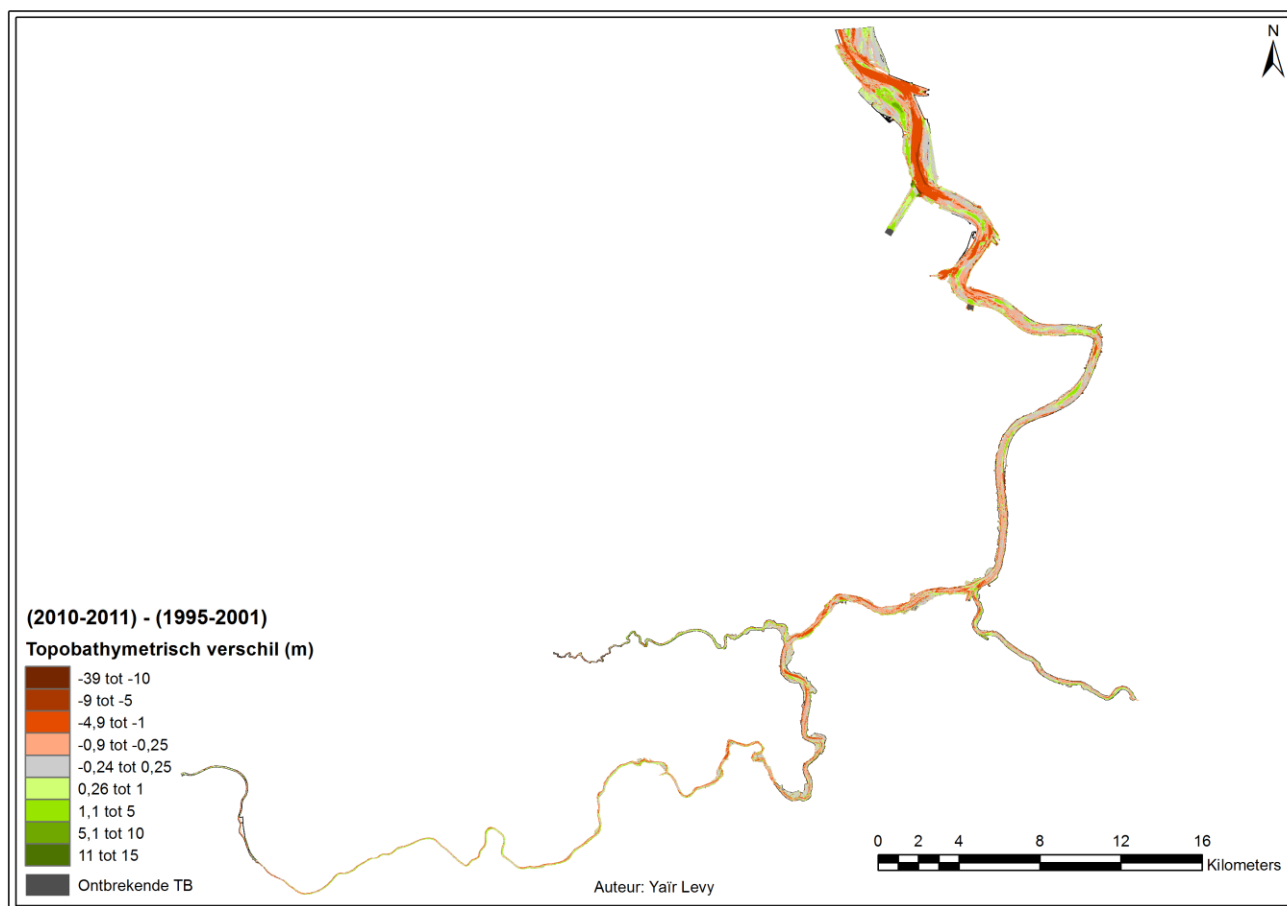
Met: ΔV_t = netto-volumeverandering in een bepaalde rekencel over tijdsinterval t [m³]

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 een bepaald tijdsinterval in een specifieke rekencel meer sedimentatie dan erosie plaatsgevonden. Indien $\Delta V_t < 0$ dan heeft er meer erosie dan sedimentatie plaatsgevonden. Een overzicht van de verschilgrids per OMES segment is terug te vinden in Appendix (Appendix A – Verschilkaarten).

Figuur 3 – Verschilkaart op basis van de 2011 en 2001 bathymetrieën (2011 min 2001).



Gedetailleerde verschilkaarten per rekencel zijn terug te vinden in Appendix (Appendix A – Verschilkaarten).

Rupel en Durme

De topo-bathymetrische gegevens zijn niet voor alle rekencellen op hetzelfde tijdstip opgemeten. Voor de situatie 2001 dateren de bathymetrische opnames van Rupel en Durme respectievelijk uit 1995 en 1997 (zie ook Tabel 1). Om hieraan tegemoet te komen werden de netto-volumeveranderingen lineair verrekend naar de periode 2001-2011. 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 [m^3]

N = het tijdsinterval waarnaar de volumeveranderingen worden verrekend, in dit geval is $N = 10$ (tijdsinterval 2001-2011)

Δt = aantal jaar tussen 2 topo-bathymetrische opnames

Voor de Zeeschelde is Δt gelijk aan 10 of 11 jaar, voor Rupel en Durme is Δt gelijk aan respectievelijk 15 en 14 jaar (Tabel 1).

Deurganckdok

Het Deurganckdok werd in 2005 geopend als getijdendok en is bijgevolg onderhevig aan sedimentatie- en erosieprocessen. Om de netto-volumeveranderingen in sediment over de periode 2001 tot 2011 te begroten werd een verschilgrid gemaakt voor het Deurganckdok op basis van de as-build situatie (bv. IMDC & Waterbouwkundig Laboratorium, 2007) en de bathymetrie van 2011. Aangezien het Deurganckdok geopend werd in 2005 is de netto-volumeverandering over de periode 2001 tot 2011 gelijk aan de netto-volumeverandering over de periode 2005 tot 2011.

2.4.2 Zand en slib

De sedimentbalansberekening van de Zeeschelde maakt onderscheid tussen zand en slib. Dit wil zeggen dat de netto-volumeverandering per rekencel (zie vergelijking (2)) de som is van de netto-volumeverandering zand en de netto-volumeverandering slib. Om dit onderscheid te maken tussen zand en slib moet de lithologische samenstelling van de bodem gekend zijn. In deze studie werd gebruik gemaakt van bodemstalen en de ecotopenkaart om de bodemsamenstelling te karakteriseren. Hierbij werden de beschikbare lithologische gegevens geaggregeerd per ecotoop en per rekencel (zie §2.5). Op basis van deze aannames kunnen we de netto-volumeverandering per rekencel schrijven als:

$$\Delta V = \Delta V_{zand} + \Delta V_{slib} \quad (3)$$

Met: ΔV_{zand} = netto-volumeverandering zand voor de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m^3]

ΔV_{slib} = netto-volumeverandering slib voor de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m^3]

De rechtse termen van vergelijking (3) kunnen we dan verder definiëren als:

$$\Delta V_{zand} = \sum_{i=1}^n \Delta V_i Z_i \quad (4)$$

$$\Delta V_{slib} = \sum_{i=1}^n \Delta V_i S_i \quad (5)$$

Met: i = index over de ecotopen

n = het totaal aantal ecotopen

ΔV_i = de netto-volumeverandering over tijdsinterval N voor ecotoop i, afgeleid uit de bathymetrische verschilkaart [m^3]

Z_i = de bodemzandfractie van ecotoop i [-]

S_i = de bodemslibfractie van ecotoop i [-]

De termen Z_i en S_i zijn gebaseerd op de zand- en slibgehaltenes van alle bodemstalen genomen binnen ecotoop i, en kunnen gedefinieerd worden als:

$$Z_i = \frac{Z_{i,m}}{100} \quad (6)$$

$$S_i = \frac{S_{i,m}}{100} \quad (7)$$

Met: $z_{i,m}$ = mediaan zandgehalte, berekend op basis van alle bodemstalen genomen binnen ecotoop i [%]

$s_{i,m}$ = mediaan slibgehalte, berekend op basis van alle bodemstalen genomen binnen ecotoop i [%]

Voor sommige stalen werd ook de grindfractie bepaald (zie Tabel 8 in §3.3). Deze fractie wordt in bovenstaande methodiek buiten beschouwing gelaten aangezien de grindfractie over het algemeen laag is (< 5%), en niet voor alle stalen gekend is. Voor de stalen met grindfractie werd bijgevolg de som van het slib- en zandgehalte verrekend naar 100%. Voor een algemeen overzicht van de bodemstaallocaties wordt verwezen naar Figuur 11. Voor een gedetailleerd overzicht van de locaties per rekencel, en de bijhorende zand- en slibgehaltenes wordt verwezen naar Appendix (Appendix B – Ecotopenkaarten en bodemstalen). In onderstaande paragraaf (§2.5) wordt in detail besproken hoe de bodemsamenstelling werd gekoppeld aan de ecotopenkaart.

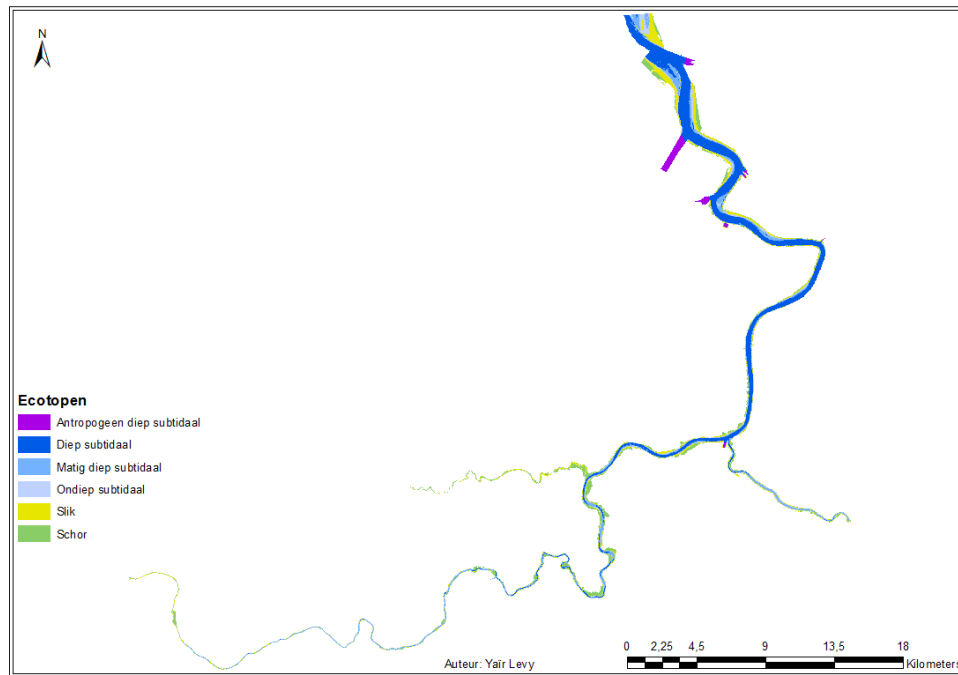
2.5 Bodemsamenstelling per ecotoop

De lithologische samenstelling van de bodem langsheen de Zeeschelde en haar bijrivieren varieert ruimtelijk. Om deze ruimtelijke variatie te implementeren in de sedimentbalansberekening maken we gebruik van kaartenheden die een min of meer vergelijkbare lithologische samenstelling hebben. In deze studie werd de ecotopenkaart uit 2010 (zie §2.5) gebruikt als basis om kaartenheden te onderscheiden. Ecotopenkaarten zijn immers gebaseerd op fysiotopenkaarten en geomorfologische kaarten (Van Ryckegem, 2014), en zijn op die manier sterk gekoppeld aan de lithologische samenstelling van de bodem. We beschouwen de ecotopenkaart van 2010 als representatief voor de tijdsperiode 2001-2011, de periode waarover we de sedimentbalans berekenen. We merken op dat ook andere technieken zoals multibeam gebruikt worden voor het opmaken van lithologische kaarten. In het geval van multibeam gebeurt de aflijning van kaartenheden op basis van verschillen in backscatter signaal (e.g., IMDC, 2015). Vermits een backscatter signaal moeilijker te koppelen is aan de lithologische samenstelling van de bodem werd er in deze studie gekozen om de lithologische samenstelling van de verschillende ecotopen te bepalen aan de hand van bodemstalen.

Deze methodiek geeft echter wel een aantal problemen. Veel van de onderscheiden ecotopen zijn klein in areaal (zie §3.2 en Figuur 10) waardoor ze geen bodemstalen bevatten. Hierdoor is het niet mogelijk om een exacte lithologische samenstelling van het betreffende ecotoop te bepalen. Om hieraan tegemoet te komen werden de ecotopen geaggregeerd in 6 ecotopenklassen. Het aggregeren van de ecotopen is een fysische benadering en wordt gebaseerd op systeemkennis van de Zeeschelde. Zo wordt het subtidaal gezien de hogere stroomsnelheden voornamelijk gedomineerd door een zandige bodem (behalve ter hoogte van sluiptoegangen), 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. Gebaseerd op deze aannames werden de ecotopen geaggregeerd tot 4 subtidaal klassen (antropogeen diep subtidaal, diep subtidaal, matig diep subtidaal, en ondiep subtidaal), één slikklasse en één schorklasse (Figuur 4). Er werd nog overwogen om een onderscheid te maken tussen slik met zacht substraat en slik met hard substraat, maar aangezien het beperkt aantal stalen binnen het ecotoop slik met hard substraat werd het ecotoop slik als één ecotoop beschouwd.

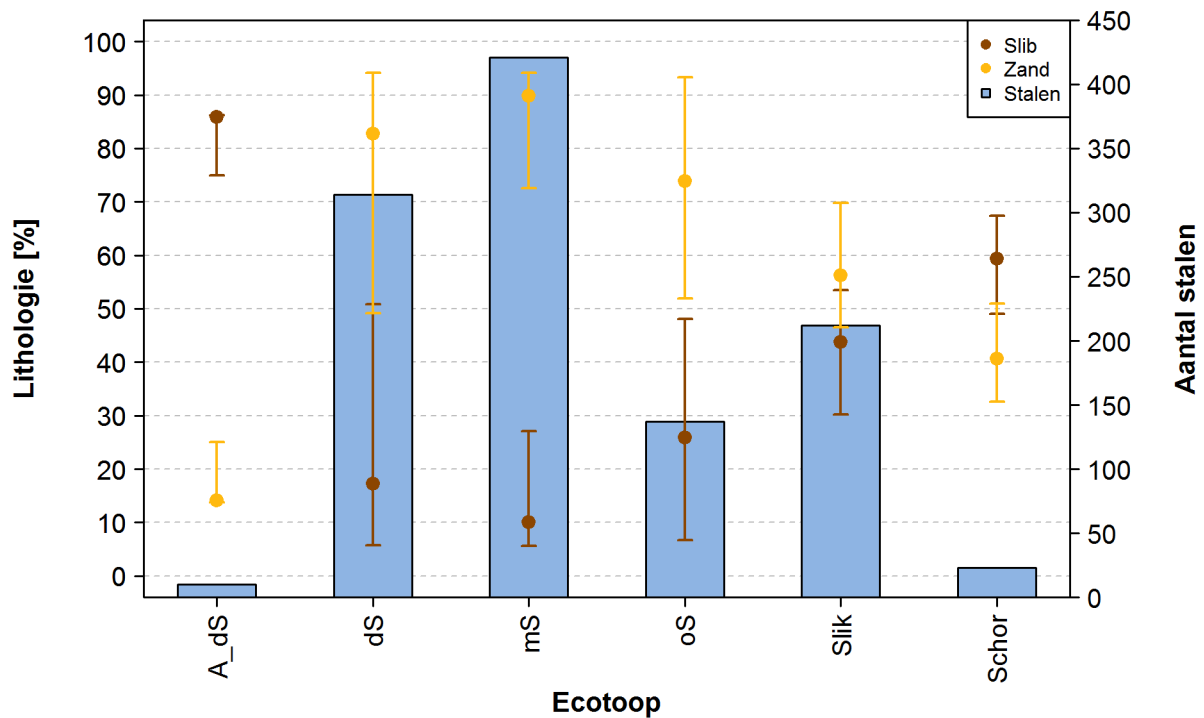
Figuur 4 – De geaggregeerde ecotopenkaart



Uiteindelijk werd voor elk ecotoop een percentage zand en slib berekend door een mediaanwaarde te berekenen op basis van alle stalen binnen het ecotoop. De mediaanwaardes zijn gebaseerd op de volumepercentages slib (< 63 µm) en zand (63 µm – 2 mm) per staal (zie ook §3.3). Een overzicht van de staalnamelocaties per ecotoop en per rekencel wordt gegeven in Appendix (Appendix B – Ecotopenkaarten en bodemstalen). De analyse van de bodemstalen genomen binnen deze geaggregeerde ecotopen bevestigt inderdaad bovenstaande aannames omtrent het verschil in lithologische samenstelling tussen deze ecotopen. Zo worden de 3 subtidaal klassen (exclusief antropogeen) gedomineerd door een zandige bodem (70-90%), waarbij het diep subtidaal en het matig diep subtidaal het meest zandrijk zijn (Figuur 5). De slikken en schorren worden gekenmerkt door een intermediaire samenstelling waarbij de slikken iets meer zandrijk zijn en de schorren iets meer slibrijk. Het antropogeen diep subtidaal (bijvoorbeeld sluisoegangen) bestaat tenslotte uit slibrijke bodems.

We merken nog op dat voor de volumeberekeningen (vergelijking (4) tot en met (7)) gebruik werd gemaakt van de zand- en slibfracties berekend per ecotoop én per rekencel. De bodemsamenstelling varieert immers niet enkel tussen de verschillende ecotopen, maar kan ook langsheen het estuarium variëren binnen éénzelfde ecotoop. Zo is het goed mogelijk dat de bodemsamenstelling van een subtidaal ecotoop in een afwaartse rekencel verschillend is van bodemsamenstelling van datzelfde ecotoop in een opwaartse rekencel. De ruimtelijke variatie in bodemsamenstelling werd bepaald door per ecotoop en per rekencel de mediaanwaardes te berekenen op basis van de zand- en slibgehalten van de bodemstalen. Het zijn deze mediaanwaardes die respectievelijk in vergelijking (6) en (7) werden gebruikt. Voor bepaalde rekencellen zijn echter geen stalen beschikbaar binnen een bepaald ecotoop (bv. Figuur 17, geen stalen beschikbaar voor rekencellen 9 tot 12 binnen ecotoop schor). In dat geval werd aan deze rekencellen de mediaanwaarde toegekend op basis van alle stalen binnen het betreffende ecotoop. Het resultaat van de ruimtelijke variatie in bodemsamenstelling wordt besproken in §4.1.

Figuur 5 – Zand en slib gehalten (in %) per geaggregeerde ecotopenklasse in de Zeeschelde, voorgesteld aan de hand van mediaanwaarden (bolletjes) en de 25^{ste} en 75^{ste} percentielwaarden (foutenvlaggen).



De mediaan- en percentielwaarden zijn gebaseerd op de volumepercentages slib (< 63 µm) en zand (63 µm – 2 mm) per staal (zie ook §3.3). Het aantal beschikbare stalen per ecotopenklasse is aangegeven aan de hand van een staafdiagram. A_dS = antropogeen diep subtidaal, dS = diep subtidaal, mS = matig diep subtidaal, oS = ondiep subtidaal.

2.6 Antropogene invloeden

2.6.1 Baggeren, storten en zandwinning

Implementatie in de sedimentbalans

De berekende volumeveranderingen voor zand en slib (vergelijkingen (4) en (5)) zijn gebaseerd op een verschilgrid van 2 topo-bathymetrische opnames (zie §2.4). Het verschilgrid geeft de bodemveranderingen over een bepaalde tijdsperiode weer en is het resultaat van enerzijds sedimenttransport, en anderzijds van menselijk ingrijpen (i.e. baggeren, storten en zandwinning). In deze sedimentbalans willen we inzicht krijgen in de sedimenttransporten over de rekencellen heen, rekening houdende met volumeveranderingen ten gevolge van menselijk ingrijpen. Bij baggeren en zandwinning wordt er sediment weggehaald op een bepaalde locatie. Om hiervoor te compenseren moet het weggehaalde volume opgeteld worden bij de sedimentbalans. Bij storten wordt er sediment toegevoegd aan een bepaalde locatie, en bijgevolg moet het toegevoegde volume afgetrokken worden van de sedimentbalans. Ter verduidelijking, de antropogene volumes die dienen verrekend worden zijn de profielvolumes (= de in-situ volumes). Rekening houdende met de antropogene invloeden kan de volumeverandering zand en slib in een rekencel over een tijdsinterval N geschreven worden als:

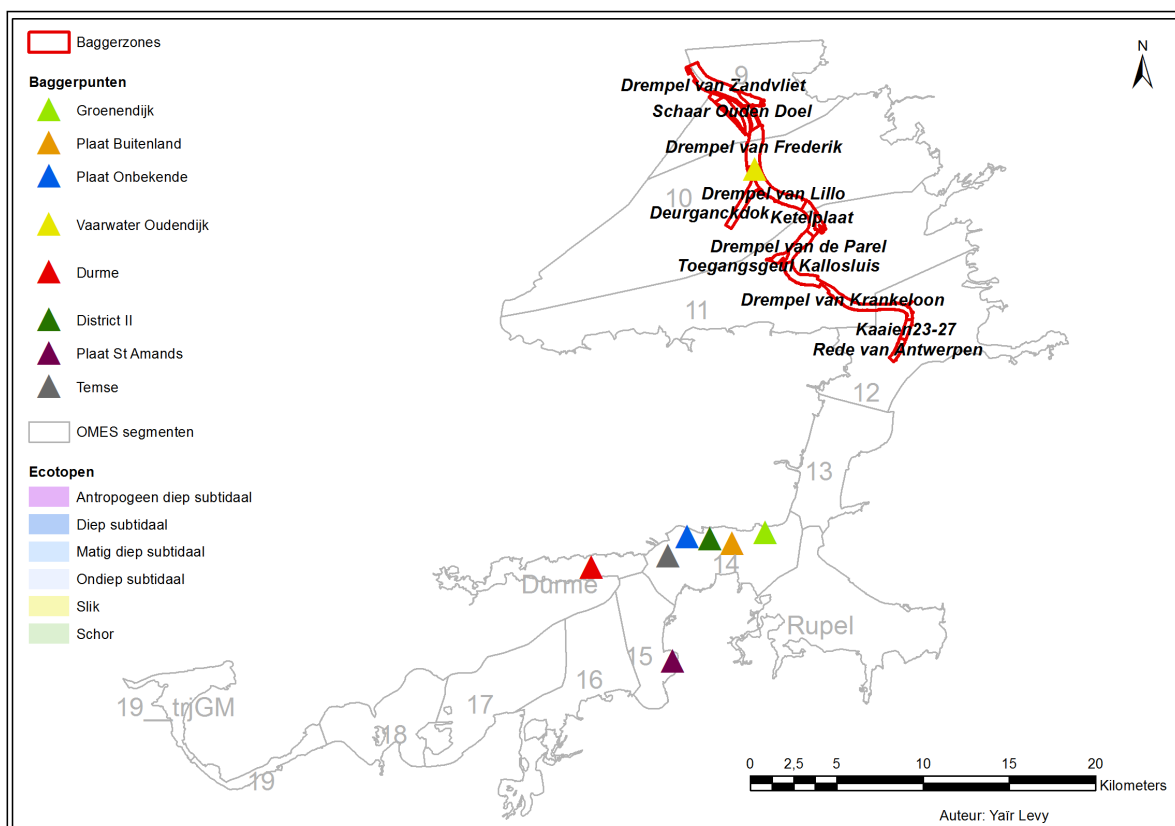
$$\Delta V_{zand,a} = \Delta V_{zand} + V_{z_bag} + V_{zandw} - V_{z_stort} \quad (8)$$

$$\Delta V_{slib,a} = \Delta V_{slib} + V_{s_bag} - V_{s_stort} \quad (9)$$

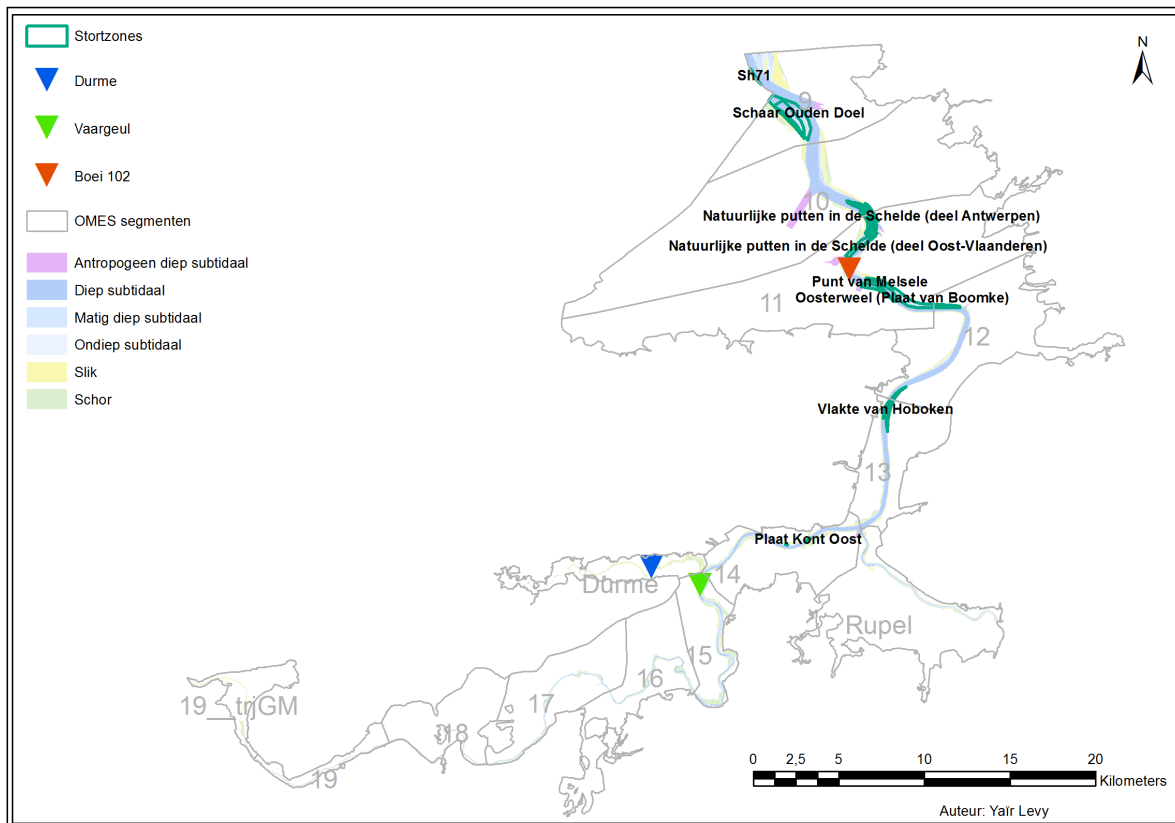
- Met: $\Delta V_{zand,a}$ = netto-volumeverandering zand voor de betreffende rekencel over tijdsinterval N, rekening houdende met antropogene invloeden [m³]
 $\Delta V_{slib,a}$ = netto-volumeverandering slib voor de betreffende rekencel over tijdsinterval N, rekening houdende met antropogene invloeden [m³]
 ΔV_{zand} : zie vergelijking (4)
 ΔV_{slib} : zie vergelijking (5)
 V_{z_bag} = gebaggerd volume zand in de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]
 V_{zandw} = volume aan zandwinning in de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]
 V_{z_stort} = gestort volume zand in de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]
 V_{s_bag} = gebaggerd volume slib in de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]
 V_{s_stort} = gestort volume slib in de betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]

Een overzicht van de bagger- en stortlocaties in de Zeeschelde wordt gegeven in respectievelijk Figuur 6 en Figuur 7. We merken hierbij op dat sommige bagger- en stortpolygoonen deel uitmaken van 2 verschillende rekencellen. Zo ligt stortlocatie Oosterweel voor een deel in rekencel 11, en een deel in rekencel 12 (Figuur 7). Om nu te bepalen hoeveel van het gestorte volume terecht komt in de respectievelijke rekencellen werd gebruik gemaakt van de relatieve verhouding in areaal. Zo ligt 74% van stortpolygoon Oosterweel in rekencel 11 en slechts 26% in rekencel 12.

Figuur 6 – Overzicht van de baggerlocaties in de Zeeschelde



Figuur 7 – Overzicht van de stortlocaties in de Zeeschelde



Omzetting naar profielvolumes

Over het algemeen worden bagger- en stortgegevens opgeleverd in beunvolumes, dit zijn de volumes die geregistreerd worden in het beun van de baggerschepen. Voor de implementatie van de bagger- en stortvolumes in de sedimentbalans moeten we echter gebruik maken van in situ bagger- en stortvolumes (= de profielvolumes). Het is immers zo dat de bulkdichtheid in het beun van het baggerschip lager is dan de bulkdichtheid in de bodem. Bovendien is het zo dat de opgeleverde bagger- en stortgegevens (zie §3.4) verschillend zijn voor de Beneden-Zeeschelde en de Boven-Zeeschelde. In de Beneden-Zeeschelde worden de zandvolumes opgeleverd in beunvolumes, terwijl de slibvolumes opgeleverd worden in gereduceerde volumes. Voor de Boven-Zeeschelde worden dan weer totale sedimentvolumes (als beunvolume) opgeleverd en wordt er geen onderscheid gemaakt tussen zand en slib. Voor iedere dataset is er dus een specifieke methodologie nodig om de opgeleverde volumes om te zetten naar profielvolumes.

Zand Beneden-Zeeschelde

Zandvolumes voor de Beneden-Zeeschelde worden opgeleverd in beunvolumes. Om de beunvolumes om te rekenen naar profielvolumes werd in overeenstemming met de sedimentbalans van de Westerschelde (Cleveringa, 2013) aangenomen dat het beunvolume 10% groter is dan het profielvolume. Of met andere woorden, de opgeleverde beunvolumes zand voor de Beneden-Zeeschelde werden gedeeld door een factor 1,1 om profielvolumes te bekomen:

$$V_b^{profiel} = \frac{V_b^{beun}}{1,1} \tag{10}$$

Met: $V_b^{profiel}$ = het bulkvolume in profiel [m³]

V_b^{beun} = het bulkvolume in beun [m³]

Slib Beneden-Zeeschelde

Slibgegevens voor de Beneden-Zeeschelde worden opgeleverd in gereduceerde volumes (V'_b). Op basis van dit gereduceerd volume en een waterdichtheid van 1 ton/m³ (zie ook Dams et al, 2016) kan de hoeveelheid ton droge stof berekend worden als:

$$m_g = 1,606 V'_b \quad (11)$$

Met: m_g = de massa van het slibsediment [T]

V'_b = het gereduceerde beunvolume slib [m³]

Verder geldt dat het volume aan slibsediment gedefinieerd kan worden als:

$$V_g = \frac{m_g}{\rho_g} \quad (12)$$

Met: V_g = het volume slibsediment [m³]

ρ_g = de dichtheid van het sediment = 2,65 ton/m³ = de dichtheid van kwarts

Het bulkvolume (water + slib) dat uit de bodem wordt weggehaald is het zogenaamde profielvolume en wordt gedefinieerd als:

$$V_b^{profiel} = \frac{V_g}{C^{profiel}} \quad (13)$$

Met: $V_b^{profiel}$ = het bulkvolume in profiel [m³]

$C^{profiel}$ = volumeconcentratie profiel [-]

De volumeconcentratie in profiel wordt bepaald door de bulkdichtheid, de dichtheid van het water en de dichtheid van de sedimentkorrels en kan geschreven worden als:

$$C^{profiel} = \frac{\rho_b^{profiel} - \rho_w}{\rho_g - \rho_w} \quad (14)$$

Met: $\rho_b^{profiel}$ = bulkdichtheid in profiel [ton/m³]

ρ_w = de dichtheid van water = 1 ton/m³

Integratie van vergelijkingen (11), (12) en (14) in vergelijking (13) laat ons uiteindelijk toe om het profielvolume slib te berekenen op basis van de gegeven gereduceerde volumes:

$$V_b^{profiel} = \frac{1,606 V'_b}{\rho_g} \frac{\rho_g - \rho_w}{\rho_b^{profiel} - \rho_w} \quad (15)$$

We nemen hierbij aan dat de bulkdichtheid in profiel $\rho_b^{profiel}$ gelijk is aan 1,45 ton/m³. Deze waarde kan beschouwd worden als een gemiddelde bulkdichtheid voor een slibhoudende Scheldebodem (Bastin, 1993).

Zand en slib Boven-Zeeschelde

De opgeleverde beunvolumes voor de Boven-Zeeschelde en Durme maken geen onderscheid tussen zand en slib. Om hieraan tegemoet te komen werd voor elke rekencel de gemiddelde bodemsamenstelling berekend op basis van de subtidale bodemstalen (Tabel 2). Het merendeel van de baggerwerkzaamheden vindt immers plaats in het subtidaal. De waarden in Tabel 2 werden gebruikt om het totale beunvolume per rekencel op te delen in een beunvolume zand en een beunvolume slib. De bekomen beunvolumes zand en slib werden dan uiteindelijk verrekend naar profielvolumes gebruik makende van vergelijking (10).

Tabel 2 – Bodemsamenstelling subtidaal (mediaanwaardes op basis van bodemstalen) voor de rekencellen van de Boven-Zeeschelde, Durme en Rupel

Rekencel	Slib [%]	Zand [%]
14	6,8	93,2
15	9,1	90,5
16	10,1	89,8
17	10,8	89,2
18	14,0	86,0
19	43,8	56,2
19_trjGM	54,7	45,3
Rupel	7,6	92,4
Durme	33,1	66,9

2.6.2 Havendokken

De niet-getijgebonden havendokken zijn van het estuarium gescheiden door sluizen. Bij het openen van de sluizen ontstaan er densiteitsstromingen waardoor sediment naar de dokken wordt getransporteerd. Het gaat voornamelijk om het transport van slibrijk sediment dat accumuleert in de toegangseulen 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 (Heylen, 2013). Dit sediment komt via 3 sluiscomplexen in de dokken terecht (Tabel 3). Momenteel wordt onderzocht wat het relatieve aandeel is van elk van deze sluiscomplexen met betrekking tot sedimentaanvoer (GHA, 2017). Aangezien we dit lopend onderzoek nog niet kunnen implementeren in de sedimentbalans gaan we vereenvoudigd te werk door aan te nemen dat er evenveel sediment langs elk van de 3 sluizen binnenkomt. Voor de periode 2001-2011 komt dit neer op ~1 670 000 TDS per sluis (Tabel 3). Bijkomend nemen we aan dat het sediment uitsluitend bestaat uit slib. Deze aanname is te verantwoorden aangezien de bodem van het ecotoop antropogeen diep subtidaal (typisch zijn dit sluistoegangen) voor meer dan 85% uit slib bestaat (Figuur 5). Om uiteindelijk te komen tot een slibvolume werd de hoeveelheid slib in TDS gedeeld door een bulkdichtheid van 1,3 ton/m³. Deze bulkdichtheid is representatief voor de bulkdichtheid van slibbodems ter hoogte van sluistoegangen (Bastin, 1993). Tenslotte merken we op dat de onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de dokken op linkeroever verwaarloosbaar zijn ten opzichte zijn van deze op rechteroever (Heylen, 2013). Er is dus slechts een beperkte sedimentflux doorheen de Kallosluis en bijgevolg nemen we hier een waarde 0 aan (Tabel 3).

Tabel 3 – Overzicht slibfluxen doorheen sluiscomplexen over periode 2001-2011

Sluiscomplex	Rekencel	Hoeveelheid slib [TDS]	Volume slib [Mm ³]
Berendrecht-Zandvliet (RO)	9	~1 670 000	~1,28
Boudewijn-Van Cauwelaert (RO)	11	~1 670 000	~1,28
Royer (RO)	12	~1 670 000	~1,28
Kallo (LO)	11	0	0

2.6.3 Ontpolderingen

Gedurende de periode 2001-2011 werd een aantal gebieden ontpolderd langsheen het interessegebied. Ontpolderen impliceert het optreden van sedimentatie- en erosieprocessen ten gevolge van de geïntroduceerde getijwerking. Hierbij zijn de sedimentatieprocessen dominant waardoor de ontpolderingsgebieden op termijn ophogen. Enkel in en nabij de geulen treedt er lokale erosie op. In de sedimentbalans werd rekening gehouden met de afzetting van sedimenten door het areaal van de ontpoldering te vermenigvuldigen met een representatieve jaarlijkse ophogingssnelheid (Speybroeck, 2011). Hierdoor werd een jaarlijks ophogingsvolume bekomen wat vervolgens verrekend werd naar een totaal ophogingsvolume door te vermenigvuldigen met het aantal jaar tussen tijdstip van ontpolderen en het jaar 2011 (Tabel 4). Ontpolderingsgebieden evolueren typisch naar de estuariene habitats slik en schor. De gemiddeldes zand en slib berekend op basis van de stalen genomen binnen deze habitats werden gebruikt om het volume zand en slib te bepalen binnen het ophogingsvolume (Tabel 4). Beide fracties zijn in gelijke mate aanwezig (~50%).

Tabel 4 – Overzicht ophoging ontpolderingsgebieden 2001-2011

Ontpoldering	Rekencel	Areaal [ha]	Tijdstip ontpoldering	Ophogingssnelheid [cm/jaar]	Ophogingsvolume [m ³]	Volume zand [m ³]	Volume slib [m ³]
Paardenschor	9	12	2003	3	28800	14400	14400
Ketenisse	11	35	2004	3	73500	36750	36750
Lippenbroek	15	8	2006	3	12000	6000	6000
Heusden	19_trjGM	13	2006	3	19500	9750	9750

Zowel de sedimentfluxen naar de sluisdokken als de ontpolderingen kunnen onrechtstreeks beschouwd worden als fluxen ten gevolge van antropogene invloed. We kunnen vergelijking (8) en (9) (zie §2.6.1) dan ook verder uitwerken tot:

$$\Delta V_{zand,a} = \Delta V_{zand} + V_{z_bag} + V_{zandw} - V_{z_stort} + V_{z_ontp} \quad (16)$$

$$\Delta V_{slib,a} = \Delta V_{slib} + V_{s_bag} - V_{s_stort} + V_{s_ontp} + V_{s_hdok} \quad (17)$$

Met: V_{z_ontp} = hoeveelheid zand afgezet in ontpoldering langsheen betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]

V_{s_ontp} = hoeveelheid slib afgezet in ontpoldering langsheen betreffende rekencel over tijdsinterval N [m³]

V_{s_hdok} = hoeveelheid slib afgezet in havendokken via sluisdoorgangen gelegen in een bepaalde rekencel (zie Tabel 3) en dit over tijdsinterval N [m³].

2.7 Vastlegging randvoorwaarde sedimentimport rivieren

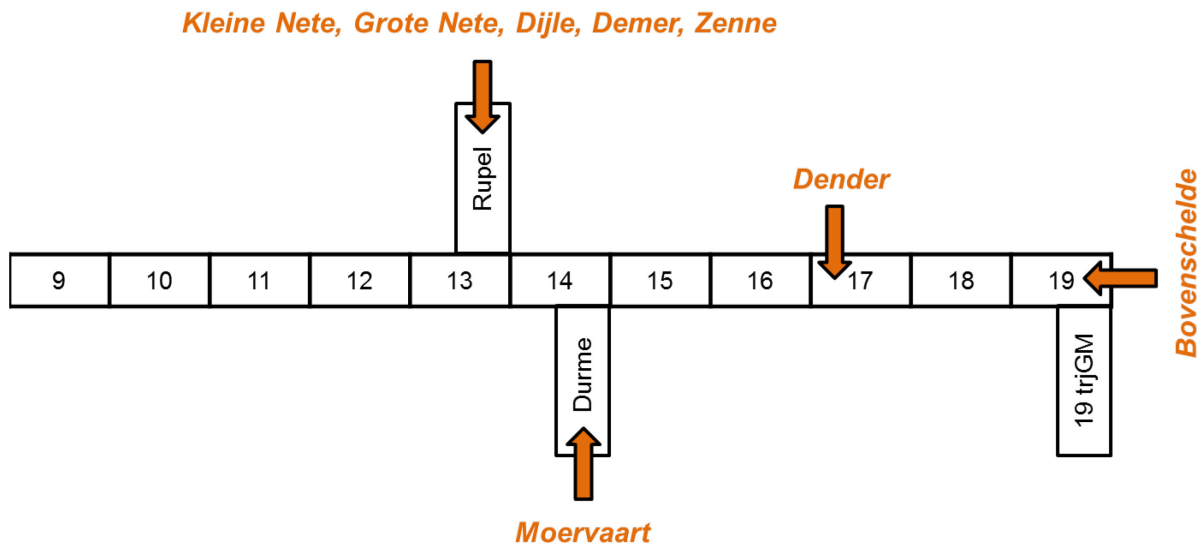
Van Hoestenbergh et al. (2014) geeft een overzicht van de jaarlijkse sedimentlading (uitgedrukt in Ton Droge Stof) die via de zijrivieren in de Zeeschelde stroomt over de periode 1972-2009. Deze fluviale sedimentimport dient mee in rekening te worden gebracht bij de berekening van het sedimenttransport over de rekencellen heen (zie §2.8). Er werden in totaal 4 opwaartse randen gedefinieerd waarover een waarde voor fluviale sedimentimport werd opgelegd (Figuur 8).

Voorliggende sedimentbalans werd berekend over de periode 2001-2011. Om de totale sedimentlading over de periode 2001-2011 te kennen werden de jaarlijkse sedimentladingen voor de betreffende periode gesommeerd. Van Hoestenbergh et al. (2014) berekent jaarlijkse waardes tot en met 2009. Om ook een representatieve waarde te hebben voor de jaartallen 2010 en 2011 werd gebruik gemaakt van de gemiddelde waarde over de periode 2001-2009.

De gerapporteerde sedimentladingen in Van Hoestenbergh et al. (2014) 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 (bv. Taverniers et al., 2013). Meer specifiek werd gebruik gemaakt van de ISCO stalen en de schepstalen te Gavere (Bovenschelde), Appels (Dender), Duffelsluis (Netes), Haacht (Dijle) en Epegem (Zenne). De laatste drie stations werden als representatief beschouwd voor het fluviale sediment dat in de Rupel terecht komt. Verwerkte korrelgrootteverdelingen zijn deels beschikbaar vanaf 2005, en volledig beschikbaar vanaf 2009. Er werd gekozen om te werken met de stalen afkomstig uit het jaar 2011, het meest recente jaar in de beschouwde periode voor de sedimentbalansberekening. Analyse van de stalen toont aan dat het sediment in de waterkolom hoofdzakelijk tot de slibfractie behoort (Tabel 5). De totale sedimentlading over de periode 2001-2011 werd per rivier opgesplitst in een hoeveelheid zand en een hoeveelheid slib (zie Tabel 6), gebruik makende van de mediaanwaardes berekend in Tabel 5.

In de sedimentbalansberekening wordt gewerkt met volumeverschillen. De berekende hoeveelheden zand en slib zijn echter gebaseerd op de jaarlijkse sedimentladingen uit Van Hoestenbergh et al. (2014), en dus uitgedrukt in TDS. Om deze TDS waardes om te zetten naar volumes werd gebruik gemaakt van de bulkdichtheid. Hierbij werd gebruik gemaakt van een bulkdichtheid van 1,45 ton/m³, een waarde die representatief is voor de bulkdichtheid van een slibrijke Scheldebodem (Bastin, 1993). Het zijn uiteindelijk deze volumewaardes zand en slib die de randvoorwaardes vormen voor de fluviale sedimentimport (Tabel 6).

Figuur 8 – Schematische voorstelling van de rekencellen met aanduiding van de randen voor fluviatiele sedimentimport



Tabel 5 – Zand- en slibgehalte van het fluviatiele sediment in de rivieren Bovenschelde, Rupel en Dender. p25 = 25^{ste} percentiel, p50 = mediaanwaarde, p75 = 75^{ste} percentiel.

Rivier	Station	Aantal stalen	Slibgehalte [%]			Zandgehalte [%]		
			p25	p50	p75	p25	p50	p75
Bovenschelde	Gavere	90	91.0	92.7	94.0	6.0	7.3	9.0
Rupel	Duffelsluis, Haacht, Epegem	413	73.5	86.6	91.4	8.6	13.4	26.5
Dender	Appels	12	91.5	92.1	94.8	5.2	7.9	8.5

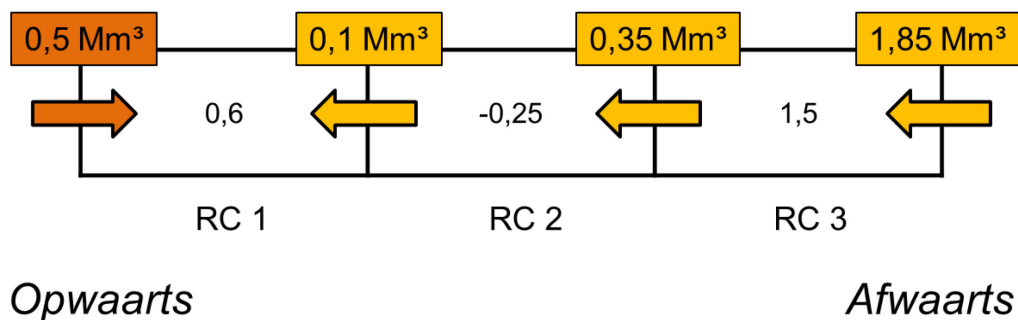
Tabel 6 – Overzicht van de opgelegde randvoorwaarden voor sedimentimport vanuit de rivieren over de periode 2001-2011

Rand	Totale sedimentlading [TDS]	Aandeel zand [TDS]	Aandeel slib [TDS]	Aandeel zand [m ³]	Aandeel slib [m ³]
Rupel (KN, GN, Dijle, Demer, Zenne)	873318	117108	756459	80764	521696
Boven-Zeeschelde (Bovenschelde)	1168194	85155	1083027	58728	746915
Boven-Zeeschelde (Dender)	340242	26891	313353	18546	216105
Durme (Moervaart)	0	0	0	0	0

2.8 Berekening zand- en slibtransport over randen rekencellen

Op basis van de opwaartse randvoorwaarden en de volumeveranderingen per rekencel (vergelijking (8) en (9), §2.6.1) werd door terugrekening het sedimenttransport over de rekencellen heen bepaald. Stel, we beschouwen 3 rekencellen met netto-volumeveranderingen van respectievelijk $0,6 \text{ Mm}^3$, $-0,25 \text{ Mm}^3$ en $1,5 \text{ Mm}^3$, en een opwaartse randvoorwaarde (fluviatische import) van $0,5 \text{ Mm}^3$ (Figuur 9). Het sedimenttransport aan de afwaartse rand van rekencel 1 wordt dan bepaald door het verschil tussen de opwaartse randvoorwaarde en de netto-volumeverandering in rekencel 1 ($= 0,5 \text{ Mm}^3 - 0,6 \text{ Mm}^3 = -0,1 \text{ Mm}^3$). Het teken van de bekomen sedimenttransportwaarde is negatief wat wil zeggen dat de richting van sedimenttransport tegengesteld is aan de fluviatische import over de opwaartse rand. Er wordt dus $0,1 \text{ Mm}^3$ getransporteerd van rekencel 2 naar rekencel 1. Eens het sedimenttransport aan de afwaartse rand van rekencel 1 is gekend kan het sedimenttransport voor de overige rekencellen bepaald worden door terugrekening in afwaartse richting.

Figuur 9 – Berekening sedimenttransport voor 3 fictieve rekencellen met een opgelegde randvoorwaarde van $0,5 \text{ Mm}^3$



2.9 Gevoeligheidsanalyse

De grootte en richting van het zand- en slibtransport wordt enerzijds bepaald door de volumeveranderingen in de rekencellen, en anderzijds door de opgelegde opwaartse randvoorwaarden (§2.8). Om de volumeveranderingen in de rekencellen te bepalen werd rekening gehouden met de bodemsamenstelling (zie §2.5) en de bagger- en stortactiviteiten. Voor de bagger- en stortactiviteiten werden hierbij de beunvolumes of gereduceerde volumes omgezet naar profielvolumes (§2.6.1). Voor de opwaartse randvoorwaarden werd een onderscheid gemaakt tussen zand en slib aan de hand van de korrelgrootteverdeling van het gesuspendeerde sediment in de rivieren (§2.7). Om na te gaan wat de invloed is van elk van deze aspecten op de grootte en de richting van het zand- en slibtransport werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd aan de hand van 4 verschillende scenario's. In het referentiescenario werden de *media*gehalten zand en slib opgelegd voor bodemsamenstelling en sedimentimport (Tabel 7). Daarnaast werd voor de omzetting van gereduceerde bagger- en stortvolumes slib naar profielvolumes slib gerekend met een bulkdichtheid van $1,45 \text{ ton/m}^3$. Deze waarde is in overeenstemming met de gemiddelde bulkdichtheid van een slibrijke Scheldebodem (Bastin, 1993). Wat betreft zand werd er voor de omzetting van beunvolumes naar profielvolumes van uit gegaan dat het profielvolume 10% kleiner is dan het beunvolume zand (§2.6.1 en vergelijking (10)). Op deze omzetting werd geen gevoeligheidsonderzoek toegepast. Naast het referentiescenario werden de scenario's 'V_{slib} hoog' en 'V_{zand} hoog' doorgerekend (Tabel 7). In het scenario 'V_{slib} hoog' zijn de randvoorwaarden zo gekozen opdat de slibvolumes groter zijn dan het referentiescenario en de zandvolumes kleiner. Dit werd bekomen door te werken met de 75^{ste} percentielwaardes voor slib en de 25^{ste} percentielwaardes voor zand (Tabel 7). Voor de in-situ bulkdichtheid van slib werd een waarde van $1,2 \text{ ton/m}^3$ opgelegd. Deze lagere waarde in in-situ bulkdichtheid wordt door Bastin (1993) omschreven als de grenswaarde tussen mobiel en niet-mobiel slib, en leidt tot een groter volume slib in profiel. Voor het scenario 'V_{zand} hoog' zijn de randvoorwaarden zo gekozen opdat de

zandvolumes groter zijn dan het referentiescenario en de slibvolumes kleiner (Tabel 7). Er werd gewerkt met de 75^{ste} percentielwaardes voor zand en de 25^{ste} percentielwaardes voor slib, en een in-situ bulkdichtheid van 1,6 ton/m³ voor slib. Bij deze bulkdichtheid hebben we te maken met een meer compacte en vaste Scheldebodem (Bastin, 1993). Tenslotte werd het scenario 'Rand 0' doorgerekend. Dit scenario is in overeenstemming met het referentiescenario, maar neemt aan dat er geen sediment vanuit de rivieren naar het estuarium wordt getransporteerd (Tabel 7).

Tabel 7 – Scenario's gevoeligheidsanalyse met bijhorende randvoorwaarden

Scenario	Bodemsamenstelling	ρ_b^{profiel} slib [ton/m ³]	Sedimentimport rivieren
Referentie	Mediaanwaardes zand en slib	1,45	Mediaanwaardes zand en slib
V _{slib} hoog	Slib 75 ^{ste} percentiel, zand 25 ^{ste} percentiel	1,2	Slib 75 ^{ste} percentiel, zand 25 ^{ste} percentiel
V _{zand} hoog	Slib 25 ^{ste} percentiel, zand 75 ^{ste} percentiel	1,6	Slib 25 ^{ste} percentiel, zand 75 ^{ste} percentiel
Rand 0	Mediaanwaardes zand en slib	1,45	0

3 Gegevens

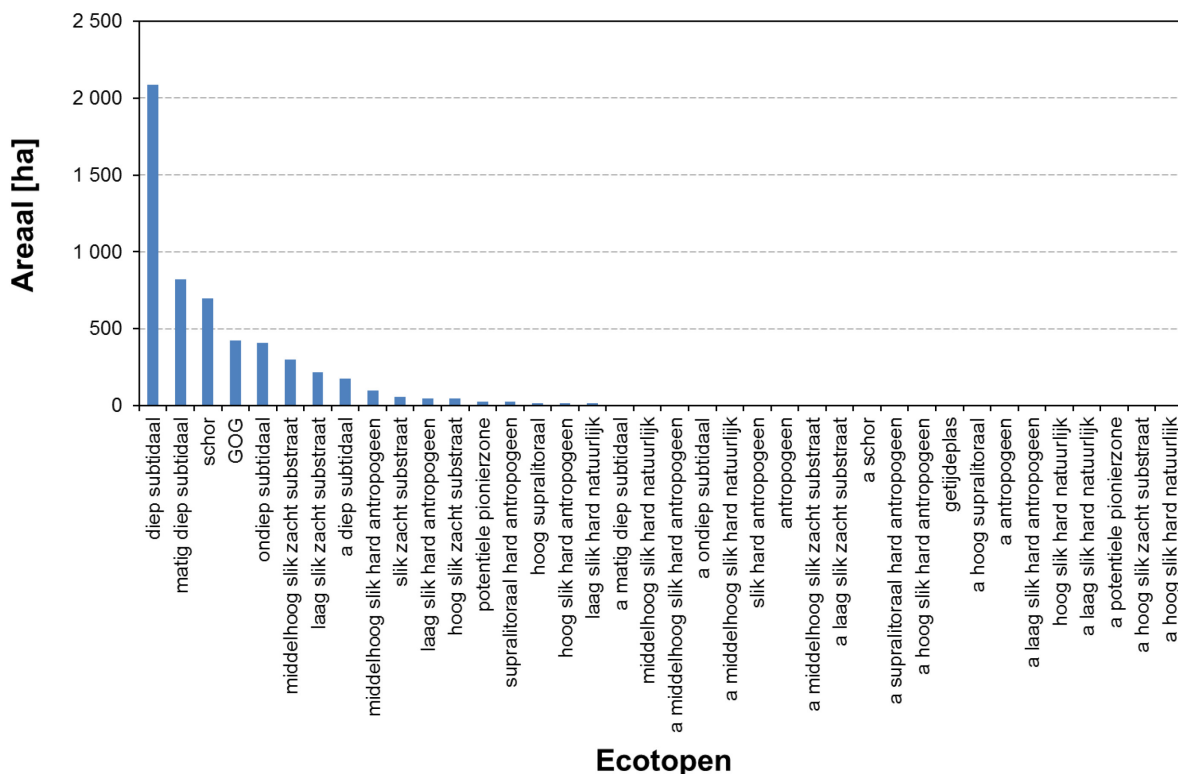
3.1 Topo-bathymetrie

Topo-bathymetrische gegevens werden verzameld voor de Beneden-Zeeschelde, Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme, en dit voor 2 verschillende tijdstippen representatief voor de tijdstippen waarover de sedimentbalans werd berekend (2001 en 2011). De topo-bathymetrische gegevens zijn afkomstig uit de GIS-databank van Maritieme Toegang. We merken hierbij op dat niet alle gegevens afkomstig zijn uit hetzelfde jaartal. Voor de situatie 2001 zijn de bathymetrische gegevens van de Rupel en de Durme enkel beschikbaar voor de jaartallen 1995 en 1997 (Tabel 1). Hoe hiermee werd omgegaan wordt besproken in §2.4.1. Ook de resolutie van de gegevens varieert van 1 x 1 m tot 5 x 5 m. Alle gebruikte gegevens werden uiteindelijk vergrid naar een resolutie van 5 x 5 m.

3.2 Ecotopenkaart

In deze studie werd gebruik gemaakt van de ecotopenkaart die de situatie voorstelt voor het jaar 2010. Een ecotopenkaart van de Zeeschelde wordt over het algemeen opgebouwd op basis van een fysiotopenkaart en een geomorfologische kaart. Meer informatie omtrent deze methodiek is terug te vinden in Van Braeckel et al. (2012) en Van Braeckel (2013). Een overzicht van de onderscheiden ecotopen in de kartering van 2010 en de bijhorende arealen wordt gegeven in Figuur 10. De ecotopenkaart werd in voorliggende studie gebruikt om de bodemsamenstelling uit te karteren. We merken hierbij op dat het aantal ecotopen (voorgesteld in Figuur 10) sterk gereduceerd werd door aggregatie. Voor de methodiek wordt verwezen naar §2.5.

Figuur 10 – Overzicht van de ecotopen onderscheiden in de kartering van 2010, gerangschikt volgens areaal.



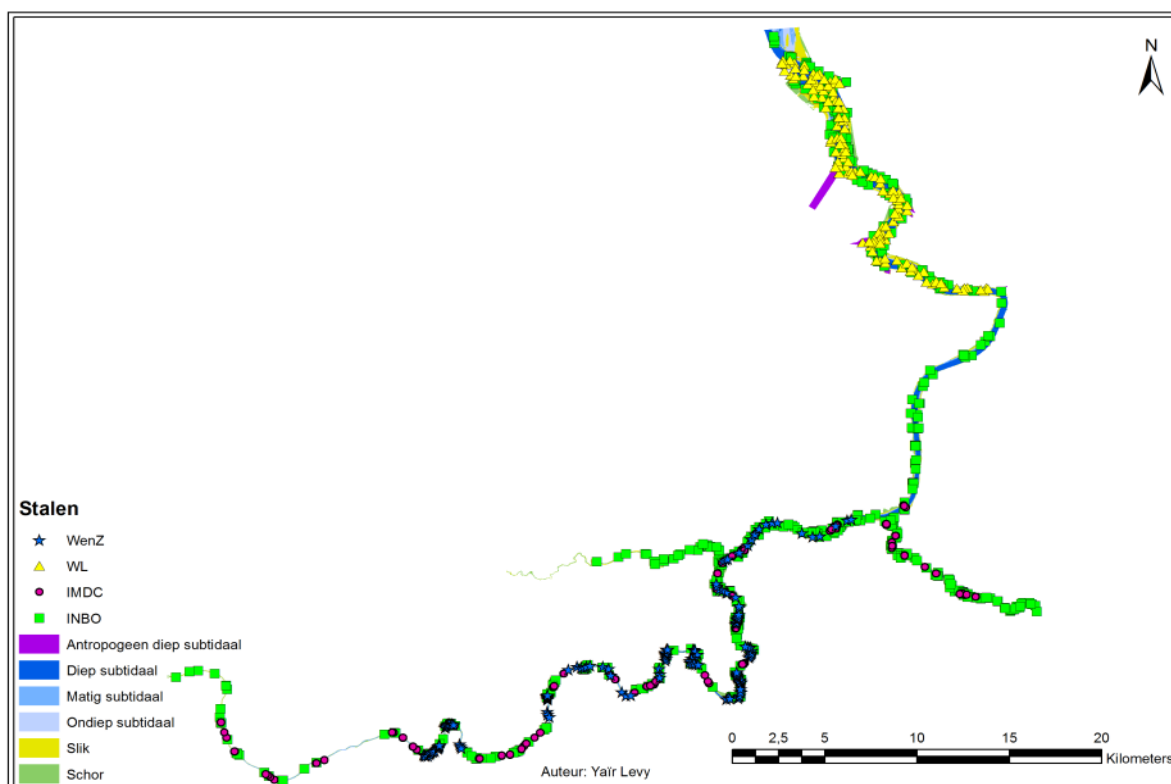
3.3 Bodemstalen en granulometrie

Er werd gebruik gemaakt van 4 datasets met bodemstaalgegevens. De datasets onderscheiden zich door de zone waarin de stalen werden genomen en de periode van staalname (Tabel 8). Op elk van de stalen werd een granulometrische analyse uitgevoerd. Hierbij werd in een eerst stap de grovere fractie (grindfractie) verwijderd door het staal te zeven op 2 mm. Na verwijdering van de grindfractie werd aan de hand van laserdiffractie (MasterSizer) de korrelgrootteverdeling bepaald voor de fractie kleiner dan 2 mm. Dit laat toe om de lithologische samenstelling van de bodemstalen uit te drukken in volumepercentages slib (< 63 µm) en zand (63 µm – 2 mm). Voor de IMDC en W&Z werd ook de grindfractie bepaald. Deze fractie wordt buiten beschouwing gelaten bij de berekening van de Voor een gedetailleerd overzicht van de locaties per rekencel, en de bijhorende zand- en slibgehalten wordt verwezen naar Appendix (Appendix B – Ecotopenkaarten en bodemstalen).

Tabel 8 – Overzicht bodemstaalgegevens

Dataset	Zone	Periode	Grindfractie bepaald
WL (Vos et al., 2011; IMDC & VUB, 2010)	Subtidale, afwaartse deel Beneden-Zeeschelde	2009	Nee
INBO (INBO, 2011)	Subtidaal en intertidaal Zeeschelde, Rupel en Durme	1999-2010	Nee
IMDC (IMDC, 2015)	Subtidaal Boven-Zeeschelde en Rupel	2014	Ja
W&Z	Subtidaal Boven-Zeeschelde		Ja

Figuur 11 – Ecotopenkaart 2010 (geaggregeerd) met aanduiding van de bodemstaallocaties opgesplitst per dataset.



3.4 Baggergegevens

Voor de Beneden-Zeeschelde werden de bagger- en stortgegevens opgeleverd door Afdeling Maritieme Toegang. In deze dataset wordt een onderscheid gemaakt tussen zand en slib, waarbij zandvolumes voorgesteld worden in beunvolume en slibvolumes in gereduceerde volumes. Voor de Boven-Zeeschelde en Durme werden de bagger- en stortgegevens opgeleverd door Afdeling Zeeschelde. In deze dataset wordt geen onderscheid gemaakt tussen zand en slib, en worden totale sedimenthoeveelheden opgeleverd als beunvolume. Hoe werd omgegaan met de baggergegevens, op welke manier beunvolumes en gereduceerde volumes werden omgezet naar profievolumes, en hoe een onderscheid werd gemaakt tussen zand en slib voor de gegevens van de Boven-Zeeschelde wordt besproken in §2.6.1.

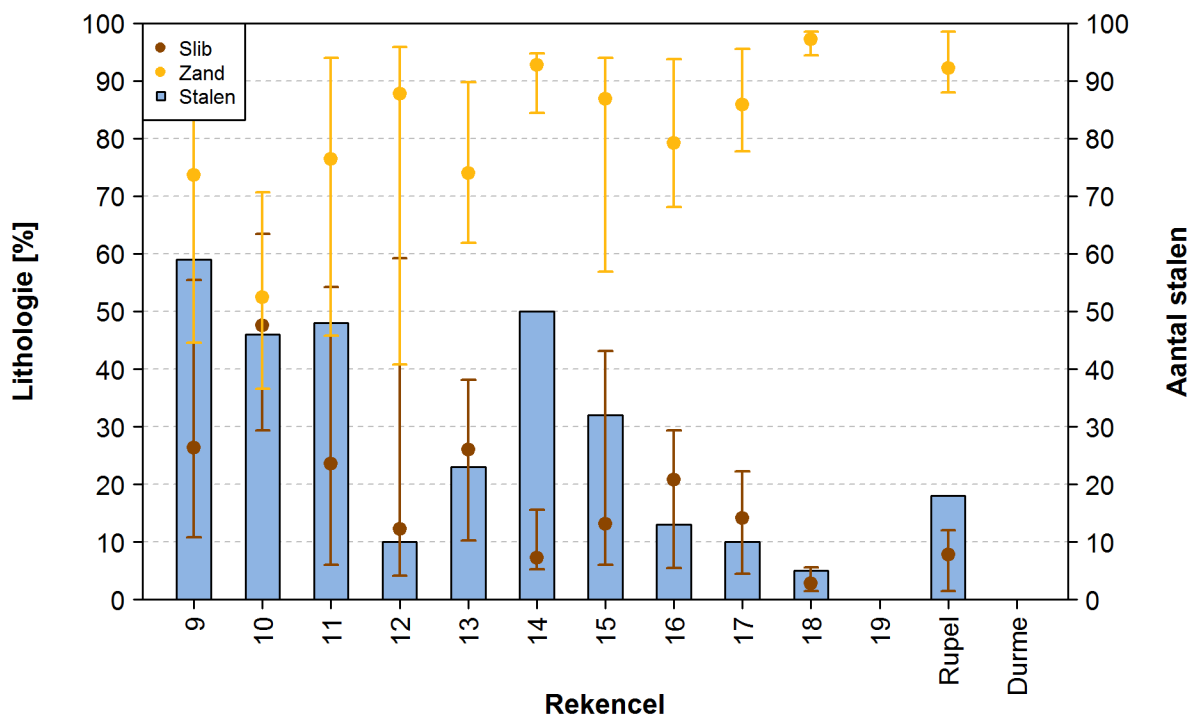
4 Resultaten en Bespreking

4.1 Bodemsamenstelling en ecotopenareaal

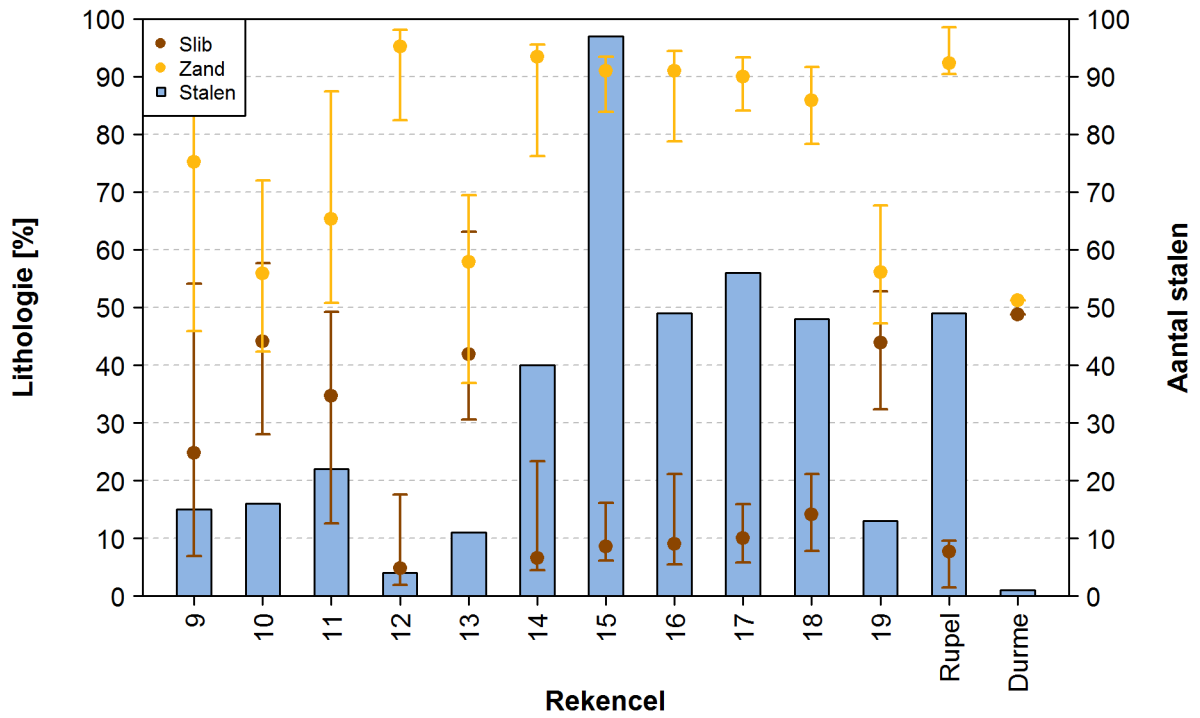
We toonden reeds aan dat de bodemsamenstelling varieert tussen de onderscheiden ecotopengroepen (Figuur 5). Maar ook binnen éénzelfde ecotoop kunnen er langsheen het estuarium variaties in bodemsamenstelling optreden. Voor de subtidale ecotopen kunnen we over het algemeen stellen dat de bodem zandig is (50-95% zand). Enkel voor de meest opwaartse en afwaartse delen van de Zeeschelde is er een toename in slibgehalte tot maximaal 55% (zie Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14). Uitzondering op de voornamelijk zandige bodems van het subtidaal is het ecotoop antropogeen subtidaal (bv. sluisoegang) waar de bodem beduidend slibrijker is (Figuur 15). Wat betreft de slikken en schorren observeren we een eerder beperkte ruimtelijke variatie in bodemsamenstelling (Figuur 16 en Figuur 17). Enkel voor rekencel 13 en rekencel Durme is het slik beduidend zandiger. Over het algemeen zijn de slikken zandiger (50-75% zand), terwijl de schorren slibrijker zijn (50-70% slib).

Tenslotte merken we op dat er in opwaartse richting een belangrijke afname in ecotopenareaal is. Hierbij neemt niet enkel het totale areaal af maar wijzigt ook de relatieve verhouding van ecotopen langsheen het estuarium (Figuur 18 en Figuur 19). Beide factoren hebben een belangrijke invloed op de berekening van de volumeveranderingen per rekencel (vergelijking (4) en (5)).

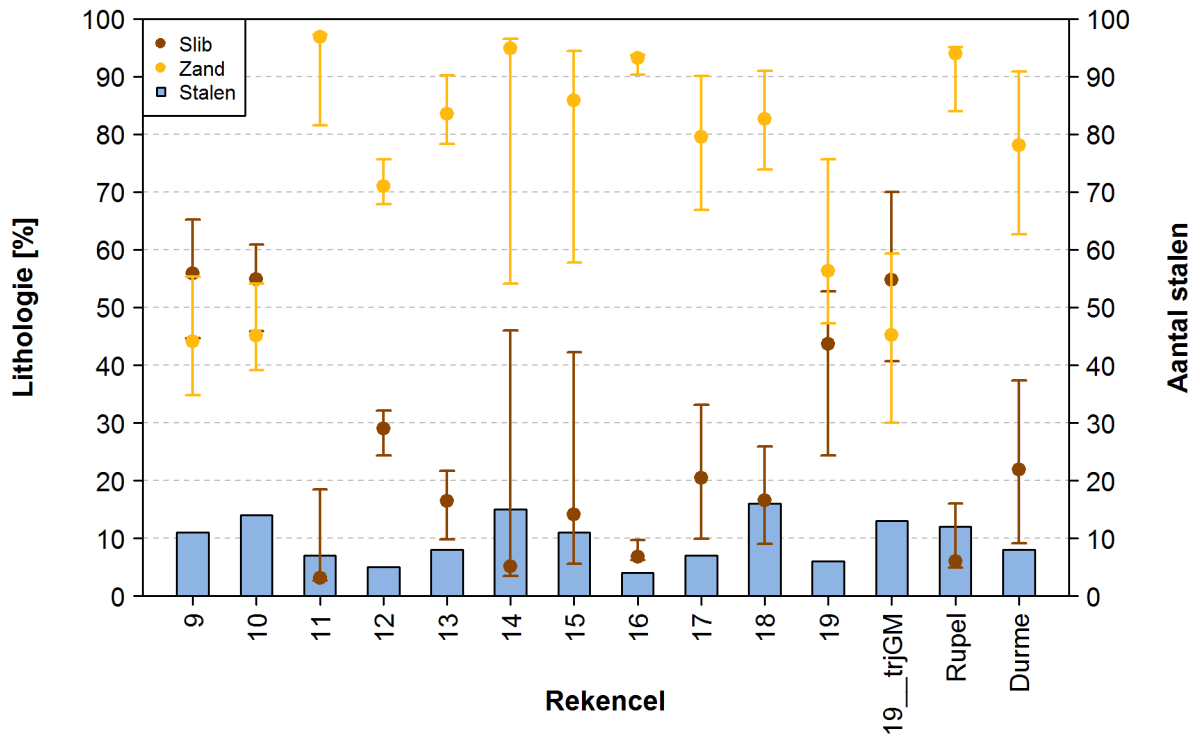
Figuur 12 – Bodemsamenstelling van het ecotoop diep subtidaal



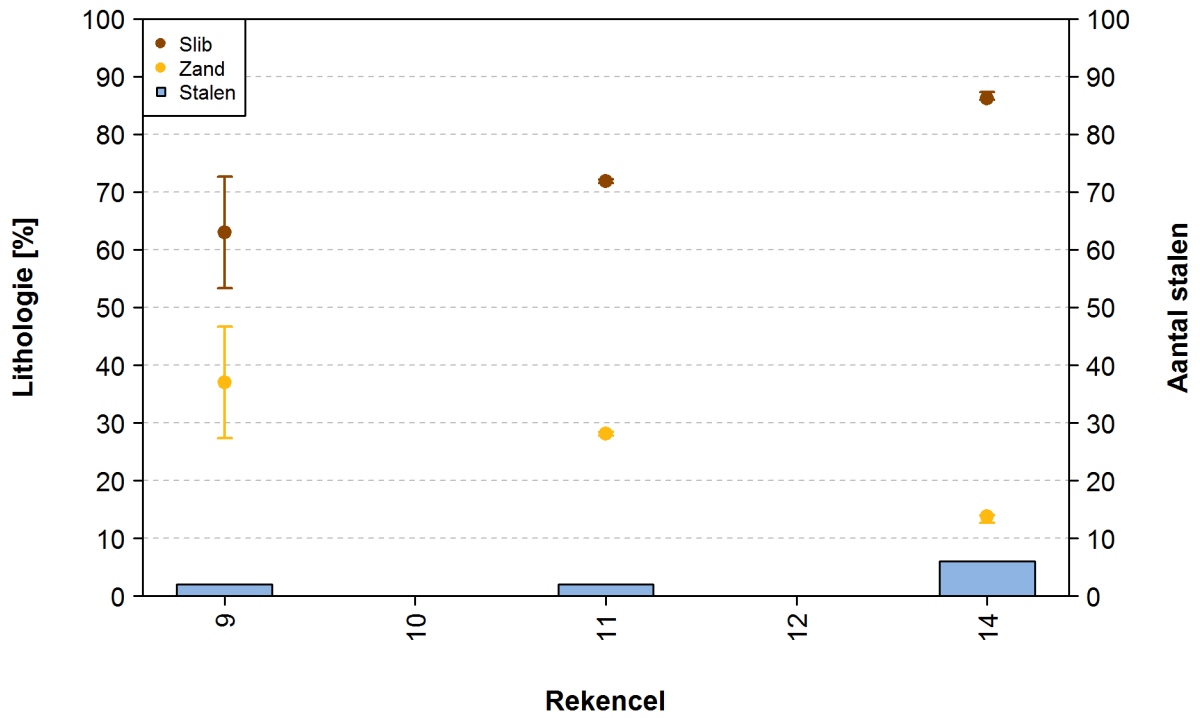
Figuur 13 – Bodemsamenstelling van het ecotoop matig diep subtidaal



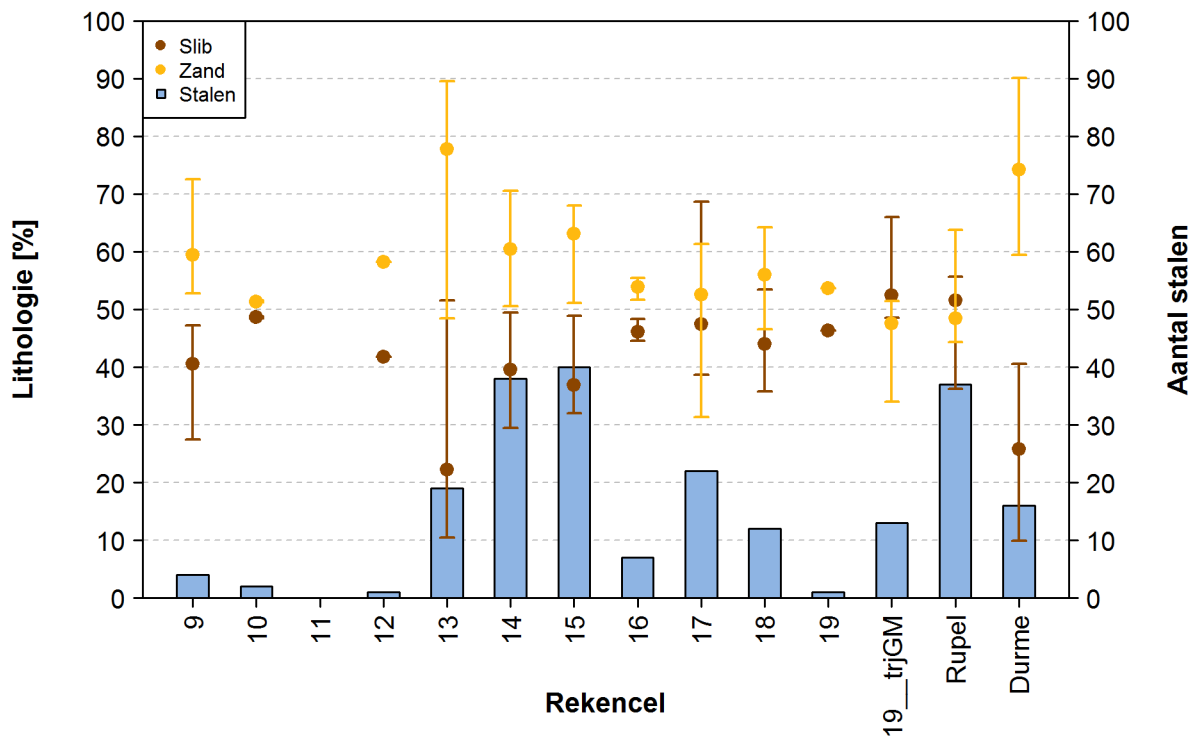
Figuur 14 – Bodemsamenstelling van het ecotoop ondiep subtidaal



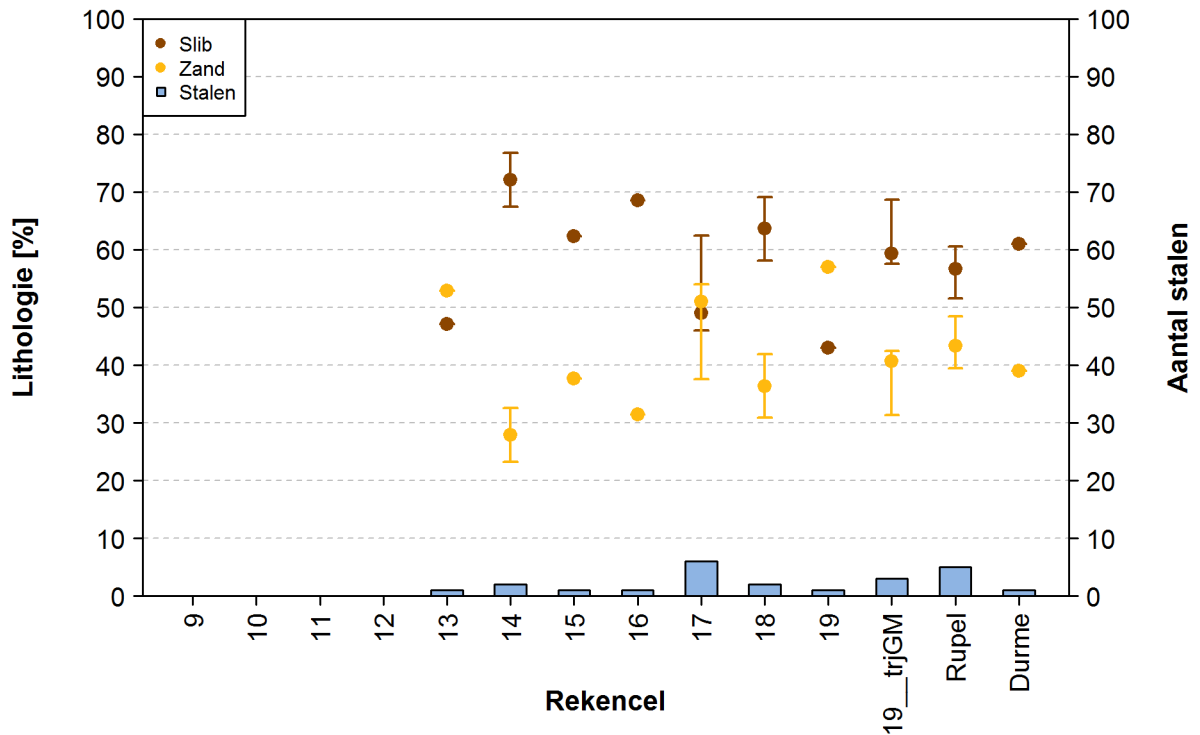
Figuur 15 – Bodemsamenstelling van het ecotoop antropogeen diep subtidaal



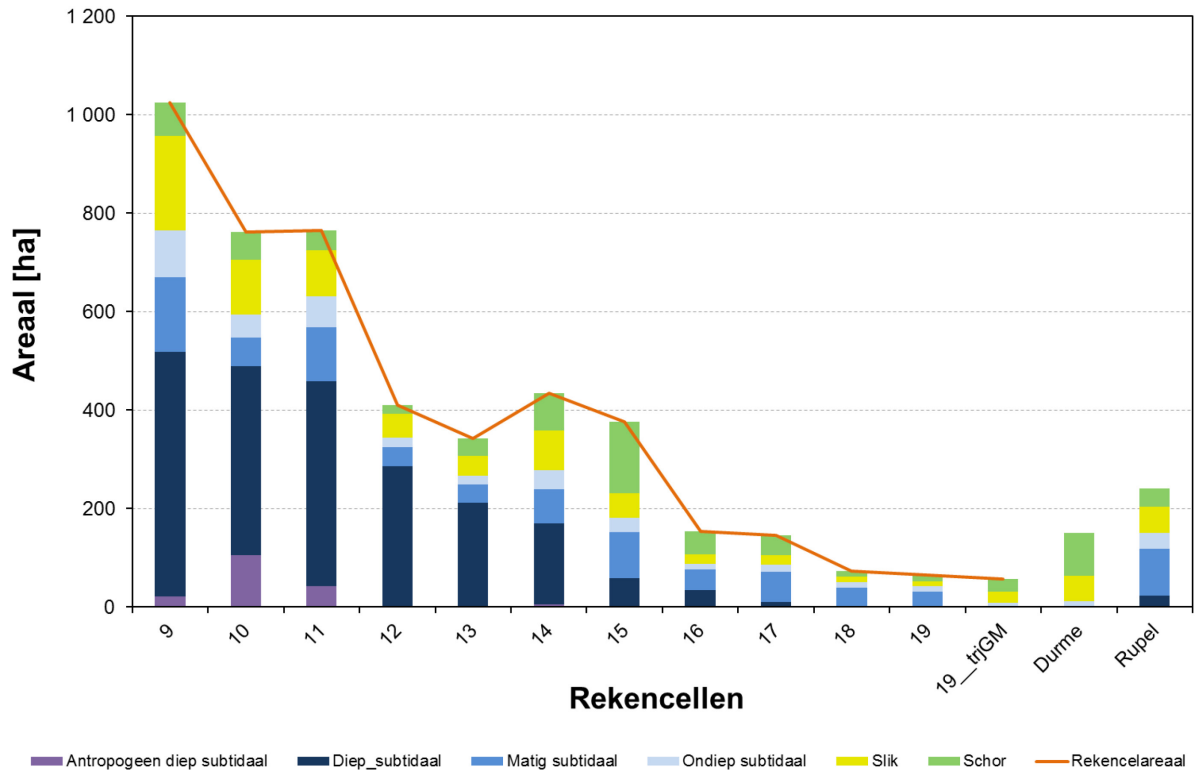
Figuur 16 – Bodemsamenstelling van het ecotoop slik



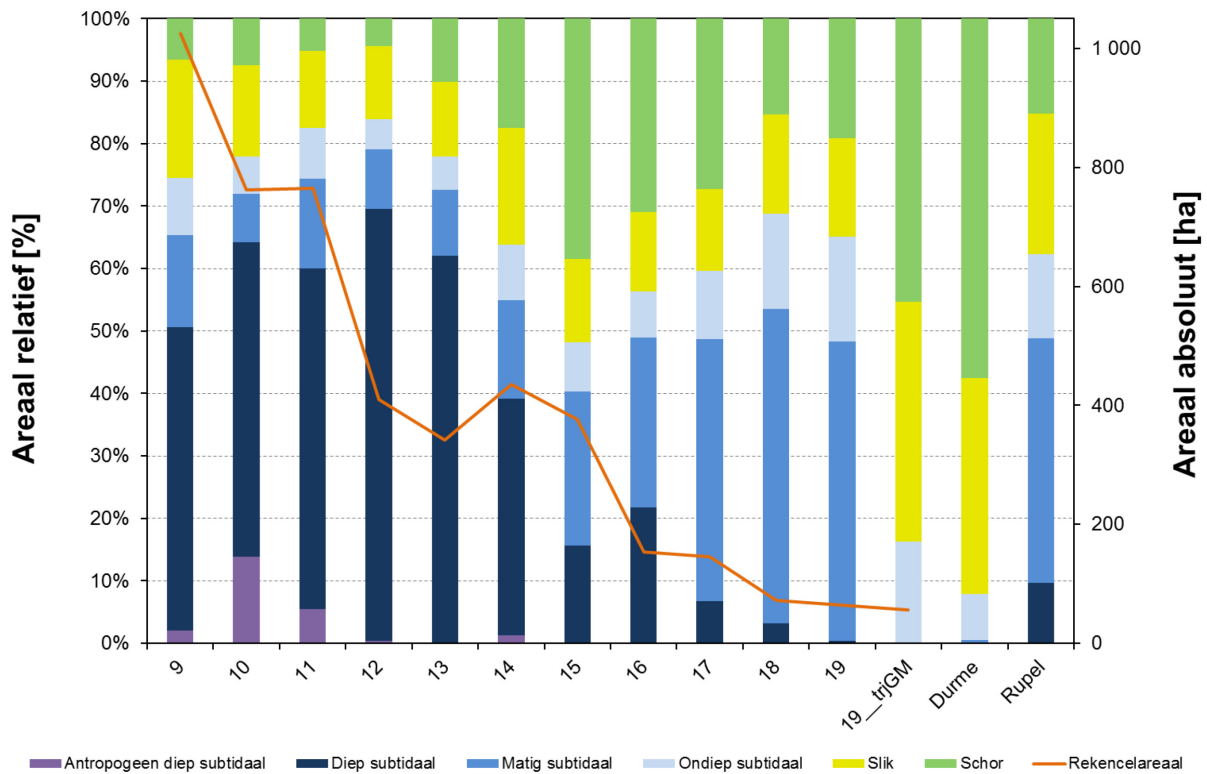
Figuur 17 – Bodemsamenstelling van het ecotoop schor



Figuur 18 – Areaal aan ecotopen per reekencel



Figuur 19 – Relatieve verhouding aan ecotopen per rekencel

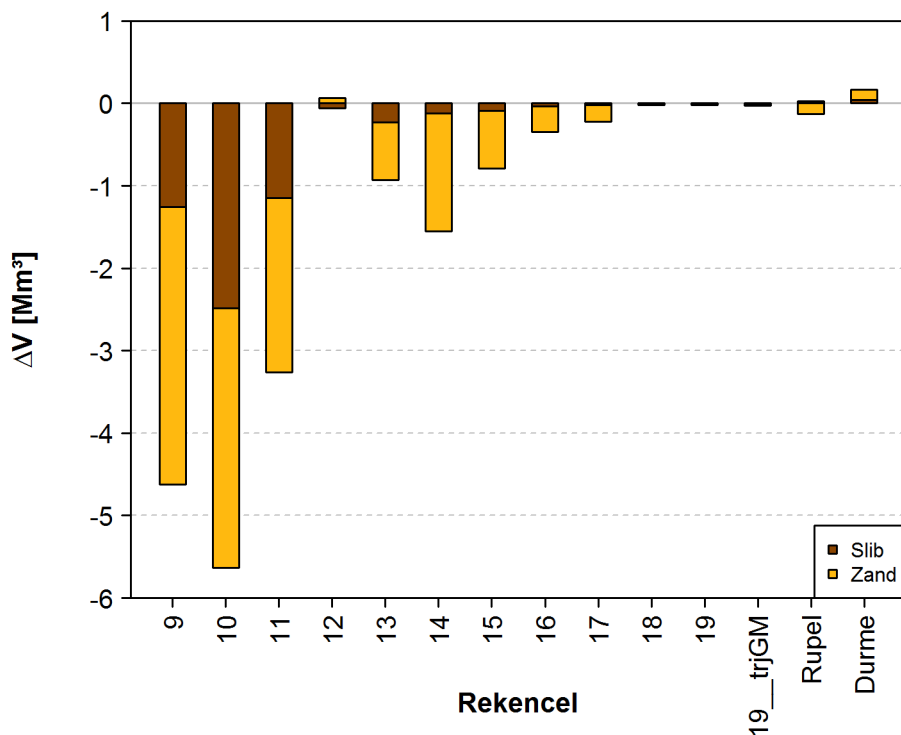


4.2 Sedimentbalans

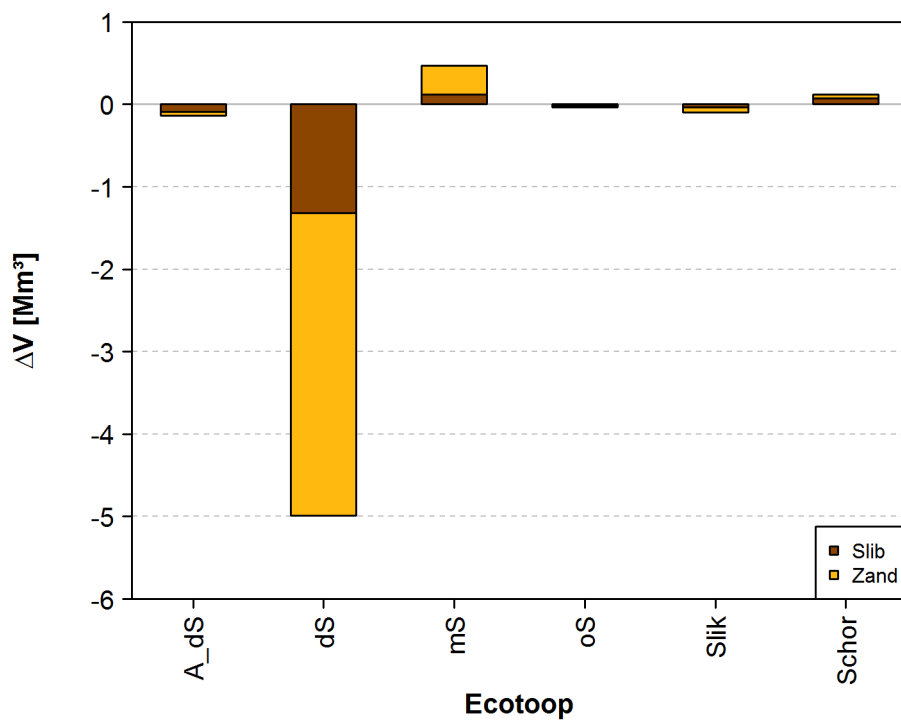
4.2.1 Volumeverschillen op basis van topo-bathymetrie

De netto-volumeverandering zand en slib berekend per rekencel op basis van de topo-bathymetrieën (zie vergelijkingen (3), (4) en (5)) toont over het algemeen een afname in bodemvolume tussen 2001 en 2011 (Figuur 20). De afname is het sterkst voor rekencellen 9, 10 en 11, wat naast het toenemen van de diepte (zie Figuur 3) in belangrijke mate te verklaren valt door het grote areaal aan estuarium in deze rekencellen (Figuur 18). Binnen deze afzonderlijke rekencellen is de afname in bodemvolume hoofdzakelijk toe te schrijven aan een afname in bodemvolume binnen het ecotoop diep subtidaal (Figuur 21). Aangezien het ecotoop diep subtidaal hoofdzakelijk gekenmerkt wordt door een zandige bodem (Figuur 5 en Figuur 12) verklaart dit meteen waarom er voornamelijk zandige bodem verwijderd is uit rekencellen 9, 10 en 11 (Figuur 20). Voor de meer opwaartse rekencellen worden de bodemvolumeveranderingen in grote mate verklaard door wijzigingen in de subtidaal ecotopenklassen (dus niet enkel diep subtidaal), en in sommige gevallen door bodemvolumeveranderingen binnen het ecotoop slik.

Figuur 20 – Netto volumeverandering op basis van de topo-bathymetrieën uit 2001 en 2011.



Figuur 21 – Netto volumeverandering voor rekencel 9 op basis van de topo-bathymetrieën uit 2001 en 2011, opgesplitst per ecotoop.

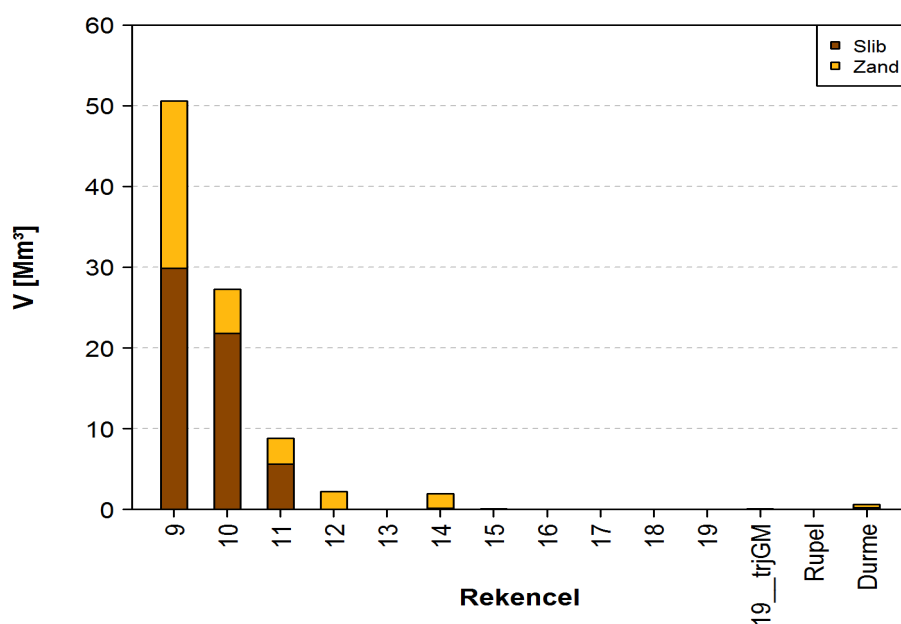


A_dS = antropogeen diep subtidaal, dS = diep subtidaal, mS = matig diep subtidaal, oS = ondiep subtidaal.

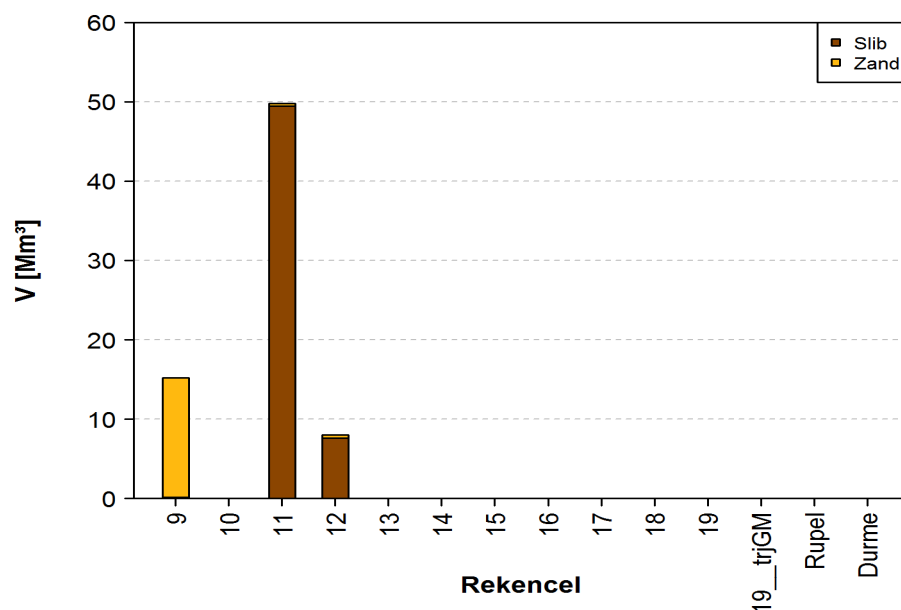
4.2.2 Volumes baggeren, storten en zandwinning

De bodemveranderingen waargenomen op basis van de topo-bathymetrieën (Figuur 3) zijn in belangrijke mate beïnvloed door menselijk ingrijpen (baggeren, storten en zandwinning). In rekencellen 9 en 10 zijn er over de periode 2001 tot 2011 de grootste hoeveelheden sediment gebaggerd (Figuur 22). In rekencel 10 gaat het voornamelijk over slib, in rekencel 9 is er ook een grote hoeveelheid zand gebaggerd. We merken hierbij op dat de grote hoeveelheid gebaggerd zand in rekencel 9 in belangrijke mate toe te schrijven is aan de zandwinning ter hoogte van Schaar Ouden Doel. In de Boven-Zeeschelde vindt het merendeel van de baggerwerkzaamheden plaats in rekencel 14. Wat betreft het storten van sediment is er een duidelijk onderscheid tussen waar er zand en waar er slib gestort wordt. Voor zand is dit in rekencel 9 ter hoogte van Schaar Ouden Doel, voor slib is dit in rekencellen 11 en 12 ter hoogte van de stortlocaties Oosterweel (Plaat van Boomke) en Punt van Melsele (Figuur 23).

Figuur 22 – Gebaggerde profievolumes zand (inclusief zandwinning) en slib over de periode 2001 tot 2011.

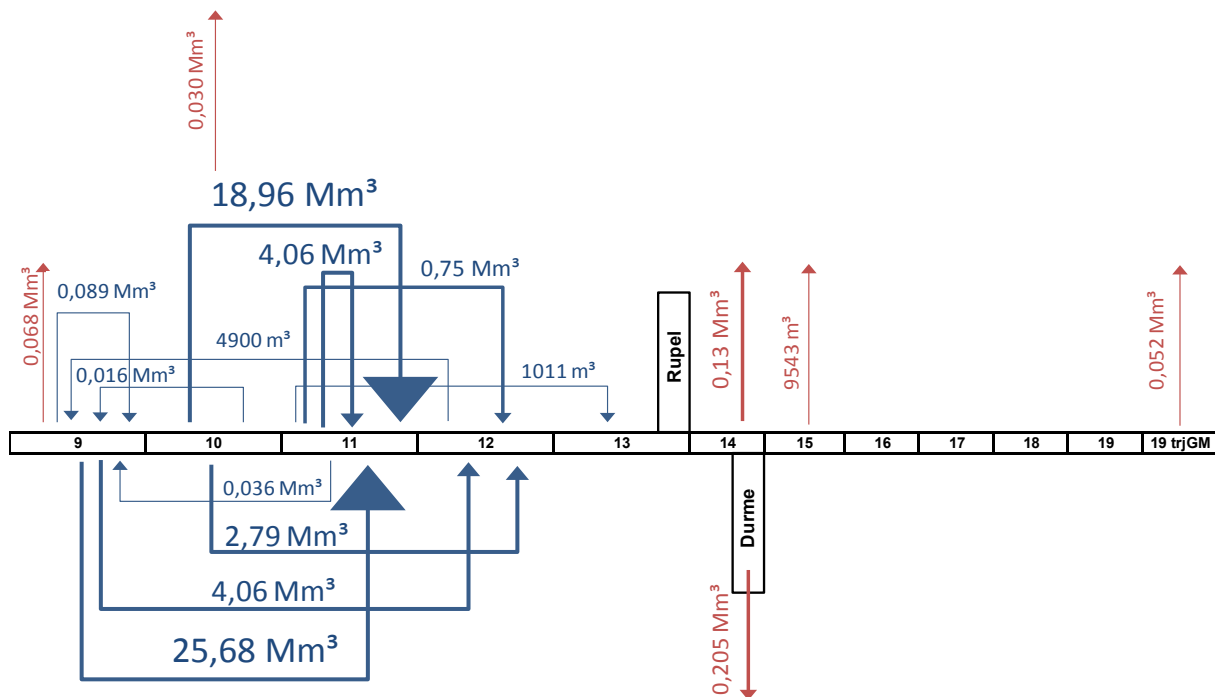


Figuur 23 – Gestorte profievolumes zand en slib over de periode 2001 tot 2011.



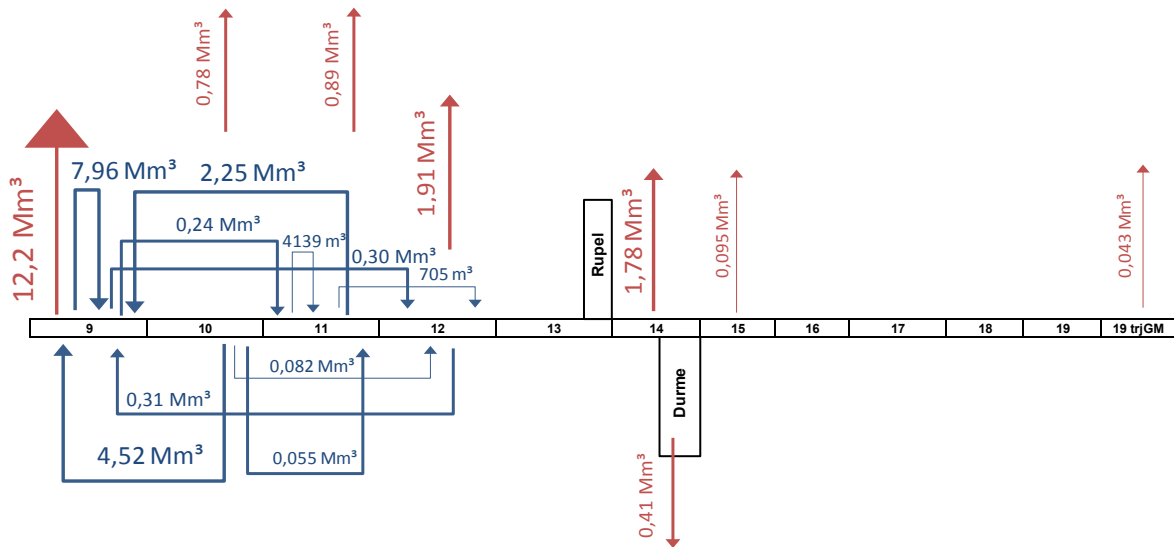
Figuur 22 en Figuur 23 tonen reeds aan dat het baggeren en storten van specie niet noodzakelijkerwijs binnen éénzelfde rekencel gebeurt. Zo worden er grote hoeveelheden slib gebaggerd in rekencellen 9 en 10, maar wordt dit slib niet teruggestort in deze rekencellen. Een analyse van de bagger- en stortgegevens toont ons inderdaad dat er in de Beneden-Zeeschelde belangrijke fluxen van slib over de rekencellen heen (blauwe pijlen, Figuur 24). Zo wordt het gebaggerd slib in rekencellen 9 en 10 gestort op de locaties Oosterweel en Punt van Melsele. Deze locaties zijn gelegen in rekencel 11 (Oosterweel ook deels in rekencel 12, zie Figuur 7), en verklaren op die manier de grote fluxen van slib tussen enerzijds rekencellen 9 en 10 (bagger) en anderzijds rekencellen 11 en 12 (stort). Wat betreft zand zijn de sedimentfluxen in de Beneden-Zeeschelde beduidend kleiner (blauwe pijlen, Figuur 25). De belangrijkste fluxen vinden plaats tussen enerzijds rekencellen 10 en 11 (bagger), en anderzijds tussen rekencel 9 (stort). Opvallender is de onttrekking van een grote hoeveelheid zand ter hoogte van rekencel 9 (rode pijl, Figuur 25). Deze onttrekking kan grotendeels verklaard worden door de zandwinning die plaatsvindt ter hoogte van Schaar Ouden Doel. Wat betreft de Boven-Zeeschelde (rekencellen 13 tot en met 19 trjGM) zijn er geen sedimentfluxen over de rekencellen heen. De belangrijkste soort ingreep in de Boven-Zeeschelde is de onttrekking van sediment, en dit uit rekencellen 14, 15, 19trjGM en Durme (Figuur 24 en Figuur 25). Een groot deel van dit sediment wordt gebruikt voor de aanleg van de overstromingsgebieden langsheen de Zeeschelde.

Figuur 24 – Schematische voorstelling van de slibfluxen ten gevolge van baggeren en storten (blauwe pijlen) en de slibextracties (rode pijlen), berekend over de periode 2001-2011.



Waardes stellen de profievolumes slib voor.

Figuur 25 – Schematische voorstelling van de zandfluxen ten gevolge van baggeren en storten (blauwe pijlen) en de zandextracties (rode pijlen), berekend over de periode 2001-2011.



Waardes stellen de profievolumes zand voor.

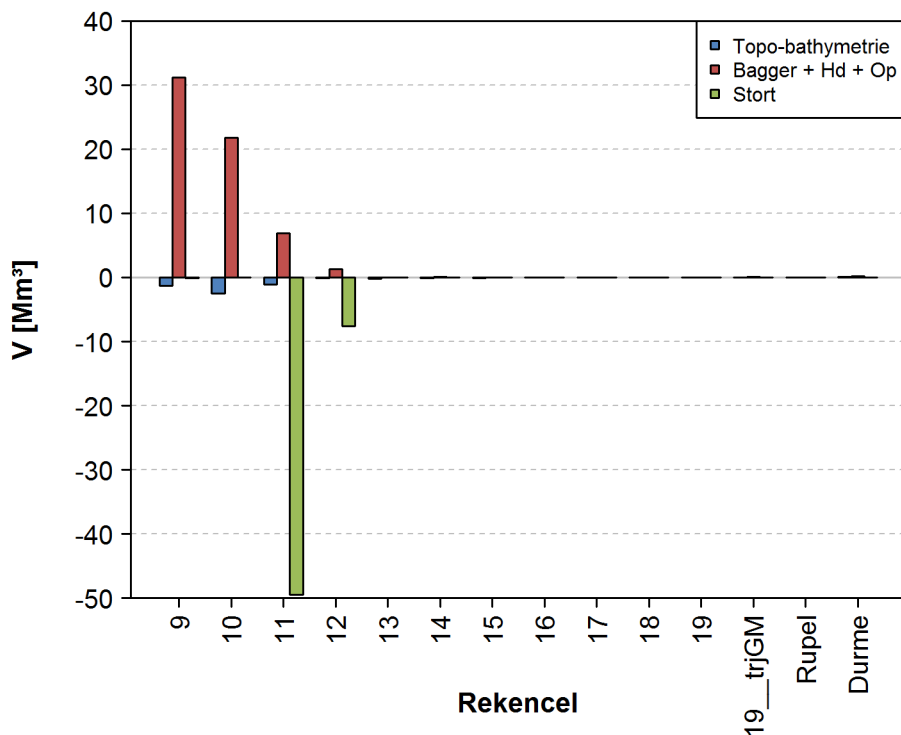
4.2.3 Totale sedimentbalans

Per rekencel kan de netto-volumeverandering zand en slib berekend worden op basis van de verschilbathymetrie, de bagger- en storthoeveelheden, de eventuele zandwinning, en de fluxen naar de havendokken en ontpolderingen (zie §2.6.2, vergelijkingen (16) en (17)). Baggervolumes en fluxen naar havendokken en ontpolderingsgebieden krijgen hierbij een positieve waarde in de balans (want verwijderd uit rekencel), stortvolumes krijgen een negatieve waarde (want toegevoegd aan rekencel). Voor meer informatie omtrent deze methodiek wordt verwezen naar §2.6.1 en §2.6.2.

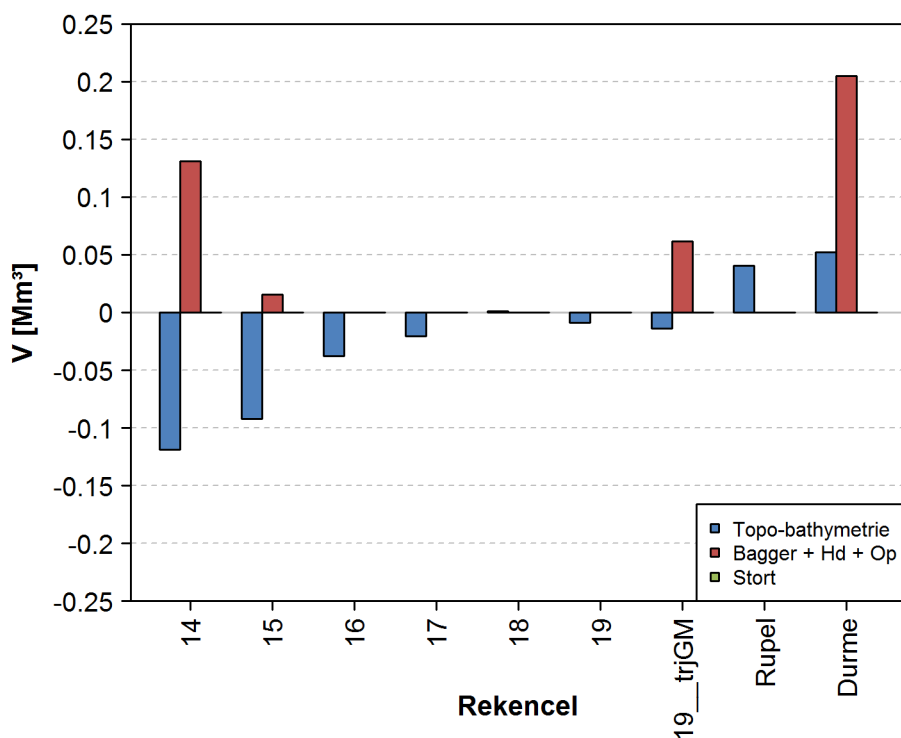
Wat betreft slib zijn de bagger- en storthoeveelheden in de Beneden-Zeeschelde groot ten opzichte van de waargenomen volumeveranderingen (Figuur 26). De totale slibbalans in de Beneden-Zeeschelde wordt dan ook in belangrijke mate bepaald worden door de bagger- en storthoeveelheden (Figuur 30). Wat betreft de Boven-Zeeschelde zijn de baggerhoeveelheden gelijkaardig aan de waargenomen volumeveranderingen. Er wordt meest slib gebaggerd in rekencellen 14 en 19 trjGM, en in de Durme (Figuur 27).

Wat betreft zand zijn de bagger- en storthoeveelheden in de Beneden-Zeeschelde over het algemeen kleiner dan de bagger- en storthoeveelheden slib (Figuur 26 en Figuur 28). In de Boven-Zeeschelde is dit beeld omgekeerd en wordt er meer zand gebaggerd dan er slib wordt gebaggerd. Dit blijkt ook uit de totale sedimentbalans (rekening houdende met de antropogene invloeden) waar de slibvolumes beduidend groter zijn voor de rekencellen in de Beneden-Zeeschelde (Figuur 30), en de zandvolumes meestal groter zijn voor de rekencellen in de Boven-Zeeschelde en Durme (Figuur 31).

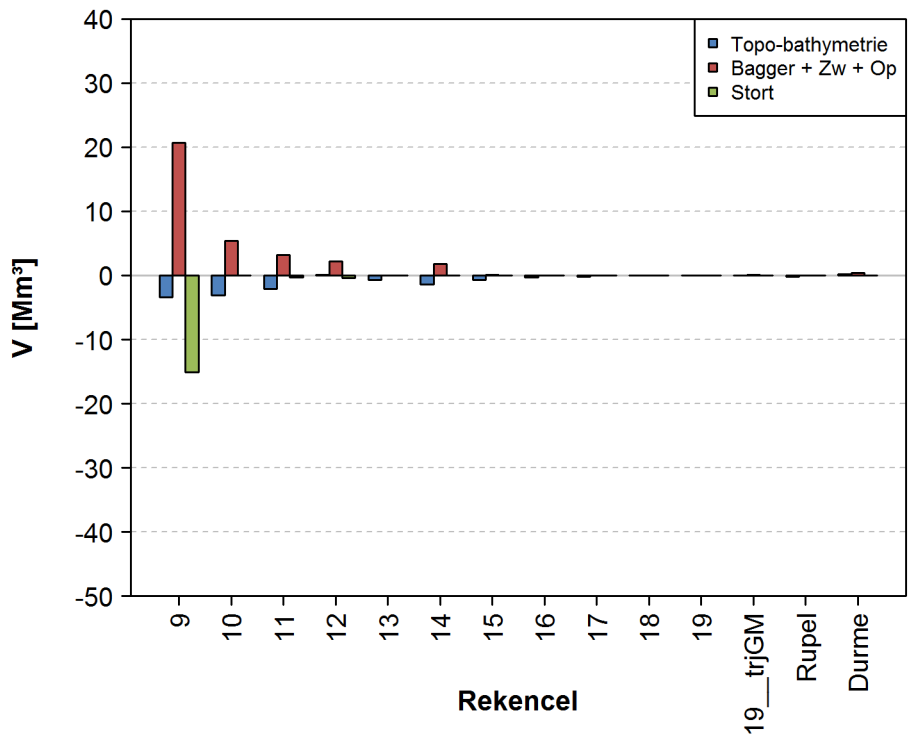
Figuur 26 – De volledige slibbalans met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie), baggervolumes, fluxen naar havendokken (Hd), fluxen naar ontpolderingen (Op), en stortvolumes.



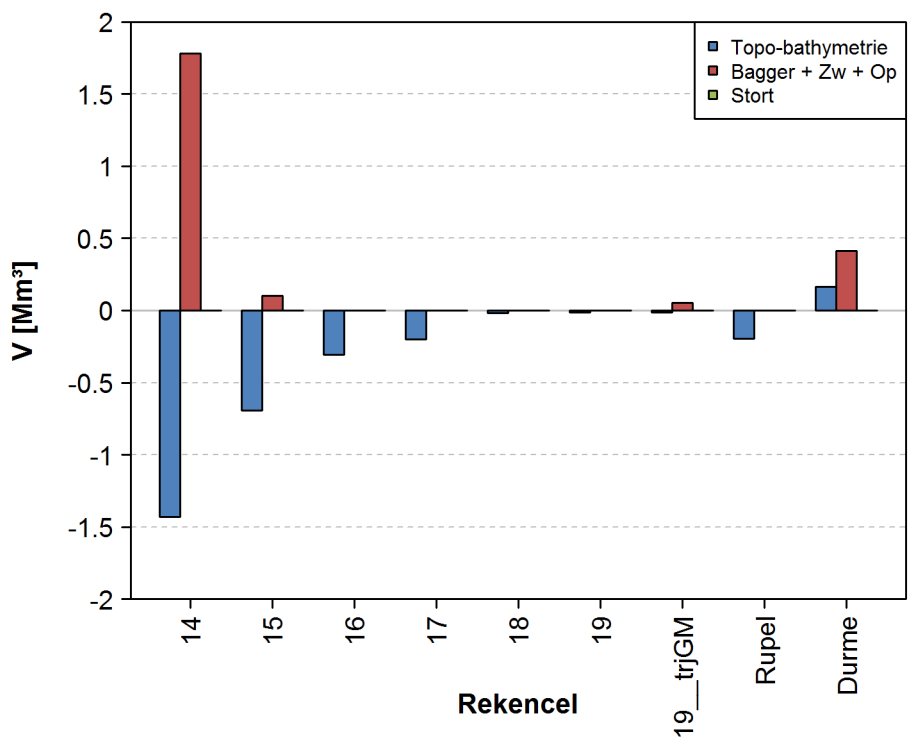
Figuur 27 – De slibbalans (detail) voor de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme, met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie) en baggervolumes.



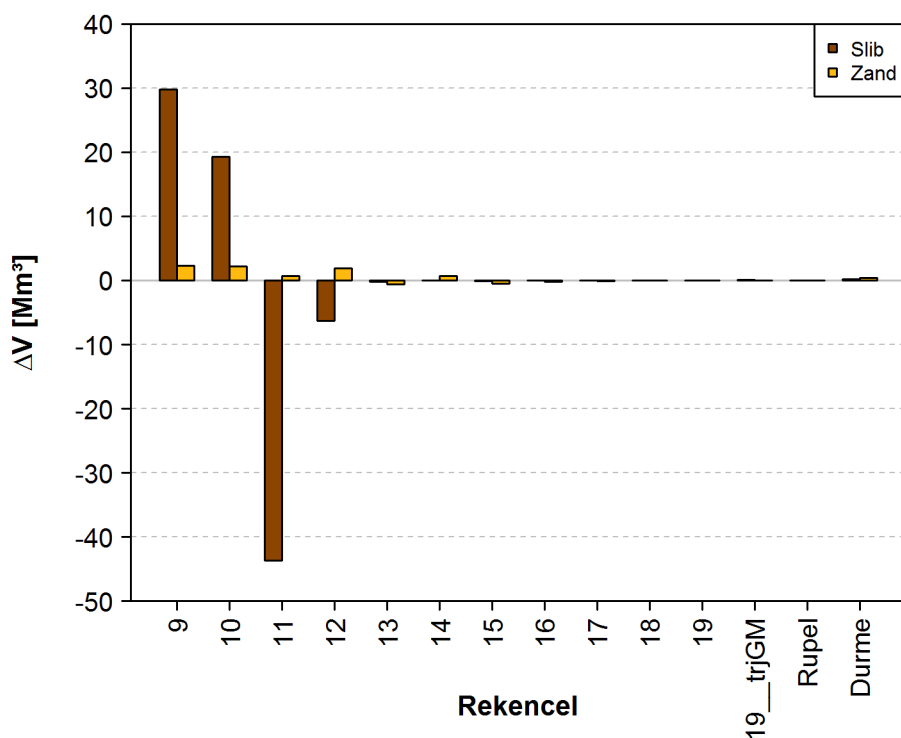
Figuur 28 – De volledige zandbalans met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie), baggervolumes, zandwinningsvolumes (Zw), fluxen naar ontpolderingen (Op), en stortvolumes.



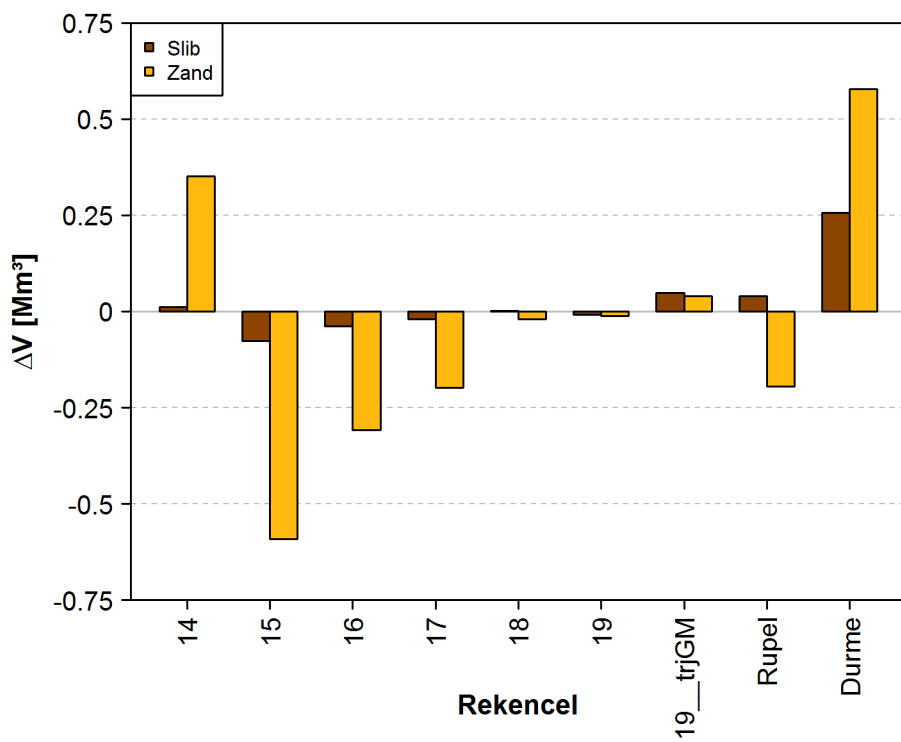
Figuur 29 – De zandbalans (detail) voor de Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme, met per rekencel de waargenomen volumeveranderingen (topo-bathymetrie) en baggervolumes



Figuur 30 – De totale slib- en zandbalans



Figuur 31 – Detail van de totale slib- en zandbalans voor de rekenen in Boven-Zeeschelde



4.3 Sedimenttransport

4.3.1 Referentiescenario

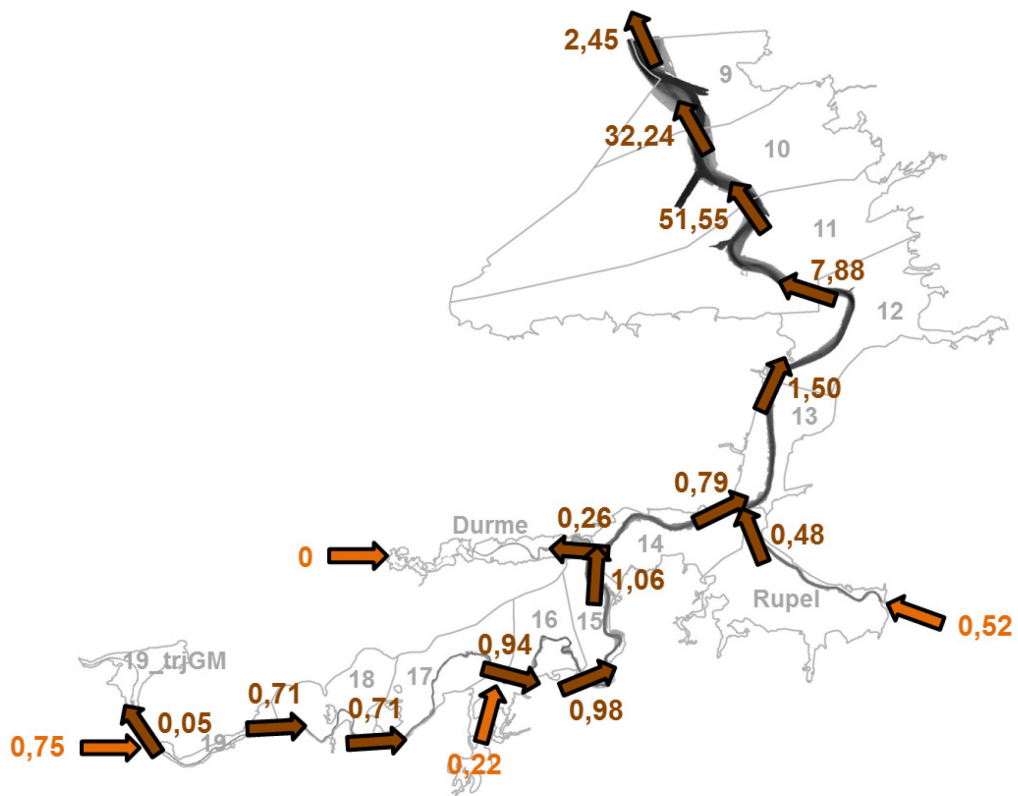
Op basis van de berekende volumeveranderingen per rekencel (Figuur 30 en Figuur 31) en de opgelegde randvoorwaarden voor fluviaatiele aanvoer (§2.7, Tabel 6) werd het sedimenttransport over de rekencellen heen berekend (zie §2.8 voor methodologie).

Voor slib observeren we langsheen de volledige Zeeschelde een afwaarts gericht transport (Figuur 32). Enkel naar de Durme en de tij-arm Gentbrugge-Melle is er een opwaarts gericht transport. In de Beneden-Zeeschelde observeren we in vergelijking met de Boven-Zeeschelde veel hogere transportwaardes, in het bijzonder 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 (Figuur 22) 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 meestal kleiner dan 1 Mm^3 .

In tegenstelling tot slib is het zandtransport in de Beneden-Zeeschelde hoofdzakelijk opwaarts gericht. In de Boven-Zeeschelde daarentegen is het zandtransport afwaarts gericht (Figuur 33). Net zoals voor slib, wordt er zand vanuit de Zeeschelde naar de Durme en de tij-arm Gentbrugge-Melle getransporteerd. De Durme en de tij-arm zijn dus duidelijke sinks van sediment en dit zowel voor zand als voor slib. Wat betreft de Rupel wordt er zowel slib als zand getransporteerd vanuit de Rupel naar de Zeeschelde.

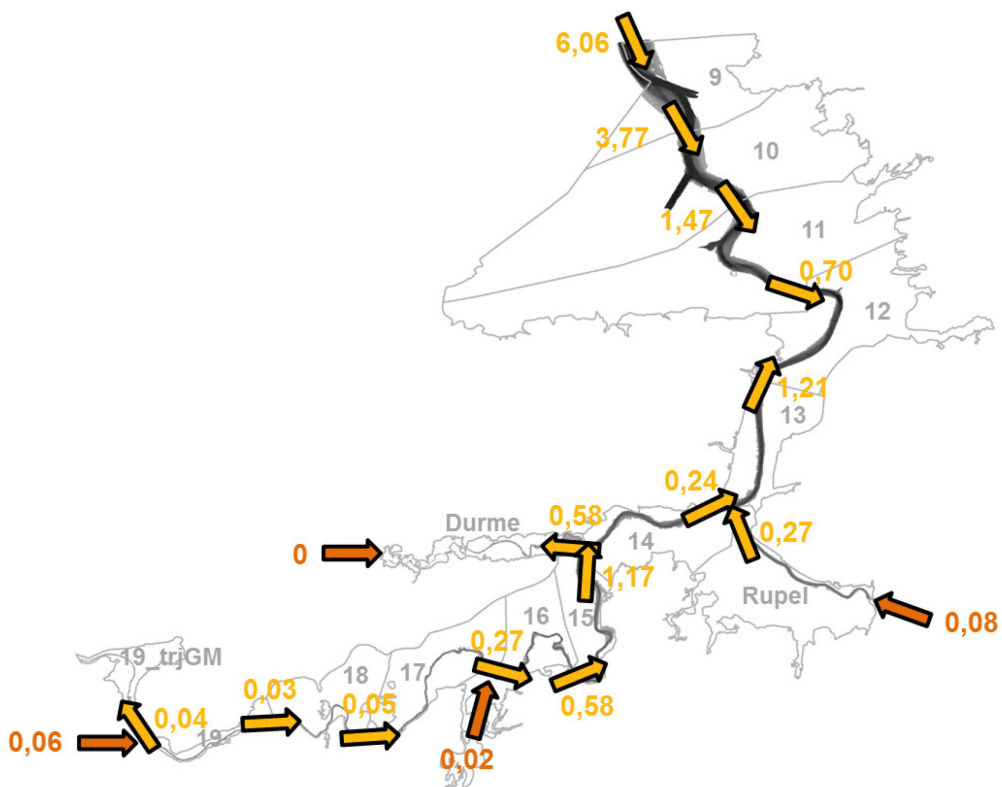
Aan de afwaartse rand van de Zeeschelde (afwaartse rand rekencel 9) zijn de gevonden transportwaardes van dezelfde grootteorde als de vastgelegde transportwaardes in Cleveringa (2013) (Figuur 1). Voor slib wordt in voorliggende studie een waarde van $2,45 \text{ Mm}^3$ bekomen over de periode 2001-2011 (dit is $0,25 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) en voor zand een waarde van $6,06 \text{ Mm}^3$ (dit is $0,61 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$). Ter vergelijking, in Cleveringa (2013) wordt gerekend met een waarde van $0,615 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (berekend over de periode 1994-2000) en dit zowel voor zand als voor slib. Voor zand is de transportrichting in beide studies hetzelfde, voor slib is de transportrichting tegenovergesteld. Voorliggende studie berekent een afwaarts gericht slibtransport, terwijl dit in Cleveringa (2013) opwaarts gericht is. We merken op dat Cleveringa (2013) de periode 1994-2000 behandelt, terwijl voorliggende studie de periode 2001-2011 beschouwt.

Figuur 32 – Schematische voorstelling van het slibtransport in Mm³ (bruine pijlen) over de periode 2001-2011 (referentiescenario).



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

Figuur 33 – Schematische voorstelling van het zandtransport in Mm³ (gele pijlen) over de periode 2001-2011 (referentiescenario).



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

4.3.2 Gevoeligheidsanalyse

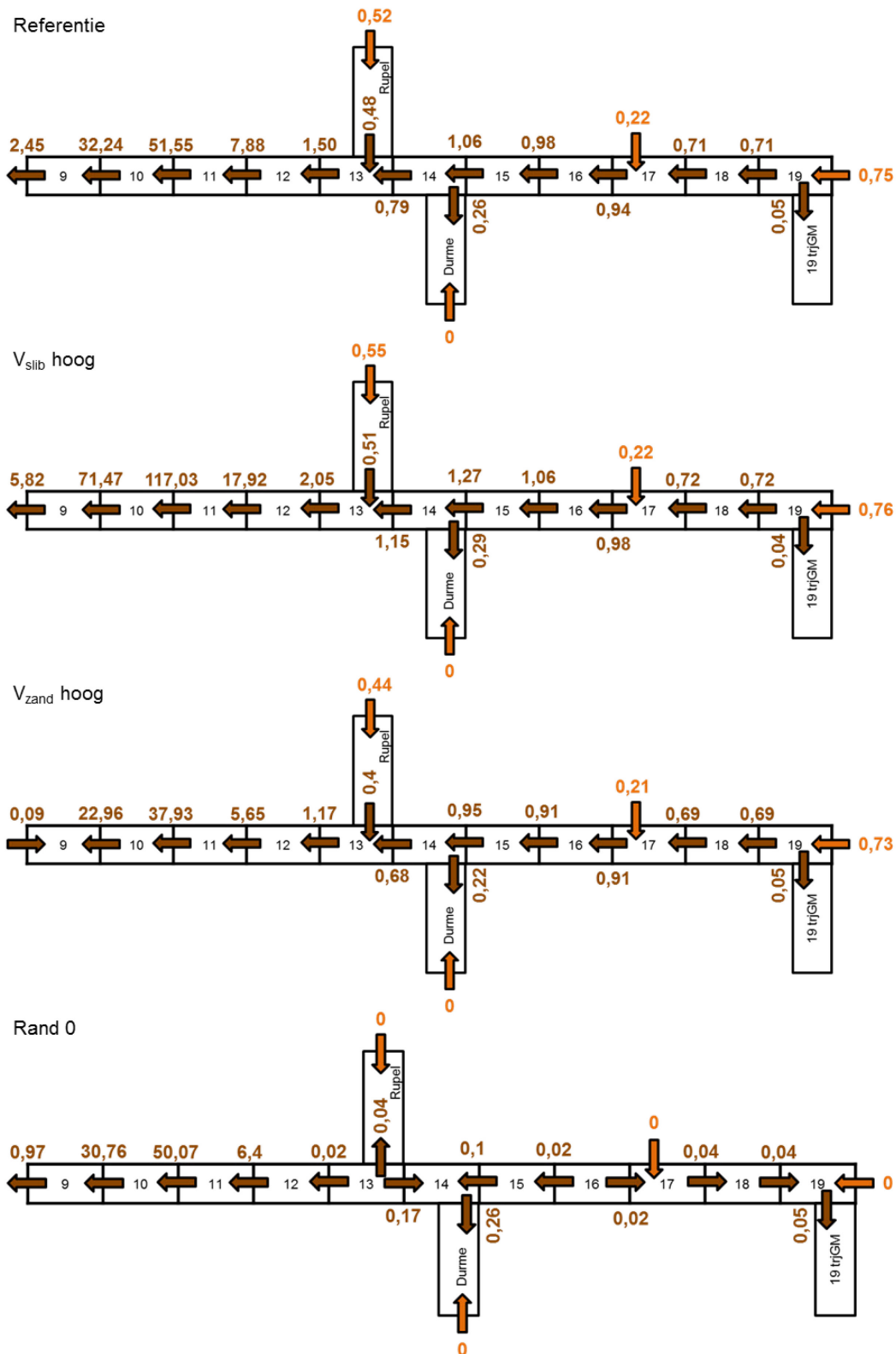
In deze gevoeligheidsanalyse werd nagegaan wat de invloed is van bodemsamenstelling, fluviaatiele aanvoer, en omrekeningsbulk-dichtheden op de richting en grootte van slib- en zandtransport. De gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd door verschillende scenario's te vergelijken met het referentiescenario. De randvoorwaarden in het referentiescenario stemmen het meest overeen met de observaties, en het referentiescenario kan dan ook beschouwd worden als het meest realistische scenario. Doel van deze gevoeligheidsanalyse is om na te gaan in welke mate richting en grootte van sedimenttransport wijzigen in functie van de verschillende scenario's (methodiek gevoeligheidsanalyse, zie §2.9).

In de Zeeschelde wordt het slib afwaarts getransporteerd in de referentiesituatie (§4.3). Doorrekening van de overige scenario's toont aan dat het afwaarts gericht slibtransport behouden blijft voor de scenario's 'V_{slib} hoog' en 'V_{zand} hoog' (Figuur 34). Enkel aan de afwaartse rand is er (beperkt) opwaarts gericht transport in het geval van 'V_{zand} hoog'. In het scenario 'Rand 0' wordt er in de Boven-Zeeschelde een beperkte hoeveelheid slib opwaarts getransporteerd. Wat betreft de Rupel wordt slib in drie van de vier scenario's afwaarts getransporteerd, waarbij de opwaartse en afwaartse transportwaarde ongeveer gelijk zijn aan elkaar. Enkel in het scenario 'Rand 0' is er een beperkt opwaarts gericht transport. De Durme en de tij-arm Gentbrugge-Melle tenslotte worden in alle scenario's gekenmerkt door opwaarts gericht slibtransport en kunnen beschouwd worden als een sink voor slibsediment.

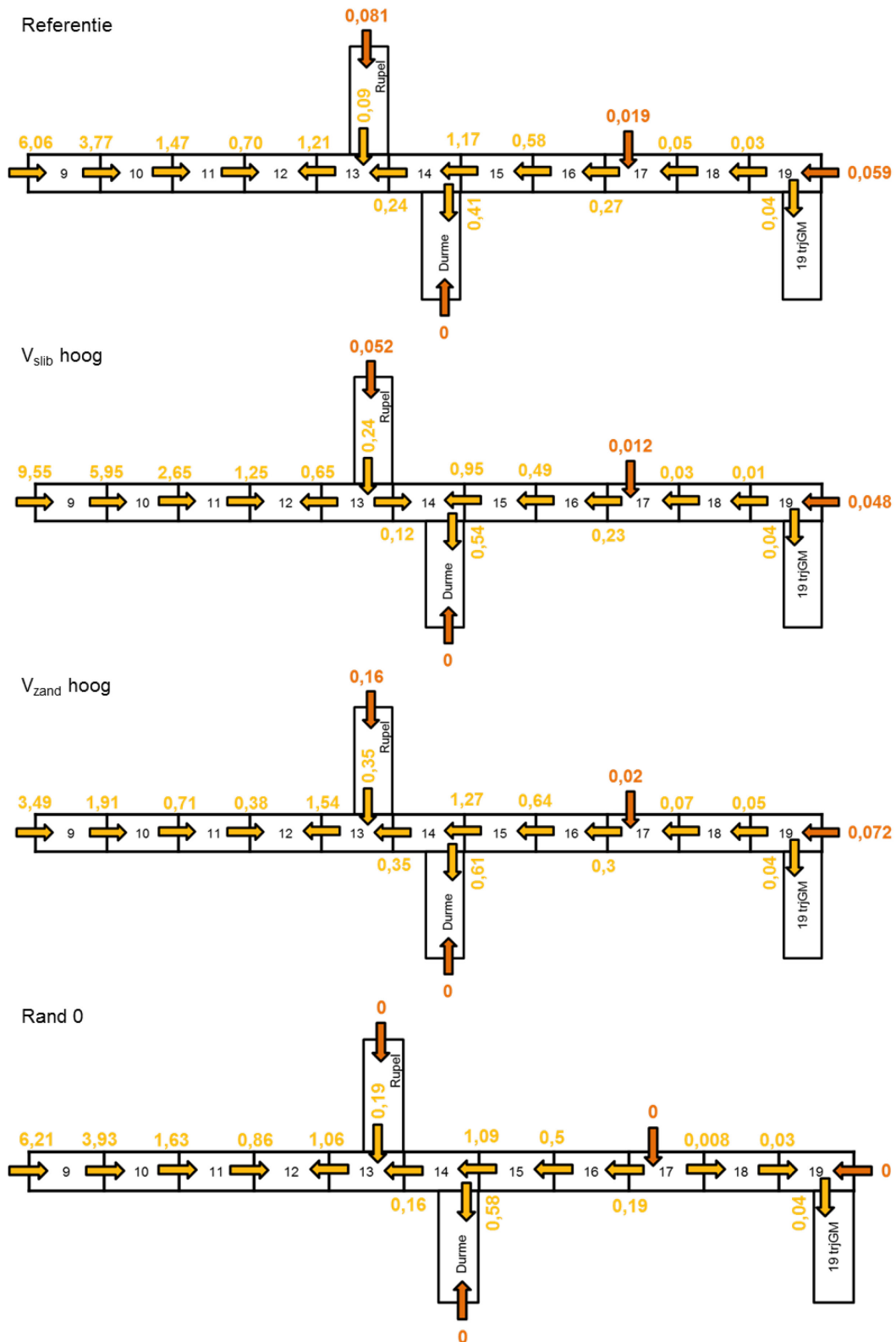
Beschouwen we de grootte van het slibtransport dan observeren we sterk verhoogde transportwaardes ter hoogte van de bagger- en stortzones in de Beneden-Zeeschelde. Doorrekening van de verschillende scenario's toont aan dat er een sterke variatie is in de grootte van deze slibtransporten. Dit is een gevolg van de aanname in bulkdichtheid die gebruikt werd bij de omzetting van gereduceerde slibvolumes naar profielvolumes slib (§2.6.1 en Tabel 7). We merken hierbij op dat de relatie tussen bulkdichtheid en profielvolume slib niet-lineair is (vergelijking (15)). Dit verklaart meteen waarom een lage waarde in bulkdichtheid (zoals voor het scenario 'V_{slib} hoog', zie ook Tabel 7) resulteert in heel hoge transportwaardes.

Wat betreft zandtransport wordt het grootste deel van de Beneden-Zeeschelde gekenmerkt door opwaarts gericht transport, en dit voor alle scenario's. Enkel over de rand van rekencellen 12 en 13 is het transport afwaarts gericht (Figuur 35). In de Boven-Zeeschelde is het zandtransport hoofdzakelijk afwaarts gericht, enkel in het scenario 'Rand 0' komt er in een deel van de Boven-Zeeschelde opwaarts gericht transport voor. Ongeacht het scenario fungeert de Rupel als een 'source' voor zand, en kunnen de Durme en de tij-arm Gentbrugge-Melle beschouwd worden als een 'sink' van zand.

Figuur 34 – Richting en grootte slibtransport (in Mm³) voor de scenario's 'Referentie', 'V_{slib} hoog', 'V_{zand} hoog' en 'Rand 0'.



Figuur 35 – Richting en grootte zandtransport (in Mm³) voor de scenario's 'Referentie', 'V_{slib} hoog', 'V_{zand} hoog' en 'Rand 0'.



4.3.3 Slibflux naar de waterkolom

De sedimentbalans werd berekend over de periode 2001-2010. Gedurende deze periode is het zwevende stofgehalte in de waterkolom niet noodzakelijkerwijs constant. Stel dat er een verhoging is in zwevende stof tussen 2001 en 2010, dan ontstaat er een slibflux naar de waterkolom toe. Om een idee te krijgen van de hoeveelheid slib die naar de waterkolom gaat, en hoe dit zich verhoudt tot de transporten over de rekencellen heen, werken we met een eenvoudig rekenvoorbeeld. Stel dat er gedurende de periode 2001-2011 een verhoging is van 10 mg/l ($=10 \cdot 10^{-6}$ ton/m³) aan zwevend stofgehalte (=slib) in de waterkolom. En we hebben een volume water in de Schelde van 240 Mm³ (watervolume onder 0 m TAW vlak, zie Depreiter et al., 2014). Dan is de toename in hoeveelheid TDS in de waterkolom gelijk aan $10 \cdot 10^{-6}$ ton/m³ * 240 Mm³ = 2400 TDS. Rekening houdende met een sedimentdichtheid van 2,65 ton/m³ (dichtheid kwarts) komt dit neer op een slibvolume van 906 m³. Deze waarde is laag in vergelijking met de sedimenttransporten die werden berekend over de rekencellen heen. Zo bedraagt de laagste slibtransportwaarde in het referentiescenario 60 000 m³ (rand rekencel 19 en 19 trjGM, Figuur 32). Dit is ruim een factor 66 groter dan de slibflux naar de waterkolom toe ten gevolge van een concentratieverhoging met 10 mg/l. We kunnen dus stellen dat eventuele fluxen naar de waterkolom laag zijn in vergelijking met de slibtransporten over de rekencellen heen.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In voorliggend onderzoek werden slib- en zandtransporten berekend voor de Zeeschelde, Rupel en Durme, gebruik makende van de rekencellenmethodiek, en dit over de periode 2001-2011. Deze methodiek vereist een sedimentbalansberekening per rekencel, en het opleggen van een opwaartse randvoorwaarde om te kunnen komen tot transportwaardes (zie §2). Op basis van de resultaten van de balans- en transportberekeningen kunnen volgende conclusies naar voor worden gebracht:

- 1) *Slib* in de Zeeschelde wordt in afwaartse richting getransporteerd. Ook de Rupel wordt gekenmerkt door afwaarts gericht slibtransport. De Durme en de tij-arm Gentbrugge-Melle worden gekenmerkt door opwaarts gericht transport (Figuur 32).
- 2) *Zand* wordt in de Beneden-Zeeschelde (in tegenstelling tot slib) hoofdzakelijk in de opwaartse richting getransporteerd, in de Boven-Zeeschelde is het zandtransport hoofdzakelijk afwaarts. Net zoals voor slib verloopt het zandtransport in de Rupel afwaarts, en in de Durme en de tij-arm Genbrugge-Melle opwaarts (Figuur 33).
- 3) Transportrichtingen voor zand en slib wijzigen slechts in beperkte mate in de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse (Figuur 34 en Figuur 35). Bijgevolg kunnen we de bekomen transportrichtingen in het referentiescenario (Figuur 32 en Figuur 33) beschouwen als representatief voor de richting van het slib- en zandtransport.
- 4) Slibtransport in de Beneden-Zeeschelde wordt in belangrijke mate beïnvloed door de bagger- en stortstrategie. Grote hoeveelheden slib worden gebaggerd in rekencellen 9 en 10, en vervolgens gestort in rekencel 11 (Figuur 24). Dit leidt tot sterk verhoogd slibtransport in afwaartse richting (Figuur 32). Gevoeligheidsonderzoek toont aan dat de gebruikte waarde in bulkdichtheid voor de omzetting van gereduceerde slibvolumes naar profielvolumes invloed heeft op de grootte van het slibtransport, maar geen invloed heeft op de richting.

5.2 Aanbevelingen

De sedimentbalans en de bijhorende sedimenttransporten werden in deze studie berekend over de periode 2001-2011. Om na te gaan in welke mate de grootte en richting van sedimenttransport wijzigt doorheen de tijd, is het zinvol om de berekening ook uit te voeren over andere tijdsperiodes (bijvoorbeeld pré-2001 of 2011-recent).

Verder strekt het tot de aanbeveling om verschillende methodes met elkaar te vergelijken. Voorliggende studie maakt gebruik van de rekencellenmethodiek, waar aan de hand van data (topo-bathymetrieën, bagger- en stortgegevens) sedimenttransporten worden berekend. Het zou zeer zinvol zijn om deze resultaten te vergelijken met gemodelleerde sedimenttransporten, en dit op basis van verschillende modelinstrumentaria (Telemac, Delft 3D, geïdealiseerde modellen).

6 Referenties

- Bastin, A.L.** (1993). Evaluatie van de hoeveelheid slib in de Beneden Zeeschelde: evolutie tussen 1964 en 1986. Ministerie van de Vlaamse gemeenschap. Antwerpse Zeehavendienst: Antwerpen. 20 + bijlagen pp.
- Cleveringa, J.** (2013). Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. International Marine & Dredging Consultants/Deltares/Svašek Hydraulics BV/ARCADIS Nederland BV: Antwerpen. 81 pp.
- Dams, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Slibbalans Zeeschelde: Deelrapport 3 - Literatuurstudie. Version 4.0. WL Rapporten, 16_029. Flanders Hydraulics Research & Vrije Universiteit Brussel: Antwerp, Belgium.
- Depreiter, D.; Cleveringa, J.; van der Laan, T.; Maris, T.; Ysebaert, T.; Wijnhoven, S.** (2014). T2009-rapport Schelde-estuarium. IMDC/Arcadis/Universiteit Antwerpen/Imares/NIOZ: [s.l.]. 522 + 2 bijlagen pp.
- GHA** (2017). Ecodocks Silt Intrusion SLBES – SLBOS. België, 2017.
- Heylen, A.** (2013). Dredging in the Port of Antwerp: challenges and best practice. Presentatie. Afgehaald van <http://sednet.org/download/SpecialSession1-8c-Antwerp.pdf>.
- IMDC** (2015). Integrale Studie Boven-Zeeschelde: opmaak lithologische kaarten Boven-Zeeschelde, Rupel en Durme.
- IMDC & VUB** (2010). Lithologische en geomorfologische kaart van de Beneden - Zeeschelde - Analyserapport: Opmaak en Interpretatie.
- IMDC & Waterbouwkundig Laboratorium** (2007). Langdurige metingen Deurganckdok: opvolging en analyse aanslibbing: deelrapport 1.1.: sediment balans 01/04/2006 - 30/06/2006. Versie 2.0. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout. V, 22 + appendices pp.
- INBO** (2011). MONEOS – Geïntegreerd datarapport Toestand Zeeschelde tot 2009. Datarapportage ten behoeve van de VNCS voor het vastleggen van de uitgangssituatie anno 2009. Rapport INBO.R.2011.8. 77 pp. Instituut voor Natuur-en Bosonderzoek, Brussel.
- McLaren, P.** (1993). Patterns of sediment transport in the western portion of the Westerschelde. Rijkswaterstaat, Tidal Waters Division: Middelburg. 18 + figuren + tabellen + bijlagen 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). Water, 95: 147-165.
- Taverniers, E.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2013). MONEOS - jaarboek monitoring WL - Basisboek: overzicht monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals door WL in het Zeescheldebekken gemeten - uitleggend basisboek met algemene situering, methodologie en achtergrond. Versie 3.0. WL Rapporten, 12_070. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XIX, 293 + 7 p. app., 30 p. tabl., 241 p. fig. pp.
- Van Braeckel, A.; Coen, L.; Peeters P.; Plancke Y.; Mikkelsen J. en Van den Bergh, E.** (2012). Historische evolutie van Zeescheldehabitats. Kwantitatieve en kwalitatieve analyse van invloedsfactoren. INBO.R.2012.59. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Van Braeckel A.** (2013). Geomorfologie – Fysiotopen - Ecotopen. p. 89-102 In Van Ryckegem, G. (red.). MONEOS – Geïntegreerd datarapport Toestand Zeeschelde INBO 2012. Monitoringsoverzicht en 1ste lijnsrapportage Geomorfologie, diversiteit Habitats en diversiteit Soorten. Rapport INBO.R.2013.26. Instituut voor Natuur-en Bosonderzoek, Brussel.
- Van Damme, S.; Ysebaert, T.; Meire, P.; Van Den Bergh, E.** (1999). Habitatstructuren, waterkwaliteit, en leefgemeenschappen in het Schelde-estuarium. Rapporten van het instituut voor natuurbehoud, 1999(24). IN: Brussel. 119 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). Versie 5.0. WL Rapporten, 00_029. Waterbouwkundig Laboratorium & Antea Group. Antwerpen, België.

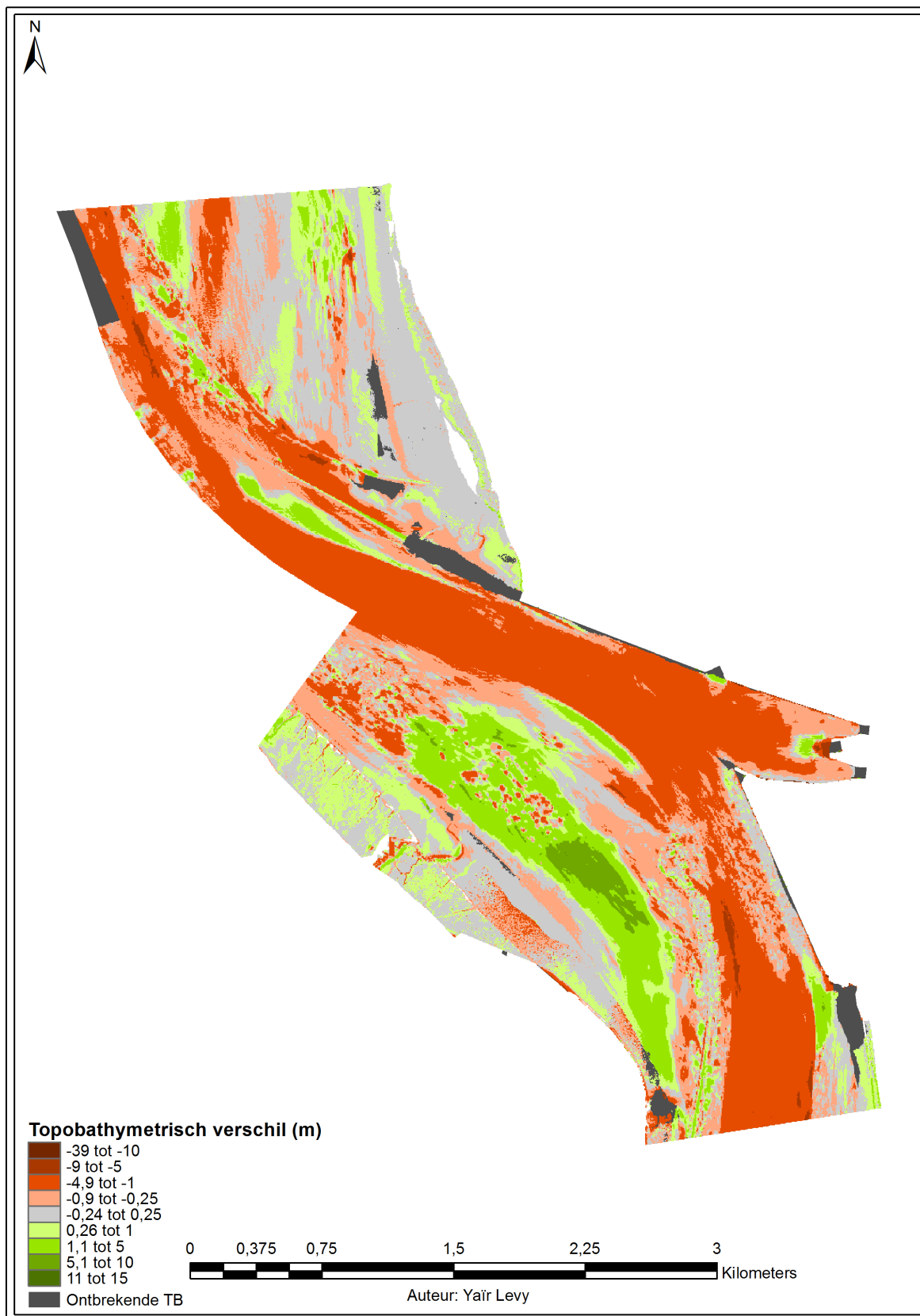
Van Ryckegem, G. (red.) (2014). MONEOS – Geïntegreerd datarapport, INBO: Toestand Zeeschelde 2013. Monitoringsoverzicht en 1ste lijnsrapportage Geomorfologie, diversiteit Habitats en diversiteit Soorten. Rapport conceptversie. 135 pp. Instituut voor Natuur-en Bosonderzoek, Brussel.

Vos, G.; Bastiaensen, E.; De Bruyn, L.; De Schutter, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2011). Lithologische kaart Beneden Zeeschelde: resultaten korrelanalyse sedimentstalen. Versie 2.0. WL Rapporten, 736_56. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. II, 6 + 17 p. Appendices pp.

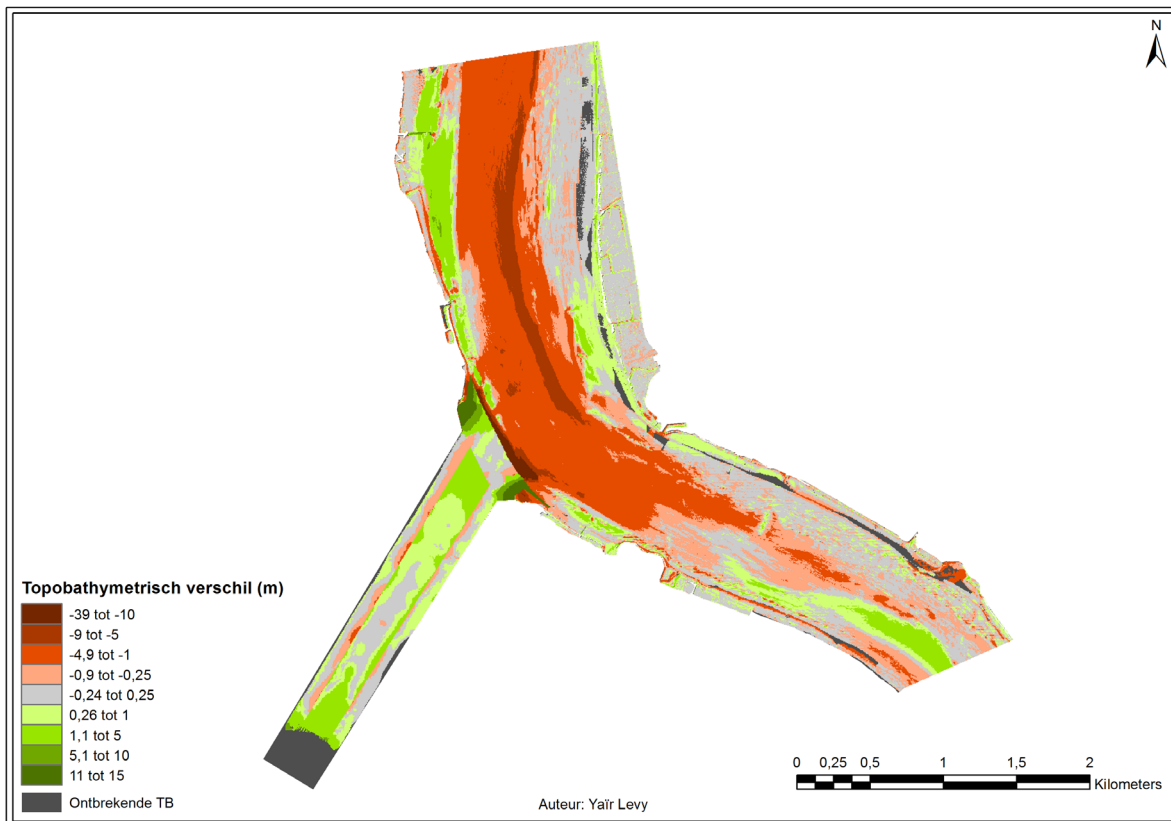
Speybroeck, J., Van Ryckegem, G., Vandevoorde, B. & Van de Bergh, E. (2011). Evaluatie van natuurontwikkelingsprojecten in het Schelde-estuarium. 2de rapportage van de projectmonitoring periode 2006-2009. Rapport INBO.R.2011.21. 160pp. Instituut voor Natuur-en Bosonderzoek, Brussel.

Appendix A – Verschilkaarten

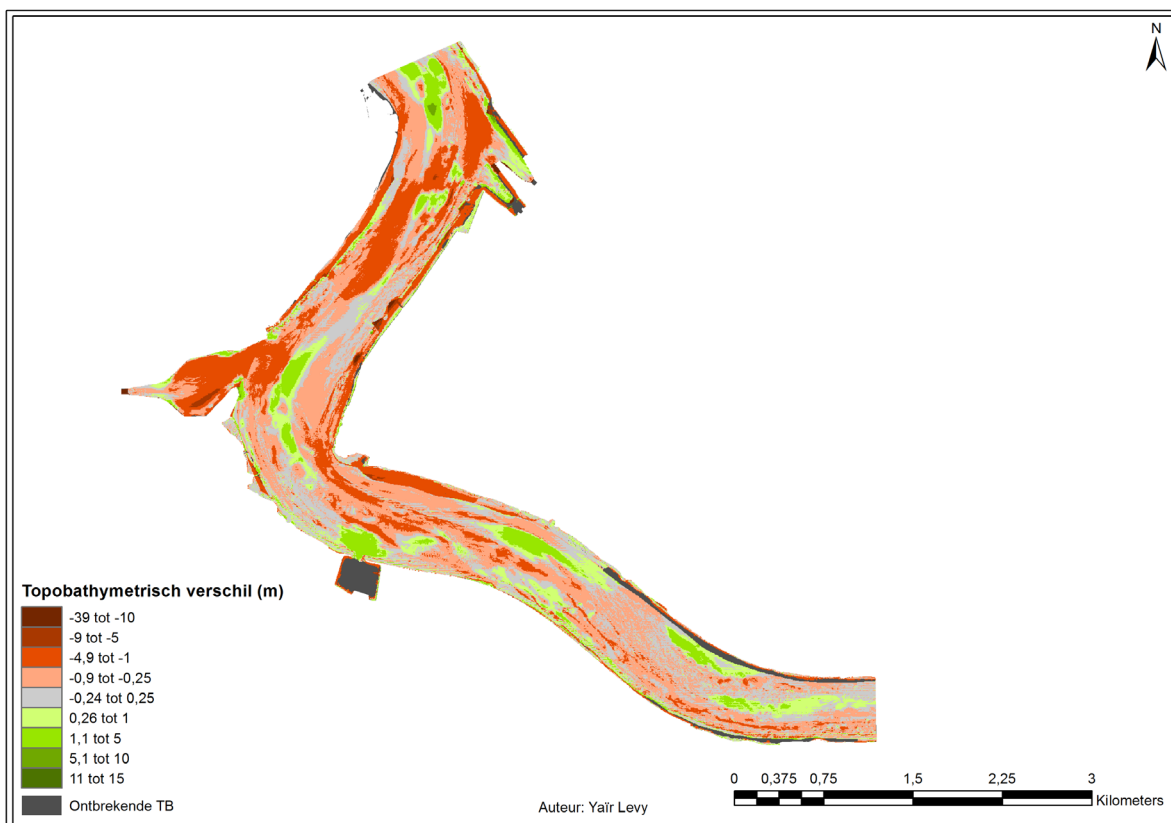
Figuur 36 – Verschilkaart voor rekencel 9 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



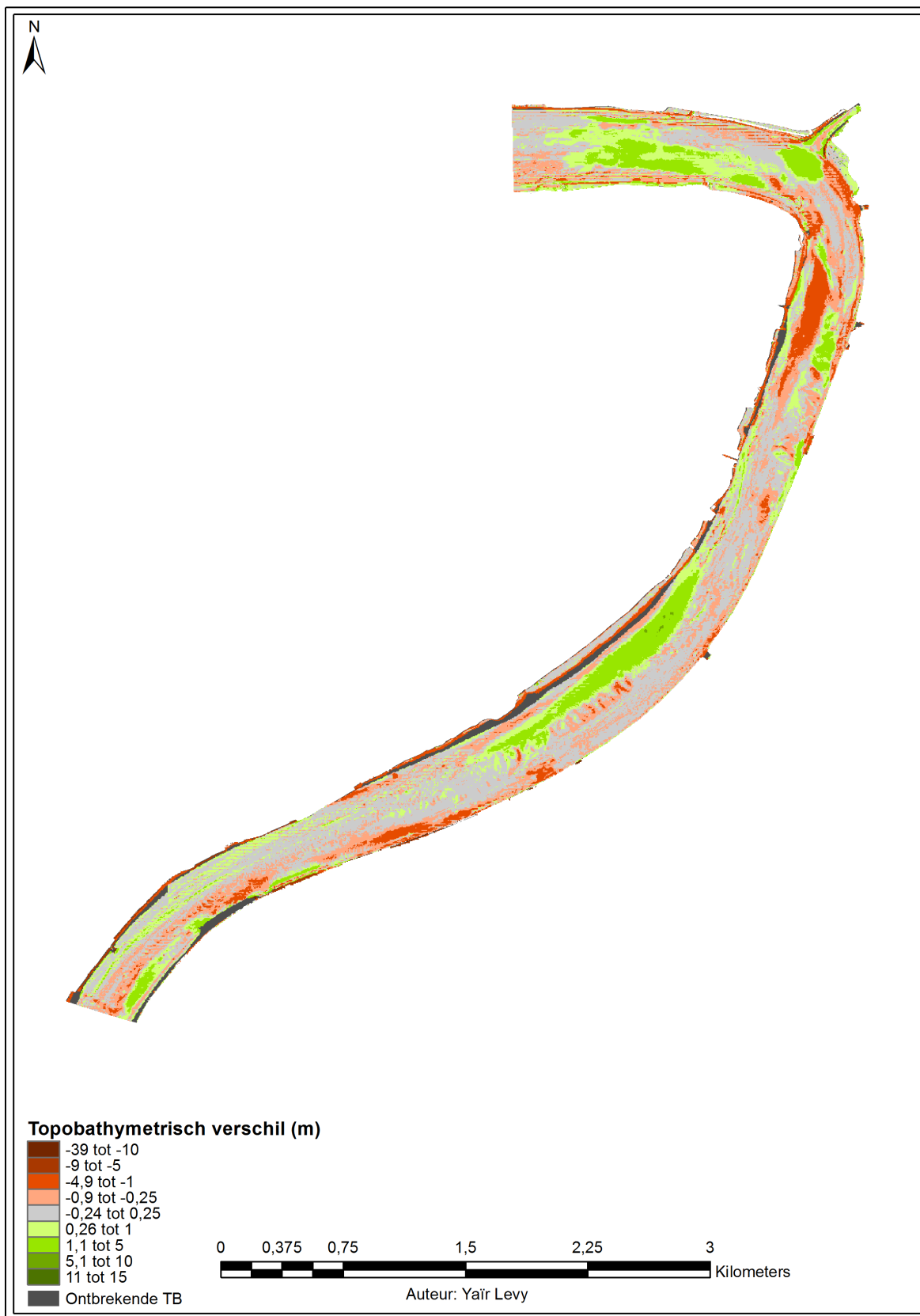
Figuur 37 – Verschilkaart voor rekencel 10 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



Figuur 38 – Verschilkaart voor rekencel 11 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



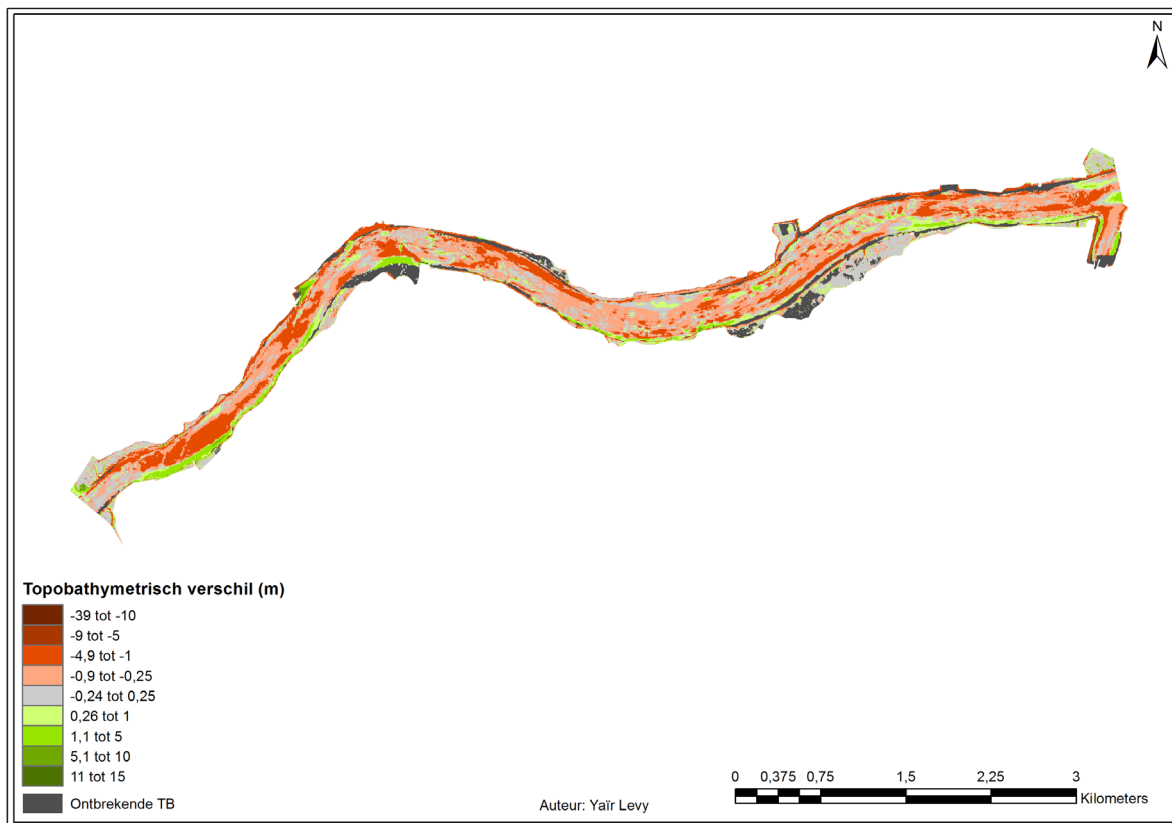
Figuur 39 – Vershilkaart voor rekencel 12 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



Figuur 40 – Verschilkaart voor rekencel 13 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



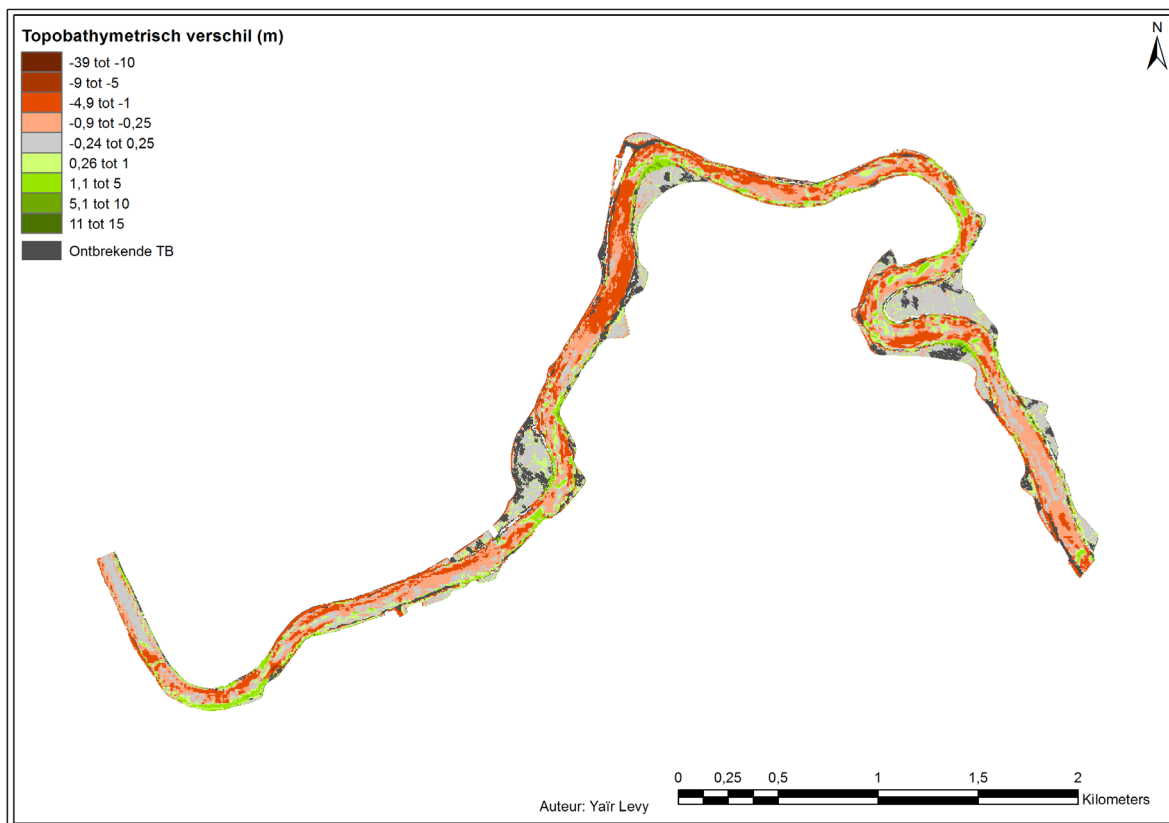
Figuur 41 – Verschilkaart voor rekencel 14 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



Figuur 42 – Verschilkaart voor rekencel 15 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



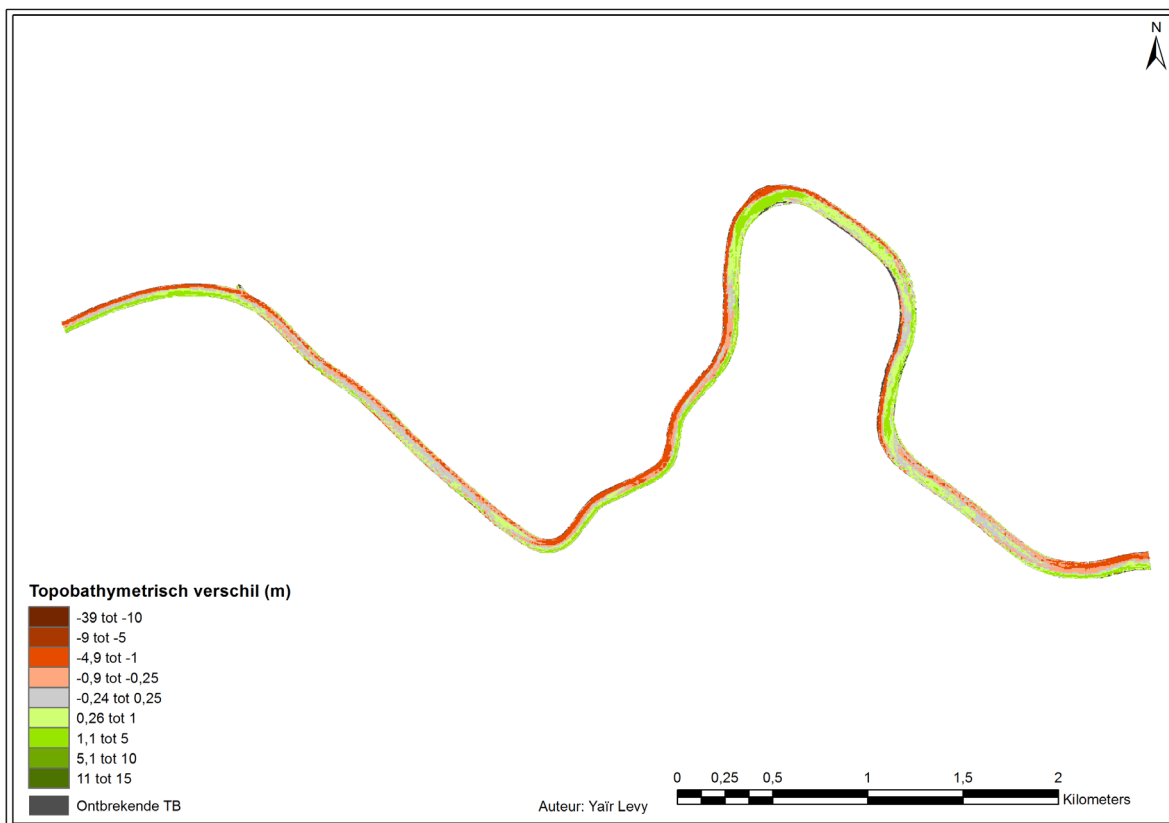
Figuur 43 – Verschilkaart voor rekencel 16 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



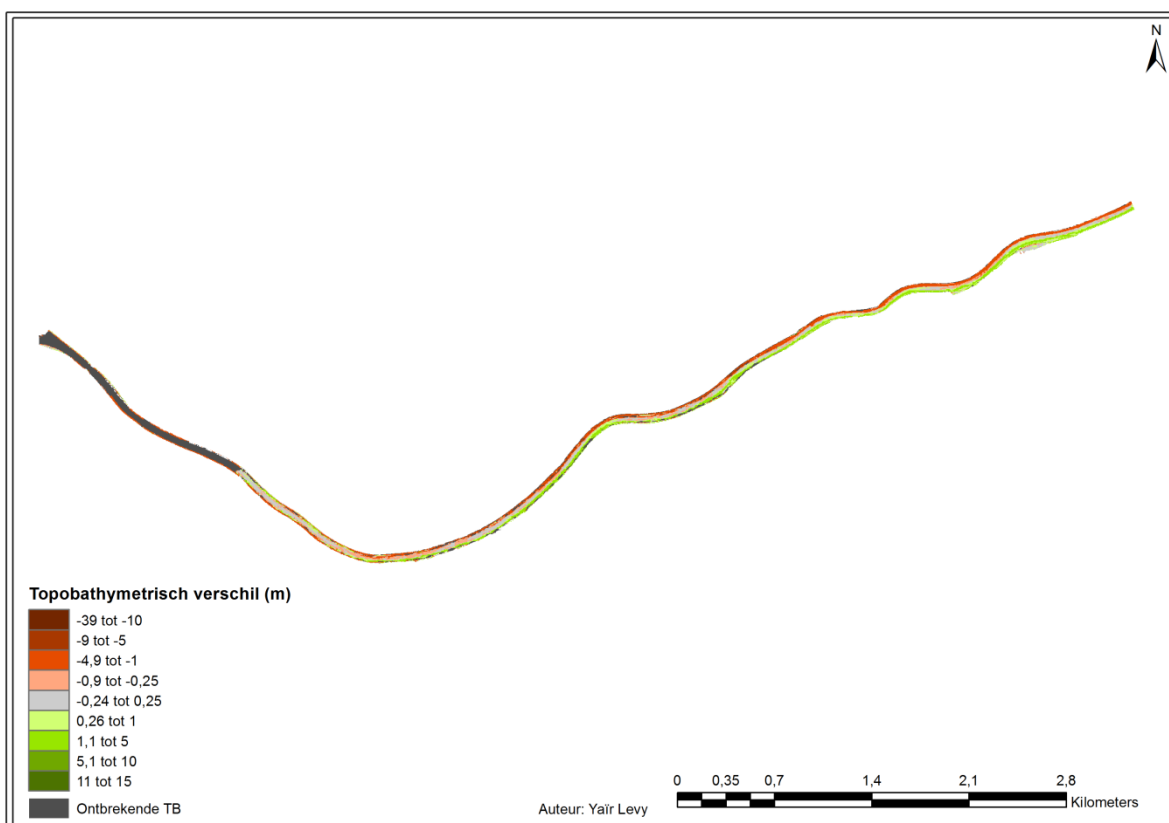
Figuur 44 – Verschilkaart voor rekencel 17 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



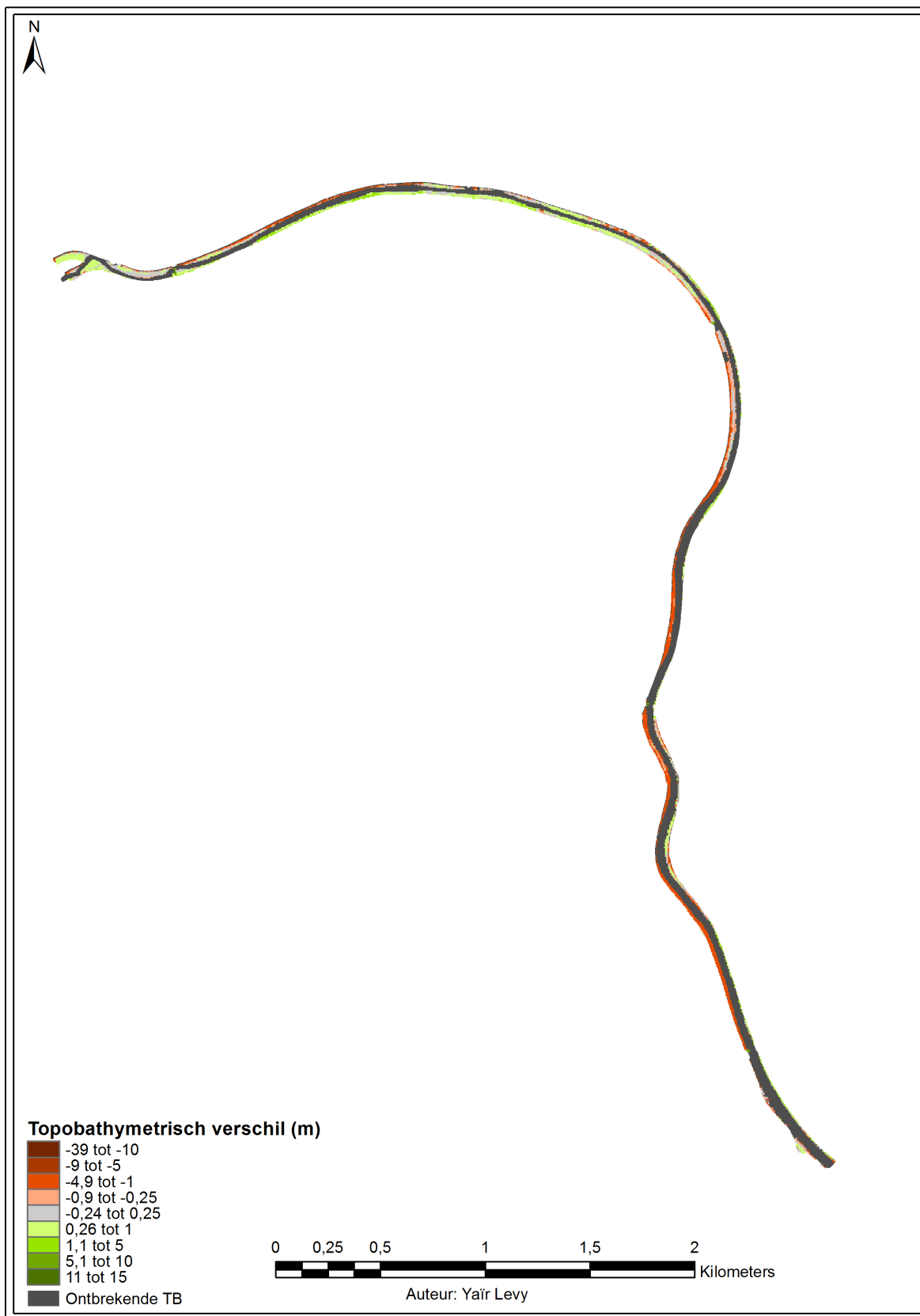
Figuur 45 – Verschilkaart voor rekencel 18 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



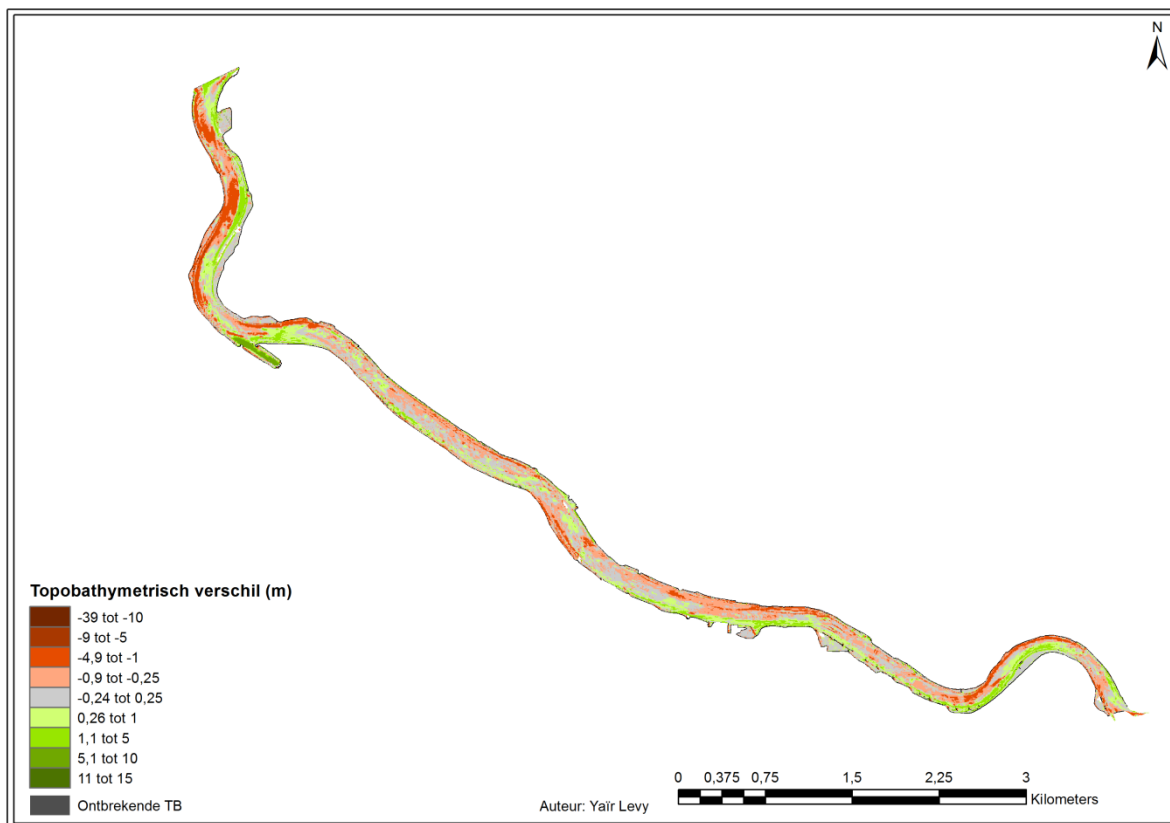
Figuur 46 – Verschilkaart voor rekencel 19 op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



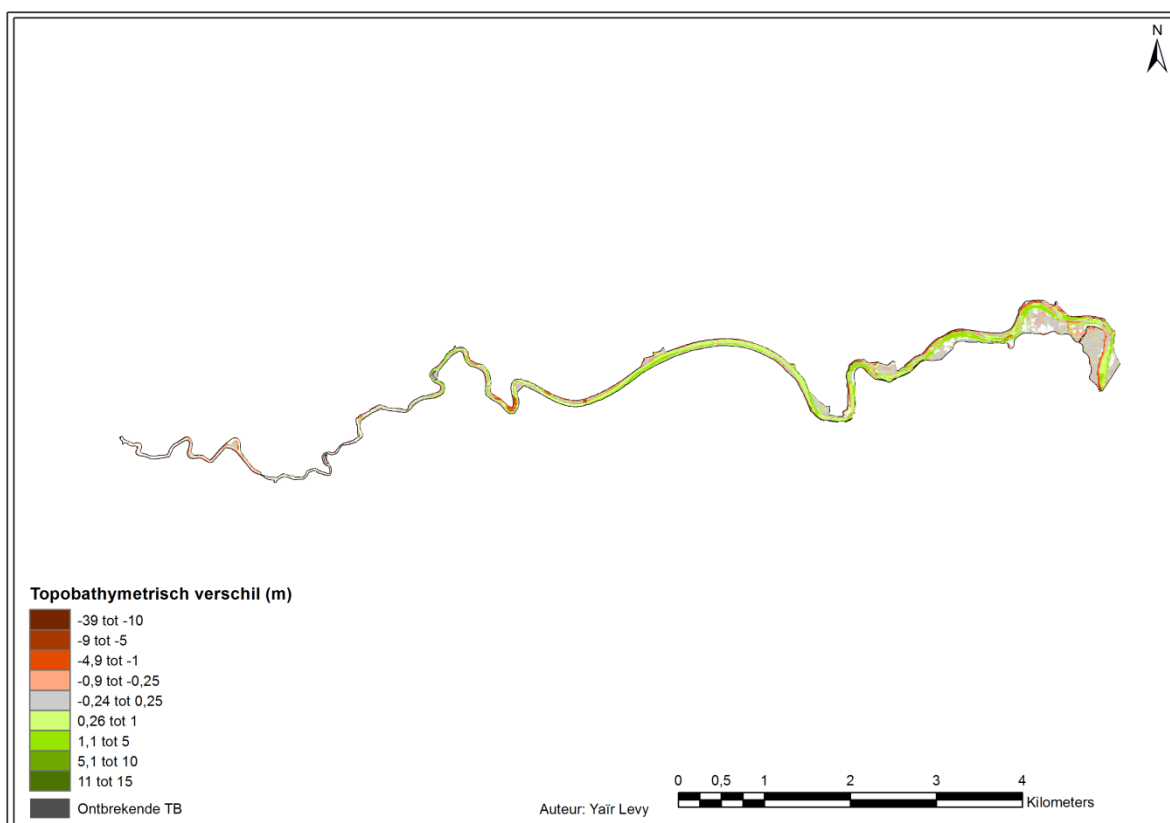
Figuur 47 – Verschilkaart voor rekencel 19_trjGM op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën



Figuur 48 – Verschilkaart voor rekencel Rupel op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën

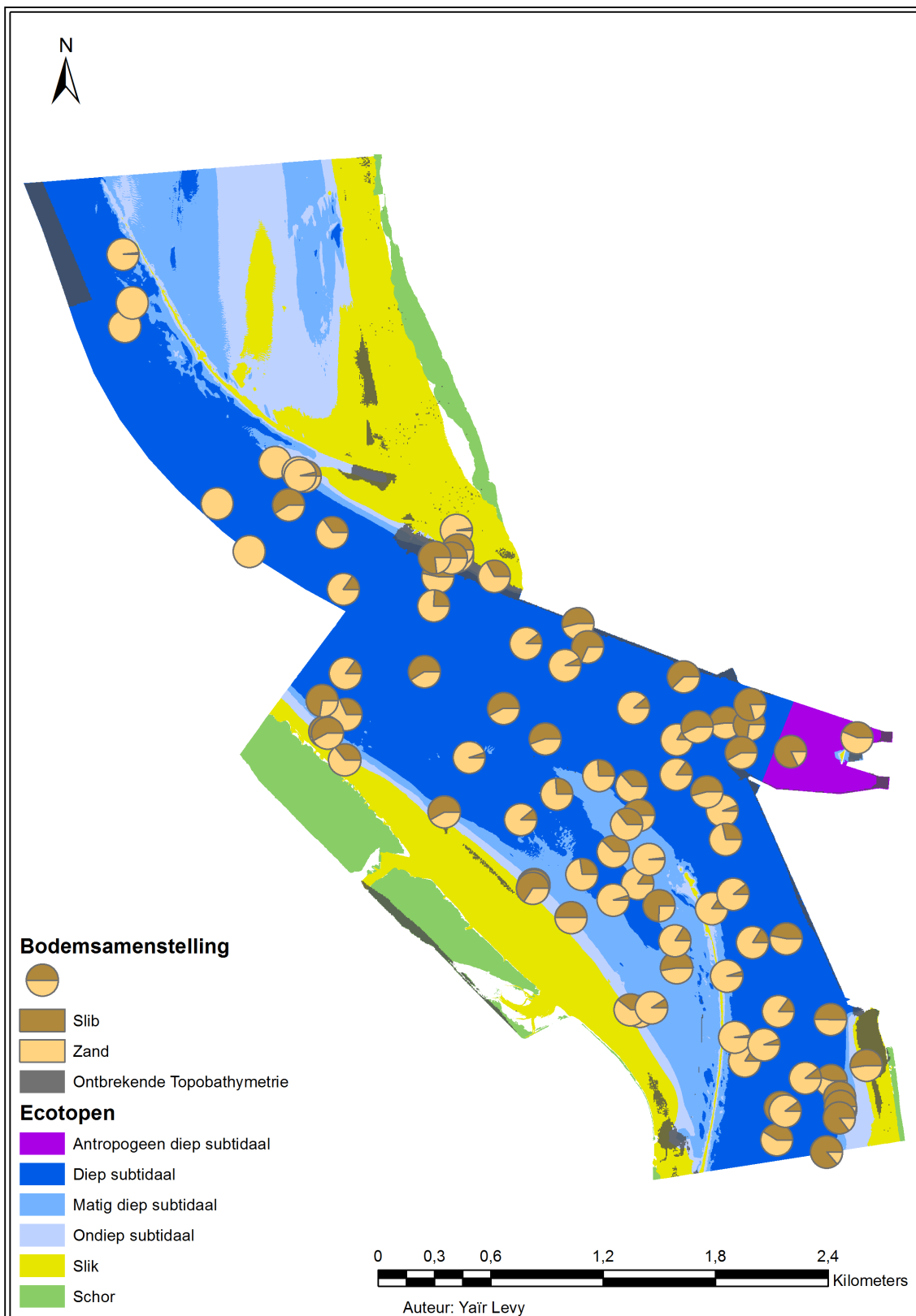


Figuur 49 – Verschilkaart voor rekencel Durme op basis van de 2001 en 2011 topo-bathymetrieën

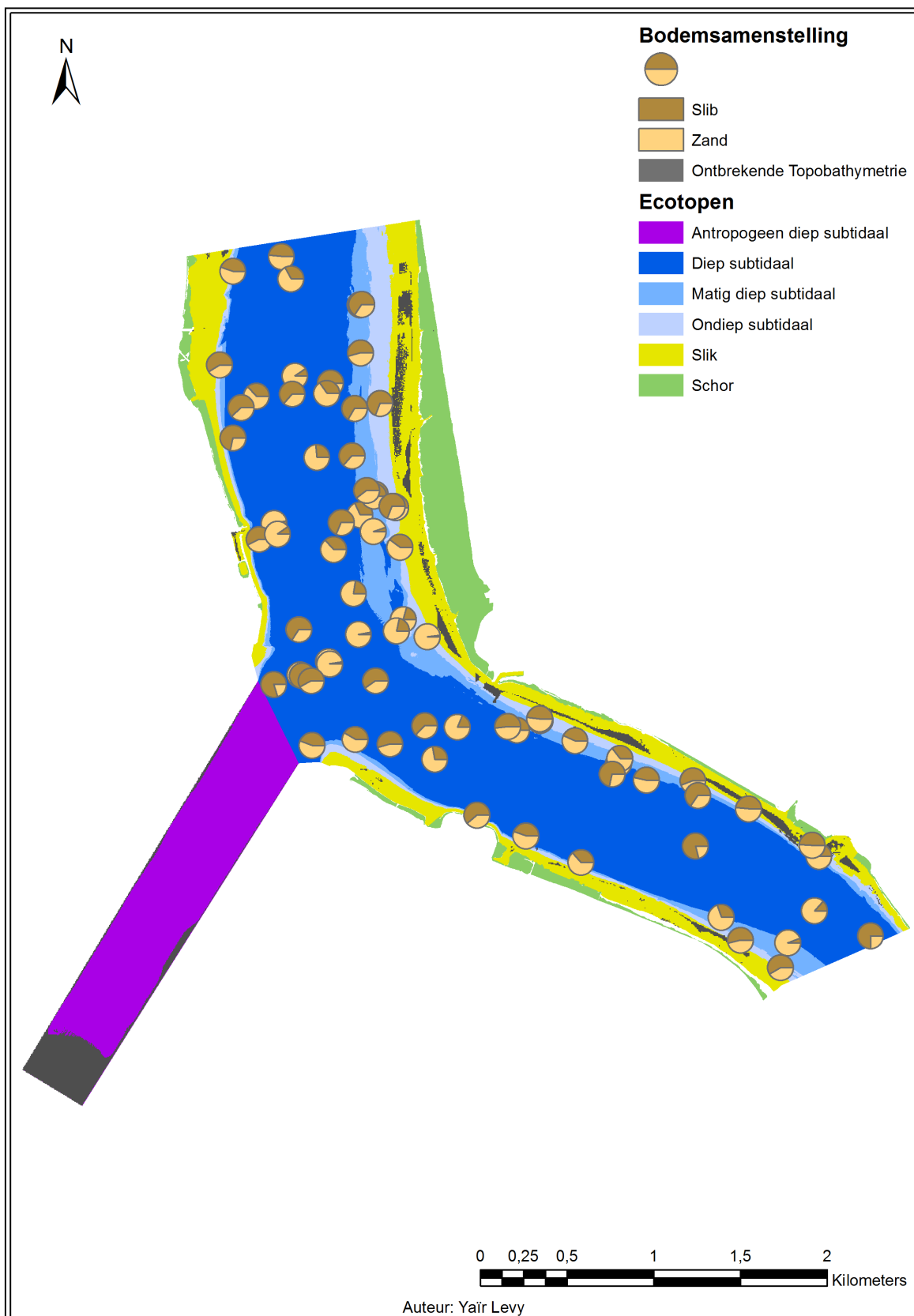


Appendix B – Ecotopenkaarten en bodemstalen

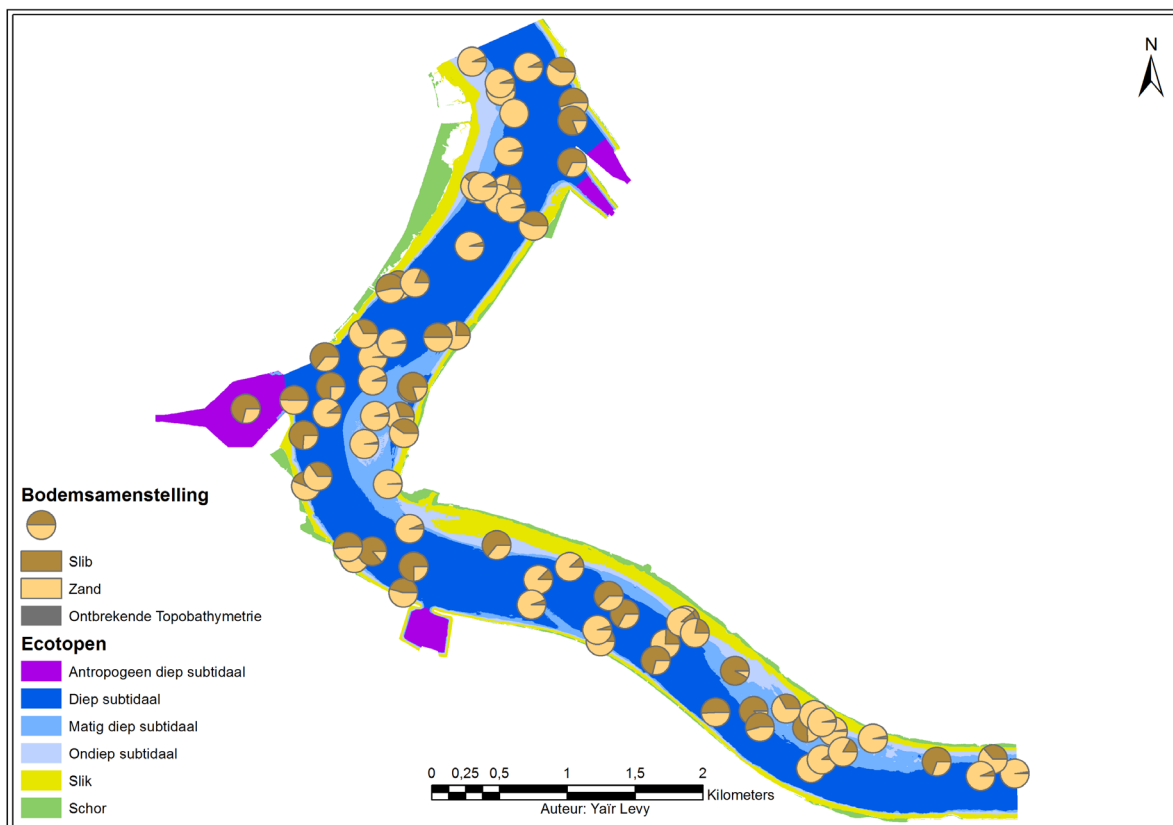
Figuur 50 – Ecotopenkaart voor rekencel 9 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slijbgehaltenes (%).



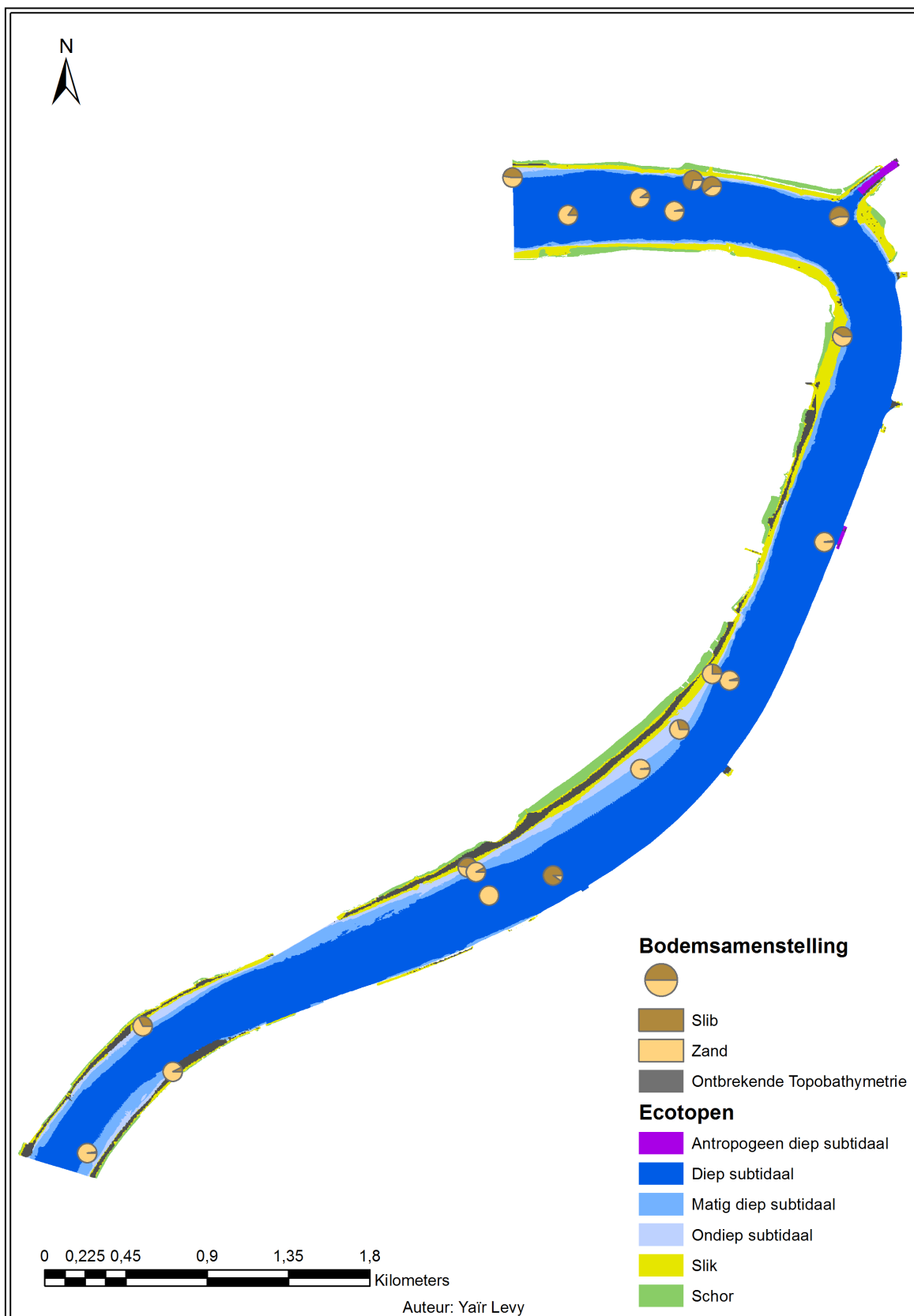
Figuur 51 – Ecotopenkaart voor rekencel 10 met aanduiding van bodemstaallocalaties en bijhorende zand- en slijbgehaltenes (%).



Figuur 52 – Ecotopenkaart voor rekencel 11 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



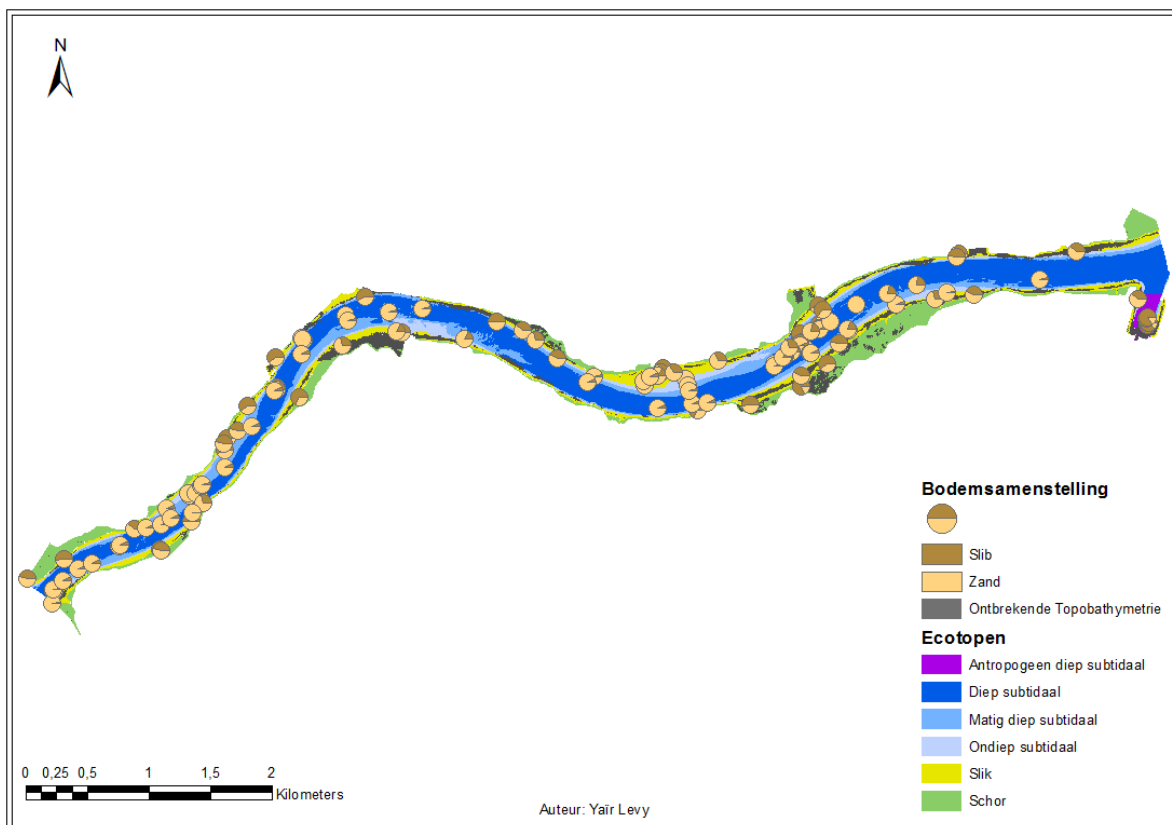
Figuur 53 – Ecotopenkaart voor rekencel 12 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



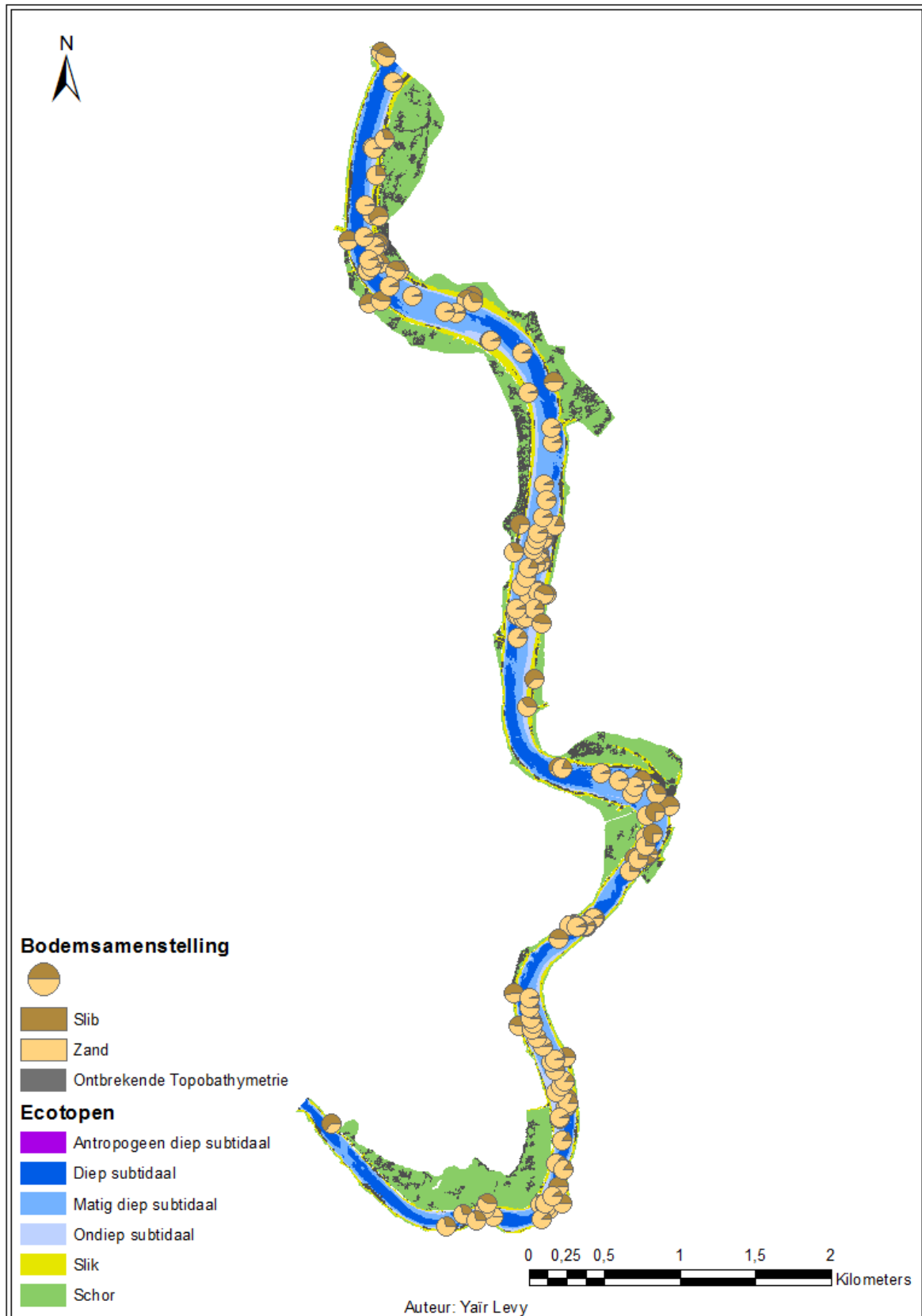
Figuur 54 – Ecotopenkaart voor rekencel 13 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehalten (%).



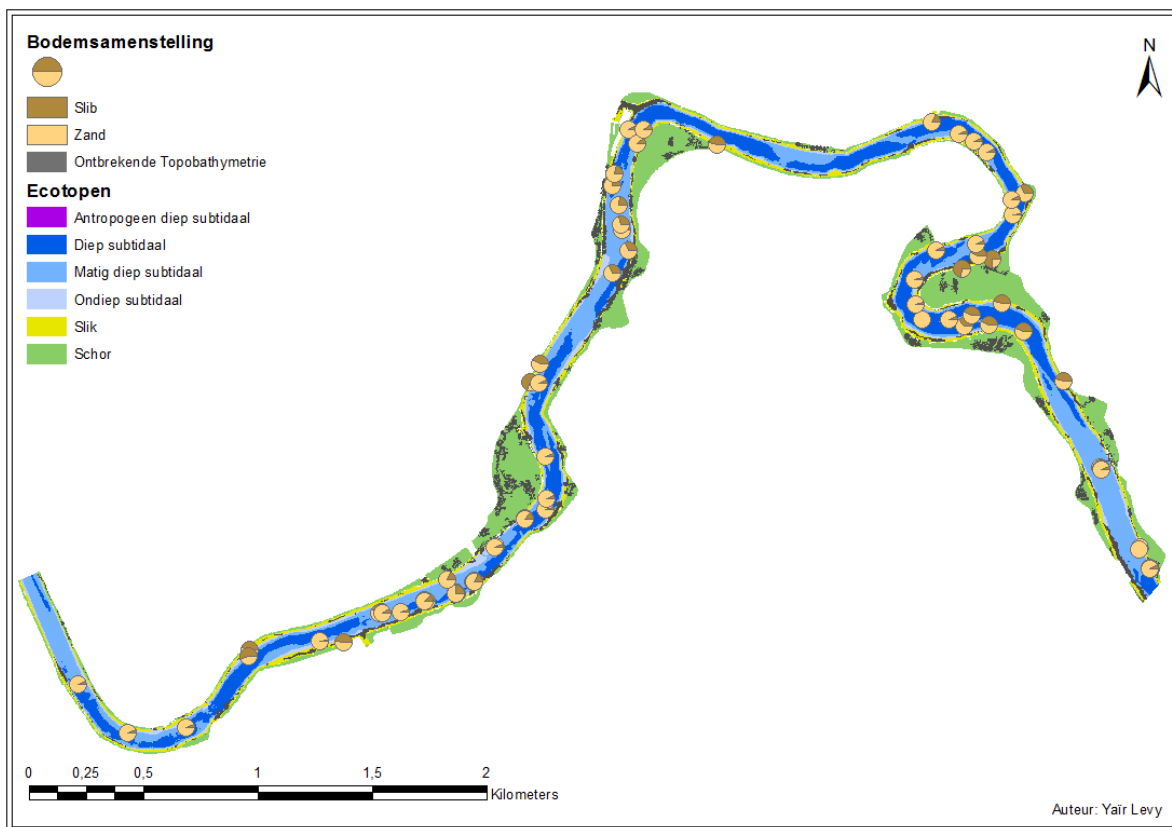
Figuur 55 – Ecotopenkaart voor rekencel 14 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



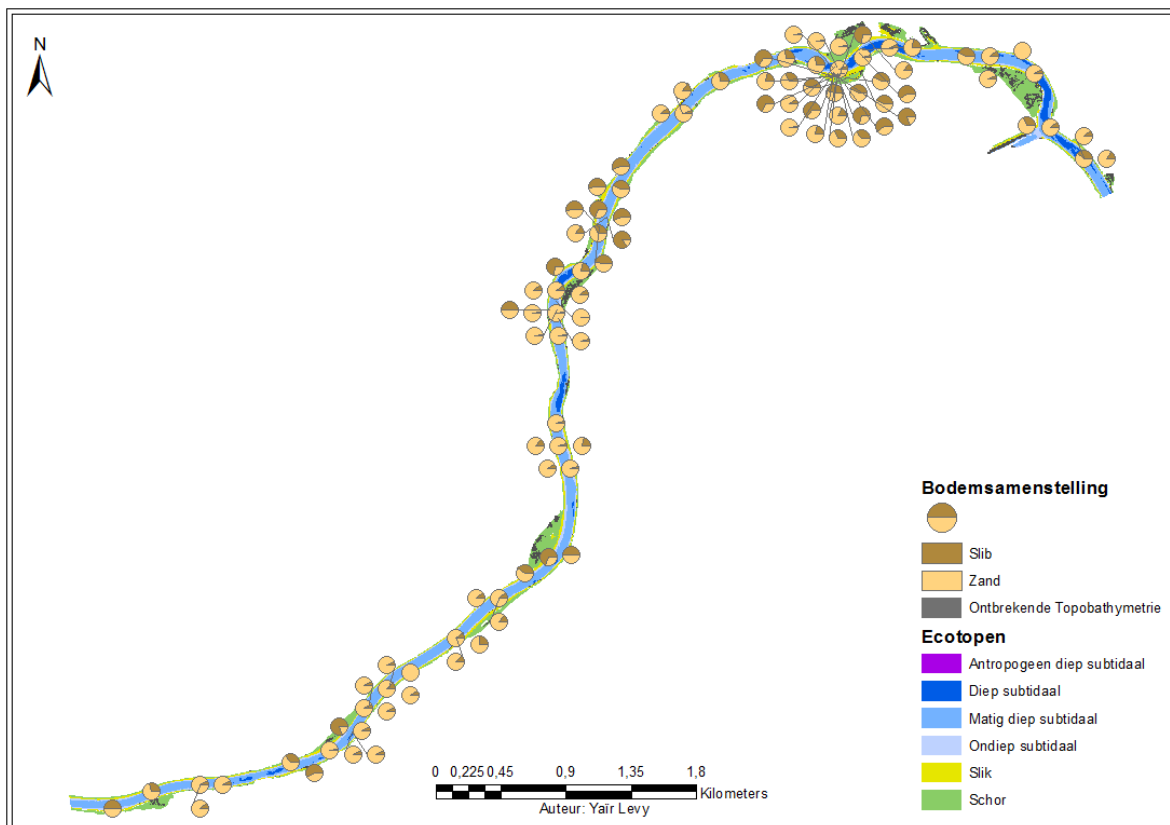
Figuur 56 – Ecotopenkaart voor rekencel 15 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



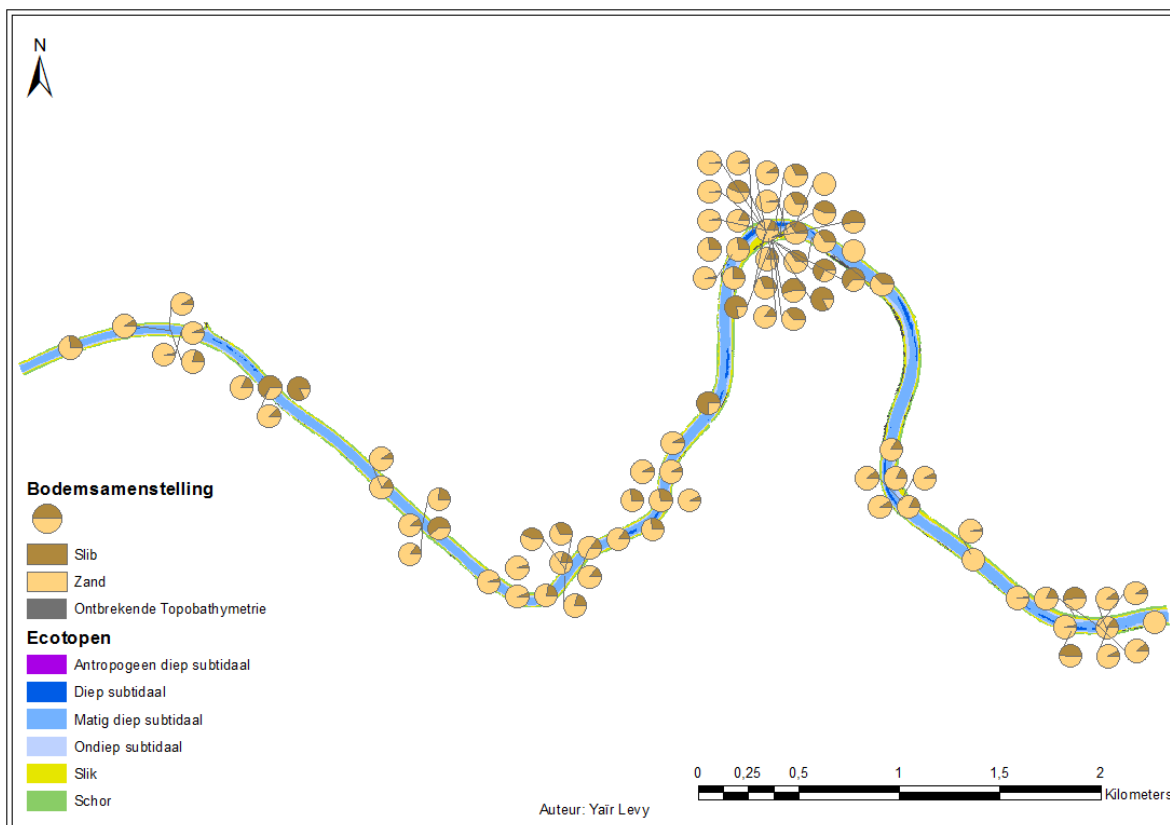
Figuur 57 – Ecotopenkaart voor rekencel 16 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



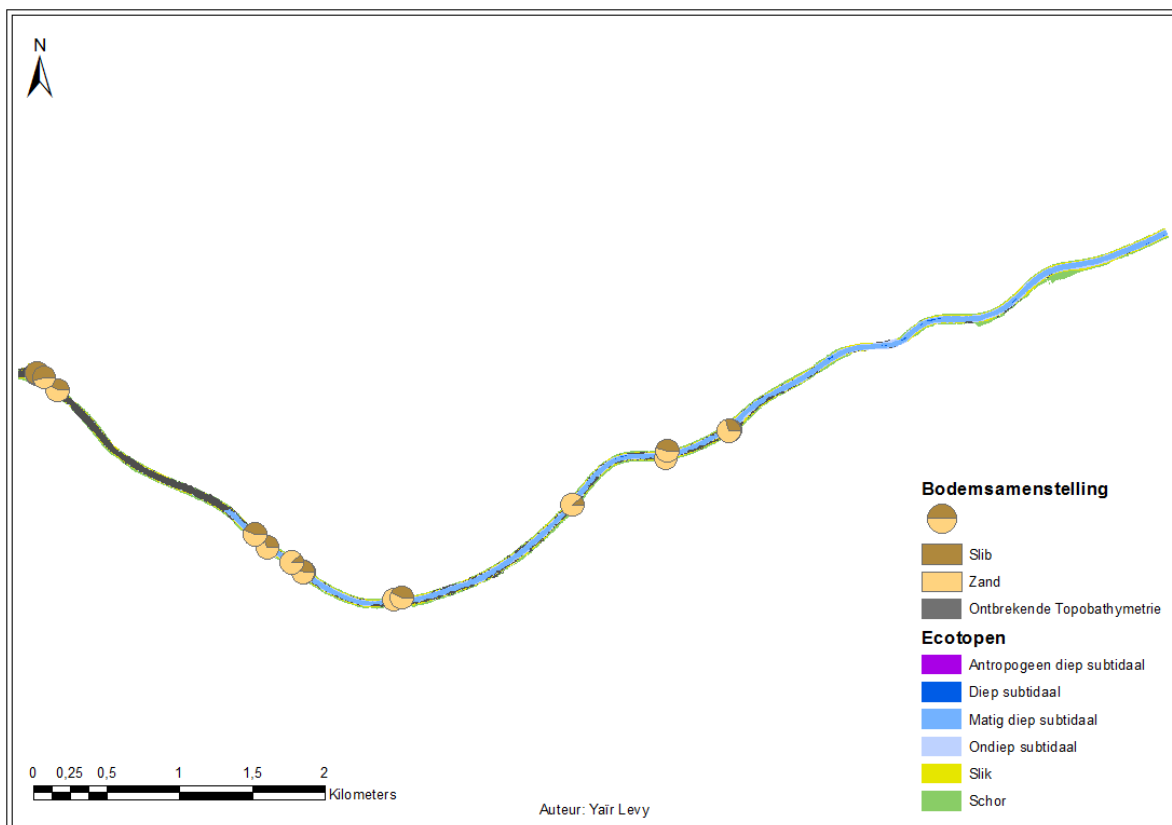
Figuur 58 – Ecotopenkaart voor rekencel 17 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



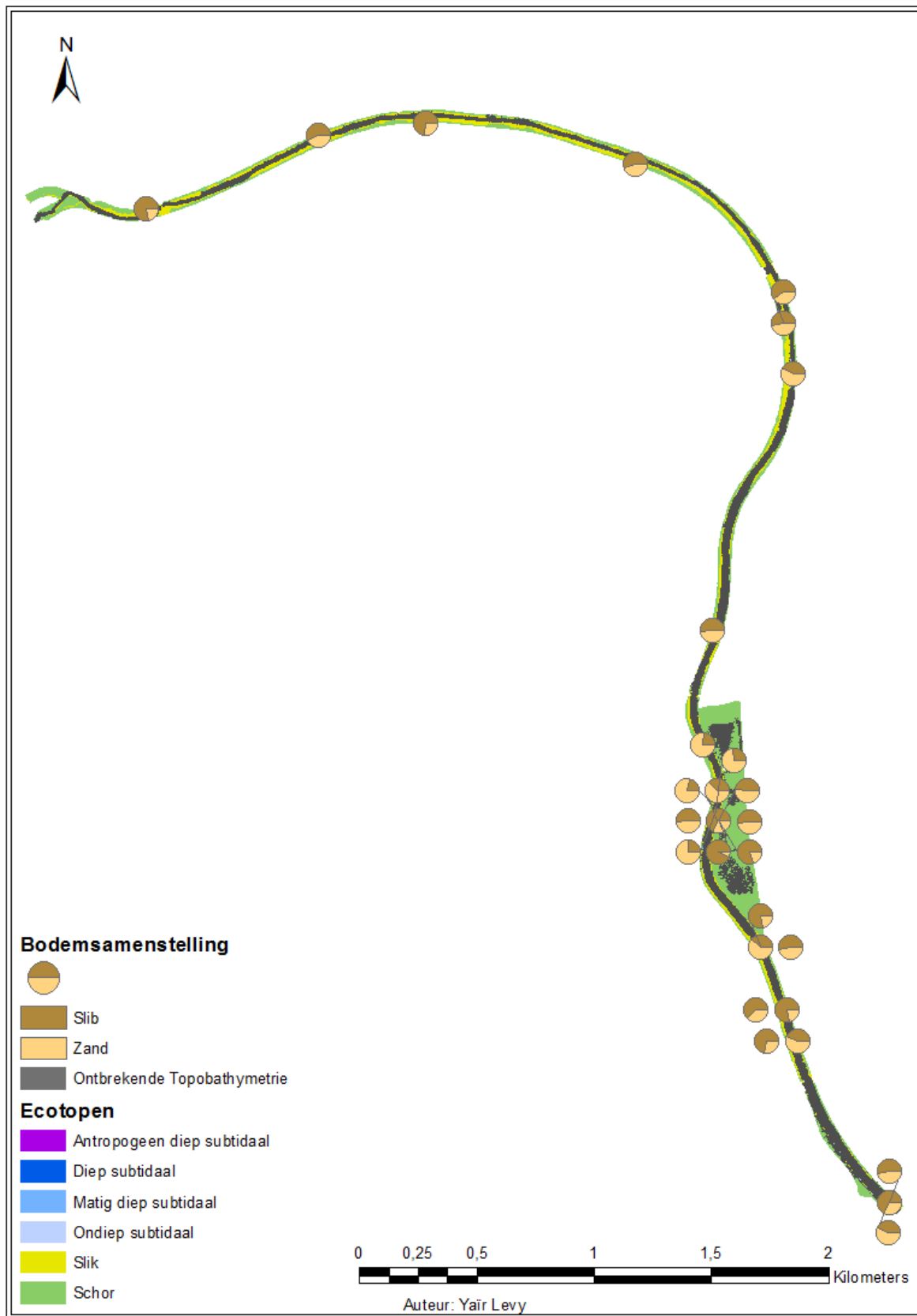
Figuur 59 – Ecotopenkaart voor rekencel 18 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehaltenes (%).



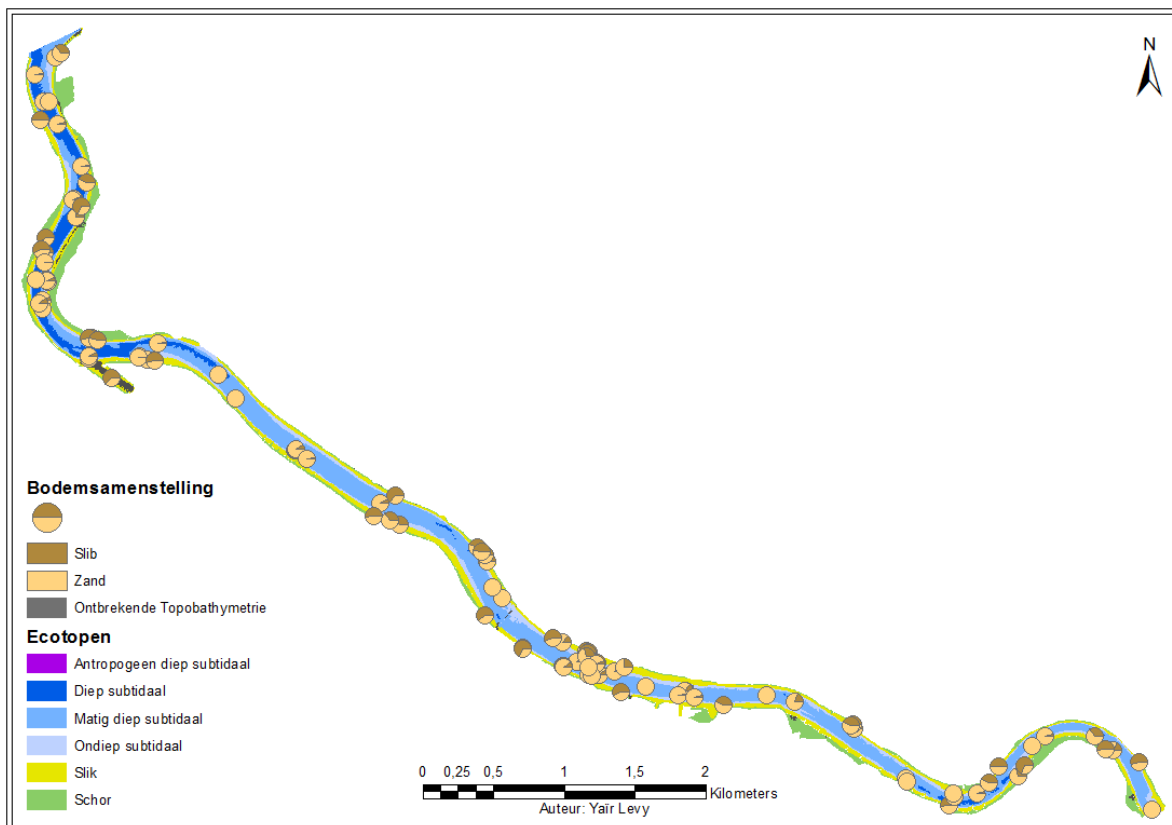
Figuur 60 – Ecotopenkaart voor rekencel 19 met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slijbgehaltenes (%).



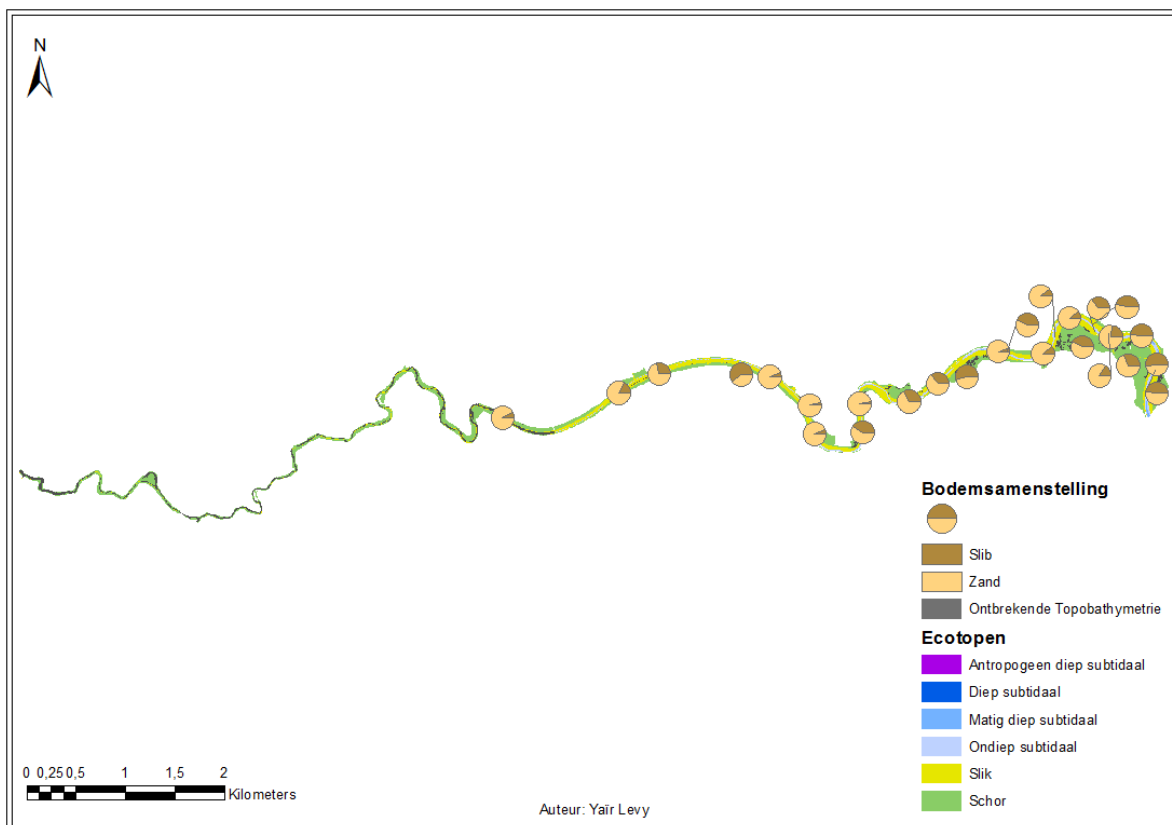
Figuur 61 – Ecotopenkaart voor rekencel 19trjGM met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slibgehalten (%).



Figuur 62 – Ecotopenkaart voor rekencel Rupel met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slijbgehaltenes (%).



Figuur 63 – Ecotopenkaart voor rekencel Durme met aanduiding van bodemstaallocaties en bijhorende zand- en slijbgehaltenes (%).



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