



Vlaanderen
is wetenschap



20_061.1
WL rapporten

Slibhuishouding in het Schelde-estuarium

Data-analyse

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Slibhuishouding in het Schelde-estuarium

Data-analyse

Plancke, Y.; Vanlede, J.; Meire, D.; 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 2021
D/2021/3241/062

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Vanlede, J.; Meire, D.; Mostaert, F. (2021). Slibhuishouding in het Schelde-estuarium: Data-analyse. Versie 4.0. WL Rapporten, 20_061_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Havenbedrijf Antwerpen	Ref.:	WL2021R20_061_1
Trefwoorden (3-5):	Sediment, getij, morfologie, zout, Schelde-estuarium		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Getij > in -situ metngen Hydraulica en sediment > Zouttong > in -situ metngen Hydraulica en sediment > Sediment > Cohesief sediment > in -situ metngen		
Tekst (p.):	40	Bijlagen (p.):	49
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Plancke, Y.; Meire, D.
------------	------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanlede, J.	Getekend door: Joris Vanlede (Signature) Getekend op: 2021-04-19 17:34:10 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Joris Vanlede</i>
Projectleider:	Meire, D.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2021-04-20 14:34:56 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Dieter Meire</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2021-04-13 06:58:39 +02:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	--



Abstract

Naar aanleiding van recente vaststellingen rond potentiële wijzigingen in de slibhuishouding in het Schelde-estuarium, voert de UAntwerpen – onderzoeksgroep ECOBE – in opdracht van het Havenbedrijf Antwerpen (HA) onderzoek uit omtrent de potentiële oorzaken van de toename van SSC in de Schelde (“causaliteitsonderzoek”). Rond een aantal aspecten: met name waterbeweging (getij en stromingen), morfologie en zout, wordt een bijdrage vanuit het WL geleverd dat aansluit bij lopend onderzoek. Dit rapport is een bundeling van deze inzichten, gebaseerd op de analyse van meetdata.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Situering.....	1
2 Waterbeweging	2
2.1 Beschikbare data	2
2.2 Methodologie	2
2.2.1 Onderzoektools	2
2.2.2 Eb- en vloedvolumes	3
2.3 Resultaten.....	3
2.3.1 Getij	3
2.3.2 Eb- en vloedvolumes	5
2.3.3 Residuele watervolumes te Driegoten	10
3 Morfologie	12
3.1 Beschikbare data	12
3.2 Methodologie	12
3.2.1 Samengestelde topo-bathymetrie.....	12
3.2.2 Verschilkaarten.....	13
3.2.3 Hypsometrie	13
3.3 Resultaten.....	14
3.3.1 Verschilkaarten.....	14
3.3.2 Hypsometrie	14
3.3.3 Volumes onder HW en LW	16
3.3.4 Verblijftijden	18
4 Zout.....	19
4.1 Beschikbare data	19
4.1.1 Periodieke data.....	19
4.1.2 Continue data	21
4.2 Methodologie	22
4.2.1 Relatie zout – bovenafvoer.....	22

4.2.2	Langsgradiënt	22
4.3	Resultaten.....	23
4.3.1	Jaarlijkse maximale zoutgehaltes	23
4.3.2	Relatie zout – bovenafvoer.....	25
4.3.3	Langsgradiënt	30
5	Sediment.....	32
5.1	Beschikbare data	32
5.2	Methodologie	32
5.2.1	Sedimentfluxen.....	32
5.2.2	Sedimenteigenschappen	32
5.3	Resultaten.....	33
5.3.1	Sedimentfluxen te Driegoten	33
5.3.2	Sedimenteigenschappen	37
6	Conclusies en aanbevelingen	39
7	Referenties	40
Bijlage 1	Hypsometrie	B1
Bijlage 2	Zout.....	B16
Bijlage 3	Verschilkaarten.....	B32

Lijst van de tabellen

Tabel 2 – Overzicht gebruikt topo-bathymetrische opname voor samengestelde bodem Schelde-estuarium	12
Tabel 3 – Overzicht van de gebruikte hoog- en laagwaterstanden per OMES segment.....	14

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Relatie tussen hoogwater [m TAW] te Antwerpen en de tijd tussen hoogwater en kentering hoogwater [min] te Oosterweel, voor 2018.....	4
Figuur 2 – Evolutie van de helling [min/m] en intercept [min] van de relatie tussen HW en de tijd tussen kentering en hoogwater, voor de periode 2001 - 2020	4
Figuur 3 – Verloop van de tijd tussen hoogwater [mTAW] en kentering hoogwater KHW [min] in de periode 2001 - 2020.....	5
Figuur 4 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) daling waterstand en ebvolume (rechts) te Kruibeke	6
Figuur 5 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) daling waterstand en ebvolume (rechts) te Weert/Driegoten.....	7
Figuur 6 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) daling waterstand en ebvolume (rechts) te Dendermonde	8
Figuur 7 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) daling waterstand en ebvolume (rechts) te Schoonaarde.....	9
Figuur 8 – Relatie tussen het residuele watervolume per getij te Driegoten en het debiet te Melle	10
Figuur 9 – Residueel watervolume [m ³] in relatie tot de dagelijkse ongelijkheid (DO), hoogwater (HW) en debiet (Q).....	11
Figuur 10 – Verloop van berekende (zwart) en voorspelde residuele waterflux (blauw, boven) en verschil tussen residuele waterflux en voorspelde waterflux (onder)	11
Figuur 11 – Langsverloop van de hoog- en laagwaterstanden voor verschillende tijdstations over de periode 2000 – 2019, met gemiddelde waarden (volle lijn) en maximale en minimale jaargemiddelde waarden voor deze periode (....)	14
Figuur 12 – Hypsometrische curve voor OMES segment 9 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	15
Figuur 13 – Hypsometrische curve voor OMES segment 10 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	15
Figuur 14 – Hypsometrische curve voor OMES segment 12 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	15
Figuur 15 – Hypsometrische curve voor OMES segment 16 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	16
Figuur 16 – Volume onder laagwater per OMES segment, relatief uitgedrukt t.o.v. het volume onder LW in 2001.....	16
Figuur 17 – Volume onder hoogwater per OMES segment, relatief uitgedrukt t.o.v. het volume onder HW in 2001.....	17
Figuur 18 – Het getijvolume, het volume tussen laag- en hoog hoogwater, per OMES segment, relatief uitgedrukt t.o.v. het getijvolume in 2001.....	17
Figuur 19 – Verblijftijd berekend aan de hand van 4 topo-bathymetrieën voor het volledige Schelde estuarium	18
Figuur 20 – Meetlocaties langsvaarten Beneden-Zeeschelde (in rood).....	20
Figuur 21 – Locatie van MONEOS-meetposten in de Zeeschelde met continue monitoring van fysische parameters	21
Figuur 22 – Verloop van zoutgehalte ter hoogte van locaties van continue meetstations	23

Figuur 23 – Langsverloop van maximaal (boven) en minimaal (onder) zoutgehalte per jaar uit langsvaarten, de aangeduide D waarde in de legende geeft de dag in het jaar weer van het gepresenteerde langsverloop	24
Figuur 24 – Variatie in de tijd van de coëfficiënten (helling – links en snijpunt – rechts) voor relatie tussen zoutgehalte en debiet.....	25
Figuur 25 – Variatie in de tijd van de coëfficiënten (helling – links en snijpunt – rechts) voor relatie tussen zoutgehalte en verblijftijd	25
Figuur 26 – Relatie tussen zoutgehalte en debiet voor Prosperpolder (boven), Lillo/Boei84 (midden) en Oosterweel (onder) met links steeds de data voor de kenteringsvaarten, en rechts de continue meetdata	26
Figuur 27 – Relatie tussen zoutgehalte en debiet voor Kruibeke (boven), Hemiksem (midden) en Driegoten/Weert (onder) met links steeds de data voor de kenteringsvaarten, en rechts de continue meetdata	27
Figuur 28 – Relatie tussen zoutgehalte en verblijftijd voor Prosperpolder (boven), Lillo/Boei84 (midden) en Oosterweel (onder)	28
Figuur 29 – Relatie tussen zoutgehalte en verblijftijd voor Kruibeke (boven), Hemiksem (midden) en Driegoten/Weert (onder)	29
Figuur 30 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het debiet voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. alle metingen ..	30
Figuur 31 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van de verblijftijd voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. alle metingen ..	31
Figuur 32 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het zoutgehalte voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. alle metingen ..	31
Figuur 33 – Relatie tussen het residueel watervolume per getij te Driegoten [m^3] en de residuele sedimentflux [ton] voor de periode 2010-2016	33
Figuur 34 – Relatie tussen het residueel watervolume per getij te Driegoten [m^3] en de residuele sedimentflux [kg] per jaar met aanduiding van de lineaire fit op de jaarlijkse data (rood) en de fit op alle data (blauw) ..	34
Figuur 35 – Berekende sedimentflux [ton] over de volledige beschouwde periode per getij (boven) en cumulatief (onder).....	35
Figuur 36 – Sedimentflux [kg] per getij (boven) en cumulatief (onder), voor de verschillende beschouwde jaren.....	36
Figuur 37 – Relatie tussen de beginwaarde (links) en gemiddelde waarde (rechts) van het hoogwater (boven), debiet (midden) en verblijftijd (onder) en de duur van een periode met opwaartse sedimentfluxen.	37
Figuur 38 – Verloop van de vlokdensiteit (boven) en mediane korrelgrootte (onder) te Kruibeke voor verschillende ijkingscampagnes in 2018	38
Figuur 39 – Hypsometrische curve voor OMES segment 9 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B1
Figuur 40 – Hypsometrische curve voor OMES segment 10 voor volume (links) oppervlakte (rechts).....	B1
Figuur 41 – Hypsometrische curve voor OMES segment 11 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B1
Figuur 42 – Hypsometrische curve voor OMES segment 12 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B2
Figuur 43 – Hypsometrische curve voor OMES segment 13 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B2
Figuur 44 – Hypsometrische curve voor OMES segment 14 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B2
Figuur 45 – Hypsometrische curve voor OMES segment 15 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B3
Figuur 46 – Hypsometrische curve voor OMES segment 16 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B3
Figuur 47 – Hypsometrische curve voor OMES segment 17 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B3

Figuur 48 – Hypsometrische curve voor OMES segment 18 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B4
Figuur 49 – Hypsometrische curve voor OMES segment 19 voor volume (links) en oppervlakte (rechts).....	B4
Figuur 50 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 1)	B5
Figuur 51 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 2)	B5
Figuur 52 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 3)	B6
Figuur 53 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 4)	B6
Figuur 54 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 5)	B7
Figuur 55 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 6)	B7
Figuur 56 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 7)	B8
Figuur 57 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 8)	B8
Figuur 58 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 9)	B9
Figuur 59 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 10)	B9
Figuur 60 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 11)	B10
Figuur 61 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 12)	B10
Figuur 62 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 13)	B11
Figuur 63 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 14)	B11
Figuur 64 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 15)	B12
Figuur 65 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 16)	B12
Figuur 66 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 17)	B13
Figuur 67 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 18)	B13
Figuur 68 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 19)	B14
Figuur 69 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 19-Gentbrugge-Melle)	B14

Figuur 70 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment Rupel).....	B15
Figuur 71 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment Durme).....	B15
Figuur 72 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Prosperpolder o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)	B16
Figuur 73 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Prosperpolder o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)	B17
Figuur 74 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Prosperpolder o.b.v. de continue metingen.....	B18
Figuur 75 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Boei84/Lillo o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)	B19
Figuur 76 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Boei84/Lillo o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)	B20
Figuur 77 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Boei84/Lillo o.b.v. de continue metingen.....	B21
Figuur 78 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Oosterweel o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)	B22
Figuur 79 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Oosterweel o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)	B23
Figuur 80 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Oosterweel o.b.v. de continue metingen.....	B24
Figuur 81 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Kruibeke o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)	B25
Figuur 82 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Kruibeke o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)	B26
Figuur 83 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Kruibeke o.b.v. de continue metingen.....	B27
Figuur 84 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Hemiksem o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)	B28
Figuur 85 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Hemiksem o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)	B29
Figuur 86 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Hemiksem o.b.v. de continue metingen.....	B30
Figuur 87 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het debiet voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. de langsvaarten	B31
Figuur 88 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het debiet voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. de continue metingen.....	B31
Figuur 89 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegmenten 9 en 10	B32
Figuur 90 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegmenten 11 en 12	B32
Figuur 91 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 13	B33

Figuur 92 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment Rupel.....	B33
Figuur 93 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 14.....	B34
Figuur 94 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment Durme.....	B34
Figuur 95 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 15.....	B35
Figuur 96 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 16.....	B35
Figuur 97 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 17.....	B36
Figuur 98 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 18.....	B36
Figuur 99 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 19.....	B37
Figuur 100 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 19 trjGM	B37
Figuur 101 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegmenten 9 en 10.....	B38
Figuur 102 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegmenten 11 en 12.....	B38
Figuur 103 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegmenten 13.....	B39
Figuur 104 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment Rupel.....	B39
Figuur 105 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 14.....	B40
Figuur 106 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment Durme.....	B40
Figuur 107 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 15.....	B41
Figuur 108 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 16.....	B41
Figuur 109 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 17.....	B42
Figuur 110 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 18.....	B42
Figuur 111 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 19.....	B43
Figuur 112 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 19_trjGM	B43
Figuur 113 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegmenten 9 en 10.....	B44
Figuur 114 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegmenten 11 en 12.....	B44
Figuur 115 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 13.....	B45
Figuur 116 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment Rupel.....	B45
Figuur 117 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 14.....	B46
Figuur 118 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment Durme.....	B46
Figuur 119 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 15.....	B47
Figuur 120 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 16.....	B47
Figuur 121 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 17.....	B48
Figuur 122 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 18.....	B48
Figuur 123 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 19.....	B49
Figuur 124 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 19 trjGM	B49

1 Situering

Naar aanleiding van recente vaststellingen rond potentiële wijzigingen in de slibhuishouding in het Schelde-estuarium, voert de UAntwerpen – onderzoeksgroep ECOBE – in opdracht van het Havenbedrijf Antwerpen (HA) onderzoek uit omtrent de potentiële oorzaken van de toename van SSC in de Schelde (“causaliteitsonderzoek”). Doel van deze opdracht is om (1) inzicht te krijgen in de oorzaak van deze toename, en vervolgens (2) enkele mogelijke maatregelen om verdere toename te vermijden (of zelfs SSC te reduceren) voor te stellen. Uit het dusver gevoerde onderzoek (dat nog lopend is), lijken vooral wijzigingen in getijslag, stroming, komberging en saliniteit sturende parameters in deze evolutie.

Aangezien het Waterbouwkundig Laboratorium in het kader van de Agenda voor de Toekomst onderzoek uitvoert naar de sedimentdynamica op verschillende tijdschalen (project 17_088), alsook rond het getij in het Schelde-estuarium (project 19_065), is er een sterke relatie tussen het werk dat gebeurt op het WL en de opdracht van UAntwerpen. Voorliggende rapport bundelt de bevindingen van het WL en gaat in op de vraag vanuit het HA om de expertise van het WL met betrekking tot analyse van meetdata van bovengenoemde parameters bij dit onderzoek te betrekken.

De bijdrage vanuit het WL focust zich op volgende aspecten:

- Waterbeweging (getij en stromingen) [Hoofdstuk 2]
- Morfologie [Hoofdstuk 3]
- Zout [Hoofdstuk 4]
- Sediment [Hoofdstuk 5]

Deze bijdrage zal eveneens gebruikt worden binnen het causaliteitsonderzoek dat uitgevoerd wordt door de UAntwerpen. Waar in dit rapport het door WL uitgevoerde onderzoek met focus op de gehanteerde data en onderzoeksmethode wordt gerapporteerd, zal in het gemeenschappelijke UAntwerpen – WL rapport worden ingezet op de linken tussen de resultaten van de verschillende onderzoekspartijen.

2 Waterbeweging

Op basis van metingen in het kader van het OMES-programma, werden de laatste jaren door de UAntwerpen hogere SSC concentraties gemeten in de Boven-Zeeschelde. Een mogelijke hypothese hiervoor is een verandering van de getijbeweging waardoor ofwel het sediment minder gemakkelijk uitspoelt ofwel sterker opwaarts wordt getransporteerd. Enerzijds wordt aan de hand van de relatie tussen kentering hoogwater en het tijdstip van hoogwater nagegaan of de vloedstroming, met name de maximale vloedstroming, sterker is opgetreden. Daarnaast wordt een relatie gelegd tussen eb en vloedvolumes op verschillende locaties, waarbij Q ook als verklarende parameter wordt gebruikt. Deze volumes worden gelinkt aan sedimentvolumes in hoofdstuk 5.

2.1 Beschikbare data

De saliniteitsdata en getijdata die hier geanalyseerd werden zijn afkomstig van continue meetposten op het Schelde estuarium, die worden opgemeten binnen het monitoringsprogramma MONEOS (factual data rapportage o.a. terug te vinden in Vandenbruwaene et al., 2020).

2.2 Methodologie

2.2.1 Onderzoektools

Kubatuur

De kubatuuurberekening is een relatief eenvoudige manier voor het berekenen van de waterbeweging in estuaria op basis van bodemliggingsgegevens en getijgegevens. Met behulp van deze meetgegevens en het toepassen van de continuïteitsvergelijking worden de (getij)debieten en sectie-gemiddelde stroomsnelheden berekend. In tegenstelling tot numerieke modellen, die bij simulaties ook een weerstandscoefficiënt noodzakelijk voor het uitvoeren van de berekeningen, vindt bij de kubatuur de berekening plaats zonder dergelijk kalibratiecoëfficiënt. Voor een uitgebreide beschrijving van de methodiek wordt verwezen naar Plancke *et al.* (2014).

In tegenstelling tot eerdere kubatuuurberekeningen waarbij gefocust wordt op het gemiddelde springtij, het gemiddelde getij of gemiddelde doottij, werd voor deze studie een berekening uitgevoerd voor de volledige periode 2010-2015, louter voor de Boven-Zeeschelde (segment Melle – Durmemonding). Hierbij werd gebruikt gemaakt van de gemeten waterstanden in de stations van de Boven-Zeeschelde (Melle, Wetteren, Schoonaarde, Dendermonde, Sint-Amands, Tielrode), het gemeten debiet te Melle en de topo-bathymetrie van 2011. De bedoeling van deze berekening was het aanleveren van debieten ter hoogte van Driegoten/Weert om zo, in combinatie met de uit gemeten turbiditeitswaarden afgeleide sedimentconcentraties, de sedimentflux te kunnen bepalen (zie § 5.2.1).

1D-model

Aangezien na de verkennende analyse voor Driegoten de noodzaak ontstond om zowel de waterbeweging als de sedimenthuishouding voor meerdere locaties te onderzoeken, werd voor het genereren van de benodigde waterbewegingsdata gebruik gemaakt van een 1D-numeriek model opgezet in MIKE11, voor de volledige Zeeschelde. Met dit model werd, aanvullend aan de eerder uitgevoerde kubatuuurberekening, een

langetermijn simulatie uitgevoerd voor de periode 2009-2018, waarbij de gemeten bovenafvoeren (opwaarts) en waterstanden (afwaarts) als randvoorwaarden werden gebruikt. De topo-bathymetrie in het model was een samengestelde bodem uit de jaren 2013-2014. Voor de analyse werden de gesimuleerde waterstanden en debieten gebruikt, die met een tijdstap van 15' beschikbaar waren. Voor 2 periodes van telkens één maand (januari en juni 2015) werd een extra simulatie uitgevoerd waarbij de resultaten per minuut werden uitgevoerd.

2.2.2 Eb- en vloedvolumes

Op basis van de tijdreeksen van de (berekende/gesimuleerde) debieten, werden de eb- en vloedvolumes voor verschillende locaties afgeleid. Er werd een selectie gemaakt van representatieve locaties langsheen en verspreid over het estuarium:

Locatie	Regio	km
Kruikeke	Beneden-Zeeschelde	[KM86]
Driegoten	Boven-Zeeschelde	[KM103]
Dendermonde	Boven-Zeeschelde	[KM122]
Schoonaarde	Boven-Zeeschelde	[KM133]

Voor elk getij tijdens de simulatieperiode 2009-2018 werd het eb- en vloedvolume berekend. De berekening gebeurt door de integraal te maken over de eb- resp. vloedperiode van de gesimuleerde debieten, waarbij het moment van kentering bepaald werd aan de hand van een wisseling van teken (+ => - en vice versa) van het debiet. Daarnaast werd voor elk getij ook de bijbehorende bovenafvoer te Melle en de verblijftijd voor de Boven-Zeeschelde bepaald.

2.3 Resultaten

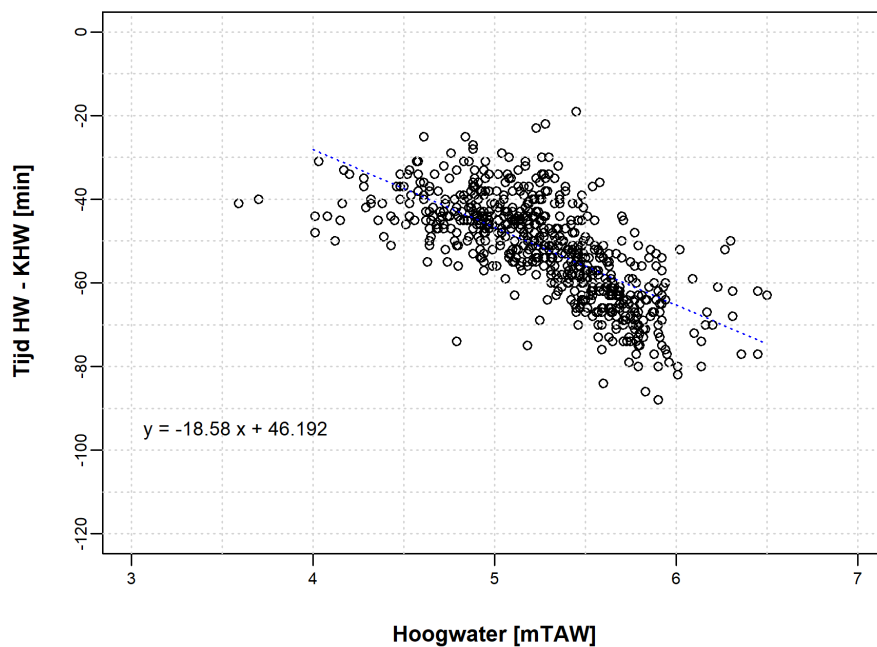
2.3.1 Getij

Om een inschatting te maken van de sterkte van de vloedstroming, wordt het moment van kentering bij hoogwater beschouwd. Er wordt gefocust op de vloedfase, aangezien een toename hiervan het opwaarts transport sterk kan beïnvloeden. Hierbij wordt de veronderstelling gemaakt dat indien de (sterkte van de) vloedstroming toeneemt doorheen de tijd, dit ook waarneembaar moet zijn in de tijd tussen hoogwater en kentering hoogwater. De tijd van hoogwater kan rechtstreeks uit de getijcurve worden afgeleid. Voor de tijd van kentering wordt het tijdstip KHW uit de gemeten saliniteitsreeksen gebruikt, met een meetfrequentie van 1 meting per 10 minuten. Deze analyse werd uitgevoerd op basis van data te Oosterweel, waar de continue meetreeks voor zout de langste is die beschikbaar is (sinds 2001). Als getijstation wordt Antwerpen-Loodsgebouw gebruikt, aangezien te Oosterweel geen getij meer wordt opgemeten.

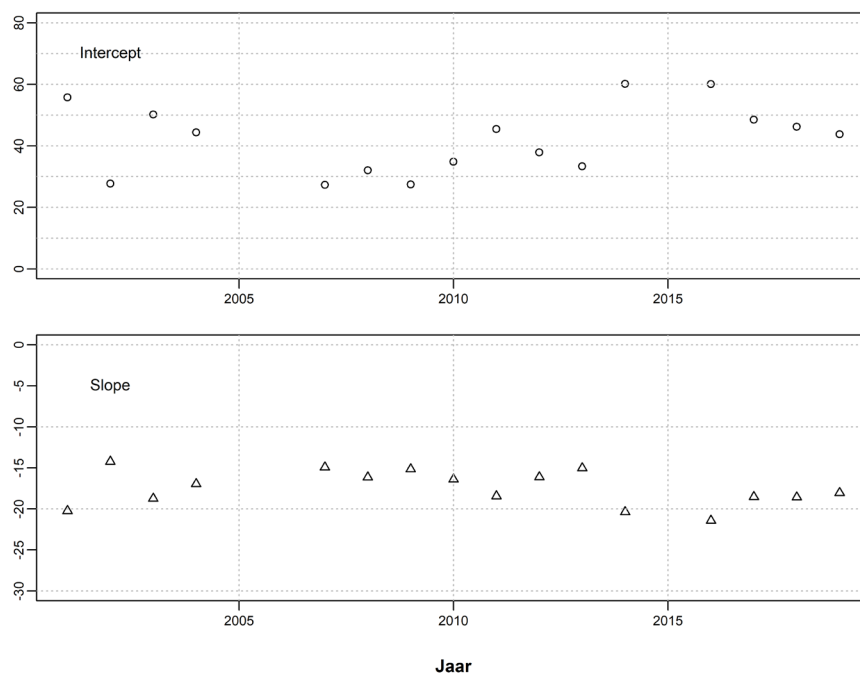
Er is een duidelijke relatie tussen de hoogte van hoogwater en het tijdstip tussen HW en KHW, zoals is weergegeven in Figuur 1. Hier is de relatie weergegeven voor de data van 2018. Voor elk jaar, van 2001 tot 2020, wordt de helling en intercept bepaald. Voor 2005 en 2006 zijn slechts enkele meetwaarden (< 10%) beschikbaar, waardoor deze resultaten niet in de analyse gebruikt werden. Het resultaat en verloop van deze

parameters van de lineaire fits is weergegeven in Figuur 2. Hier kan geen duidelijke trend worden waargenomen voor de beschouwde periode.

Figuur 1 – Relatie tussen hoogwater [m TAW] te Antwerpen en de tijd tussen hoogwater en kentering hoogwater [min] te Oosterweel, voor 2018

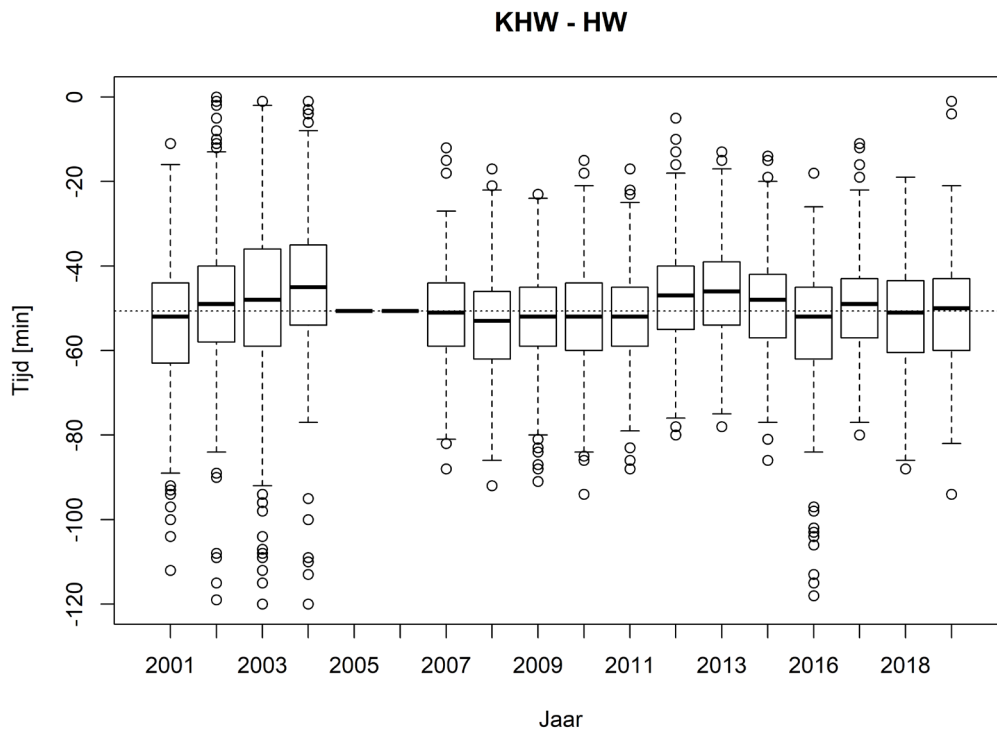


Figuur 2 – Evolutie van de helling [min/m] en intercept [min] van de relatie tussen HW en de tijd tussen kentering en hoogwater, voor de periode 2001 - 2020



In Figuur 3 is, aan de hand van boxplots per jaar, de mediane tijd tussen beide momenten weergegeven alsook de spreiding. De mediane tijd tussen beide momenten bedraagt 50 minuten. Alhoewel er kleine variaties zijn tussen de jaren, is een duidelijke trend in de gemiddelde waarden ook niet waarneembaar.

Figuur 3 – Verloop van de tijd tussen hoogwater [mTAW] en kentering hoogwater KHW [min] in de periode 2001 - 2020

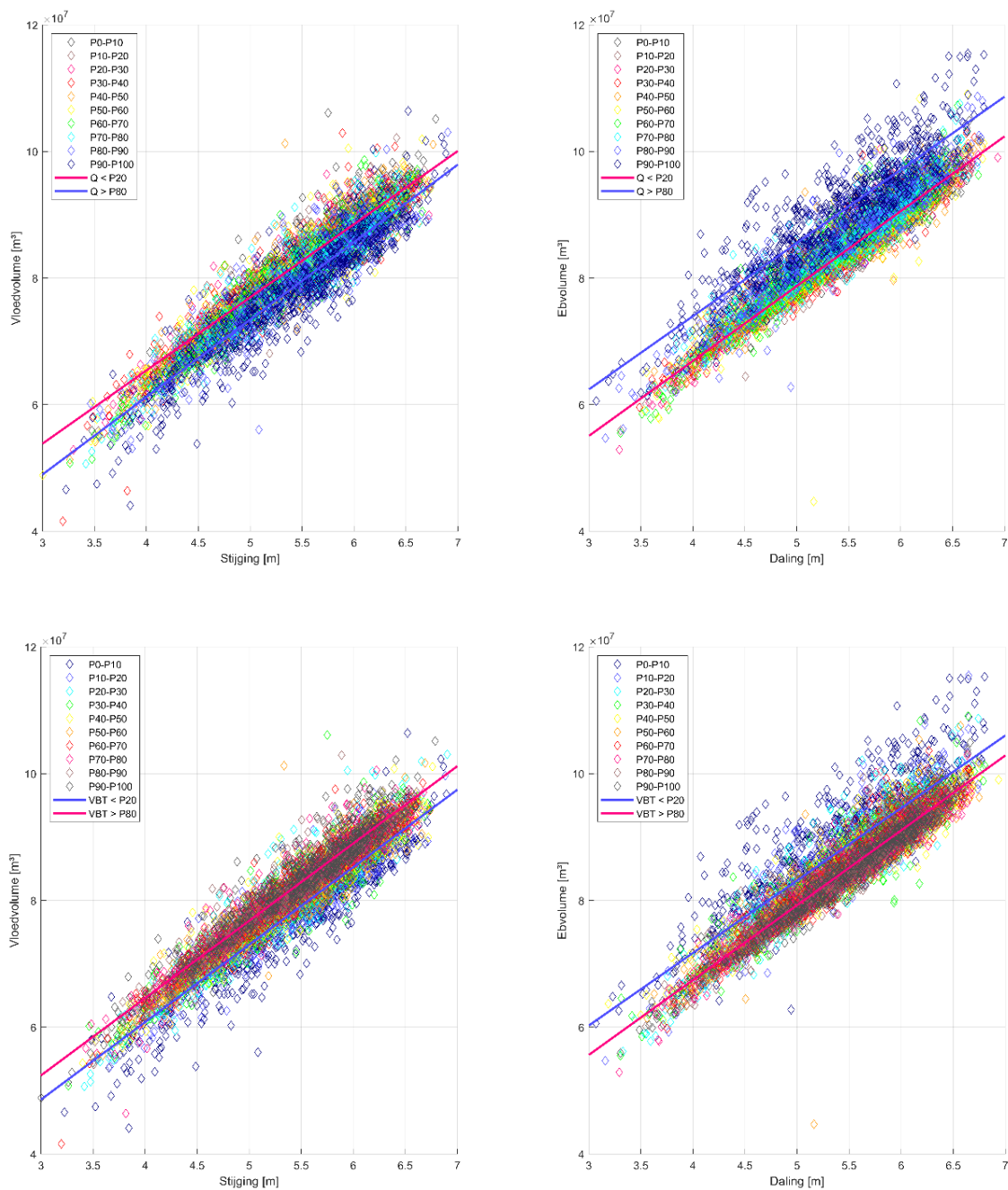


2.3.2 Eb- en vloedvolumes

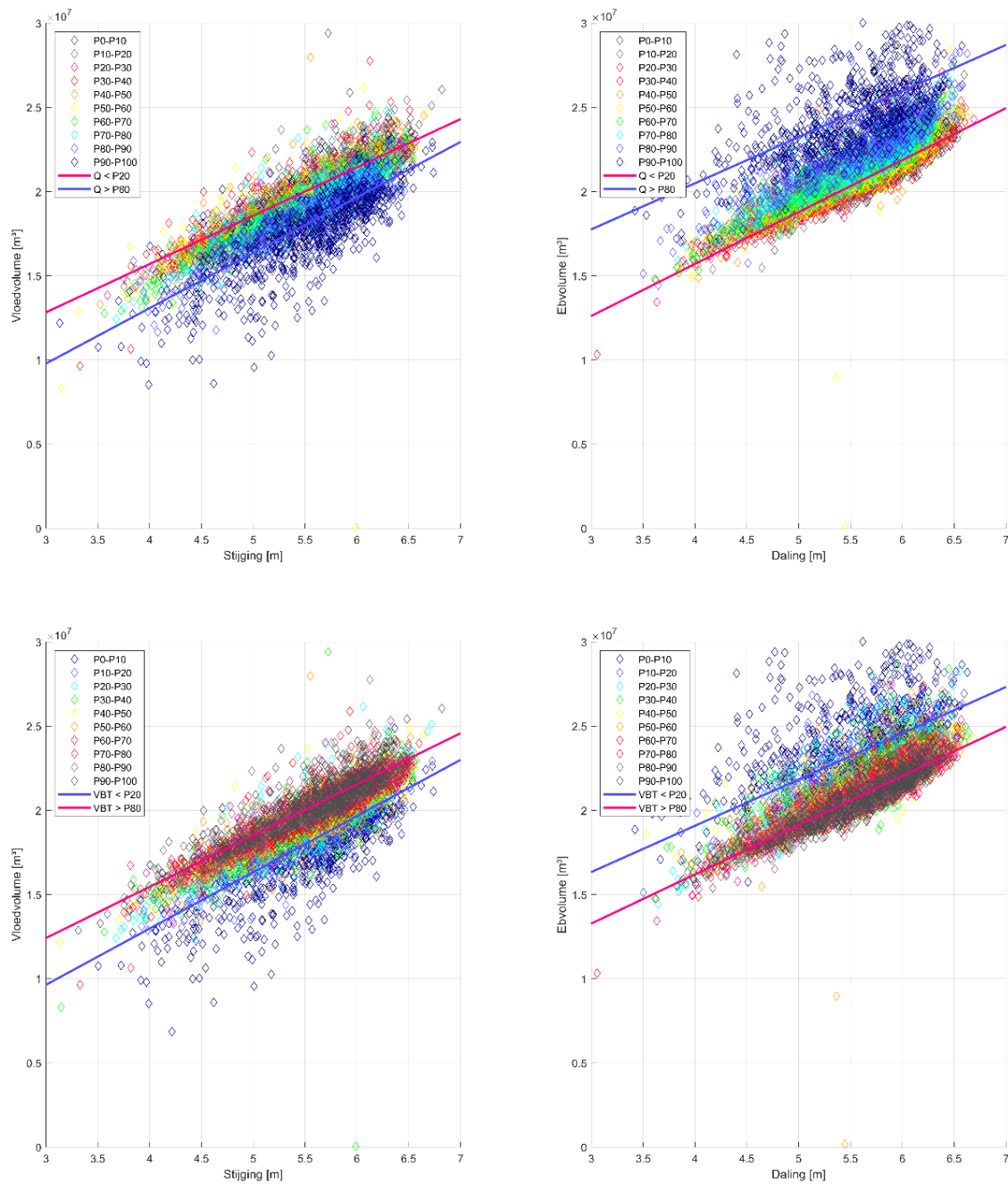
Figuur 4 t.e.m. Figuur 7 geeft de relatie weer tussen het vloedvolume en de stijging van de waterstand (gedefinieerd als het verschil tussen laagwater en hoogwater) en tussen het ebvolume en de daling van de waterstand (gedefinieerd als het verschil tussen hoogwater en laagwater) voor de stations Kruibeke, Driegoten/Weert, Dendermonde en Schoonaarde. Deze volumes worden afgeleid met behulp van het 1D Mike model (zie sectie 2.2.1). Telkens wordt een figuur gepresenteerd waarbij de markers ingekleurd werden volgens enerzijds de bovenafvoer en anderzijds volgens de verblijftijd. Daarnaast werd ook een lineaire regressie toegepast voor enerzijds de lage (< P20-percentiel) en hoge (> P80-percentiel) bovenafvoeren en anderzijds de lange (> P80-percentiel) en korte (< P20-percentiel) verblijftijden.

Voor Kruibeke, Driegoten/Weert en Dendermonde zijn de patronen gelijkaardig: enerzijds neemt het eb- en vloedvolume toe bij grotere daling en stijging, anderzijds neemt het vloedvolume logischerwijs af bij grotere bovenafvoer of kortere verblijftijden, terwijl het ebvolume hierbij toeneemt. Naarmate meer opwaarts, neemt de spreiding in de eb- en vloedvolumes toe bij hogere bovenafvoer, c.q. kortere verblijftijd. Voor Schoonaarde zorgt de invloed van de bovenafvoer ervoor dat het ebvolume in functie van de daling van de waterstand niet noodzakelijk toeneemt bij grotere daling. Het belang van de bovenafvoer overstijgt hier de invloed van het getij.

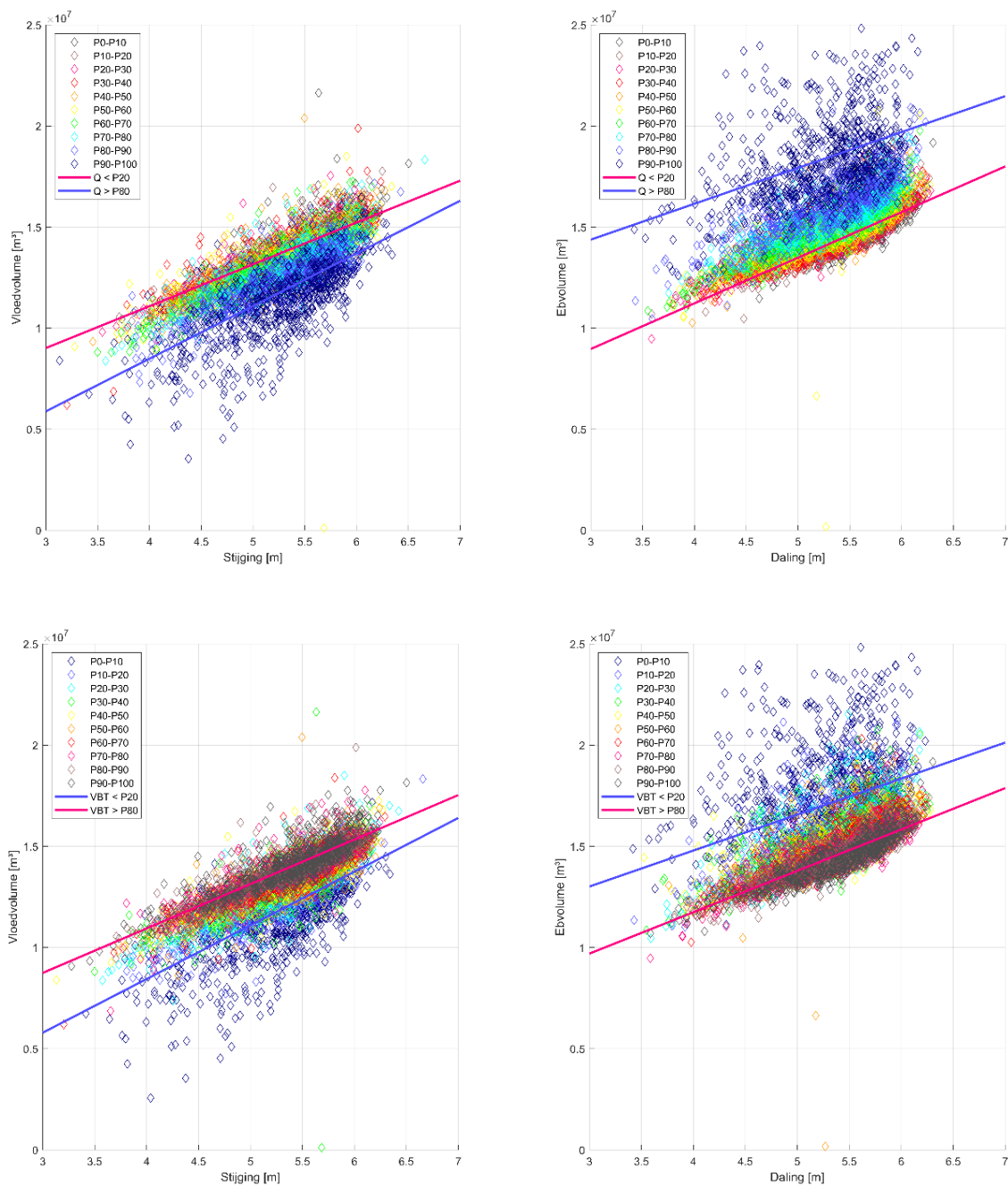
Figuur 4 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) | daling waterstand en ebvolume (rechts) te Kruibeke
Kleuring markers op basis van percentiel in debiet (boven) en verblijftijd (onder)



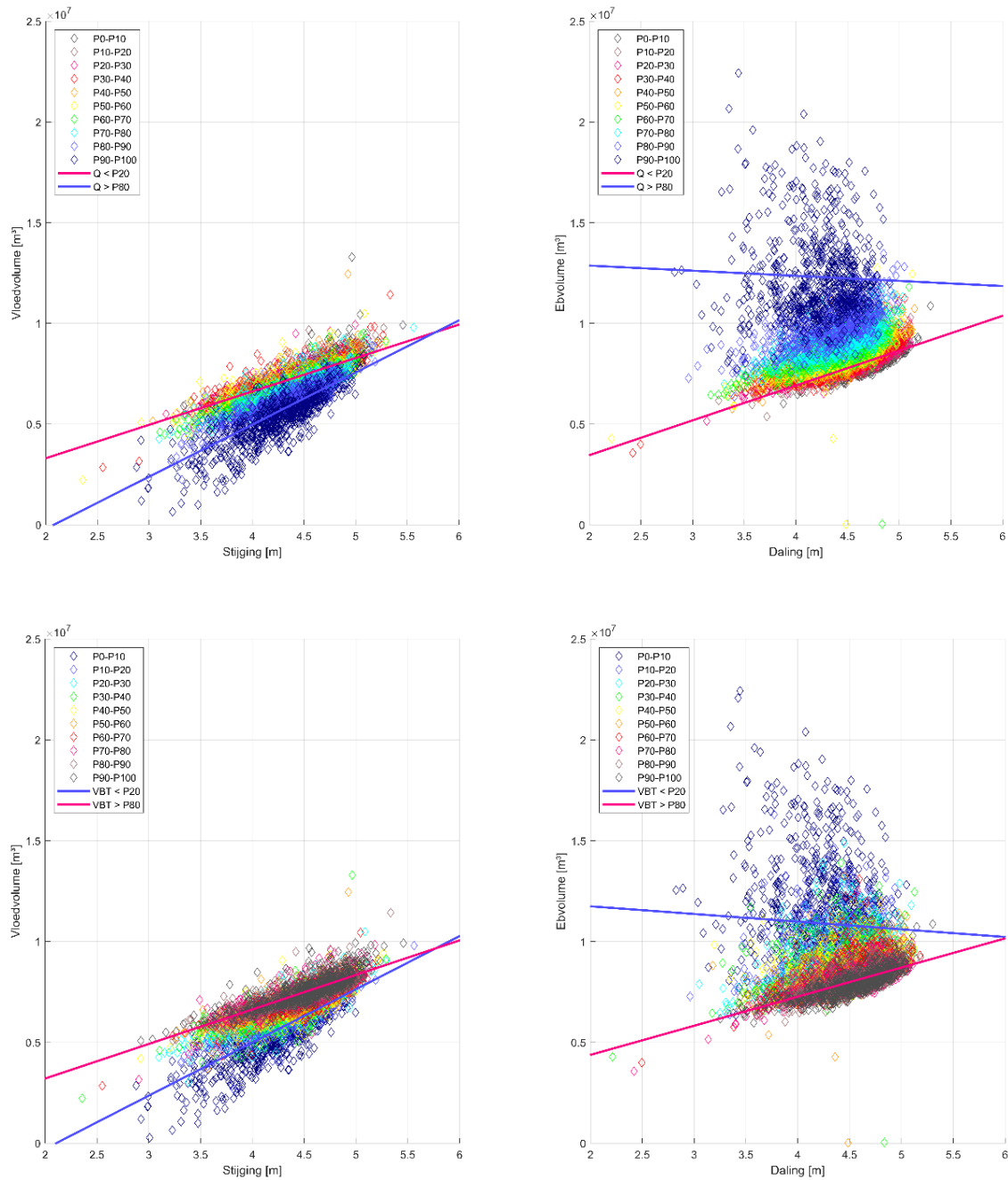
Figuur 5 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) | daling waterstand en ebvolume (rechts) te Weert/Driegoten
Kleuring markers op basis van percentiel in debiet (boven) en verblijftijd (onder)



Figuur 6 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) | daling waterstand en ebvolume (rechts) te Dendermonde
Kleuring markers op basis van percentiel in debiet (boven) en verblijftijd (onder)



Figuur 7 – Relatie tussen stijging waterstand en vloedvolume (links) | daling waterstand en ebvolume (rechts) te Schoonaarde
Kleuring markers op basis van percentiel in debiet (boven) en verblijftijd (onder)

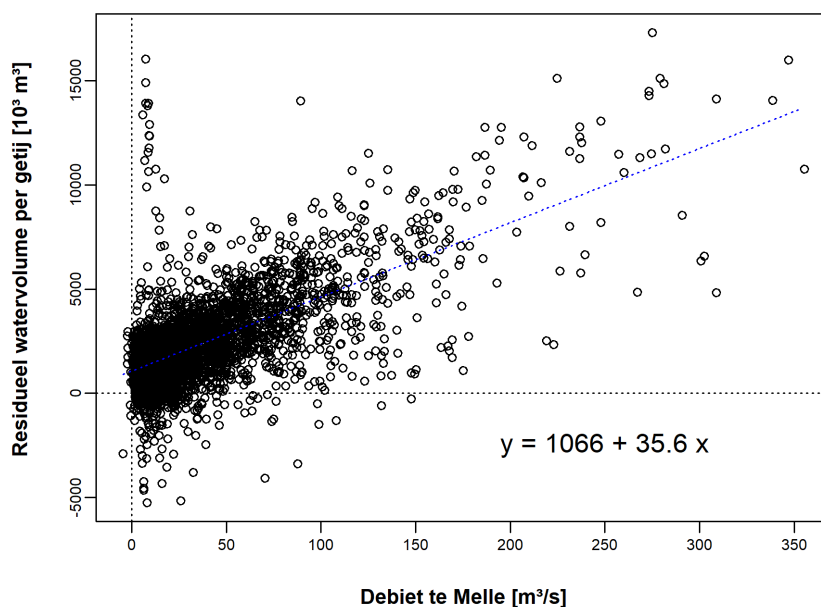


2.3.3 Residuele watervolumes te Driegoten

Naast de watervolumes per getijcyclus werden eveneens de watervolumes per getij of residuele watervolumes bepaald. Deze worden bepaald door de berekende vloed- en ebvolumes, m.b.v. een kubatuurberekening, per getij te sommeren. Deze worden hier weergegeven voor Driegoten waar zowel een residuele waterflux als sedimentflux (zie sectie 5.3.1) kan bepaald worden.

Voor het residuele watervolume per getij kan een logisch verband worden gevonden met de bovenafvoer te Melle, zoals weergegeven in Figuur 8. Dit lineaire verband ($V \text{ [m}^3\text{]} = 1,066 \cdot 10^6 + 35,6 Q \text{ [m}^3\text{/s]})$ heeft een R^2 waarde van 0,43 en voorspelt steeds een afwaarts transport van water. Er werd eveneens een multiparametermodel berekend met 3 variabelen: debiet ($Q \text{ [m}^3\text{/s]}$), dagelijkse ongelijkheid ($DO \text{ [m]}$) gedefinieerd als het verschil tussen 2 opeenvolgende laagwaterstanden, het hoogwater ($HW \text{ [m]}$) of de stijging van de waterstand, het verschil tussen laag- en het daaropvolgend hoogwater ($RIS \text{ [m]}$). Hoogwater en stijging werden niet in 1 model samen gebruikt, wegens hun sterke correlatie ($r = 0.84$). Voor beide regressiemodellen zijn alle parameters significant ($p < 0.05$).

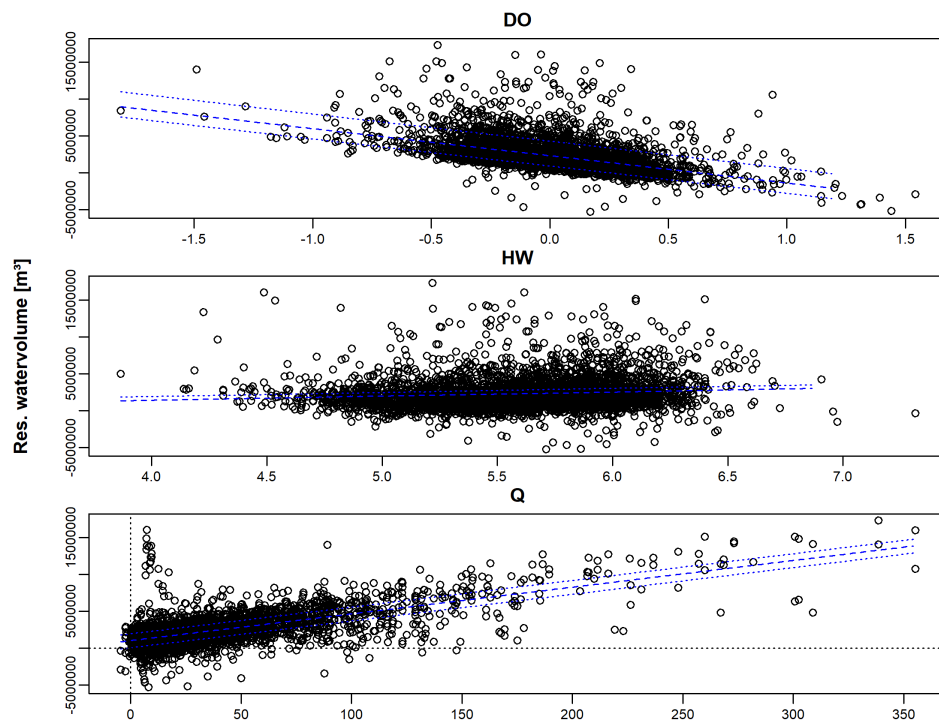
Figuur 8 – Relatie tussen het residuele watervolume per getij te Driegoten en het debiet te Melle



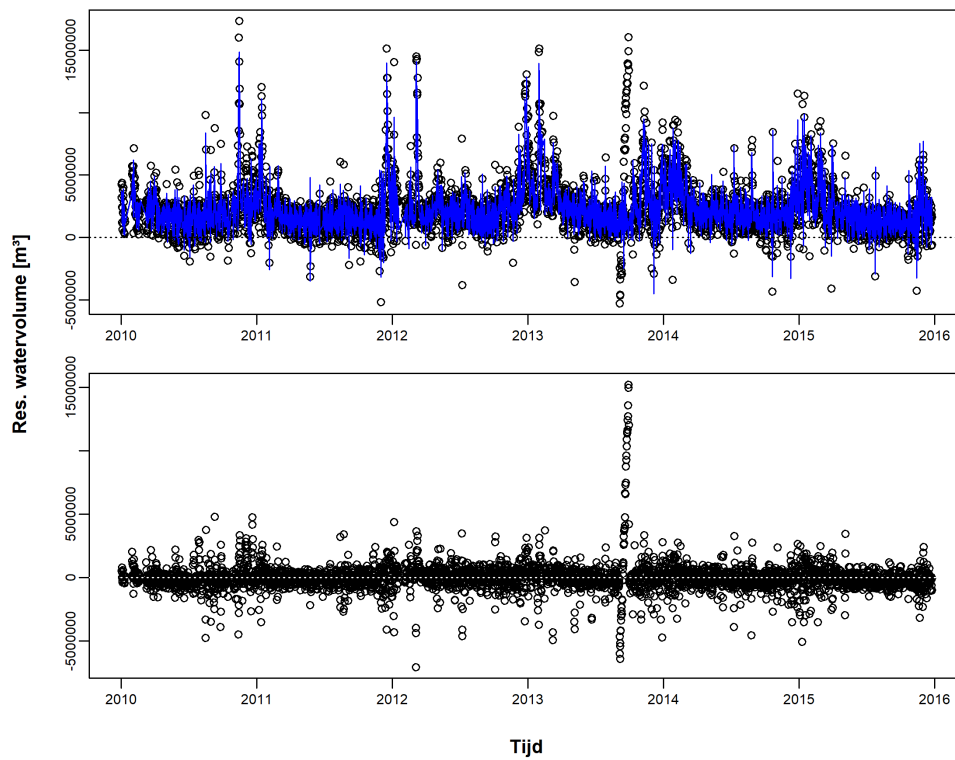
$$V = -1\,869\,444 - 3\,935\,374\,DO + 521\,434\,RIS + 37\,536\,Q \quad (R^2 = 0.71)$$

$$V = -2\,057\,501 - 3\,686\,670\,DO + 553\,404\,HW + 36\,190\,Q \quad (R^2 = 0.70)$$

In Figuur 9 is deze fit weergegeven in relatie tot de drie variabelen (DO , Q , HW). Hierbij worden de andere variabelen constant gehouden, enerzijds op de gemiddelde waarde ($--$ curves) en anderzijds de P10 en P90 waarden van deze variabelen ($...$ curves). In tegenstelling tot een fit met enkel Q als verklarende variabele, worden nu wel residuele watervolumes in opwaartse richting voorspeld. In Figuur 10 is het verloop van de residuele waterflux en de voorspelde residuele waterflux, op basis van de fit met DO , HW , Q , te Driegoten weergegeven (Figuur 10, boven). Het verschil tussen beiden is weergegeven in Figuur 10, onderaan. Hier worden geen duidelijke afwijkingen waargenomen, behalve de grote piek in het midden van 2013, vermoedelijk te wijten aan een data probleem (als input van het model).

Figuur 9 – Residueel watervolume [m³] in relatie tot de dagelijkse ongelijkheid (DO), hoogwater (HW) en debiet (Q)

Figuur 10 – Verloop van berekende (zwart) en voorspelde residuele waterflux (blauw, boven) en verschil tussen residuele waterflux en voorspelde waterflux (onder)



3 Morfologie

De morfologie van het Schelde estuarium heeft een belangrijke rol, oa. op de getijkarakteristieken en getijvoortplanting. In dit hoofdstuk wordt gefocust op de watervolumes, specifiek onder de hoog- en laagwater lijn. Dit vanuit de onderzoeksvraag dat een verandering van deze volumes de verblijftijden, en dus het relatieve belang van de bovenafvoer, beïnvloeden. Bijgevolg zou dit een rol kunnen spelen in een veranderde sedimentdynamica.

3.1 Beschikbare data

De topo-bathymetrie van het Schelde-estuarium wordt door de verschillende beheerders (RWS, Maritieme Toegang, de Vlaamse Waterweg) met verschillende meettechnieken en op verschillende momenten opgemeten. Voor de Westerschelde zijn er sinds de jaren 1950's 2-jaarlijkse gebiedsdekkende opnames beschikbaar, waarbij de single-beam techniek gebruikt wordt. Sinds het eind van de jaren 1990's is de frequentie verhoogd naar jaarlijkse opnames. Voor de Zeeschelde is de data-beschikbaarheid aanzienlijk lager. In het kader van eerdere studies werden gebiedsdekkende bathymetrische opnames samengesteld voor de laatste 5 decennia van de 20^e eeuw (zie Vandenbruwaene *et al.* (2020)). Hierbij was er meestal geen informatie beschikbaar van de intergetijdengebieden en moest deze op basis van contourlijnen ingeschat worden. Sinds 2000 zijn er wel een aantal topo-bathymetrische opnames beschikbaar voor de Zeeschelde en haar bijrivieren. De opmeting van de bathymetrie in 2001 gebeurde aan de hand van de single-beam techniek, voor de recentere jaren werd een multi-beam techniek gebruikt. Voor de intergetijdengebieden wordt gebruik gemaakt van de LIDAR meetgegevens. In het kader van voorliggende studie, is dan ook gebruik gemaakt van de 4 topo-bathymetrische opnames die in de 21^e eeuw beschikbaar zijn, waarbij voor deze jaren een gebiedsdekkende opname werd samengesteld voor het volledige Schelde-estuarium.

Tabel 1 – Overzicht gebruikt topo-bathymetrische opname voor samengestelde bodem Schelde-estuarium

	<i>Westerschelde</i>	<i>Beneden-Zeeschelde</i>	<i>Boven-Zeeschelde</i>	<i>Bijrivieren</i>
2001	2001	2000-2001	2001	1995/1997
2011	2011	2011	2011-2012	2010-2011
2016	2016	2016	2016	2016
2019	2019-2020	2019-2020	2019	2018-2019

3.2 Methodologie

3.2.1 Samengestelde topo-bathymetrie

Voor de opmaak van de verschillende topobathymetrieën werden de lidardata en de bathymetrische opnames gecombineerd. Een deel van de data werd in LAT of NAP opgeleverd en werd voor het combineren eerst gecorrigeerd naar TAW met behulp van een conversiegrid. Daarvoor wordt beroep gedaan op de

ingebouwde *Raster Calculator*-functie van *ESRI ArcMap*, die het mogelijk maakt om wiskundige bewerkingen uit te voeren met de celwaarden van rastergrids. Het resultaat wordt opgeslagen als een nieuw grid.

Vervolgens werd de lidardata en bathymetrische data voor elk van de deelgebieden via de *Mosaic Raster* tool in ArcGIS gecombineerd, waarbij, in geval van overlap tussen lidardata en bathymetrische data, voorrang gegeven werd aan bathymetrische data (om o.a. fouten te vermijden met refractie op water). Daarenboven werd een resolutie aangehouden van 1x1 m, wat overeenkomt met de resolutie van de opnames van de Zeeschelde, zodat er zo weinig mogelijk informatie verloren gaat en de opwaartse delen van het estuarium met voldoende detail weergegeven worden.

3.2.2 Verschilkaarten

Aan de hand van verschilkaarten kunnen bathymetrische ontwikkelingen doorheen de tijd beter in beeld gebracht worden. Het principe is eenvoudig: door de corresponderende rastercellen van twee bathymetrische grids van elkaar af te trekken verdwijnt de absolute diepteligging en komt de verandering in hoogteligging naar boven.

De aanmaak van de verschilgrids binnen *ESRI ArcMap* is relatief eenvoudig. De ingebouwde functie *Raster Calculator* wordt gebruikt om de celwaarden van het ene grid af te trekken van de celwaarden van het andere grid.

3.2.3 Hypsometrie

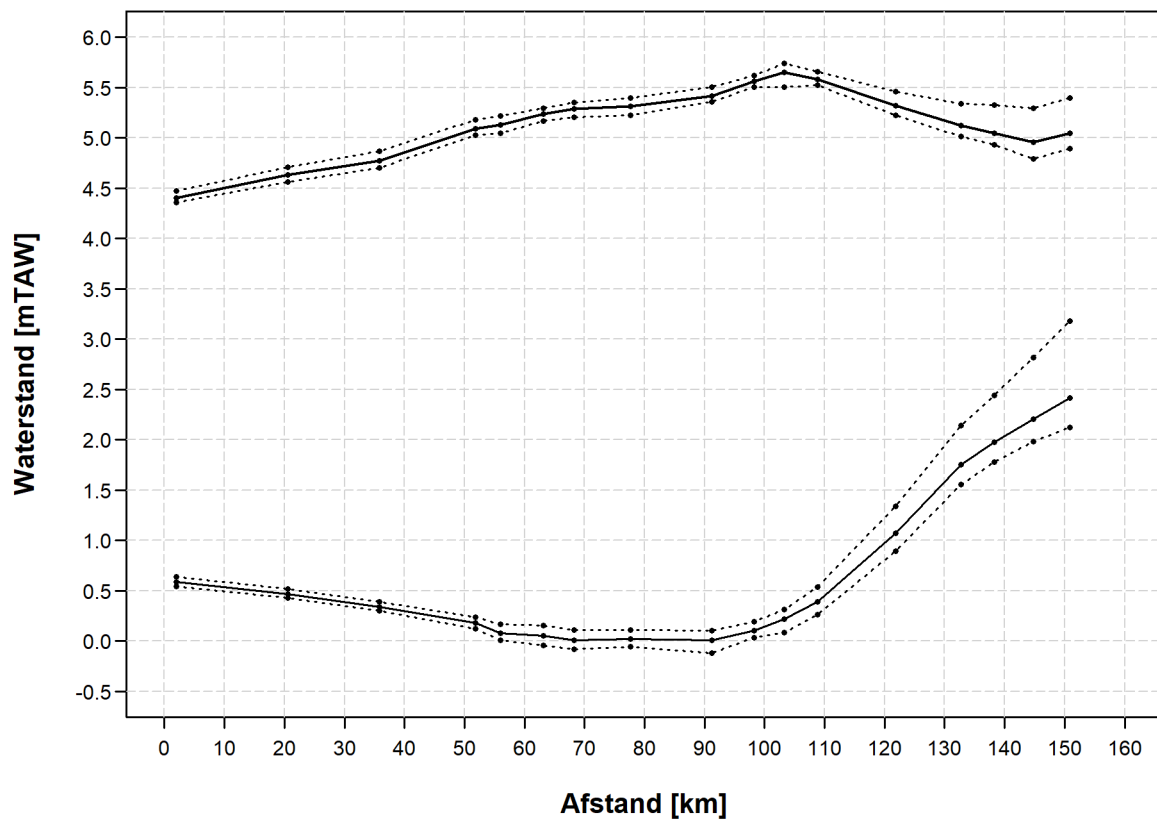
De hypsometrie geeft de variatie in oppervlakte weer van het snijvlak tussen de topo-bathymetrie en een horizontaal vlak op een bepaalde hoogte. In het kader van deze studie werd gebruik gemaakt van de functie "hypsometry" in QGIS. De tussenafstand tussen de horizontale vlakken werd gelijk aan 10 cm gekozen, terwijl voor de ruimtelijk afbakening de OMES-segmenten werden gehanteerd. Op deze manier krijgt men voor elke gebiedsdekkende opname en per OMES-segment een beeld van hoe de oppervlakte varieert volgens de hoogte. Voor deze studie wordt enerzijds de cumulatieve oppervlakte (i.e. toenemend van het diepste punt naar het hoogste niveau (~ dijk) toe) beschouwd en anderzijds het extra watervolume per hoogte (i.e. de extra oppervlakte x het verschil tussen 2 hoogten).

Op basis van de hypsometrie werden eveneens de watervolumes in verschillende secties per OMES-segment afgeleid:

- Watervolume in geul: waarbij het gemiddelde laagwater voor het OMES-segment als verticaal referentievlak (bovengrens) werd genomen
- Getijvolume: waarbij het gemiddelde laagwater (ondergrens) en hoogwater (bovengrens) voor het OMES-segment als verticaal referentievlakken werd genomen

De gemiddelde laagwater en hoogwater referentievlakken werden voor de periode van 2000 tot en met 2019 berekend op basis van alle hoog- en laagwaterstanden en zijn weergegeven in Figuur 11. Voor de analyse van de volumes (sectie 3.3.2) wordt gebruik gemaakt van een constante, gemiddelde waarde over de volledige periode. De waarde van de gebruikte laag- en hoogwaterstanden en het gebruikte getijstation per OMES segment is samengevat in Tabel 2.

Figuur 11 – Langsverloop van de hoog- en laagwaterstanden voor verschillende tijstations over de periode 2000 – 2019, met gemiddelde waarden (volle lijn) en maximale en minimale jaargemiddelde waarden voor deze periode (...)



Tabel 2 – Overzicht van de gebruikte hoog- en laagwaterstanden per OMES segment

	OMES 9	OMES 10	OMES 11	OMES 12	OMES 13	OMES 14	OMES 15	OMES 16	OMES 17	OMES 18	OMES 19
station	Prosperpolder	Liefkenshoek	Kallo	Antwerpen	Hemiksem	Temse	Driegoten/St. Amands	Dendermonde	Schoonaarde	Uitbergen	Melle/Wetteren
HW	5.13	5.23	5.29	5.32	5.41	5.56	5.62	5.32	5.12	5.04	4.99
LW	0.08	0.05	0.01	0.02	0.00	0.10	0.30	1.07	1.75	1.97	2.09

3.3 Resultaten

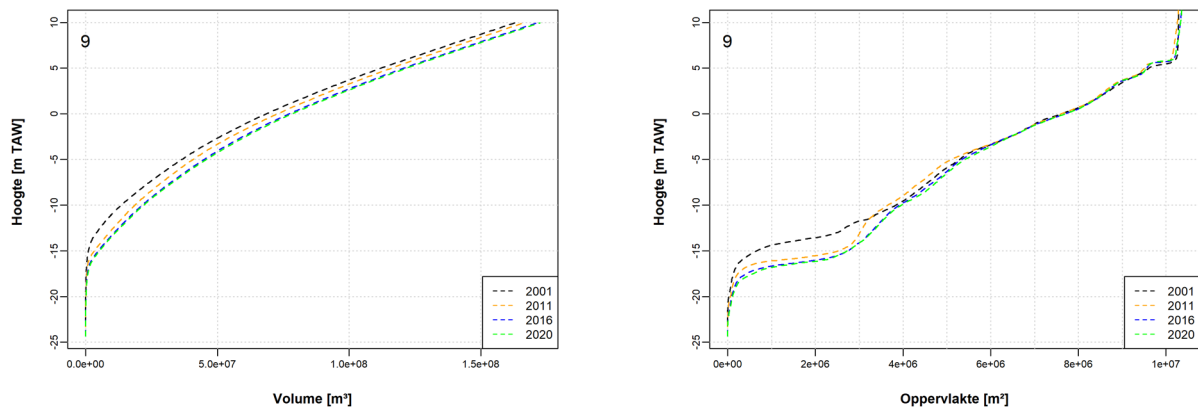
3.3.1 Verschilkaarten

De verschilkaarten voor de Zeeschelde tussen de verschillende topo-bathymetrieën zijn weergegeven in Bijlage 3.

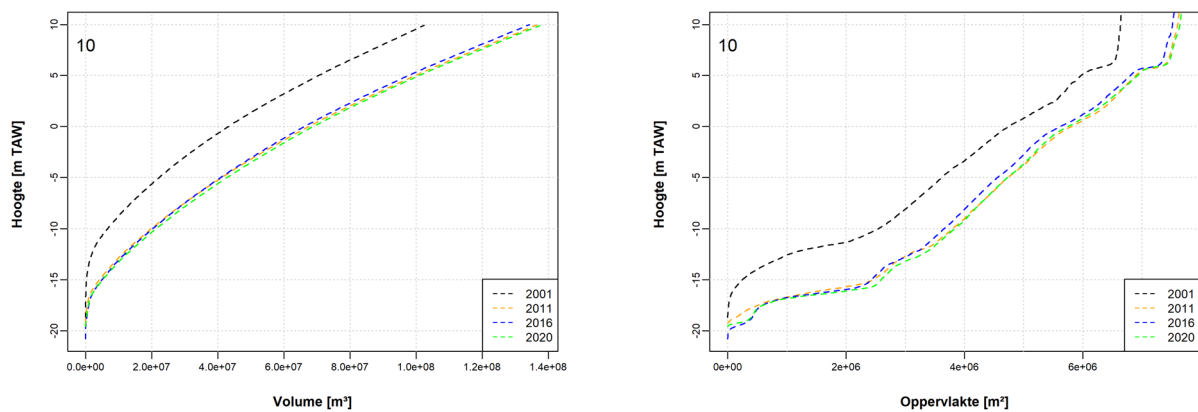
3.3.2 Hypsometrie

Voor enkele OMES segmenten (met name 9, 10, 12, 16) zijn de hypsometrische curves weergegeven in Figuur 12 t.e.m. Figuur 15. De volledige reeks van hypsometrische curves, voor alle segmenten, zijn terug te vinden in Bijlage 1.

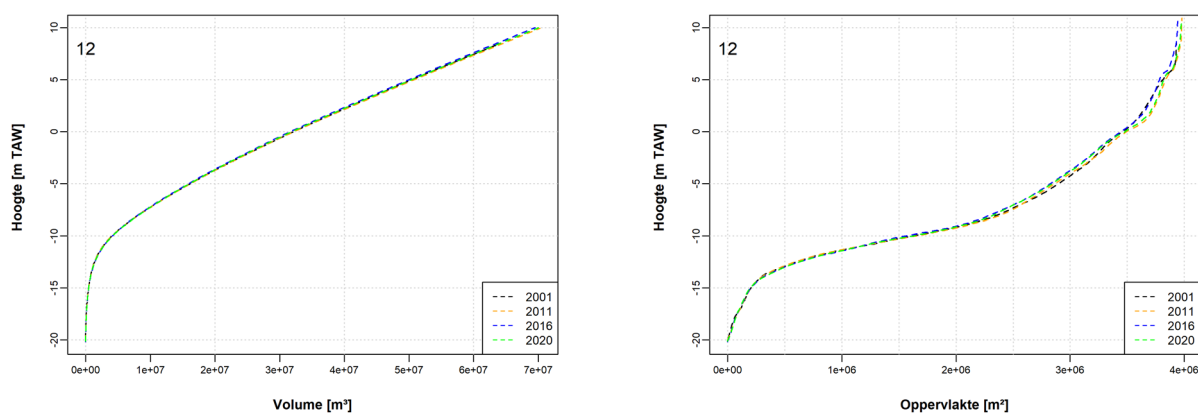
Figuur 12 – Hypsometrische curve voor OMES segment 9 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



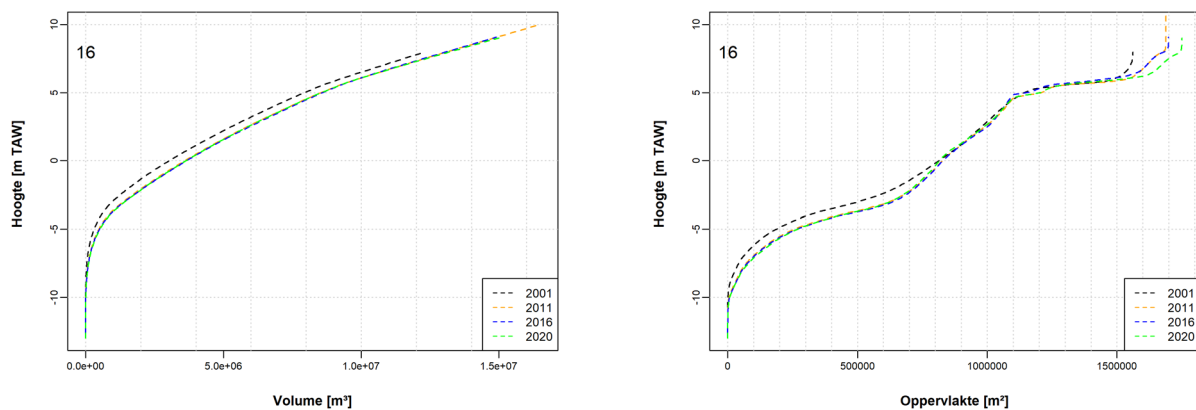
Figuur 13 – Hypsometrische curve voor OMES segment 10 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



Figuur 14 – Hypsometrische curve voor OMES segment 12 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



Figuur 15 – Hypsometrische curve voor OMES segment 16 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)

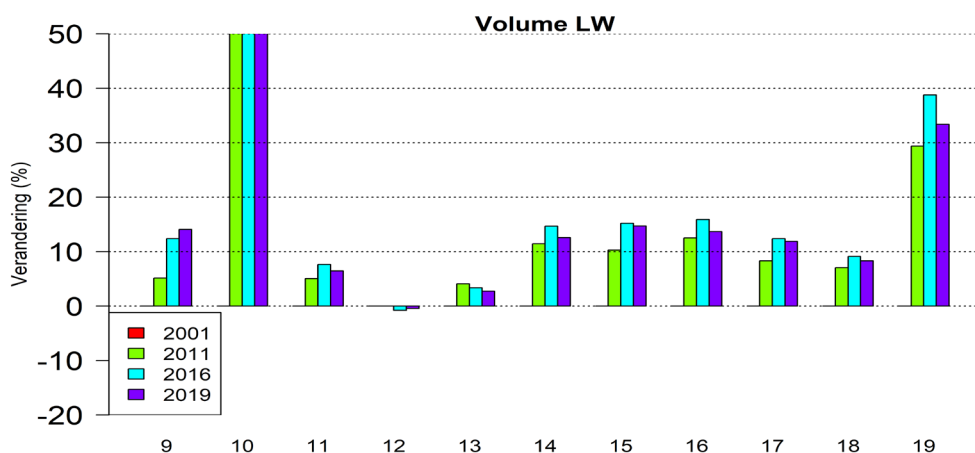


3.3.3 Volumes onder HW en LW

Uit de hypsometrie kunnen de volumes onder HW en LW, die zijn bepaald en weergegeven in sectie 3.2.3, berekend worden. Er worden verschillende volumes afgeleid, met name het volume onder hoog- en laagwater, maar eveneens het gemiddeld getijvolume, gedefinieerd als het volume tussen hoog- en laagwater.

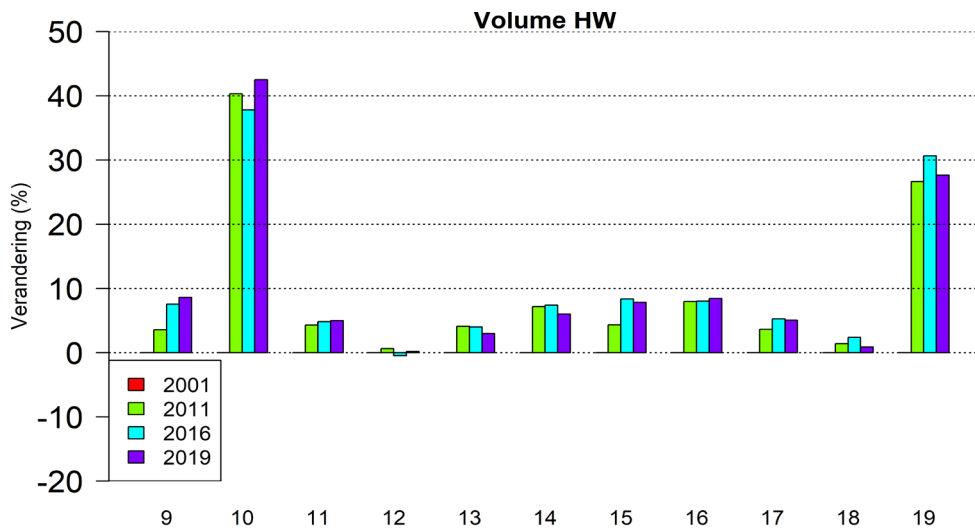
Het volume onder laagwater is relatief weergegeven t.o.v. 2001 in Figuur 16. De meest opvallende uitschieter in de Beneden-Zeeschelde is OMES segment 10, door de aanleg van het Deurganckdok. Dit dok heeft een lengte van ca. 2.5 km, t.o.v. een rivierlengte in dit compartiment van 5.7 km. De verschuiving van de hypsometrische curve is hier ook duidelijk waarneembaar (Figuur 13). Ook in OMES segment 9 is er een duidelijke toename van het volume (> 10 % t.o.v. 2001). De volumever verschillen zitten hier voornamelijk in de diepste delen, met een duidelijke toename van areaal onder de -15 m TAW (zie Figuur 12). Meer opwaarts in de Beneden-Zeeschelde (segment 12 en 13) lijken de veranderingen eerder beperkt (zie ook Figuur 14). In de Boven-Zeeschelde is de toename overal duidelijk en gelijkaardig (tot ca. 15 %). Ook hier lijken de grootste verschillen waarneembaar in de diepere delen. Opwaarts van Dendermonde lijkt de toename iets kleiner (ca. 10 %). Het meest opwaartse deel kent een forse toename van 30% of meer, al zij het dat dit in absolute volumes beperkt is. Dit is te wijten aan een gebaggerde zone in het meest opwaartse deel van segment 19, zoals te zien in Figuur 123. Behalve in segment 9 lijkt de toename van het volume in de opmeting van 2016 iets groter te zijn dan deze van 2019.

Figuur 16 – Volume onder laagwater per OMES segment, relatief uitgedrukt t.o.v. het volume onder LW in 2001



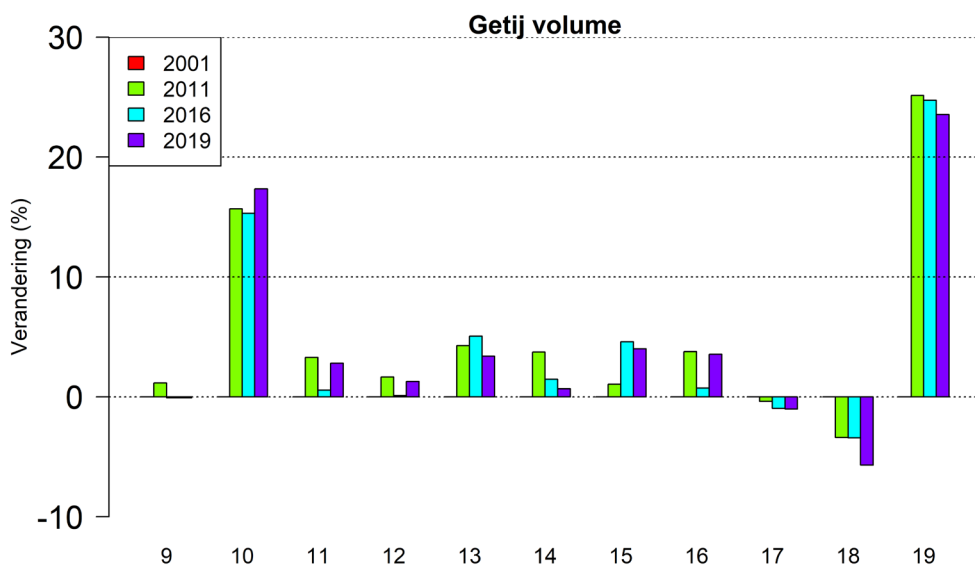
De verandering van de volumes onder hoogwater zijn weergegeven in Figuur 17. Deze figuur vertoont een volledig gelijkaardig patroon als weergegeven in Figuur 16, al zijn de toenames hier iets kleiner. M.u.v. segment 10 en 12 lijkt de toename voor de verschillende segmenten tot aan Dendermonde (segment 17) zeer gelijkaardig, gelegen tussen 5 en 10 %.

Figuur 17 – Volume onder hoogwater per OMES segment, relatief uitgedrukt t.o.v. het volume onder HW in 2001



Het verschil tussen het volume onder hoogwater en boven laagwater, wordt hier gedefinieerd als het getijvolume. Dit getijvolume is weergegeven in Figuur 18. Er dient op gewezen te worden dat veranderingen in het getijvolume enkel te wijten zijn aan bathymetrische verschillen, aangezien evoluties in de waterstanden niet in beschouwing zijn genomen. In segment 9 is dit volume quasi onveranderd, in segmenten 17 en 18 lijkt het getijvolume zelfs afgenomen. In segment 10 en 19 is er een duidelijke vergroting, voor de overige segmenten is het getijvolume licht toegenomen.

Figuur 18 – Het getijvolume, het volume tussen laag- en hoog hoogwater, per OMES segment, relatief uitgedrukt t.o.v. het getijvolume in 2001

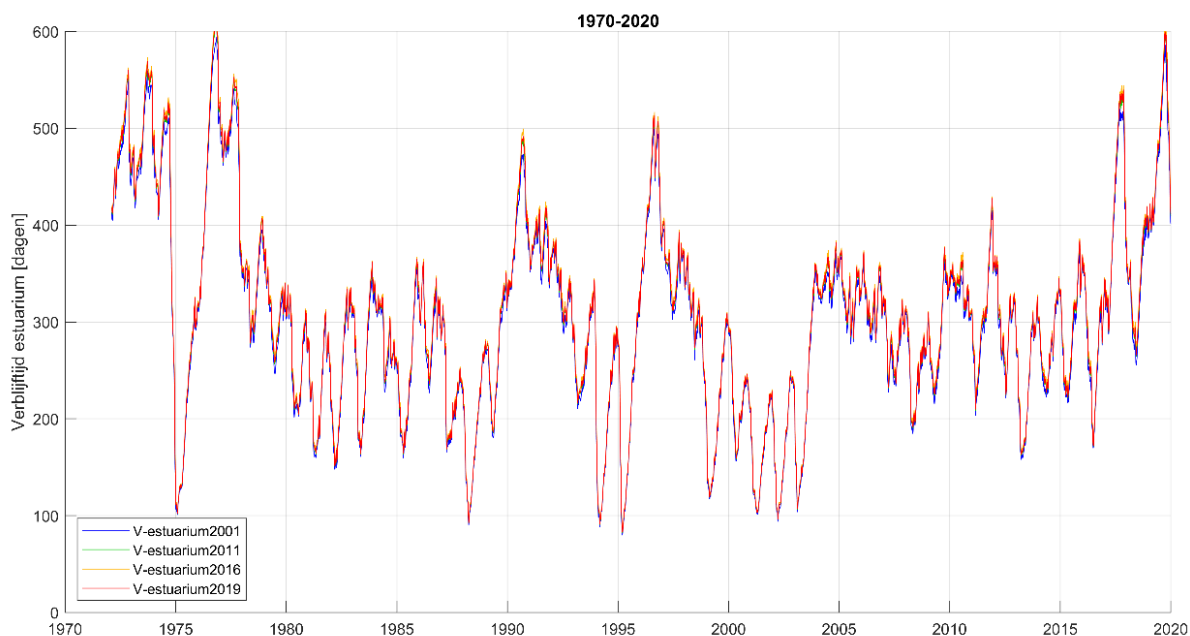


3.3.4 Verblijftijden

Op basis van de berekende volumes kunnen de verblijftijden worden bepaald. Deze verblijftijd geeft een indicatie hoelang het duurt dat het volume water van een bepaald segment van de rivier vervangen wordt door water afkomstig van bovenstrooms. Deze berekening werd gedaan voor de verschillende topo-bathymetrieën die werden opgeleverd, en vanaf 1970. Voor de Boven-Zeeschelde wordt gewerkt met de bovenafvoer opgemeten te Melle, voor de Beneden-Zeeschelde en Westerschelde werd het debiet te Schelle gebruikt als bovenstrooms debiet.

In Figuur 19 is de verblijftijd weergegeven voor het volledige Schelde estuarium. Hierbij kan duidelijk worden waargenomen dat de fluctuaties t.g.v. debietsschommelingen veel groter zijn dan deze t.g.v. de verschillende bathymetrieën. Een minimale waarde rond 100 dagen wordt enkele malen bereikt, in periodes van hoge bovenafvoer, oa. in 1975, 1987, 1994 – 1995 en begin jaren 2000. Lange verblijftijden, rond 500 dagen, worden waargenomen in een lange periode van de jaren '70, begin en eind jaren '90 en de laatste, recentste jaren. Een duidelijke trend is niet waar te nemen.

Figuur 19 – Verblijftijd berekend aan de hand van 4 topo-bathymetrieën voor het volledige Schelde estuarium



4 Zout

Op basis van metingen in het kader van het OMES-programma, werden de laatste jaren door de UAntwerpen hogere zoutgehaltes gemeten in de Boven-Zeeschelde. Dit leidt tot de onderzoeksvraag of, en zo ja hoe, de zoutdynamiek in het estuarium is gewijzigd en of er hierbij een link is te vinden met veranderingen in SSC. Aangezien de hoogste zoutgehaltes optreden op het einde van de vloedperiode (kentering hoogwater “KHW”), is de analyse dan ook toegespitst op de meetwaarden op dit moment in de cyclus. In aanvulling van de OMES-dataset die bestaat uit getij-onafhankelijke metingen, beschikt het WL over getij-afhankelijke metingen, waarbij metingen uitgevoerd worden rond het moment van kentering hoogwater.

4.1 Beschikbare data

4.1.1 Periodieke data

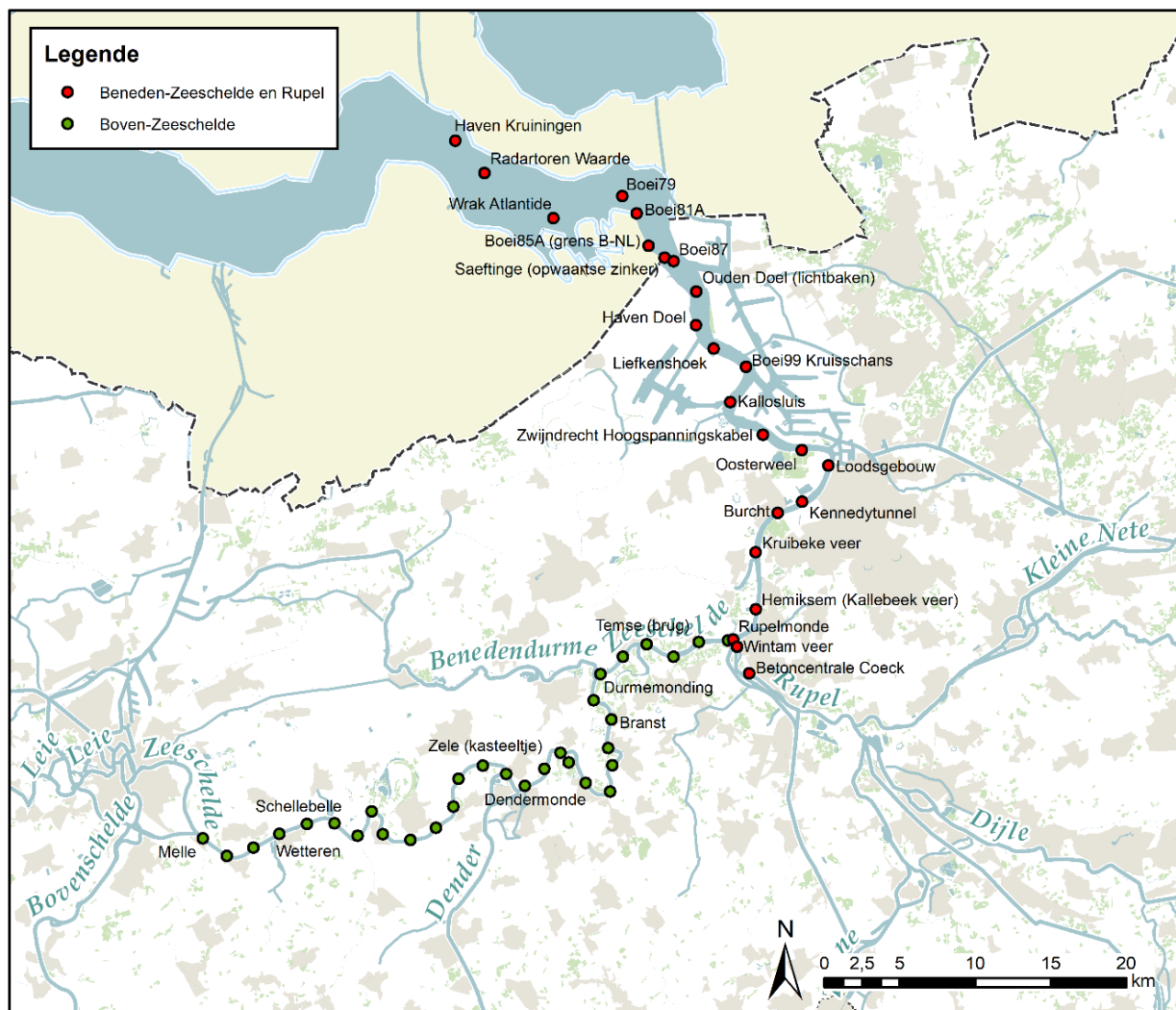
Het Waterbouwkundig Laboratorium voert reeds vanaf de jaren 1960 periodieke langsvaarten uit langsheen het Schelde-estuarium. Hierbij wordt met behulp van een meetschip op een bepaald moment in de getijcyclus een meting uitgevoerd van bepaalde fysische parameters. In eerste instantie waren deze vaarten vooral gericht op het meten van het verloop van de conductiviteit en temperatuur langsheen het estuarium om alzo de “saliniteitsgradiënt” in beeld brengen. Bij de zogeheten langsvaarten worden op 17 vaste locaties (zie Figuur 20) langsheen de Beneden Zeeschelde pompstalen genomen in de bovenste helft van de waterkolom (1 à 3 m onder het wateroppervlak). De vaarten werden tot 2007 maandelijks tot 3-maandelijks uitgevoerd op volgende momenten van het getij:

- Kentering hoogwater (KHW): deze meting geeft de ligging van de saliniteitsgradiënt weer na de vloedperiode, wat overeenkomt met de meest opwaartse ligging ervan;
- Kentering laagwater (KLW): deze meting geeft de ligging van de saliniteitsgradiënt weer na de ebperiode, wat overeenkomt met de meest afwaartse ligging ervan;

Bij de kenteringsvaarten dient het meetschip de kentering bij te houden, wat in de praktijk niet evident is. Hierdoor zal de meting aanvangen op het meest stroomafwaartse punt op een moment dat de stroming nog niet gekenterd heeft, terwijl op het eindpunt (meest opwaarts) de kentering reeds gebeurd zal zijn. Voor de conductiviteit zal de invloed hiervan beperkt blijven.

Ten behoeve van voorliggende onderzoeksvraag die zich richt op de hogere waarden, zal binnen de analyses enkel gewerkt worden met de langsvaarten rond KHW.

Figuur 20 – Meetlocaties langsvaarten Beneden-Zeeschelde (in rood)
Opmerking: enkel de meetpunten in de Beneden-Zeeschelde zijn relevant



4.1.2 Continue data

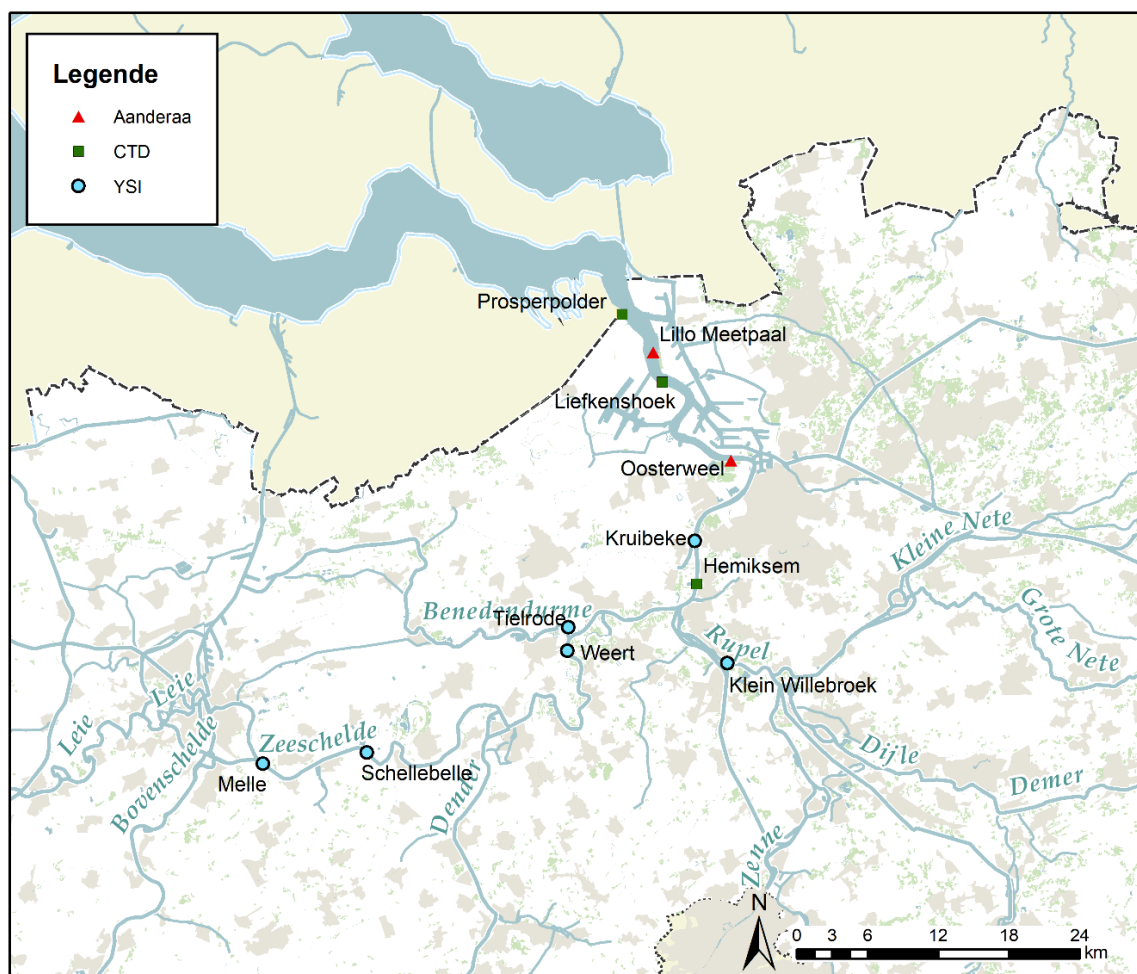
Sinds het begin van de 21^e eeuw worden ook op verschillende punten continu verschillende abiotische parameters gemeten. Initieel gebeurde dit project-gerelateerd op een beperkt aantal meetpunten, op de dag van vandaag gebeurt dit op 9 meetplaatsen in de Zeeschelde (Prosperpolder, Lillo Meetpaal, Liefkenshoek, Oosterweel, Hemiksem, Kruibeke, Weert, Schellebelle en Melle) en op één plaats op de Rupel (Klein Willebroek) (voor ligging zie Figuur 21). Op alle locaties wordt de conductiviteit en de temperatuur gemeten, wat toelaat de saliniteit af te leiden. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar het MONEOS-jaarboek (Vandenbruwaene *et al.*, 2019).

Ten behoeve van voorliggende analyse wordt gebruik gemaakt van volgende stations met lange meetreeksen:

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| • Prosperpolder | [metingen beschikbaar vanaf 2003] |
| • Meetpaal Lillo (vroeger Boei 84) | [metingen beschikbaar vanaf 2005] |
| • Oosterweel | [metingen beschikbaar vanaf 2001] |
| • Kruibeke | [metingen beschikbaar vanaf 2015] |
| • Hemiksem | [metingen beschikbaar vanaf 2010] |
| • Weert (vroeger Driegoten) | [metingen beschikbaar vanaf 2009] |

Aangezien de focus van voorliggende analyses ligt op de maximale zoutgehalten, is gebruik gemaakt van de uit de continue metingen afgeleide waarden bij KHW. Voor een beschrijving hoe deze waarden worden afgeleid, wordt verwezen naar het MONEOS-jaarboek.

Figuur 21 – Locatie van MONEOS-meetposten in de Zeeschelde met continue monitoring van fysische parameters



4.2 Methodologie

4.2.1 Relatie zout – bovenafvoer

Een eerste aspect dat onderzocht werd, is de relatie tussen het zoutgehalte (uitgedrukt in chlorositeit [g/kg]) en de bovenafvoer, waarbij zowel het daggemiddelde debiet te Melle als de verblijftijd voor de Boven-Zeeschelde als parameter werd gehanteerd. Voor de langsvaarten werd voor de dag van de meting de overeenstemmende waarde van de bovenafvoer en de verblijftijd toegekend aan de betreffende meetgegevens. Voor de continue metingen gebeurde dit gelijkaardig, waarbij de koppeling gebeurde op basis van het moment van kentering hoogwater.

Op basis van de puntenkoppels uit de continue metingen¹ werd voor elk jaar op basis van een lineaire relatie zowel de helling als het snijpunt met de x-as berekend. Voor de opwaartse locaties (Kruibeke, Hemiksem, Weert/Driegoten) is deze lineaire relatie gerechtvaardigd, voor de afwaartse locaties (Prosperpolder, Lillo/Boei84, Oosterweel) vlakt de relatie af voor lage bovenafvoeren/lange verblijftijden. Mogelijks is een exponentiële relatie hier beter, maar deze werd vooralsnog niet toegepast.

4.2.2 Langsgradiënt

Een tweede aspect dat onderzocht werd, is de langs gradiënt van het zoutgehalte. Hierbij werd een onderscheid gemaakt in het af- en opwaartse deel van de Beneden-Zeeschelde, waarbij de grens op KM70 (~ Kallo) werd gekozen. De ligging van deze grens is gebaseerd op basis van de ligging van de continue metingen, waarbij deze ongeveer in het midden gelegen is.

Voor de langsvaarten werden per meetcampagne (1) alle metingen afwaarts van KM70 geselecteerd en werd vervolgens (2) de gradiënt bepaald in het zoutgehalte op basis van een lineaire regressie tussen het gemeten zoutgehalte en de langsafstand tot de monding. Analoog gebeurde dit voor de metingen opwaarts KM70.

Voor de continue metingen werd per springtij-doodtij-cyclus (14,5 dagen) (1) de getijcyclus geselecteerd met de hoogste zoutgehalten, aangezien hier gefocust wordt op (toenemende) zoutindringing. Daarna werd (2) voor het afwaartse deel de gradiënt in zoutgehalte bepaald op basis van de metingen te Prosperpolder, Lillo/Boei84 en Oosterweel. Er werd enkel een gradiënt berekend indien de 3 stations een meting bij KHW hadden geregistreerd. Voor het opwaartse deel werd een gelijkaardige methodiek toegepast, waarbij de stations Oosterweel, Kruibeke en Hemiksem gebruikt werden. Door de lage zoutgehaltenes in Weert/Driegoten werd dit punt niet meegenomen in de analyse, aangezien de helling tussen Hemiksem en Weert/Driegoten meestal afzwakt, met in de winter vaak een quasi continu verloop van het zoutgehalte (~ zoetwater).

¹ Door het beperkt aantal langsvaarten (maximaal 13 per jaar), werd deze analyse niet uitgevoerd voor de periodieke metingen.

4.3 Resultaten

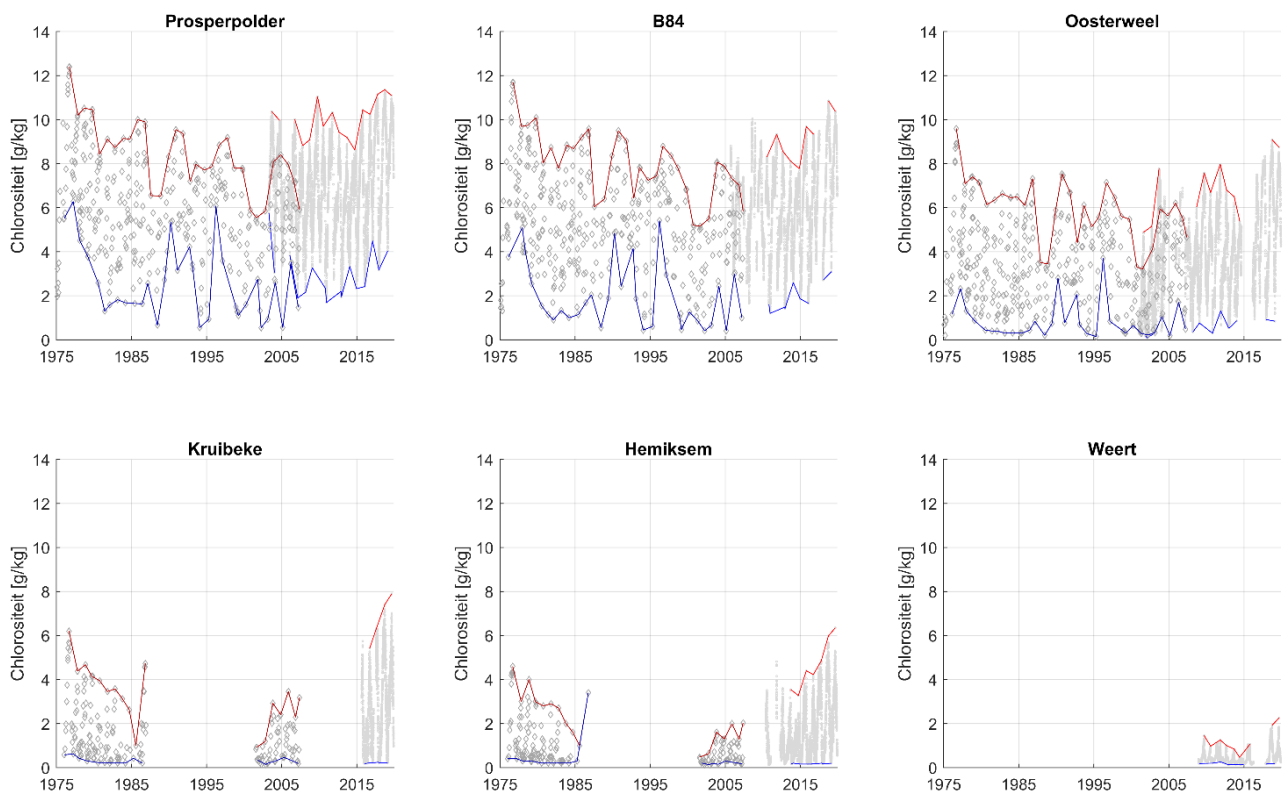
4.3.1 Jaarlijkse maximale zoutgehaltes

Figuur 22 geeft voor de verschillende locaties met continue meetstations het verloop van het zoutgehalte doorheen de tijd. In de periode 1975-2007 werden eveneens de metingen uit de langsvaarten nabij deze locaties toegevoegd. Voor Prosperpolder is er een periode van bijna 5 jaar met zowel gegevens uit de langsvaarten als continue metingen. Hieruit blijkt dat de continue metingen aanleiding geven tot hogere maximale zoutgehaltes. Dit kan toegeschreven worden aan het feit dat de continue metingen voor elk getij een meting hebben bij KHW (i.e. maximum), terwijl dit bij de langsvaarten slechts een momentopname is, één keer per maand. Hierdoor zullen de pieken in zoutgehalte gemakkelijker gemist worden. Hetzelfde geldt voor de minimale zoutgehaltes, al blijkt hierbij het verschil minder prominent te zijn.

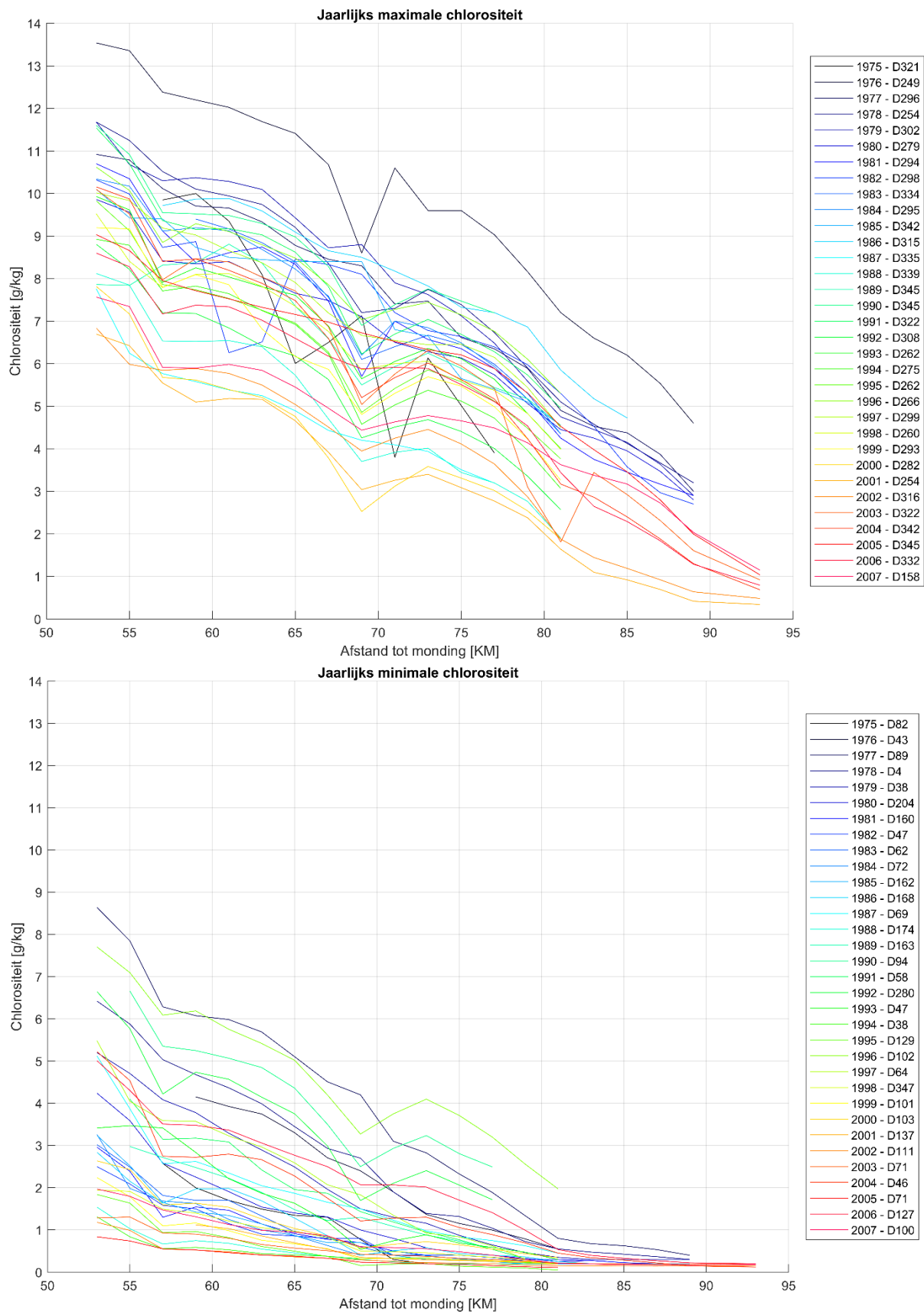
Figuur 23 geeft het langsverloop van het zoutgehalte weer op basis van de langsvaarten, voor zowel de hoogste als laagste gemeten waarden per kalenderjaar. De betreffende dag waarop dit extremum optrad wordt ook weergegeven in de legende. De langsverlopen weergegeven in de figuur zijn gemeten langsprofielen op 1 tijdstip, en dus geen combinaties van maximale meetwaarden.

De hoogste zoutgehaltes werden gemeten in het midden van de jaren 1970's. Nadien nemen de maximale zoutgehaltes geleidelijk af tot 2000-2001, waarbij de laagste waarden werden geregistreerd. Deze jaren worden gekenmerkt door hoge bovenafvoeren, waardoor het zout uit het estuarium wordt gespoeld. Nadien neemt het zoutgehalte opnieuw (geleidelijk) toe. Dit is vooral zichtbaar in de minimale waarden voor de meest afwaarts gelegen stations (Prosperpolder en Boei84), waar het minimum de laatste jaren toeneemt tot 4 g/kg, terwijl dit begin jaar 2000's lager dan 1 g/kg lag. Ook de maximale waarde in de opwaartse stations (Kruibeke, Hemiksem) nemen de laatste jaren toe.

Figuur 22 – Verloop van zoutgehalte ter hoogte van locaties van continue meetstations (tot 2007 ook data uit langsvaarten)
Rode lijn = jaarlijks maximum | blauwe lijn = jaarlijks minimum



Figuur 23 – Langsverloop van maximaal (boven) en minimaal (onder) zoutgehalte per jaar uit langsvaarten, de aangeduide D waarde in de legende geeft de dag in het jaar weer van het gepresenteerde langsverloop



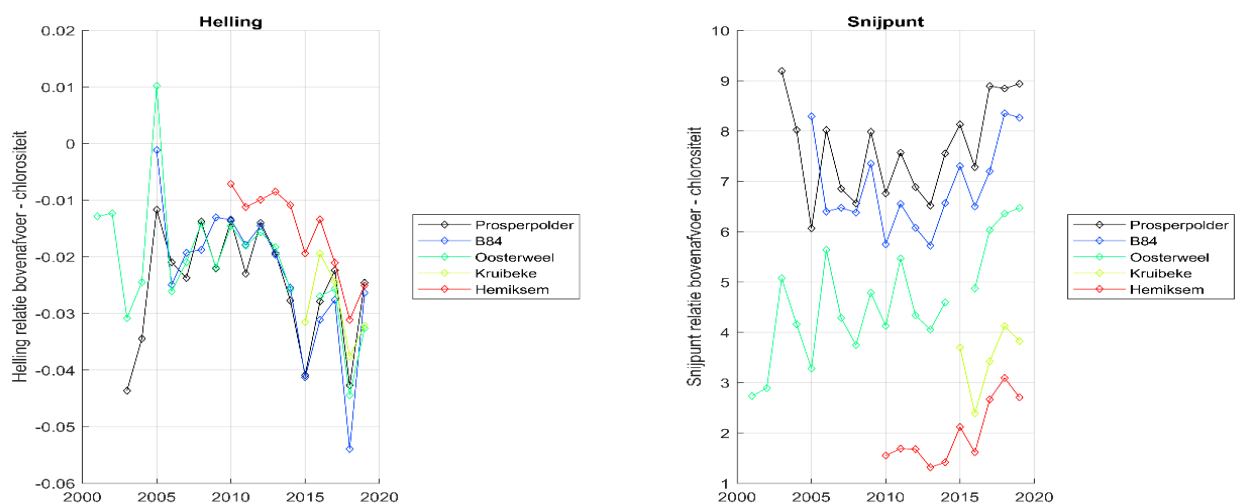
4.3.2 Relatie zout – bovenafvoer

Figuur 24 en Figuur 25 geeft het verloop in de tijd weer van de helling en het snijpunt met de x-as van de lineaire relatie tussen de bovenafvoer, respectievelijk verblijftijd, en het zoutgehalte. Figuur 26 t.e.m. Figuur 29 geeft de relatie weer tussen de bovenafvoer, respectievelijk verblijftijd, en het zoutgehalte voor de verschillende continue meetstations. Om een vergelijking met de langsvaarten mogelijk te maken, werden de meetlocaties uit de langsvaarten geselecteerd nabij de locatie van de continue meetlocaties, waardoor de relatie ook vroeger in de tijd kan gevisualiseerd worden (zonder lineaire regressie er op toe te passen). Bijlage 2 geeft deze relatie per locatie en per jaar (Figuur 72 t.e.m. Figuur 86) voor zowel de langsvaarten als de continue metingen.

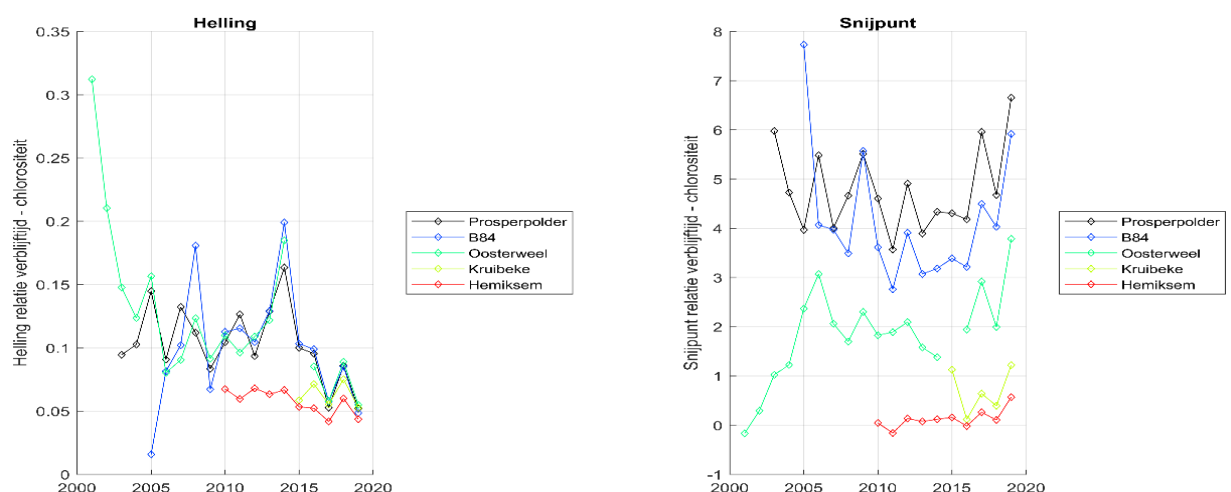
Figuur 24 toont dat de helling voor de meeste locaties sinds 2012-2014 toeneemt, wat duidt op een sterkere respons bij hogere bovenafvoer. Echter, in dezelfde periode neemt ook het snijpunt toe. Dit wijst dan weer op een hoger zoutgehalte bij lagere bovenafvoer.

Figuur 25 toont dat de helling voor de meeste locaties sinds 2012-2014 afneemt, terwijl in dezelfde periode het snijpunt toeneemt. Dit wijst dan weer op een hoger zoutgehalte bij korte verblijftijd, c.q. hoge bovenafvoer.

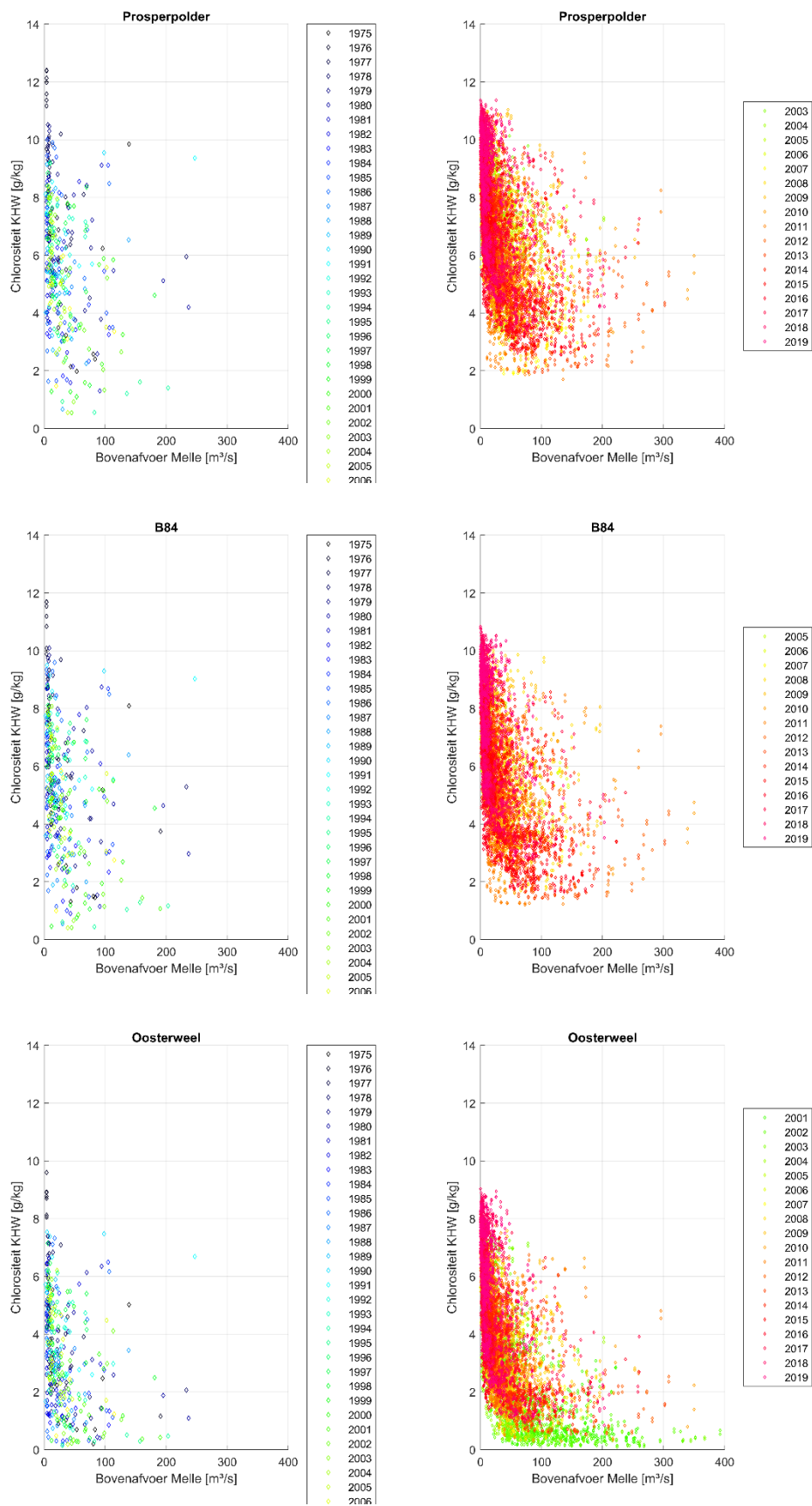
Figuur 24 – Variatie in de tijd van de coëfficiënten (helling – links en snijpunt – rechts) voor relatie tussen zoutgehalte en debiet



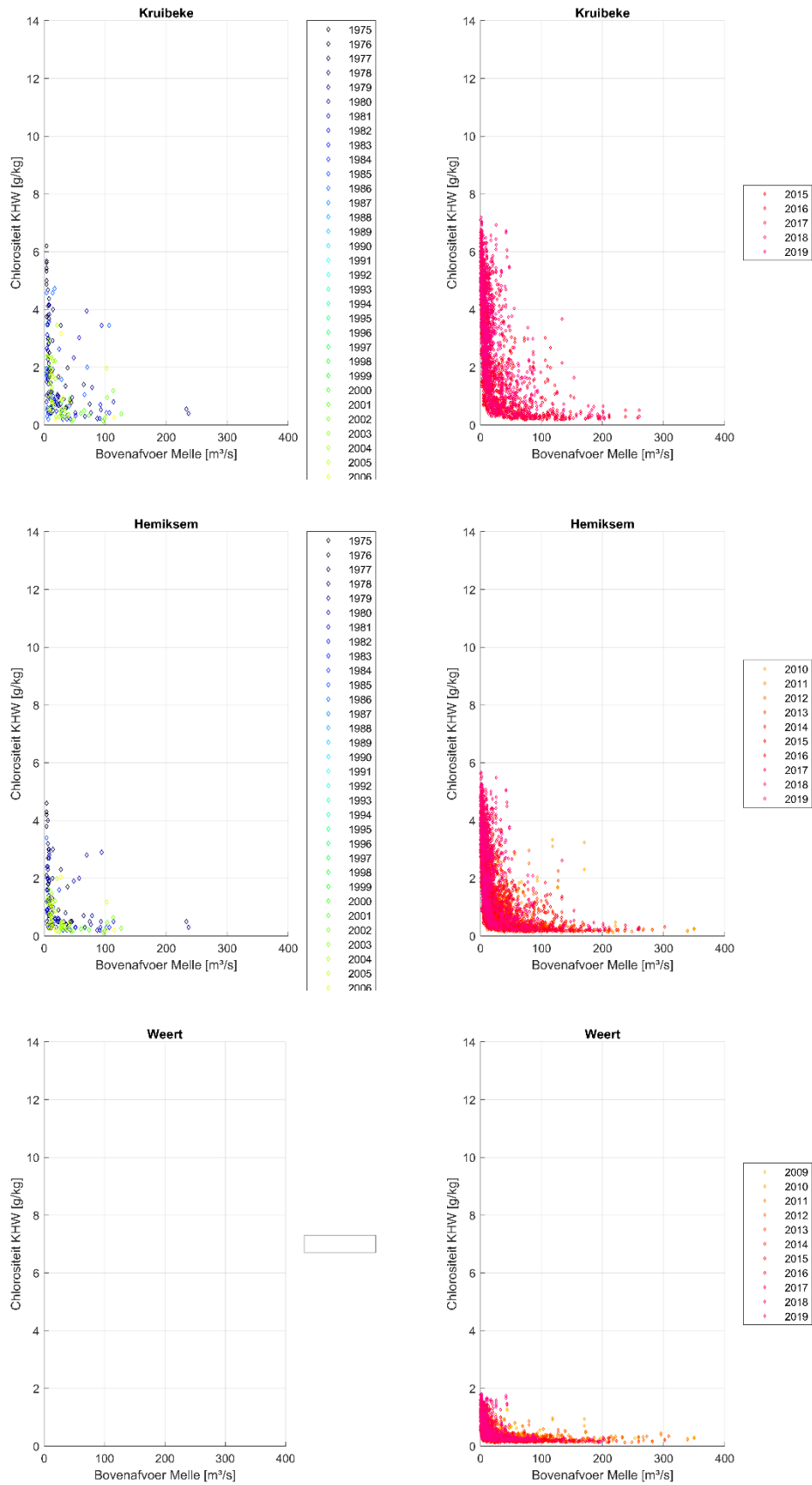
Figuur 25 – Variatie in de tijd van de coëfficiënten (helling – links en snijpunt – rechts) voor relatie tussen zoutgehalte en verblijftijd



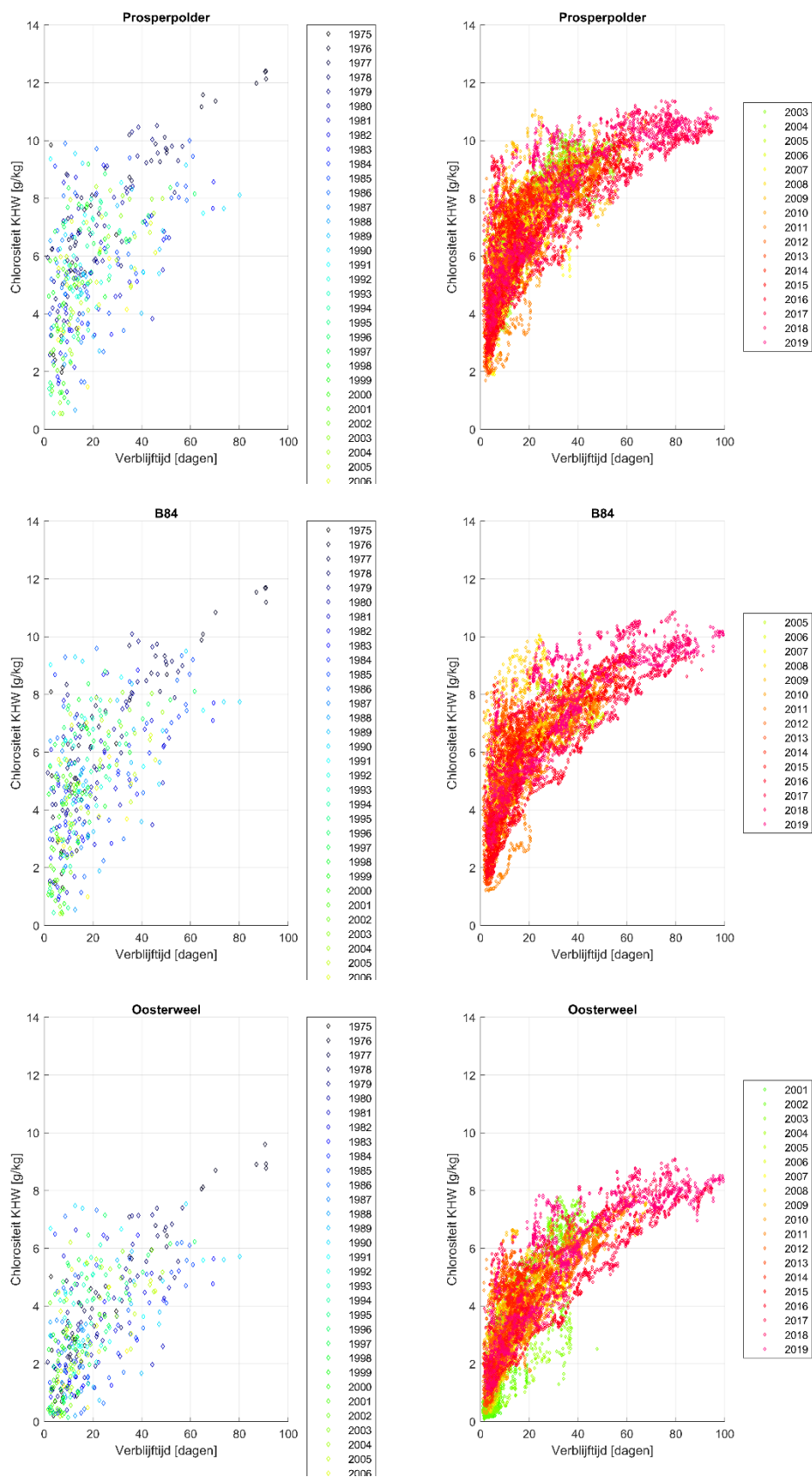
Figuur 26 – Relatie tussen zoutgehalte en debiet voor Prosperpolder (boven), Lillo/Boei84 (midden) en Oosterweel (onder) met links steeds de data voor de kenteringsvaarten, en rechts de continue meetdata



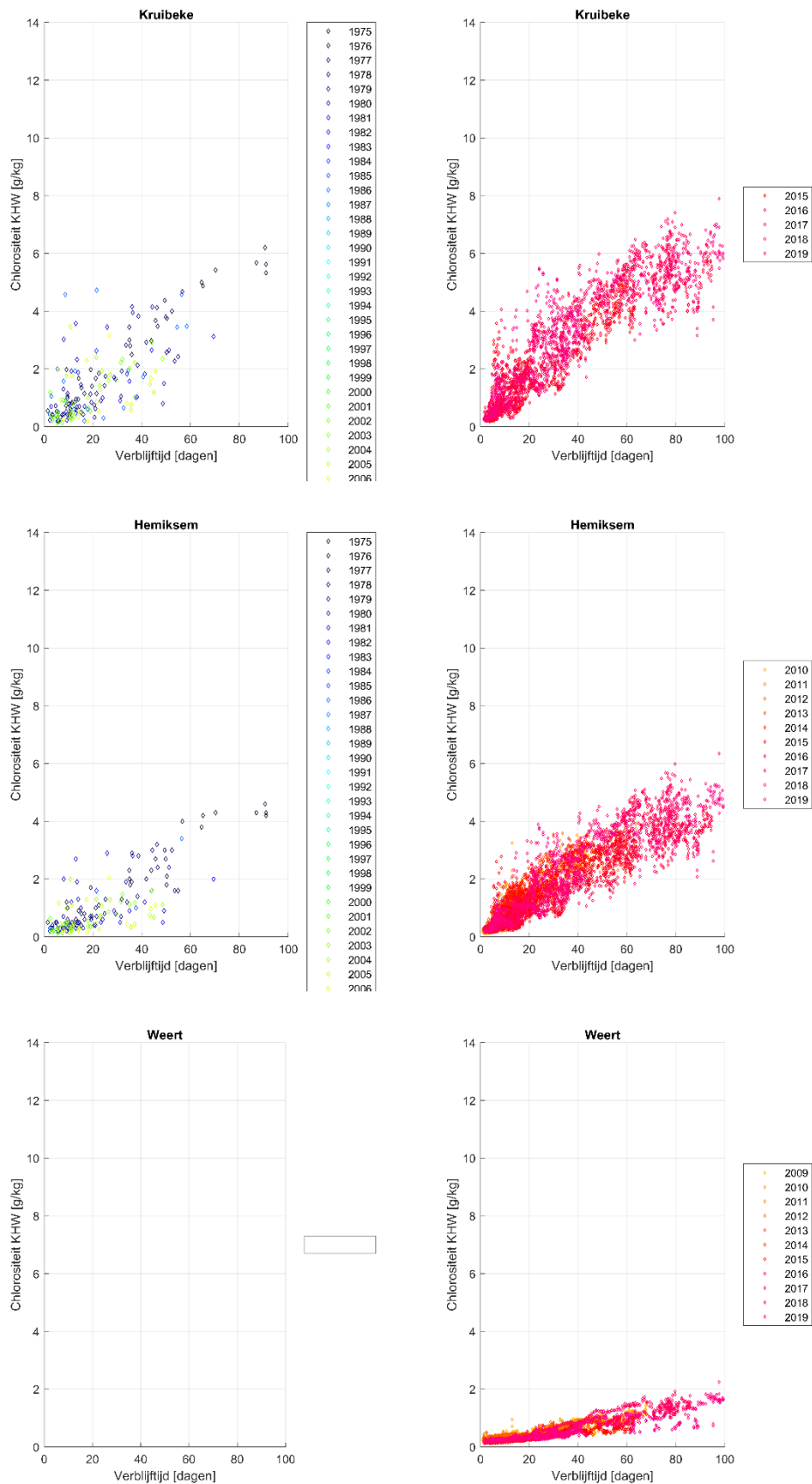
Figuur 27 – Relatie tussen zoutgehalte en debiet voor Kruibeke (boven), Hemiksem (midden) en Driegoten/Weert (onder) met links steeds de data voor de kenteringsvaarten, en rechts de continue meetdata



Figuur 28 – Relatie tussen zoutgehalte en verblijftijd voor Prosperpolder (boven), Lillo/Boei84 (midden) en Oosterweel (onder)



Figuur 29 – Relatie tussen zoutgehalte en verblijftijd voor Kruibeke (boven), Hemiksem (midden) en Driegoten/Weert (onder)

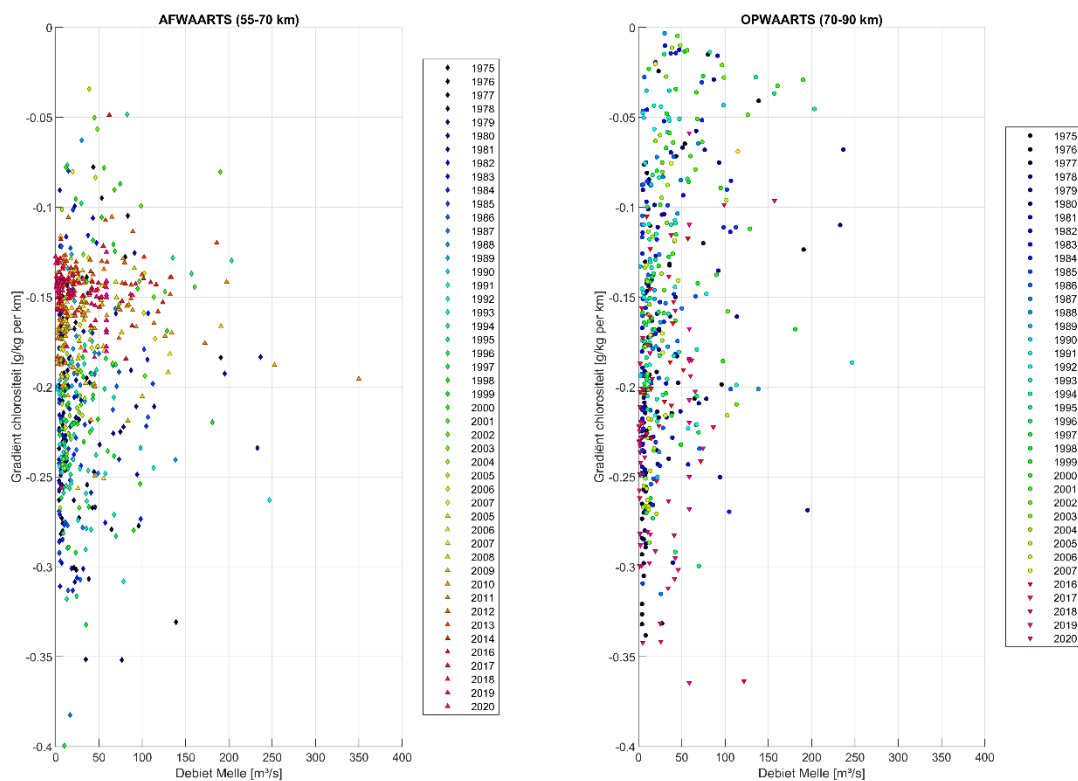


4.3.3 Langsgradiënt

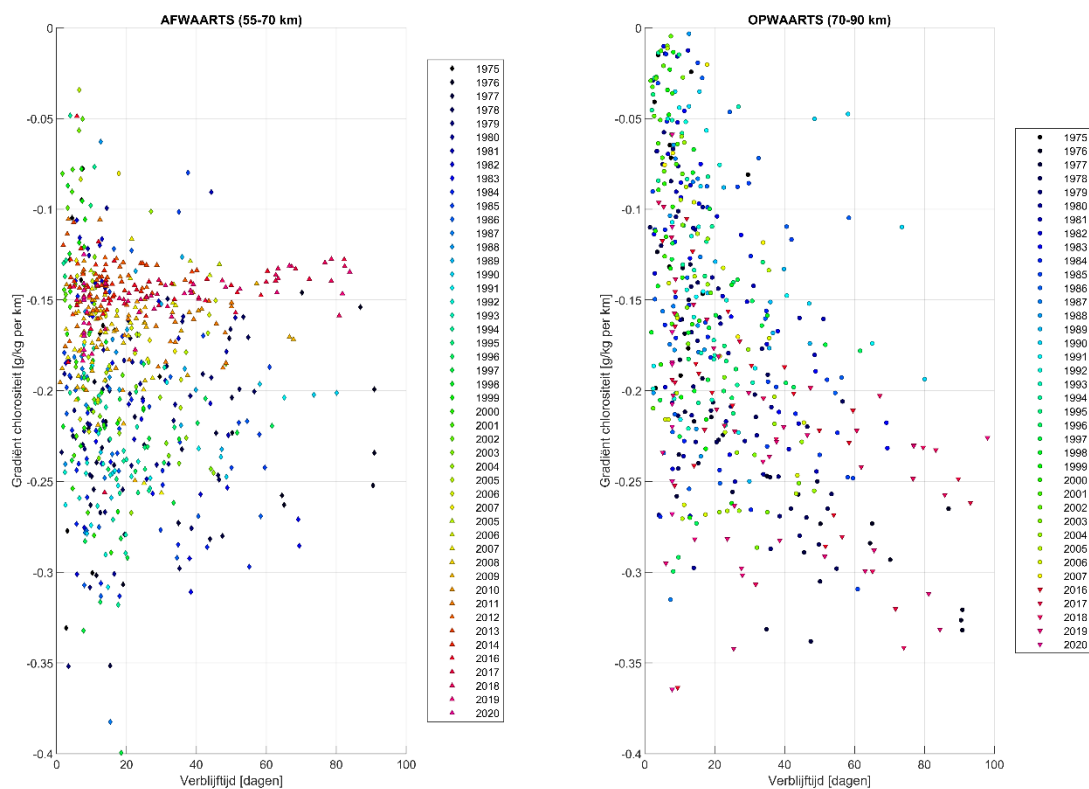
Figuur 30 toont de relatie tussen de gradiënt van het zoutgehalte en de bovenafvoer te Melle, waarbij zowel de langsvaarten als de continue metingen opgenomen zijn. In Bijlage 2 Zout is dezelfde figuur opgesplitst in de langsvaarten (Figuur 87) en de continue metingen (Figuur 88).

Voor het afwaartse deel lijkt de gradiënt (i.e. afname) in de laatste jaren minder sterk te zijn. Voor het opwaartse deel lijkt het tegengestelde, alhoewel dit moeilijker observeerbaar is.

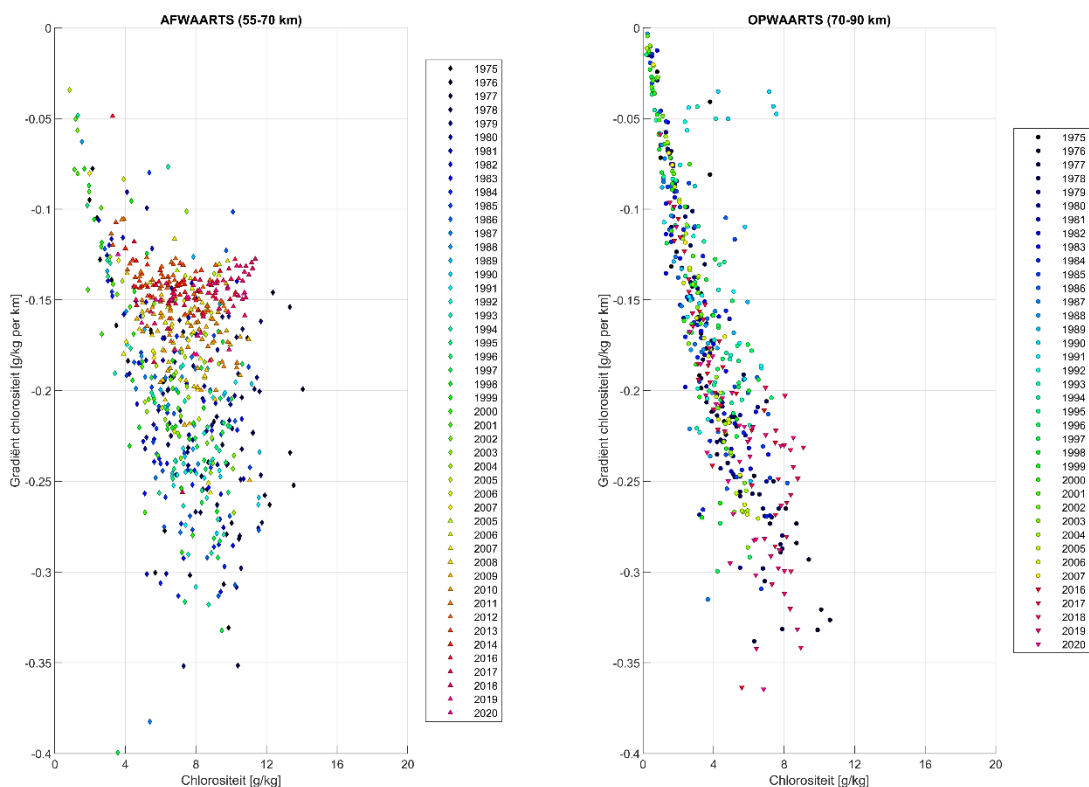
Figuur 30 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het debiet voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. alle metingen



Figuur 31 – Langsgradient van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van de verblijftijd voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. alle metingen



Figuur 32 – Langsgradient van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het zoutgehalte voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. alle metingen



5 Sediment

5.1 Beschikbare data

De turbiditeitsdata die hier gebruikt werden zijn afkomstig van continue meetpost te Driegoten, die worden opgemeten binnen het monitoringsprogramma MONEOS (Vandenbruwaene et al., 2020).

5.2 Methodologie

5.2.1 Sedimentfluxen

Te Driegoten/ Weert zijn continue meetreeksen van turbiditeit beschikbaar, die worden omgerekend naar concentraties zwevende stof met behulp van kalibratieformules. Deze SSC [mg/l] concentratie, opgemeten op een punt, wordt omgerekend naar een sectie gemiddelde sedimentconcentratie op basis van de beschikbare 13u metingen te Driegoten/Weert, van de periode 2010 – 2020. Per tijdsfase van het getij wordt een correctiefactor bepaald die de verdeling van de sedimentconcentratie over de dwarssectie (uit de metingen) linkt aan de puntmeting te Driegoten.

Voor het omrekenen van de sectiegemiddelde sedimentconcentraties naar sedimentfluxen wordt gebruik gemaakt van de kubatuurberekening (zie sectie 2.2.1), waarbij per 15 minuten een debiet doorheen de dwarssectie wordt berekend.

5.2.2 Sedimenteigenschappen

In het kader van MONEOS worden door het Waterbouwkundig Laboratorium ijkingsmetingen uitgevoerd om de gemeten turbiditeit om te rekenen naar sedimentconcentraties. Tijdens deze ijkingsmetingen worden naast het nemen van waterstalen ook metingen uitgevoerd met de LISST-100X. Dit laatste toestel meet eveneens de volumeconcentratie. Dankzij de waterstalen (massaconcentratie) kan uit de gemeten volumeconcentratie de densiteit van het sediment berekend worden. Dit gebeurt aan de hand van volgende stappen:

- Gekend zijn de massaconcentratie (m_{sed} uit pompstalen - mg/l) en de volumeconcentratie (V_{tot} uit LISST-100X - $\mu\text{l/l}$)
- Bepalen via de porositeit van de vlokdensiteit op basis van volgende formule:

$$\rho_{vlok} = \rho_{sed} - (\rho_{sed} - \rho_{water}) \cdot \left(1 - \frac{m_{sed}}{\rho_{sed} \cdot V_{tot}}\right)$$

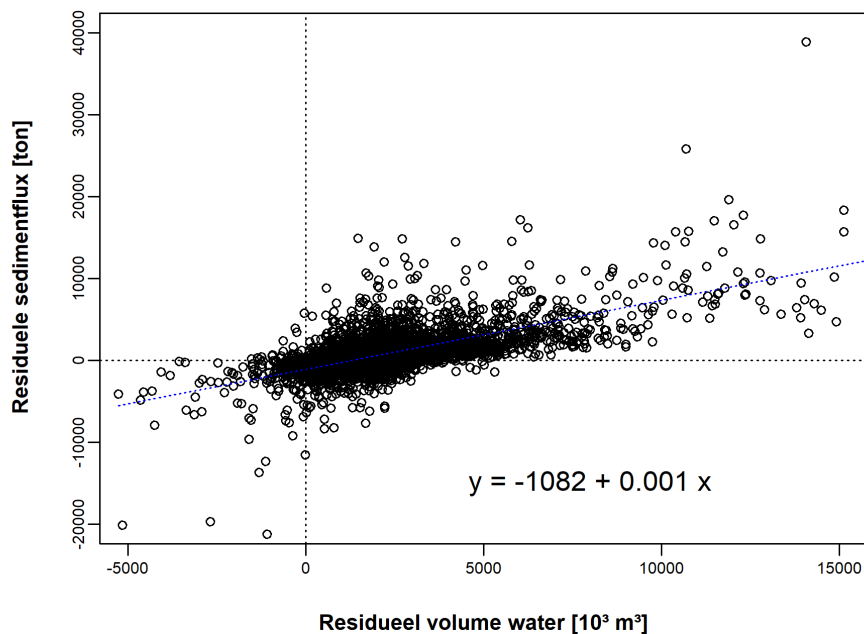
Met behulp van deze formule kan de vlokdensiteit berekend worden voor alle momenten waarop een waterstaal en meting van de volumeconcentratie beschikbaar is.

5.3 Resultaten

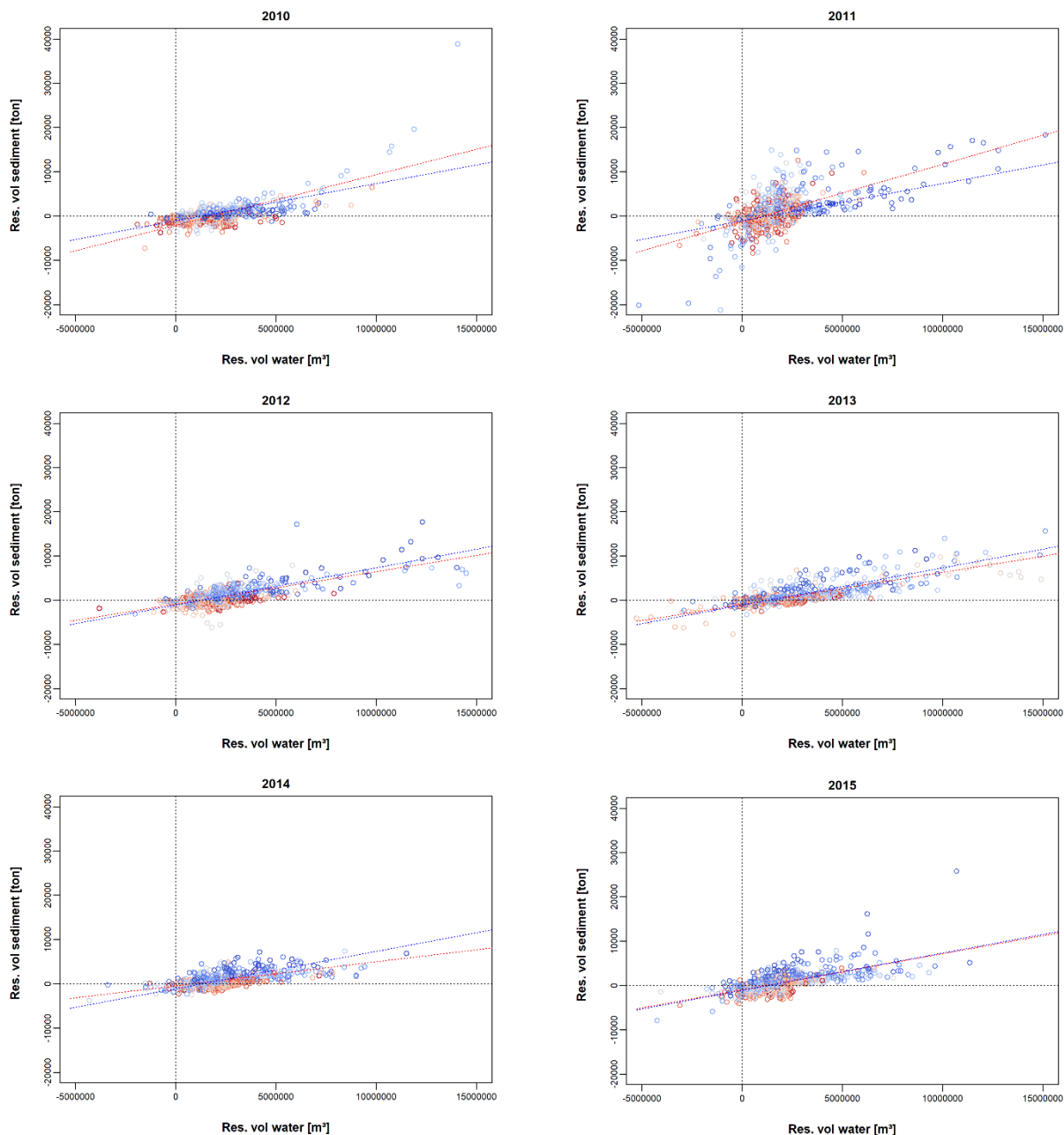
5.3.1 Sedimentfluxen te Driegoten

Naast het residueel watervolume, op basis van de kubatuur, werd eveneens het residueel sedimentvolume bepaald, met name de balans tussen opwaarts en afwaarts sedimenttransport per getij, waarbij verondersteld wordt dat dit transport 100% bepaald wordt door suspensietransport. Deze residuele sedimentflux is weergegeven in Figuur 33. Hierbij is een opwaarts gerichte sedimentflux aangeduid met een negatief teken, een afwaarts gerichte sedimentflux wordt positief aangeduid. Hier geldt een positief lineair verband tussen beide variabelen : $y = -1082 + 0.0008 x$ ($R^2 = 0.43$, eq. 1). Hierbij is het opvallend er heel wat tijen zijn waarin de residuele waterflux afwaarts gericht is (> 0), maar de sedimentflux opwaarts (< 0). Dit treedt op in ongeveer 31% van de geanalyseerde getijen, voor de periode van 2010 tot 2016. De relatie tussen beide variabelen wordt eveneens per jaar getoond in Figuur 34.

Figuur 33 – Relatie tussen het residueel watervolume per getij te Driegoten [m^3] en de residuele sedimentflux [ton] voor de periode 2010-2016



Figuur 34 – Relatie tussen het residueel watervolume per getij te Driegoten [m^3] en de residuele sedimentflux [kg] per jaar met aanduiding van de lineaire fit op de jaarlijkse data (rood) en de fit op alle data (blauw)



Aan de hand van een multiparametermodel wordt getracht om de variatie in de sedimentflux te verklaren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van enerzijds het boven debiet als verklarende parameter en anderzijds een aantal getijvariabelen: dagelijkse ongelijkheid (DO [m]), hoogwater [m], stijging laagwater tot hoogwater [m]. De dagelijkse ongelijkheid wordt hier gedefinieerd als het verschil in waterhoogte tussen 2 opeenvolgende laagwaters. De correlatie tussen de variabele hoogwater en de variabele stijging LW tot HW is 85%, deze werden niet samen gebruikt als verklarende parameter. Voor beide modellen (eq. 2, eq. 3) is de R^2 waarde sterk gelijkaardig en vrij laag, waardoor slechts een gedeelte van de variatie verklaard wordt. Voor de eerste vergelijking (eq. 2) werd de parameter hoogwater (HW) niet weerhouden, aangezien deze niet significant was.

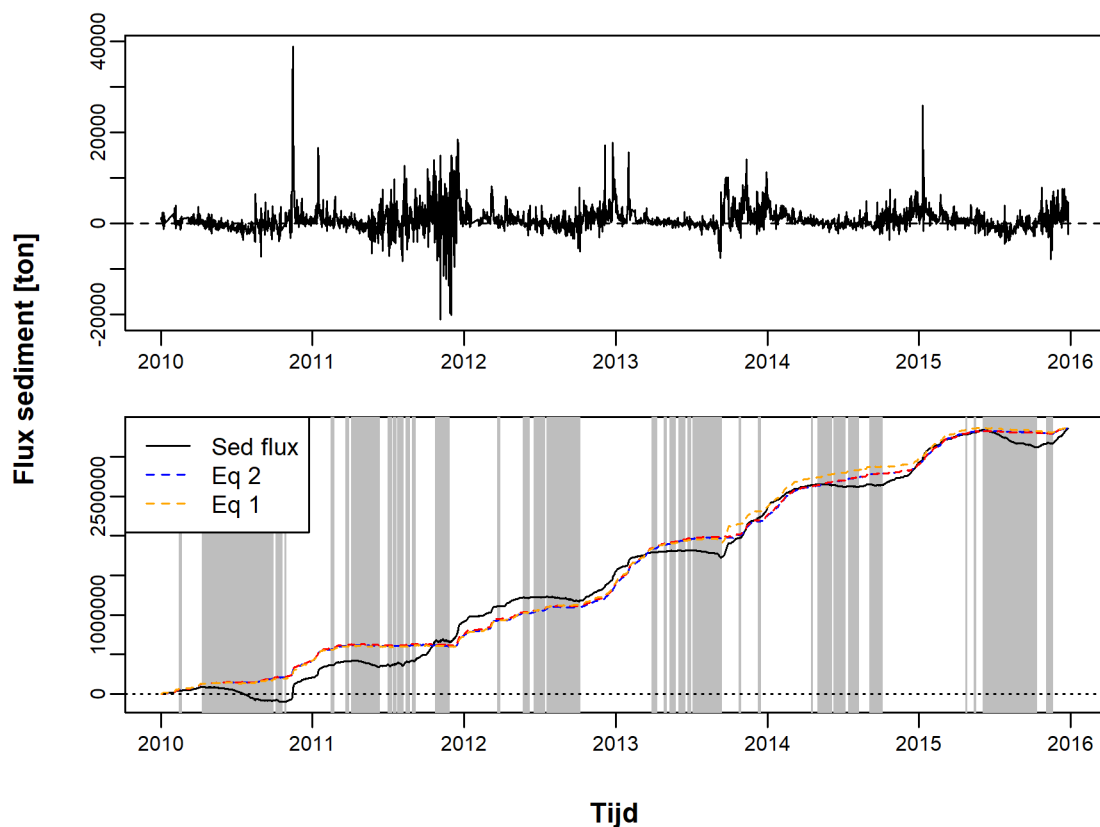
$$\text{Sed flux [ton]} = -357 - 3179 * \text{DO} + 35.1 * Q \quad (R^2 = 0,37) \quad [\text{eq. 2}]$$

$$\text{Sed flux [ton]} = 1060 - 3038 * \text{DO} - 254 * \text{rising} + 34.5 * Q \quad (R^2 = 0,38) \quad [\text{eq. 3}]$$

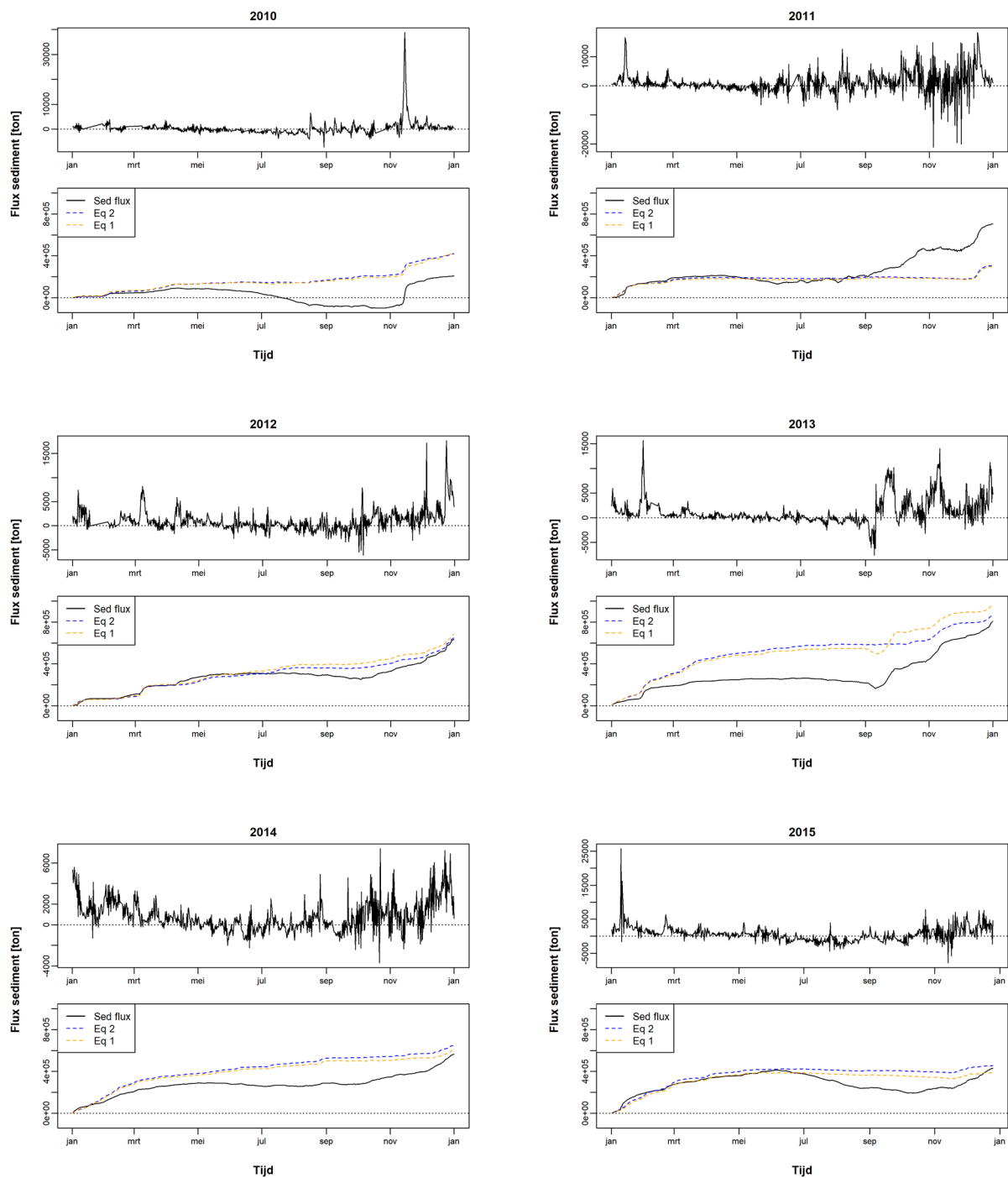
De residuele sedimentflux per getij en de cumulatieve sedimentflux over de volledige periode is weergegeven in Figuur 35. In de cumulatieve sedimentflux werden de periodes gekenmerkt door een flux in opwaartse richting aangeduid met een grijze achtergrond. Eveneens werd een voorspelling op basis van het multiparametermodel toegevoegd aan de cumulatieve sedimentfluxen. Eenzelfde evolutie is weergegeven in Figuur 36, waarbij de data zijn weergegeven per jaar. Het is duidelijk dat de totale flux redelijk voorspeld wordt, maar doordat de opwaartse fluxen niet goed gerepresenteerd zijn, zijn ook de afwaartse transporten eigenlijk een onderschatting. De periodes waarin deze onderschatting het grootst is, lijkt voor te komen in de periodes na een duidelijk opwaarts transport, bv. eind 2011 en eind 2015. Een uitzondering hierop zijn de afwaartse flux op het einde van het jaar 2011, waar het afwaarts transport sterk wordt onderschat. Dit kan te wijten zijn aan de hoge (gemeten) sedimentconcentraties in deze periode, die uiteraard sterk terug komen in de sediment fluxen. De momenten waarin de sedimentflux een opwaarts verloop kent, neemt in het algemeen het verschil tussen de berekende en de voorspelde curves toe, er wordt nauwelijks een opwaartse (negatieve) flux voorspeld op basis van de geselecteerde variabelen.

Naast deze algemene beschouwing werd eveneens nog ingezoomd op een aantal specifieke periodes. Er werden periodes geselecteerd waarin opeenvolgende tijen met een opwaartse sedimentflux voorkomen. Hierbij wordt uitgegaan van het feit dat opeenvolgende residuele sedimentfluxen noodzakelijk zijn om het sediment opwaarts te bewegen. In Figuur 37 is de lengte van een periode met enkel opwaarts gerichte residuele sedimentfluxen uitgezet t.o.v. het hoogwater, debiet en verblijftijd aan het begin van deze periode en uitgemiddeld over deze periode. Naarmate de periode langer wordt, neemt het gemiddelde debiet af, al is de spreiding op de resultaten nog groot. De gemiddelde hoogwaterstanden tijdens een dergelijke periode lijken iets hoger dan het algemeen gemiddeld hoogwater, dus eerder gelinkt aan een springtij periode.

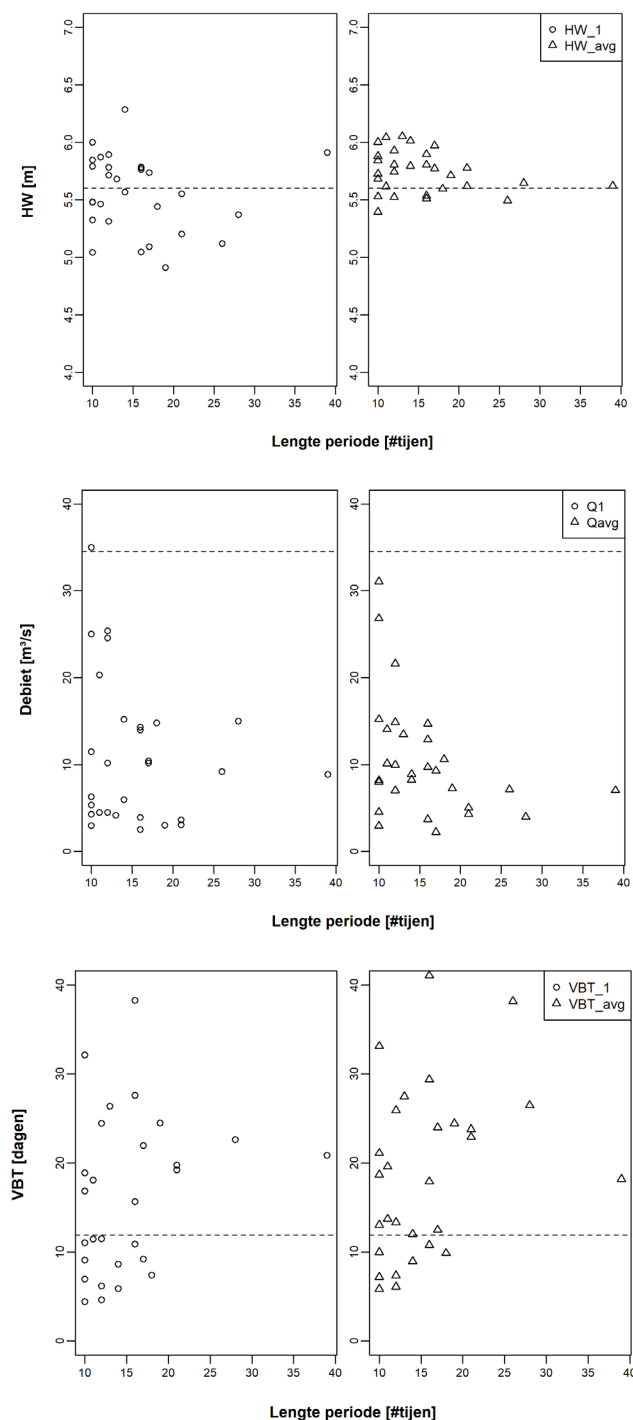
Figuur 35 – Berekende sedimentflux [ton] over de volledige beschouwde periode per getij (boven) en cumulatief (onder). De cumulatieve flux werd eveneens geschat op basis van eq. 1 ($Q = f(\text{res watervolume})$) en eq. 2 ($Q = f(\text{DO}, Q)$). Deelperiodes met een opwaartse residuele flux zijn in het grijs aangeduid



Figuur 36 – Sedimentflux [kg] per getij (boven) en cumulatief (onder), voor de verschillende beschouwde jaren. De cumulatieve flux werd eveneens geschat op basis van eq. 1 ($Q = f(\text{res watervolume})$) en eq. 2 ($Q = f(\text{DO}, Q)$).



Figuur 37 – Relatie tussen de beginwaarde (links) en gemiddelde waarde (rechts) van het hoogwater (boven), debiet (midden) en verblijftijd (onder) en de duur van een periode met opwaartse sedimentfluxen.



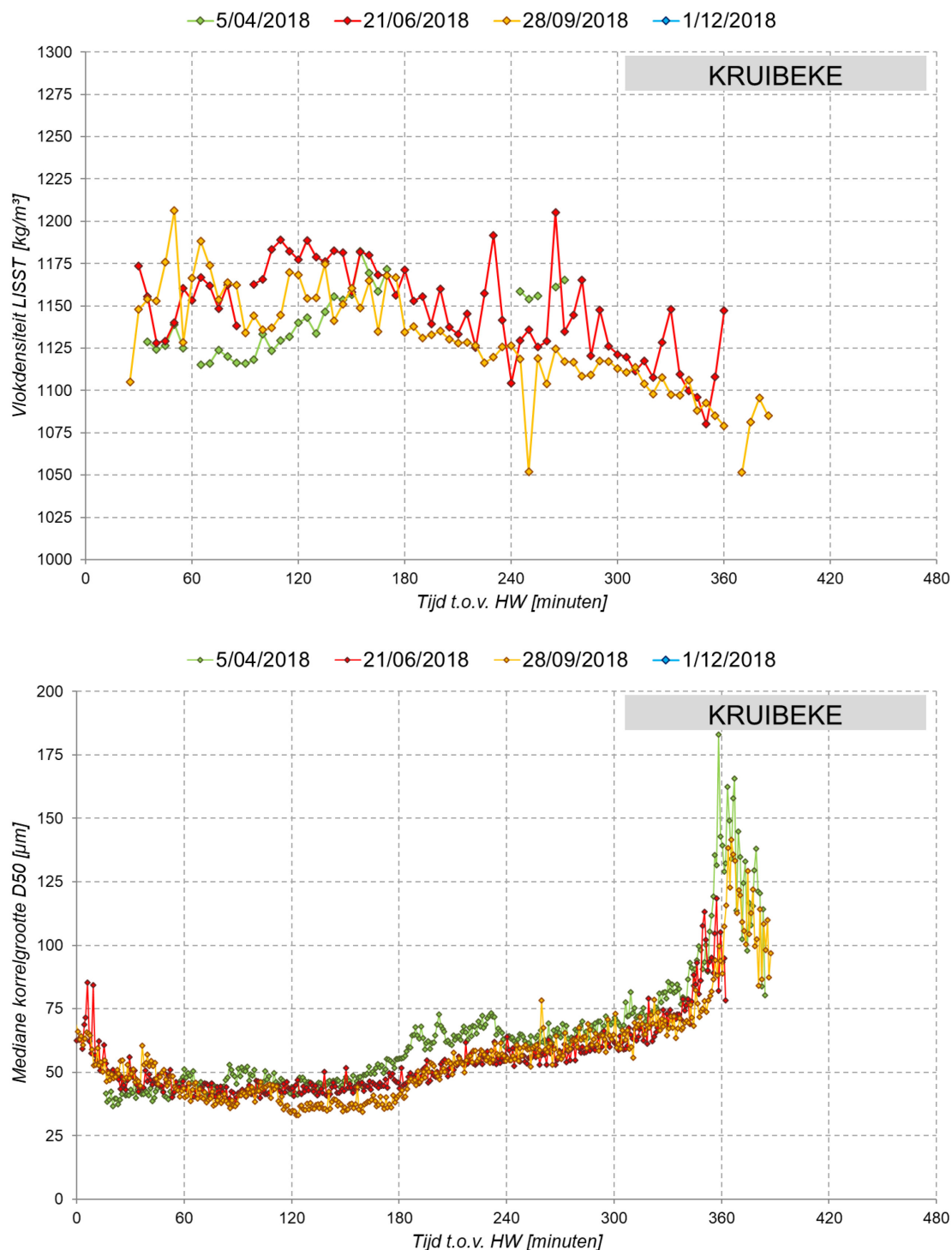
5.3.2 Sedimenteigenschappen

Figuur 38 geeft het verloop van de vlokdensiteit weer tijdens de ijkingsmetingen te Kruibeke voor het jaar 2018. Voor meer recentere jaren is het aantal campagnes beperkt en/of werd de LISST-100X niet ingezet tijdens de ijkingscampagnes. De ijkingsmetingen vinden ook hier systematisch plaats tijdens de eb fase, waardoor enkel voor de periode van hoogwater (HW) tot HW+400' metingen beschikbaar zijn. De patronen zijn zeer gelijkaardig voor de ijkingscampagnes in de verschillende seizoenen. De hoogste densiteit (tot

1200 kg/m³) wordt gemeten in de eerste 2 uren na HW. Nadien neemt de vlokdensiteit geleidelijk af tot 1100 kg/m³ op het einde van de eb fase.

De mediane korrelgrootte fluctueert in de eerste 3 uren na HW rond 50 µm, om vervolgens geleidelijk toe te nemen tot 75 µm op HW+360'. Op dit moment vindt een plotse toename in de mediane korrelgrootte plaats, met waarden tot 150 µm. Dit kan wijzen op grotere vlokken of een groter aandeel van zand. Aangezien de vlokdensiteit hierniet toeneemt, lijkt de eerste hypothese plausibeler.

Figuur 38 – Verloop van de vlokdensiteit (boven) en mediane korrelgrootte (onder) te Kruibeke voor verschillende ijkingscampagnes in 2018



6 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport draagt bij tot het causaliteitsonderzoek dat uitgevoerd wordt door de UAntwerpen, rond potentiële wijzigingen in de slibhuishouding in het Schelde-estuarium. Hier worden een aantal data-analyses gepresenteerd rond de aspecten: waterbeweging (getij en stromingen), morfologie, zout en sediment.

M.b.t. waterbeweging werd zowel gekeken naar het tijdsverschil tussen kentering hoogwater en hoogwater en naar de vloed en ebvolumes op verschillende locaties. Er is een duidelijke link tussen het tijdstip tussen kentering hoogwater en de hoogte (sterkte) van het hoogwater, uitgedrukt m.b.v. een negatieve lineaire relatie. Een sterkere vloedstroom over de jaren zou aanleiding kunnen geven tot een groter gemiddeld tijdsverschil tussen beiden. Het tijdsverschil tussen kentering hoogwater en hoogwater werd geanalyseerd voor de meetpost Oosterweel/Antwerpen, waar de langste metingen van zout beschikbaar zijn (deze worden gebruikt om kenteringsmoment af te leiden). Er kon geen duidelijke trend in deze parameter worden onderscheiden voor de beschouwde periode.

Het vloed- en ebvolume werd voor verschillende locaties langsheen Beneden- en Boven-Zeeschelde bepaald. Er wordt een logische en duidelijke relatie gevonden tussen het vloedvolume en de grootte van stijging (verschil tussen laagwater en hoogwater). De helling van deze relatie is niet afhankelijk van het bovendebiet voor meetlocatie Kruibeke. Voor de andere stations neemt het verschil in deze helling toe naarmate men opwaarts beweegt, door het relatief grotere effect van bovenafvoer. De bevindingen voor het ebvolume zijn gelijkaardig, waarbij voor de grootste debieten (P20) te Schoonaarde zelfs geen toename meer wordt gezien in het ebvolume bij groter tijdsverschil. Het residueel watervolume, berekend over een getijfase, werd eveneens bepaald voor Driegoten. Hier wordt een duidelijke relatie gevonden met het bovendebiet, maar ook de dagelijkse ongelijkheid in het getij en de hoogte van het hoogwater (of stijging) bepalen in belangrijke mate de grootte van dit residueel volume. Deze volumes werden bepaald op basis van lange numerieke simulaties, maar hierbij wordt de morfologie constant gehouden. Het uitvoeren van identieke simulaties met een andere morfologie zou meer inzicht kunnen geven in de gevoeligheid van deze eb- en vloedvolumes (en hun relatie met bovenafvoer) voor bathymetrische wijzigingen.

De volumes onder laagwater zijn overal in de Zeeschelde duidelijk toegenomen, in de periode 2001 tot 2019. De uitschieters zijn OMES segmenten 10, met de aanleg van Deurganckdok en OMES segment 19, door baggerwerken in het opwaartse deel van dit segment. Voor de Boven-Zeeschelde lijkt de toename van het volume te liggen rond 10 – 15 % t.o.v. 2001. Voor de volumes onder hoogwater wordt eenzelfde patroon waargenomen, al lijken de relatieve veranderingen kleiner dan deze voor de volumes onder laagwater.

Voor zout zijn zowel data van de continue meetposten als kenteringsvaarten geanalyseerd. Er is gefocust op de meetresultaten rond kentering hoogwater, aangezien zoutindringing hier maximaal is en dit proces het meeste aandacht geniet in het kader van een SSC toename van de Boven-Zeeschelde. Er werd een lineaire relatie opgesteld tussen zout en bovenafvoer. De helling voor de meeste locaties neemt sinds 2012-2014 toe, wat duidt op een sterkere respons bij hogere bovenafvoer. Echter, in dezelfde periode neemt ook het snijpunt toe, wijzend op een hoger zoutgehalte bij lage bovenafvoer. In het kader van lopend onderzoek op het WL worden oudere zoutmetingen gedigitaliseerd, waardoor lange termijn evoluties beter in kaart kunnen gebracht worden.

Naast de residuele waterflux werd eveneens een residuele sedimentflux bepaald voor Driegoten, waarbij beiden werden vergeleken. Voor ongeveer 1/3 van de getijden werd een opwaartse flux berekend. De sedimentflux in opwaartse richting kan niet worden voorspeld met behulp van een multiparametermodel, met als verklarende parameters de dagelijkse ongelijkheid, het debiet en hoogwater, noch met een lineaire fit op basis van de relatie tussen residuele waterflux en sedimentflux. De voorspelde sedimentflux in afwaartse richting op basis van het multiparametermodel is gelijkaardig als de berekende sedimentflux, maar aangezien geen opwaartse flux wordt voorspeld, eerder een onderschatting. Het is aanbevolen om deze sedimentflux te koppelen aan gemeten SSC gehalten in het opwaartse deel van het estuarium, om na te gaan of een opwaartse flux effectief correleert met een stijgend SSC gehalte. Eveneens zou een beter voorspellend model van de sedimentflux moeten toelaten om ook opwaartse sedimentfluxen te verklaren.

7 Referenties

Plancke, Y.; Schramkowski, G.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Kubatuuurberekening voor het Scheldeestuarium: karakteristieke getijden uit het decennium 1991 - 2000 en topo-bathymetrische gegevens uit 2001. *WL Rapporten*, 00_157. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

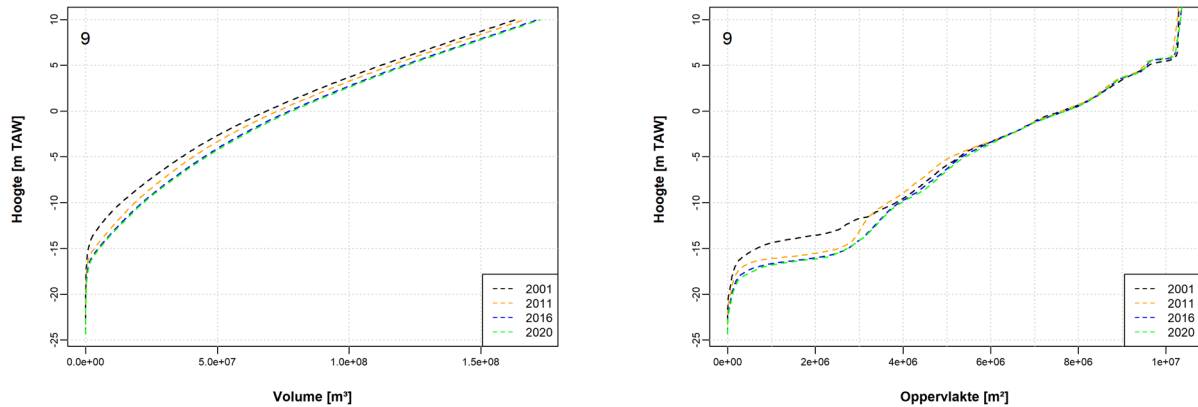
Vandenbruwaene, W.; Hertoghs, R.; Michielsens, S.; Van De Moortel, I.; Brackx, M.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Vereecken, H.; Meire, D.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2019). Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS) – Jaarboek monitoring 2018: factual data rapportage van monitoring waterbeweging en fysische parameters in de Zeeschelde in 2018. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 12_070_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=314378>

Vandenbruwaene, W.; Stark, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda voor de Toekomst – Historische evolutie getij en morfologie Schelde estuarium: deelrapport 5. Synthese. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_147_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=322528>

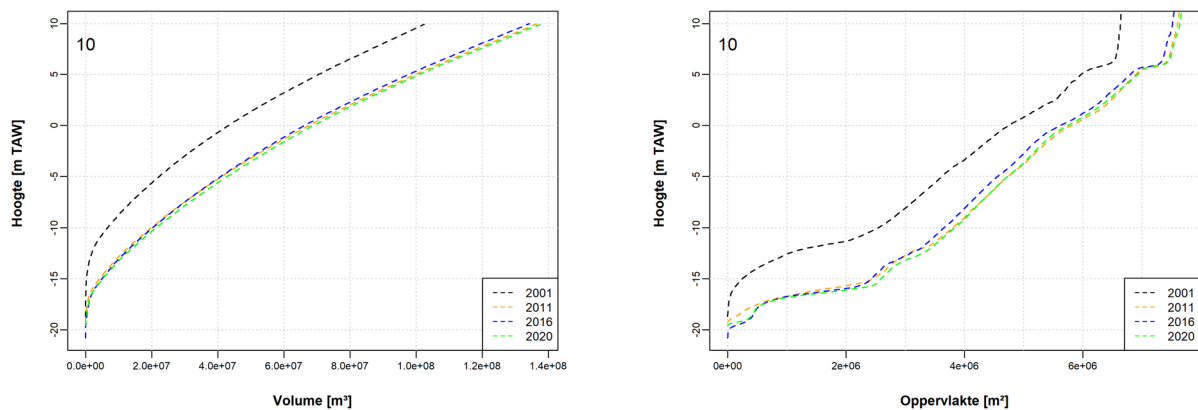
Vandenbruwaene, W.; Thant, S.; Michielsens, S.; Van De Moortel, I.; Brackx, M.; Hertoghs, R.; Claeys, S.; Plancke, Y.; Vereecken, H.; Meire, D.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2020). Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS) – Jaarboek monitoring 2019: factual data rapportage van monitoring waterbeweging en fysische parameters in het Schelde estuarium in 2019. Versie 4.0. *WL Rapporten*, PA047_9. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XVI, 132 + 21 p. bijl. pp.

Bijlage 1 Hypsometrie

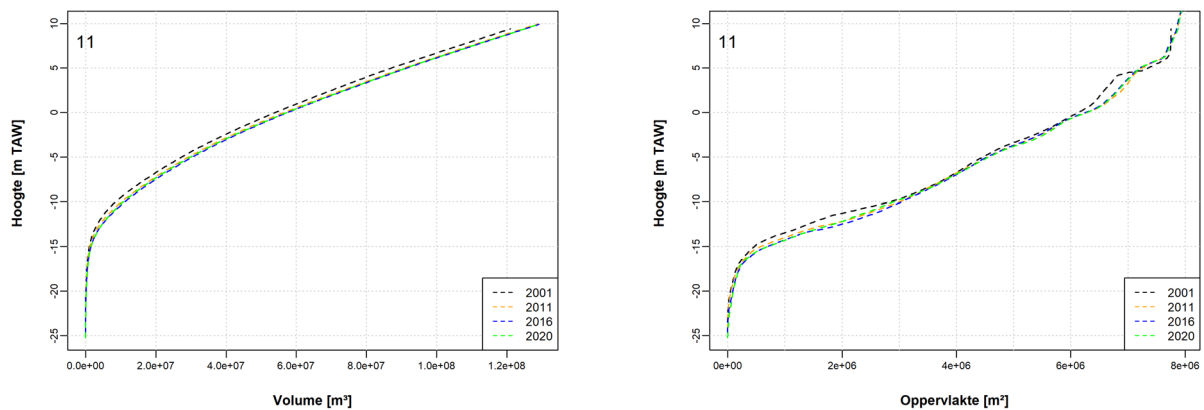
Figuur 39 – Hypsometrische curve voor OMES segment 9 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



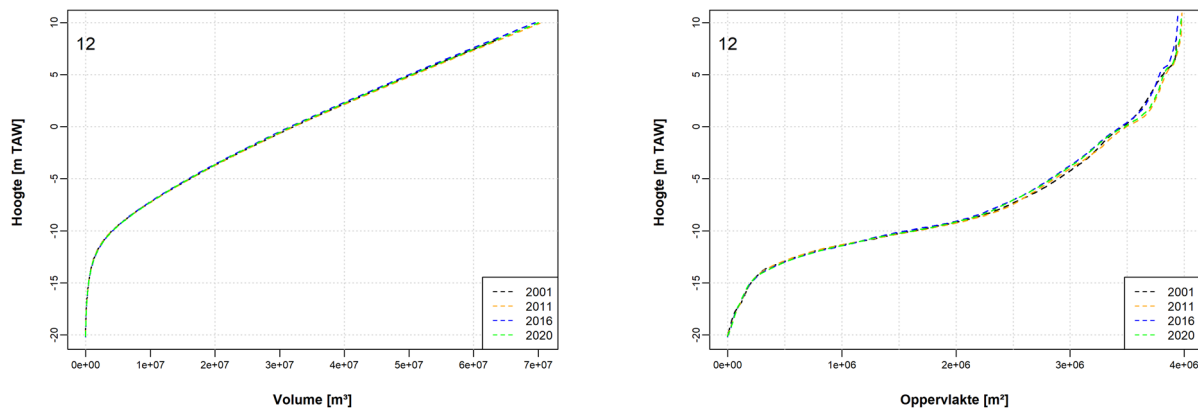
Figuur 40 – Hypsometrische curve voor OMES segment 10 voor volume (links) oppervlakte (rechts)



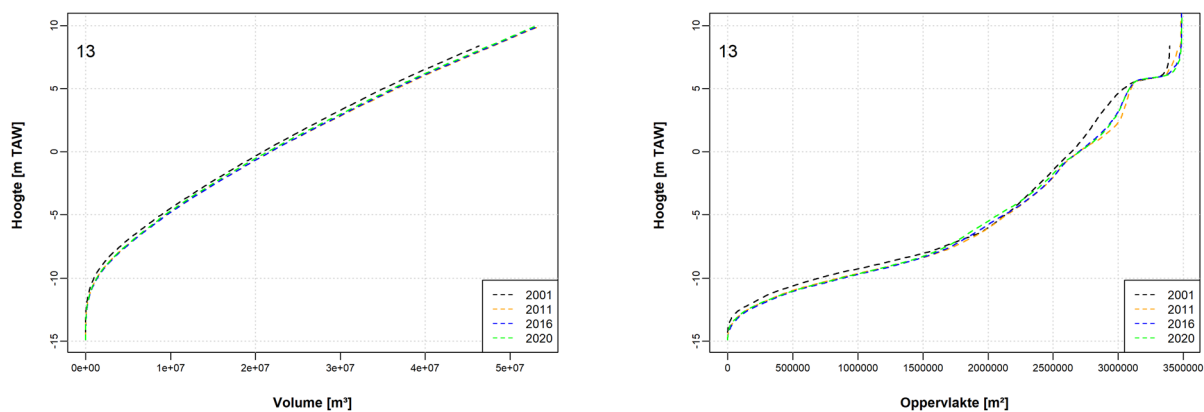
Figuur 41 – Hypsometrische curve voor OMES segment 11 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



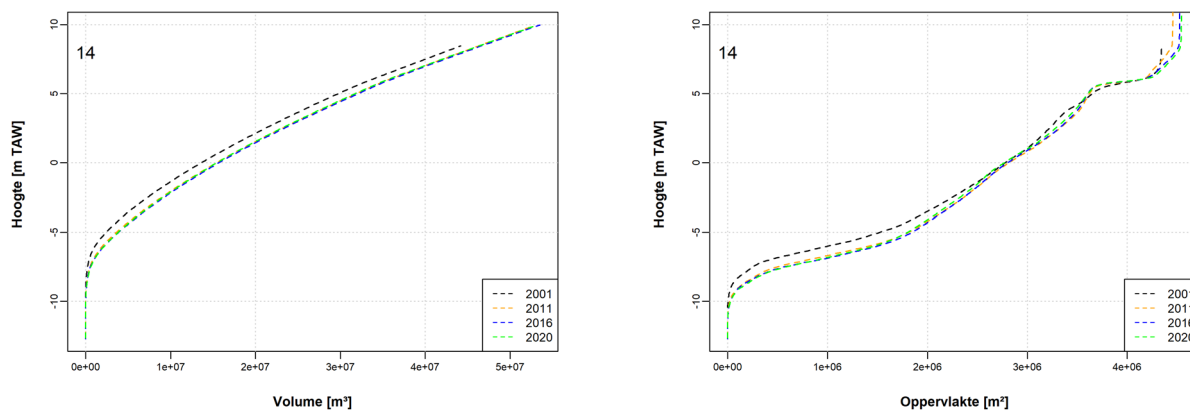
Figuur 42 – Hypsometrische curve voor OMES segment 12 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



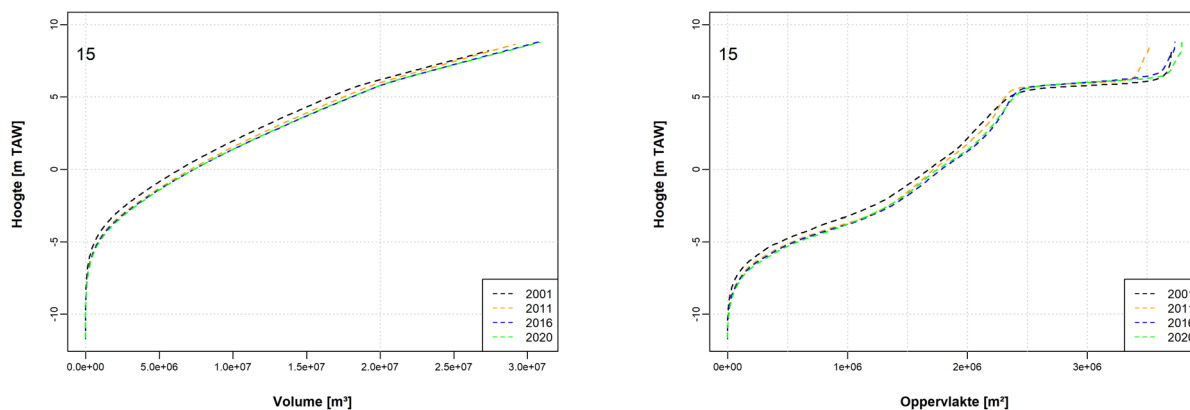
Figuur 43 – Hypsometrische curve voor OMES segment 13 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



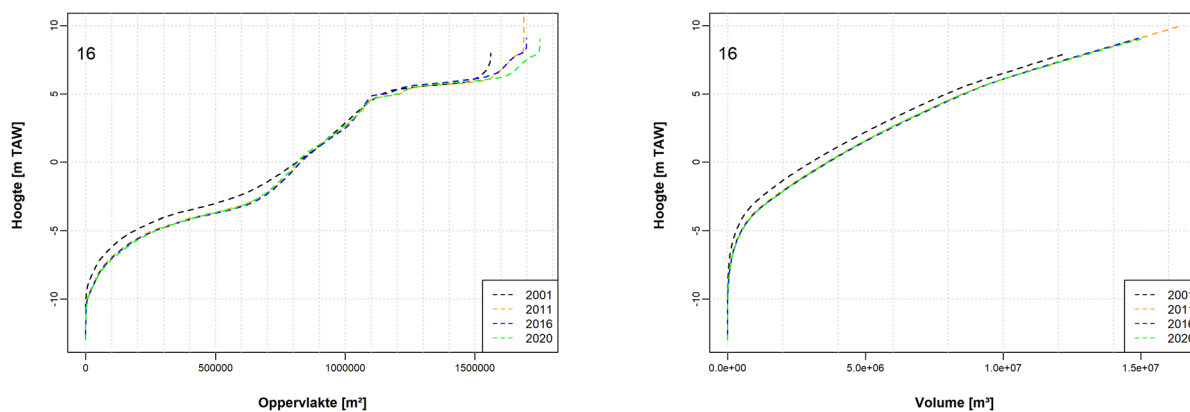
Figuur 44 – Hypsometrische curve voor OMES segment 14 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



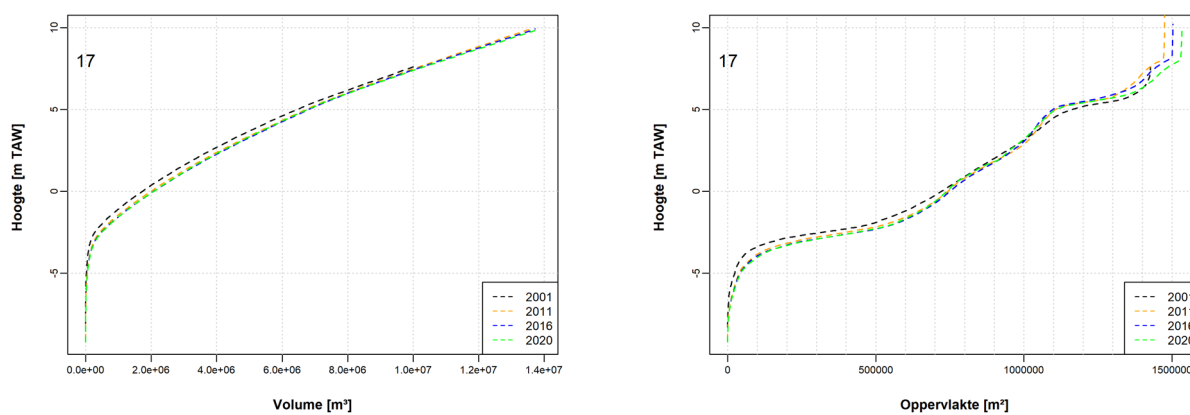
Figuur 45 – Hypsometrische curve voor OMES segment 15 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



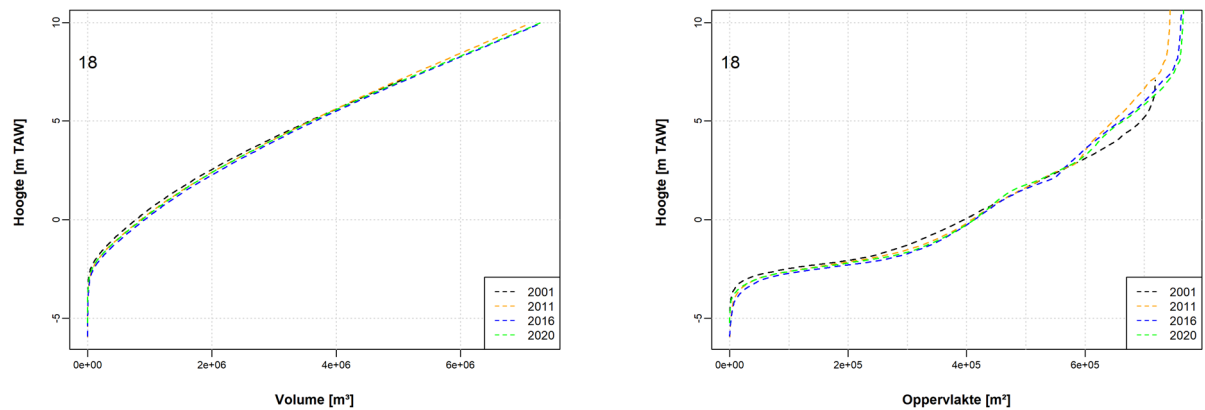
Figuur 46 – Hypsometrische curve voor OMES segment 16 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



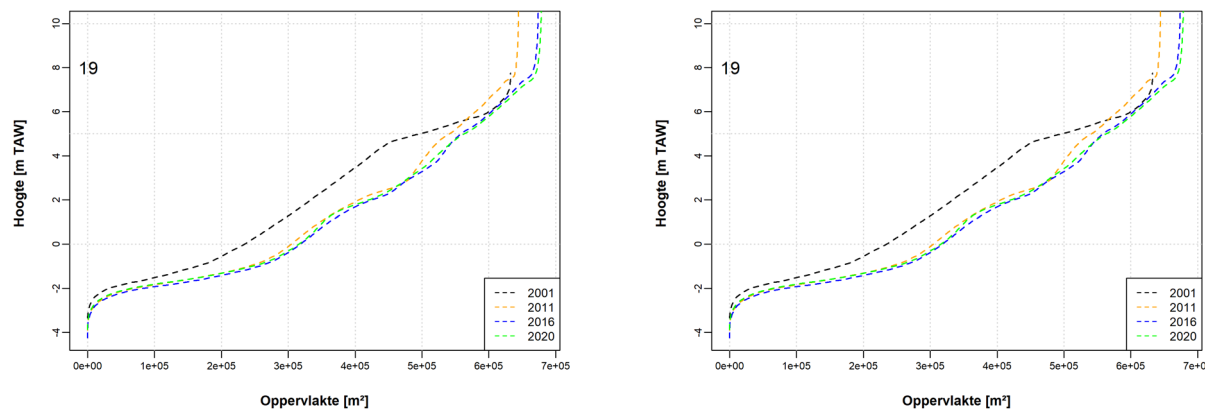
Figuur 47 – Hypsometrische curve voor OMES segment 17 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



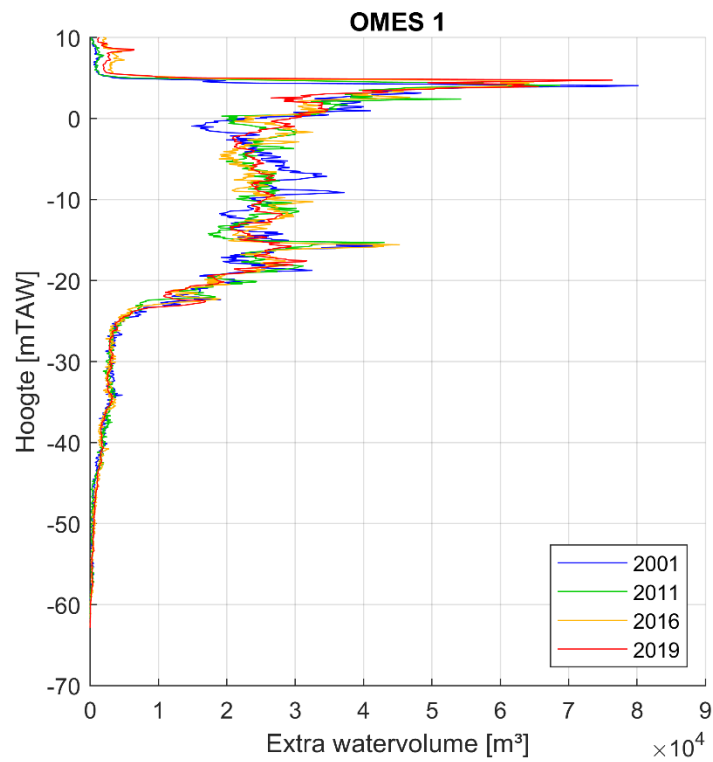
Figuur 48 – Hypsometrische curve voor OMES segment 18 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



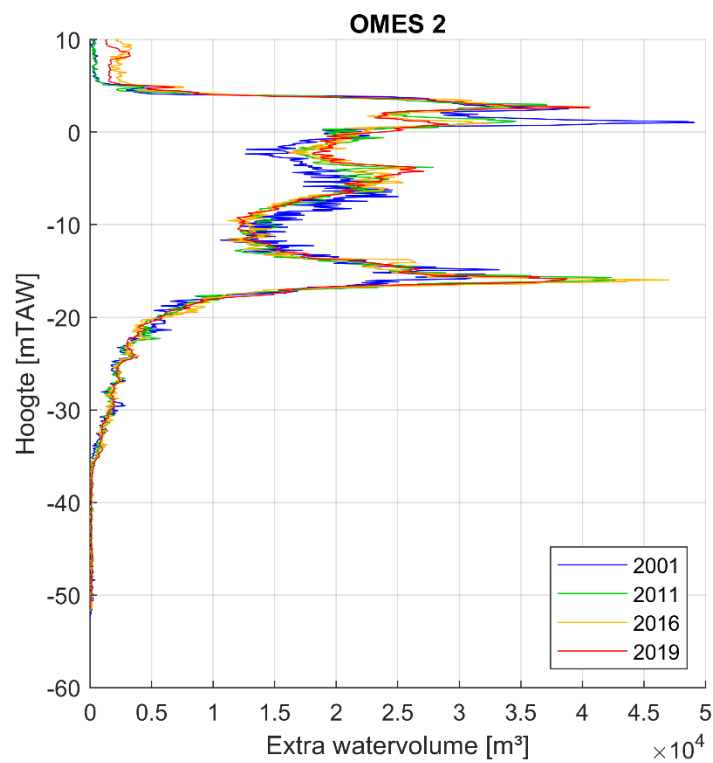
Figuur 49 – Hypsometrische curve voor OMES segment 19 voor volume (links) en oppervlakte (rechts)



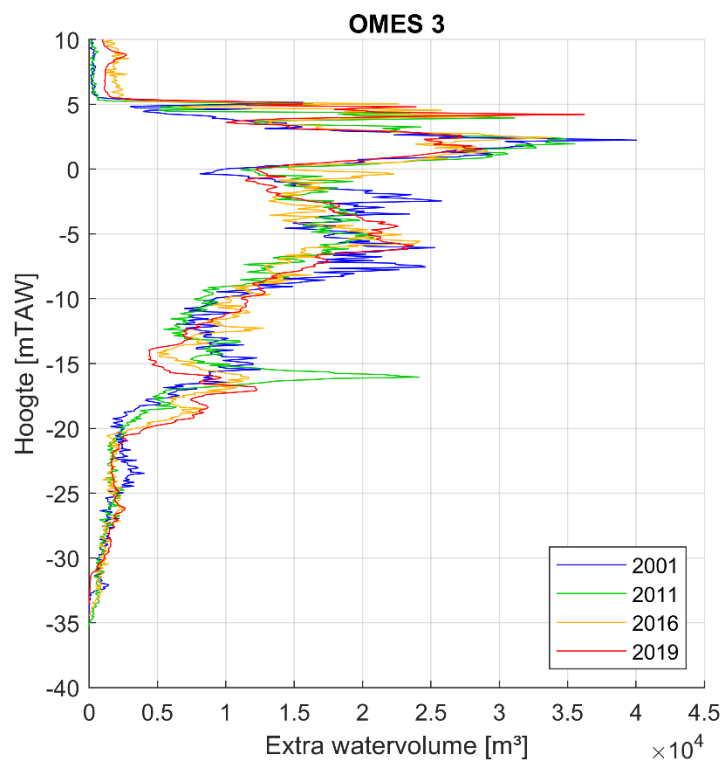
Figuur 50 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 1)



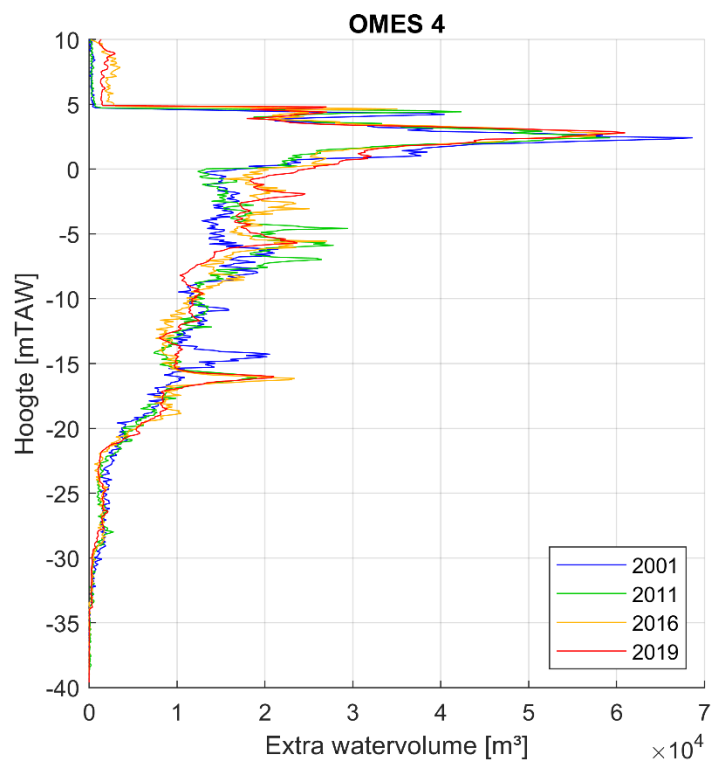
Figuur 51 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 2)



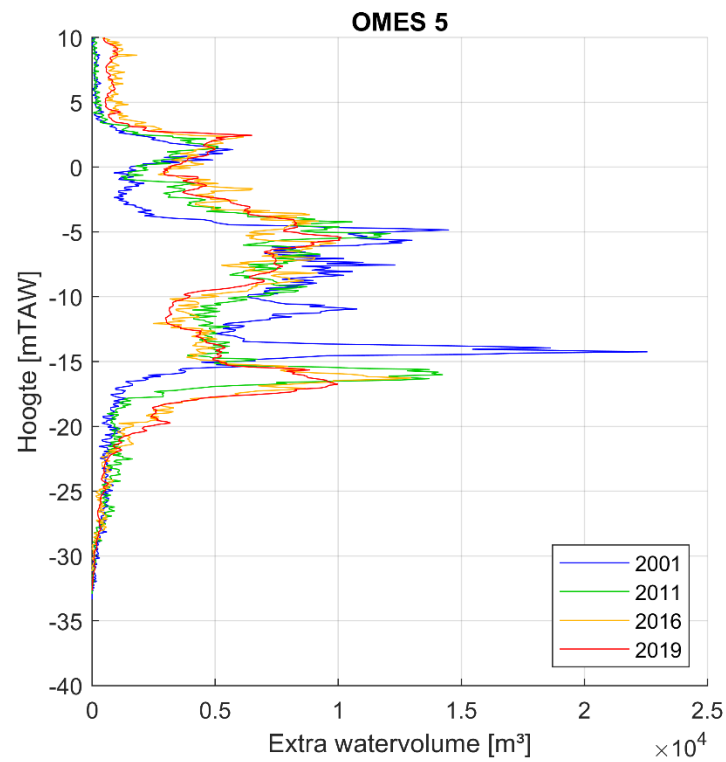
Figuur 52 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 3)



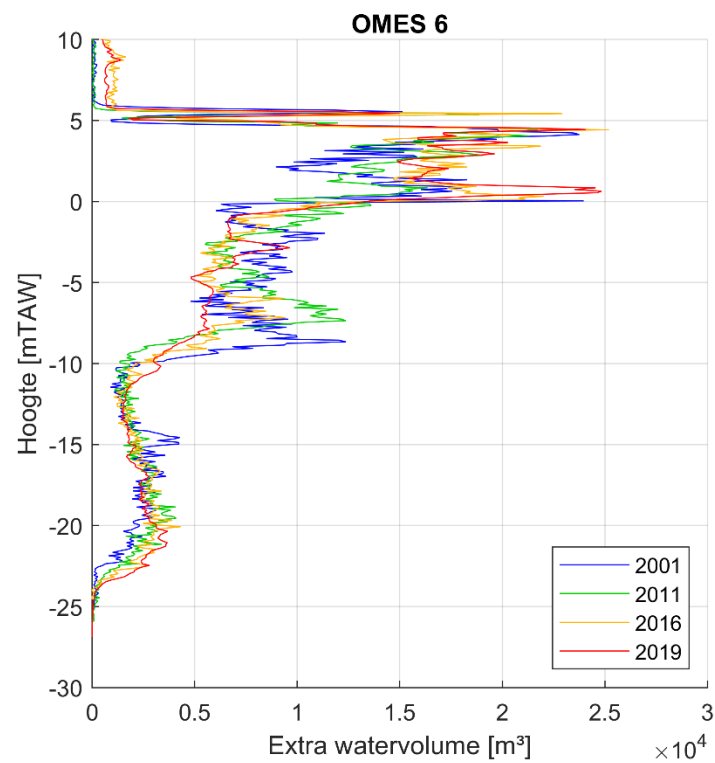
Figuur 53 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 4)



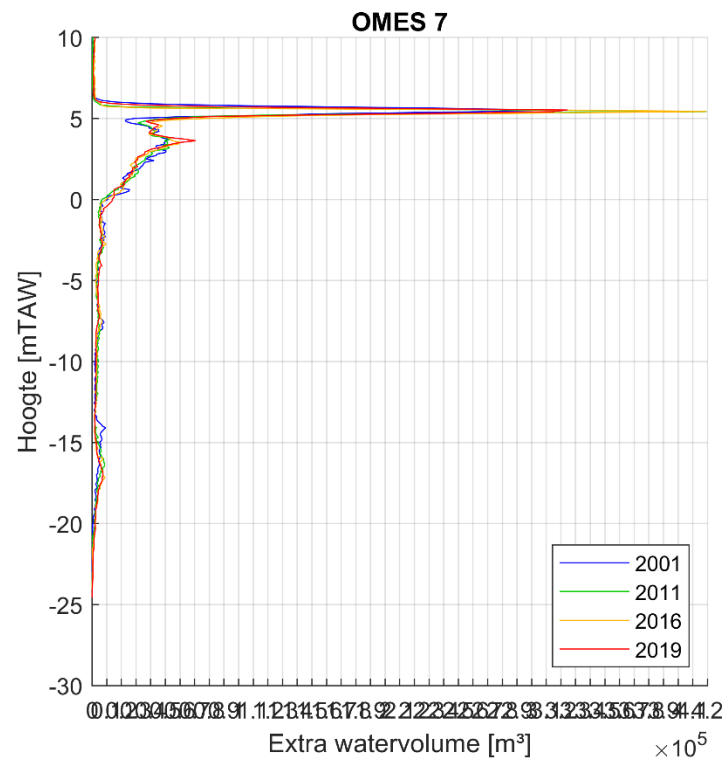
Figuur 54 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 5)



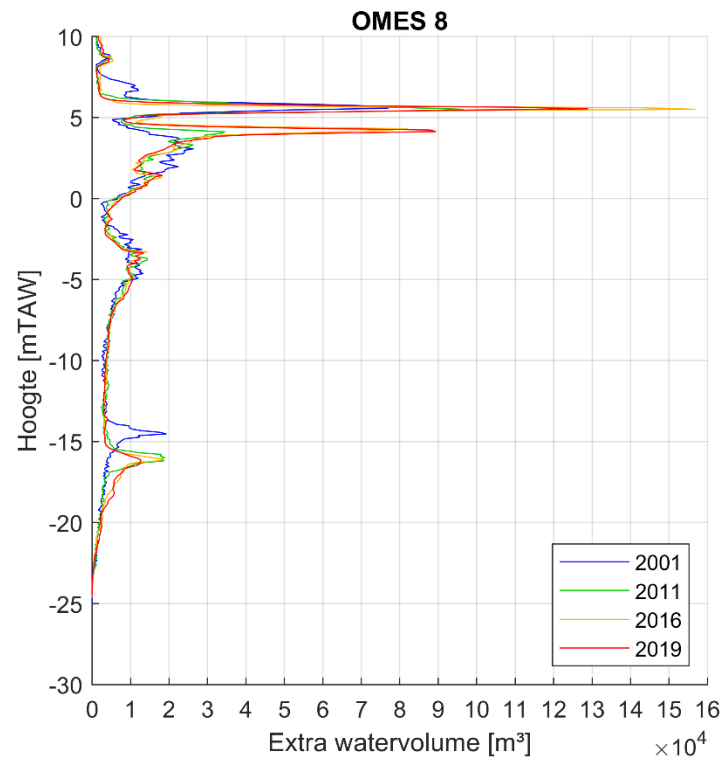
Figuur 55 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 6)



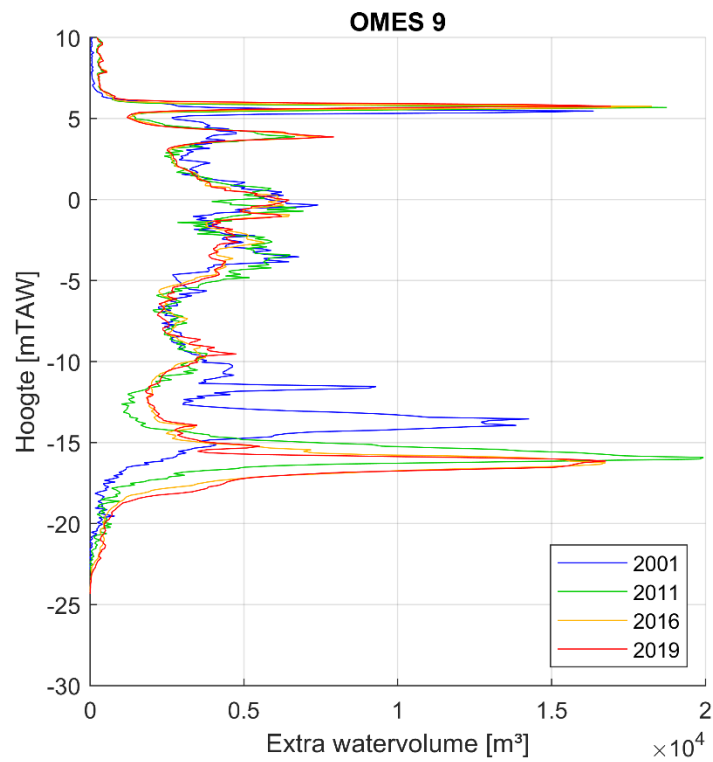
Figuur 56 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 7)



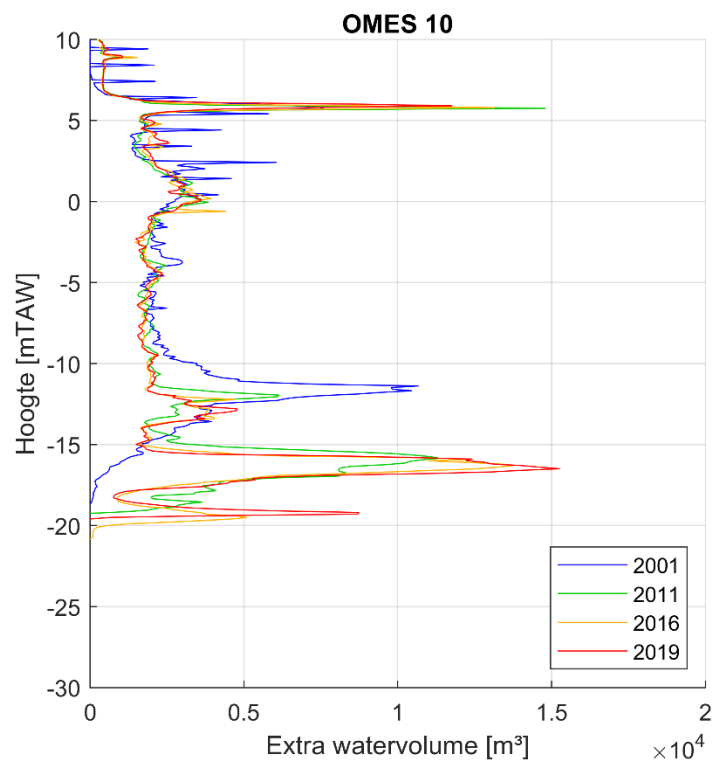
Figuur 57 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 8)



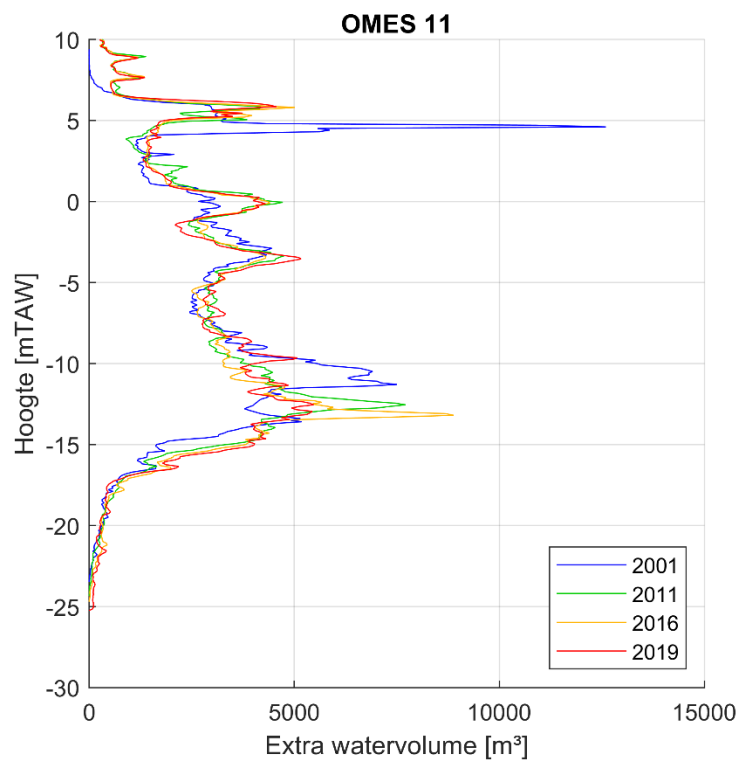
Figuur 58 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 9)



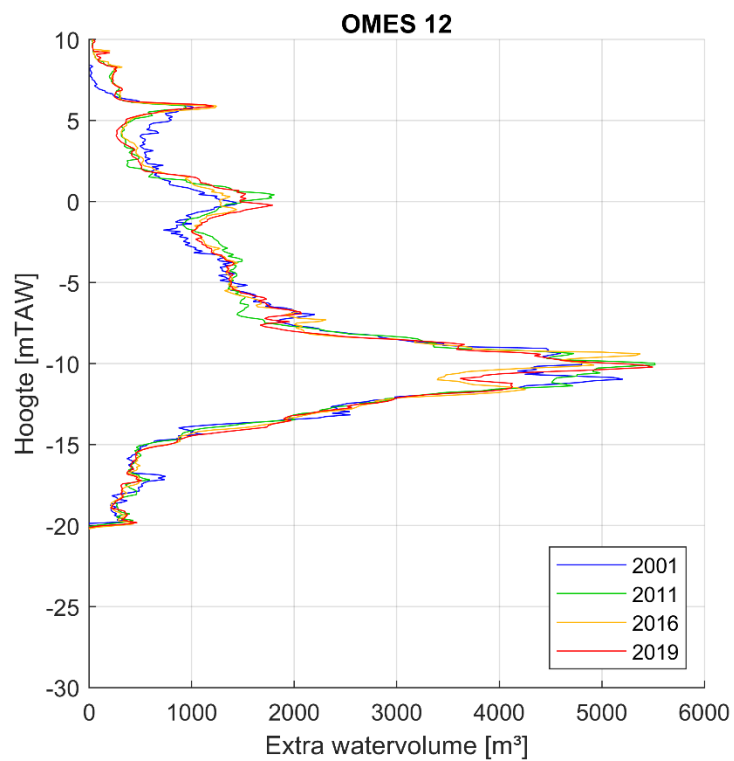
Figuur 59 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 10)



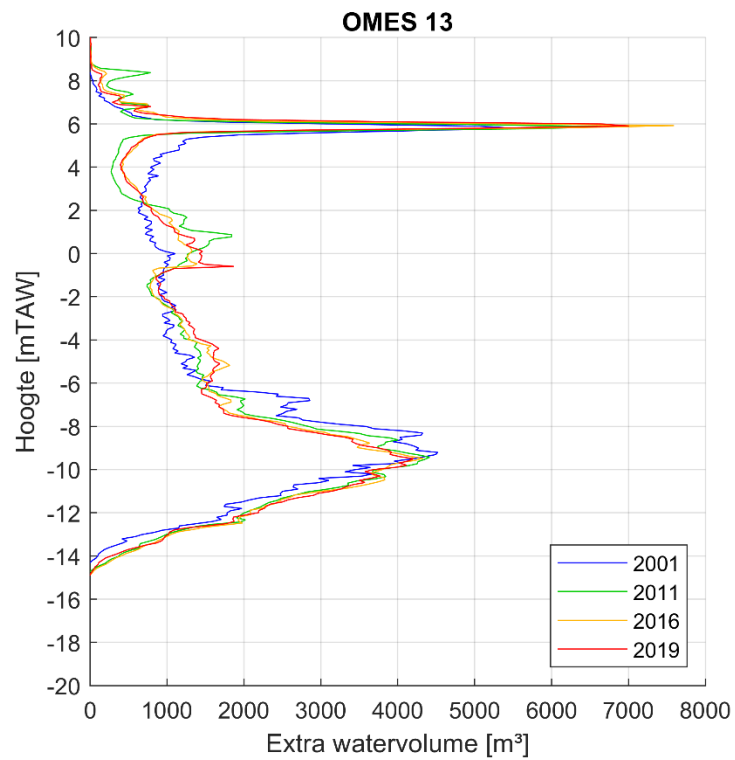
Figuur 60 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 11)



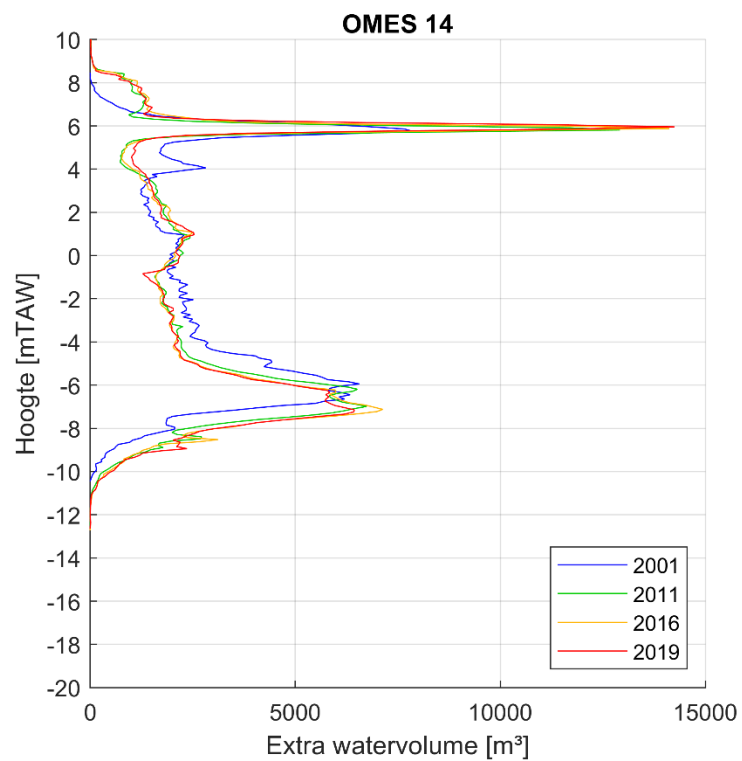
Figuur 61 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 12)



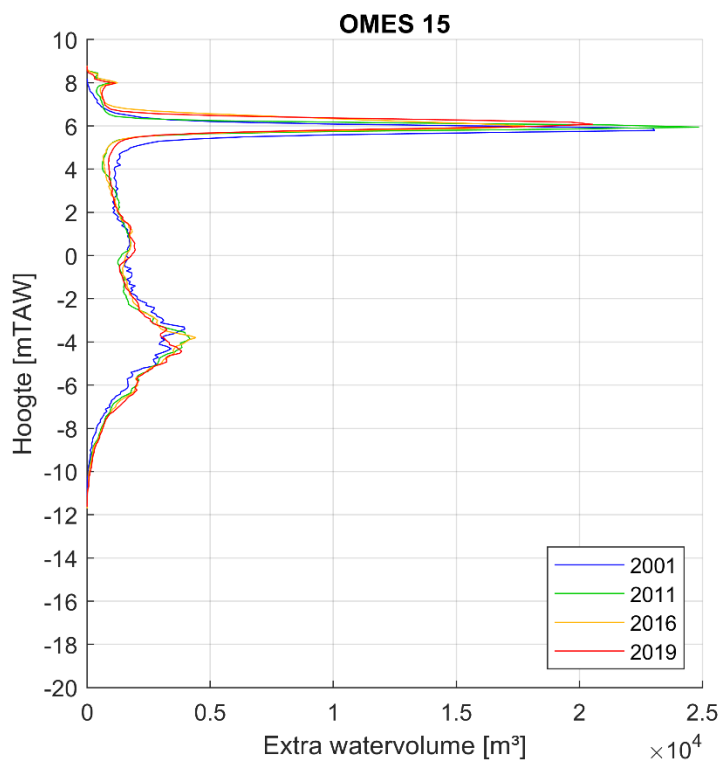
Figuur 62 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 13)



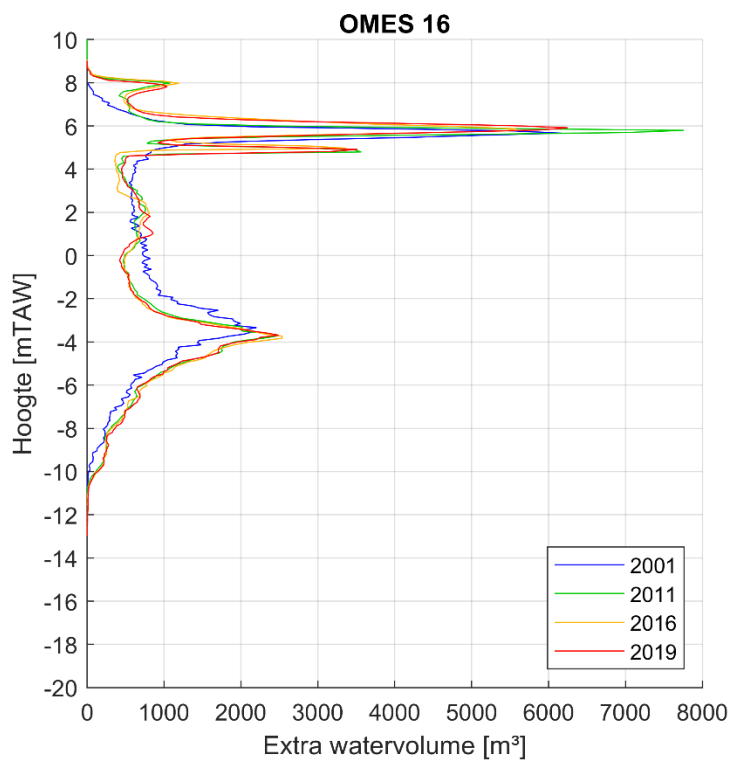
Figuur 63 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 14)



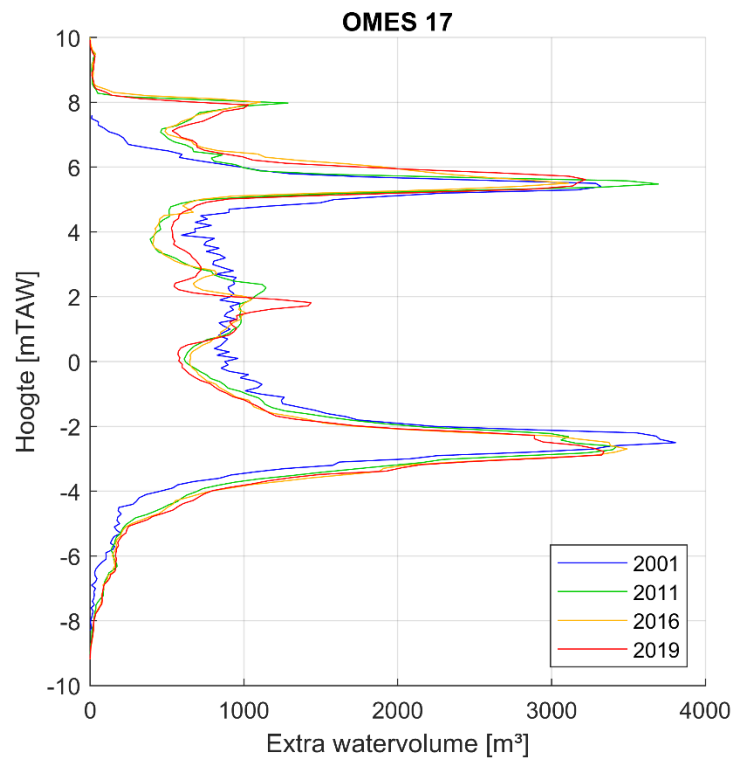
Figuur 64 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 15)



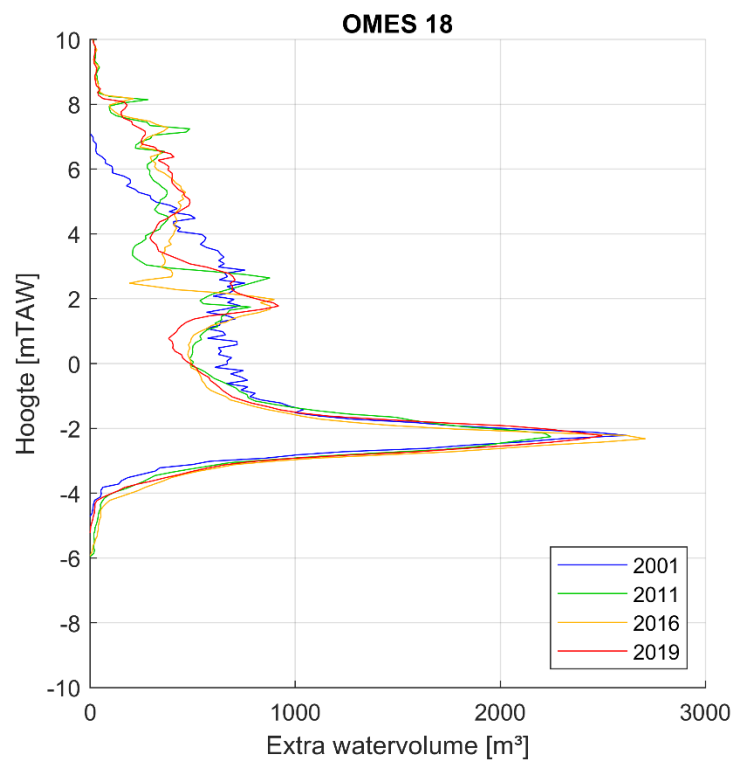
Figuur 65 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 16)



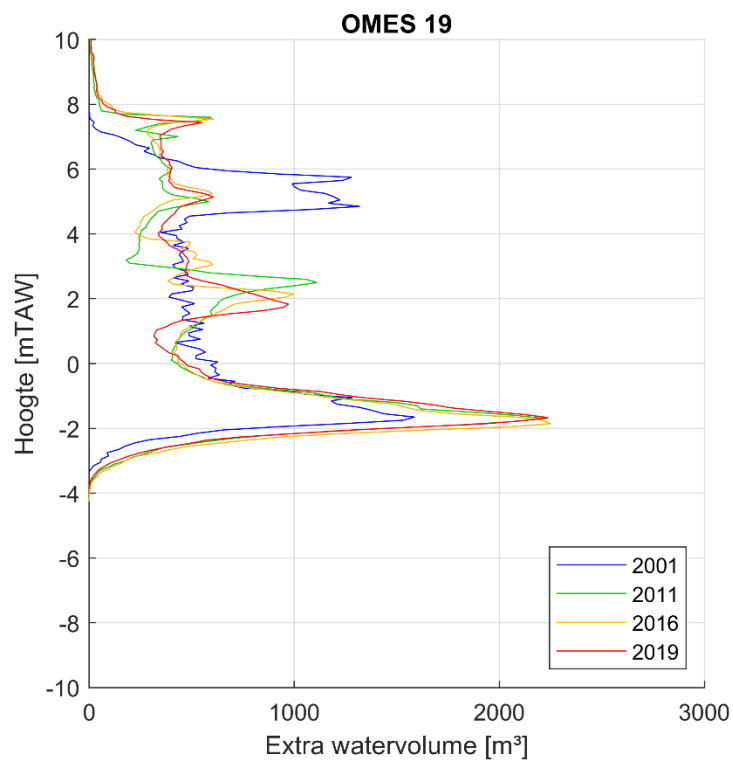
Figuur 66 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 17)



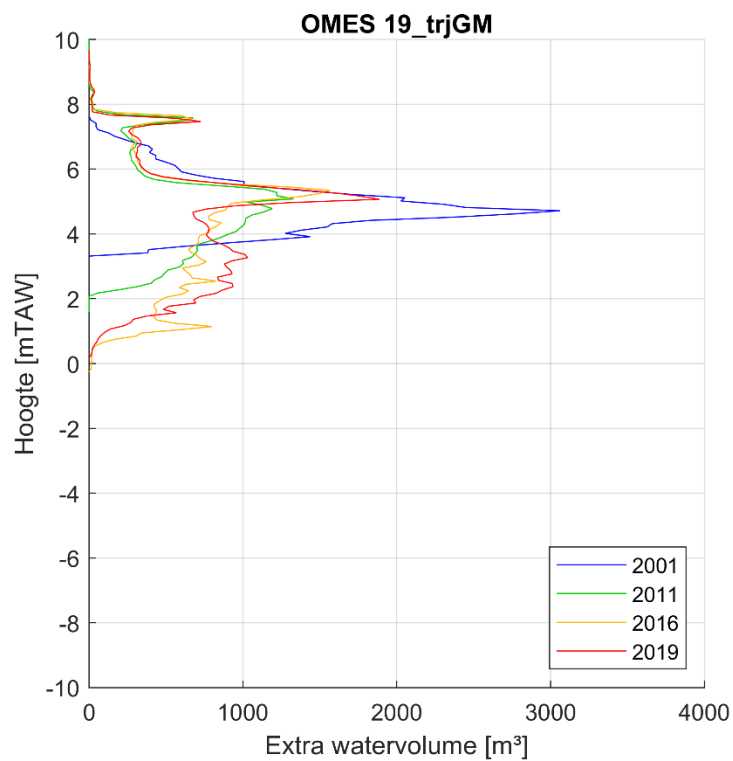
Figuur 67 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 18)



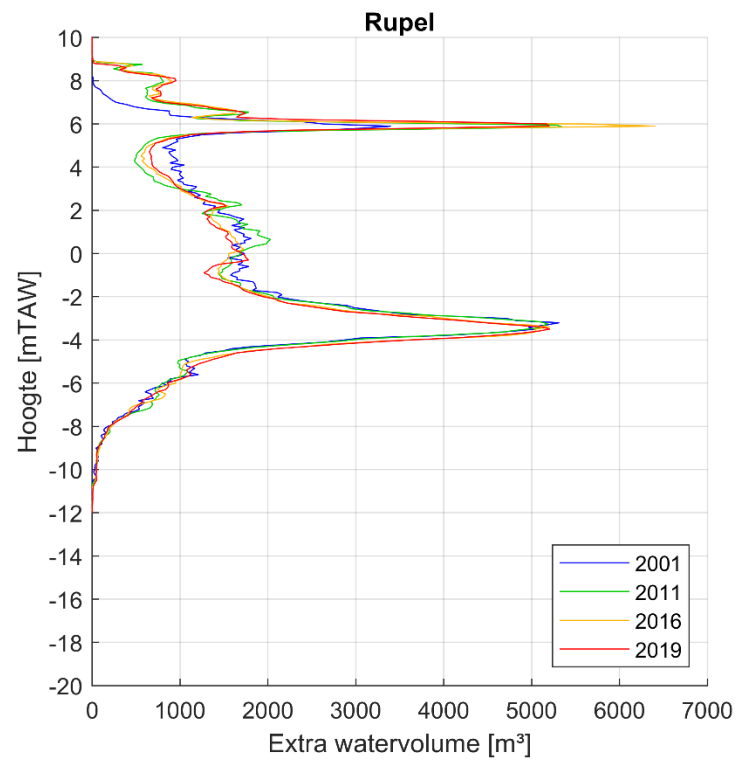
Figuur 68 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 19)



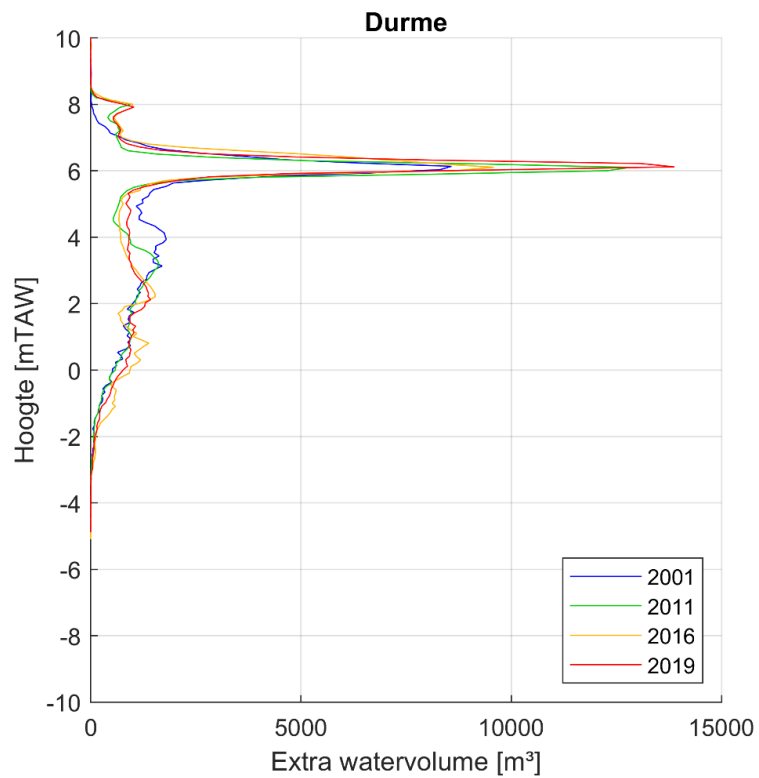
Figuur 69 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment 19-Gentbrugge-Melle)



Figuur 70 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment Rupel)

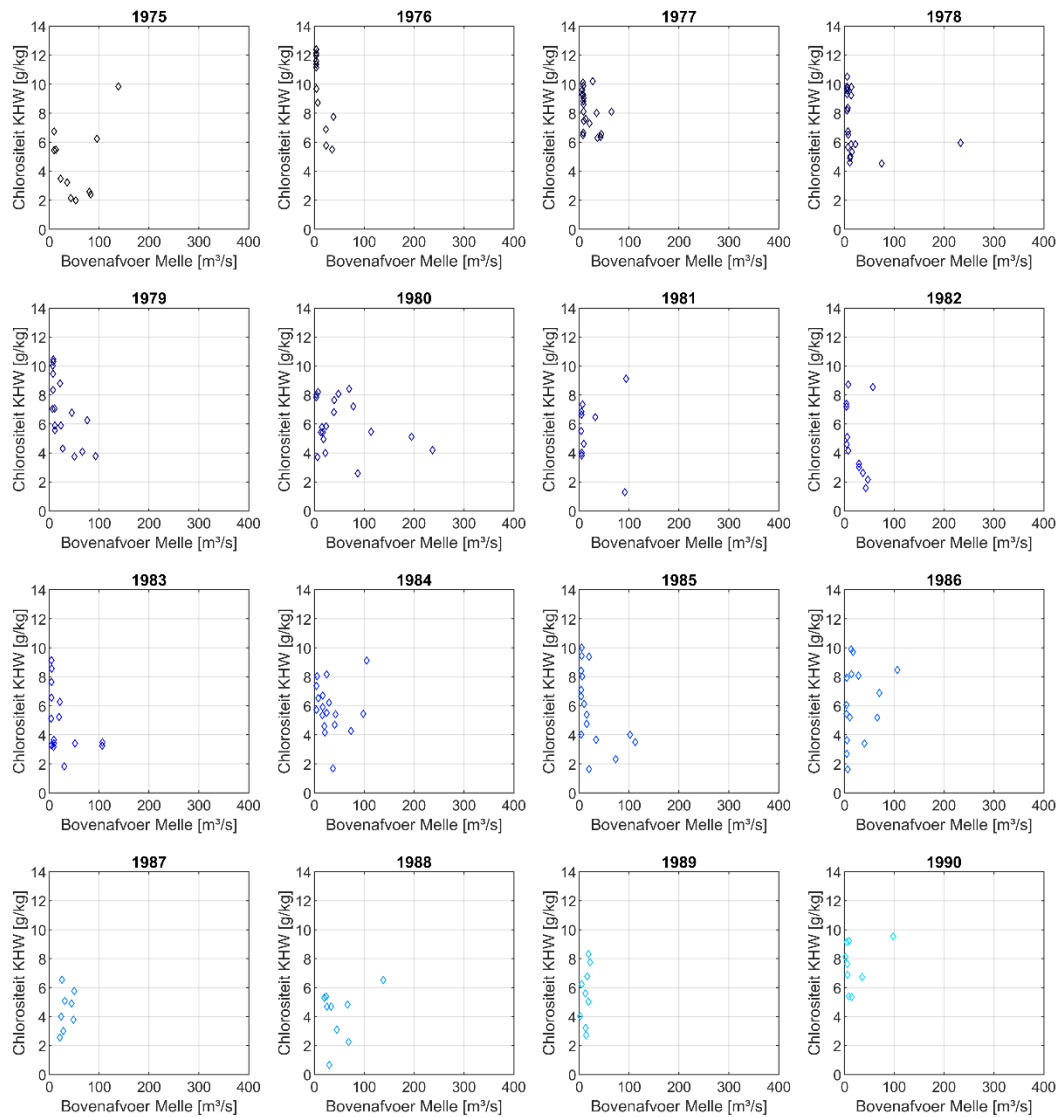


Figuur 71 – Hypsometrie: watervolume boven extra oppervlakte in functie van de hoogte (OMES-segment Durme)

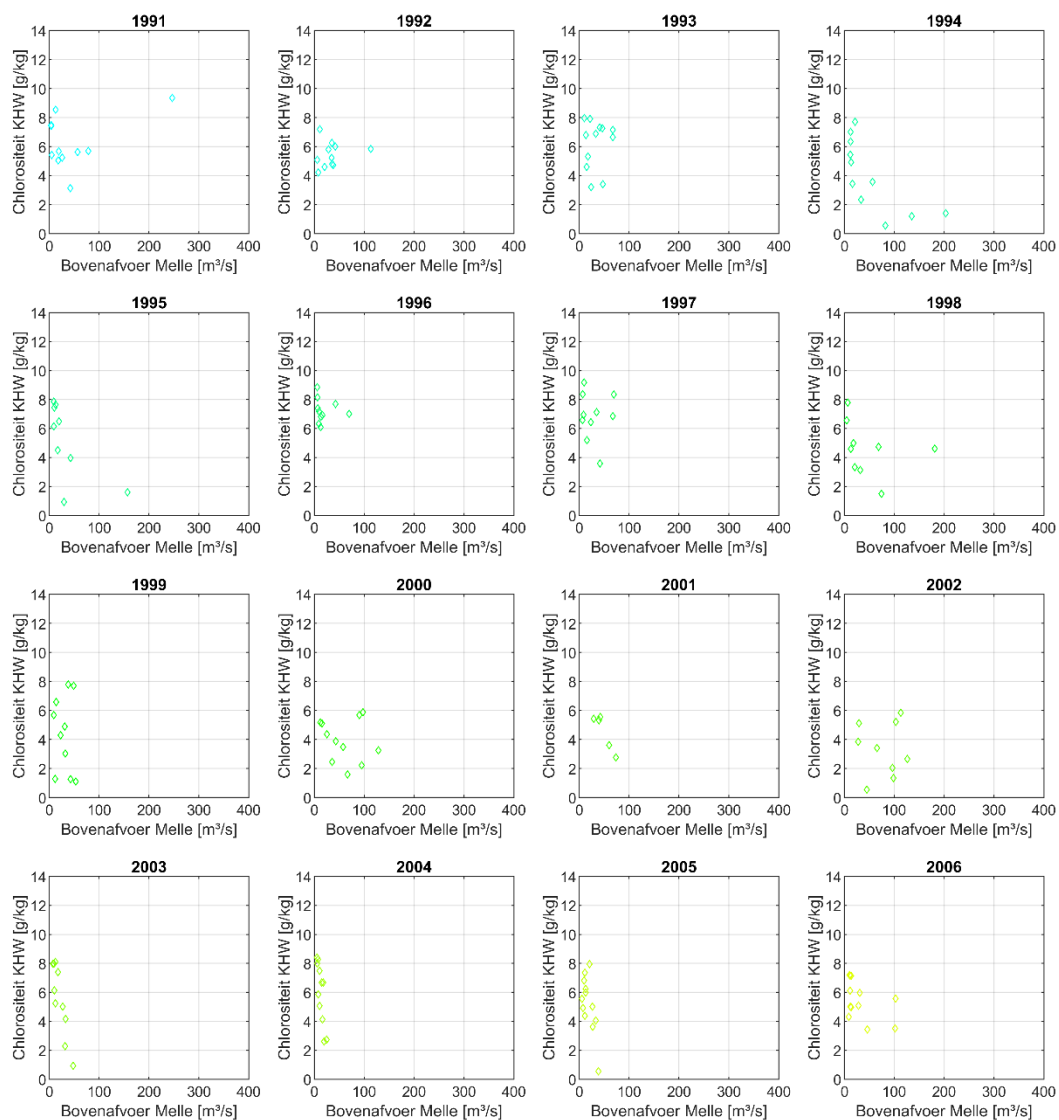


Bijlage 2 Zout

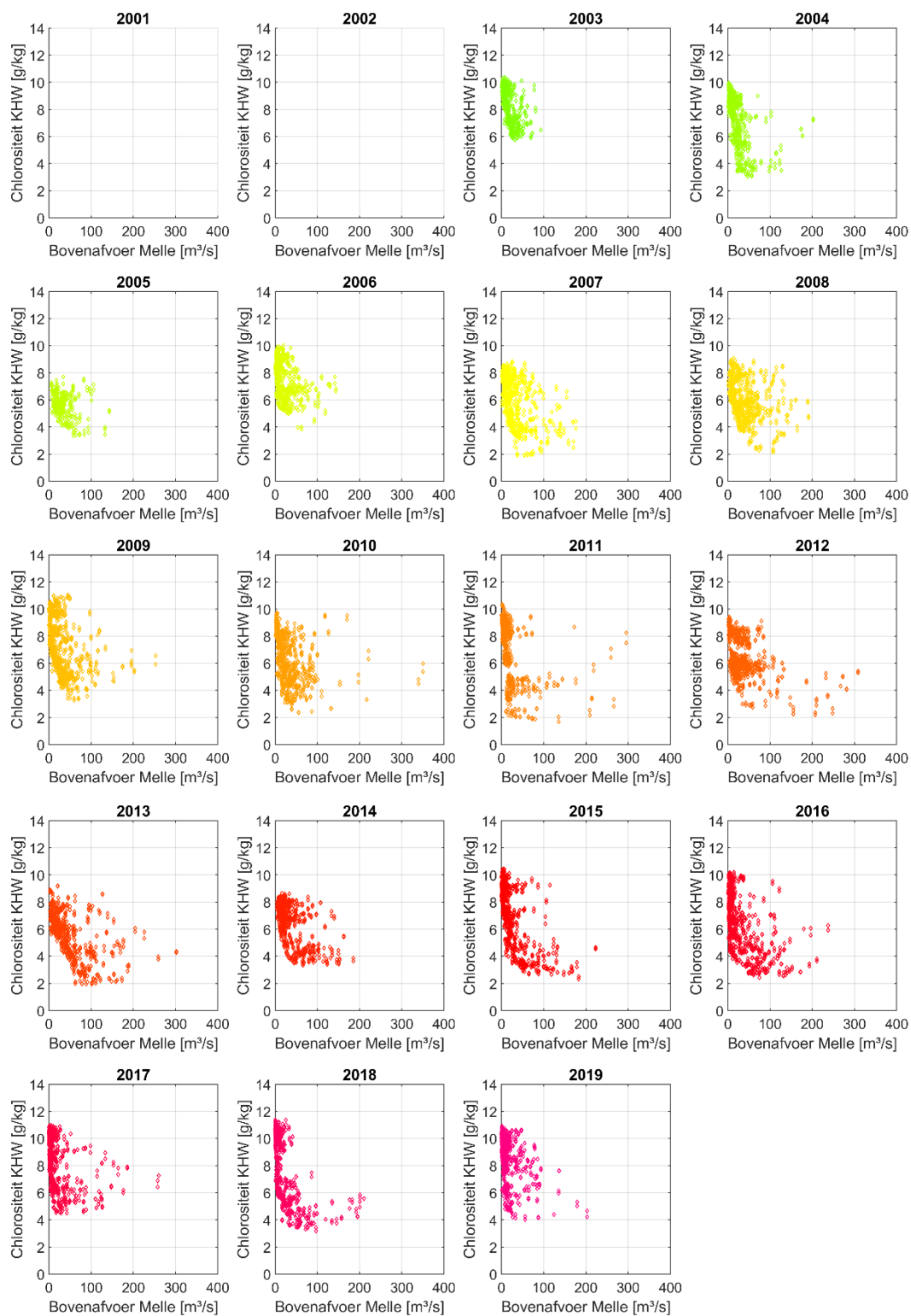
Figuur 72 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Prosperpolder o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)



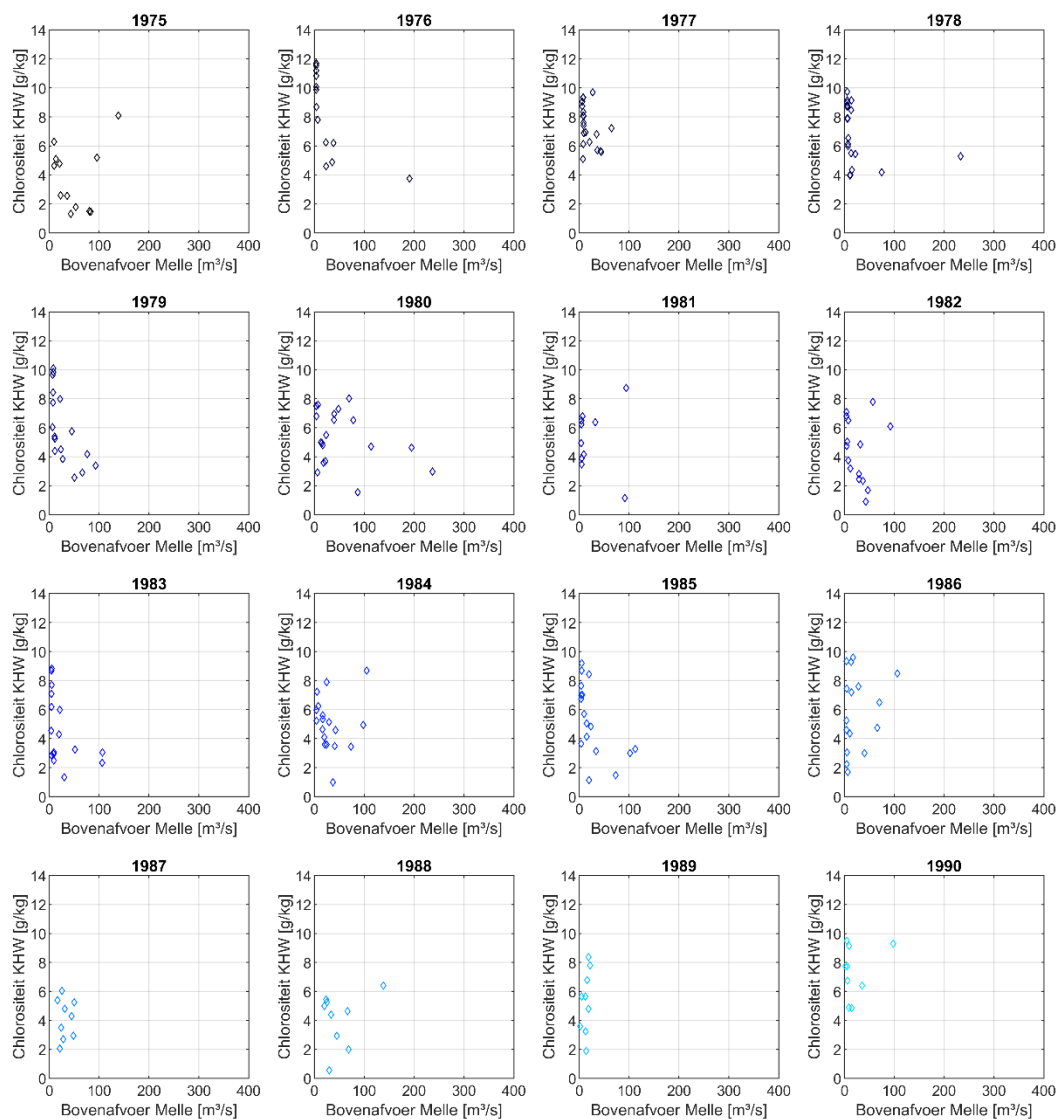
Figuur 73 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Prosperpolder o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)



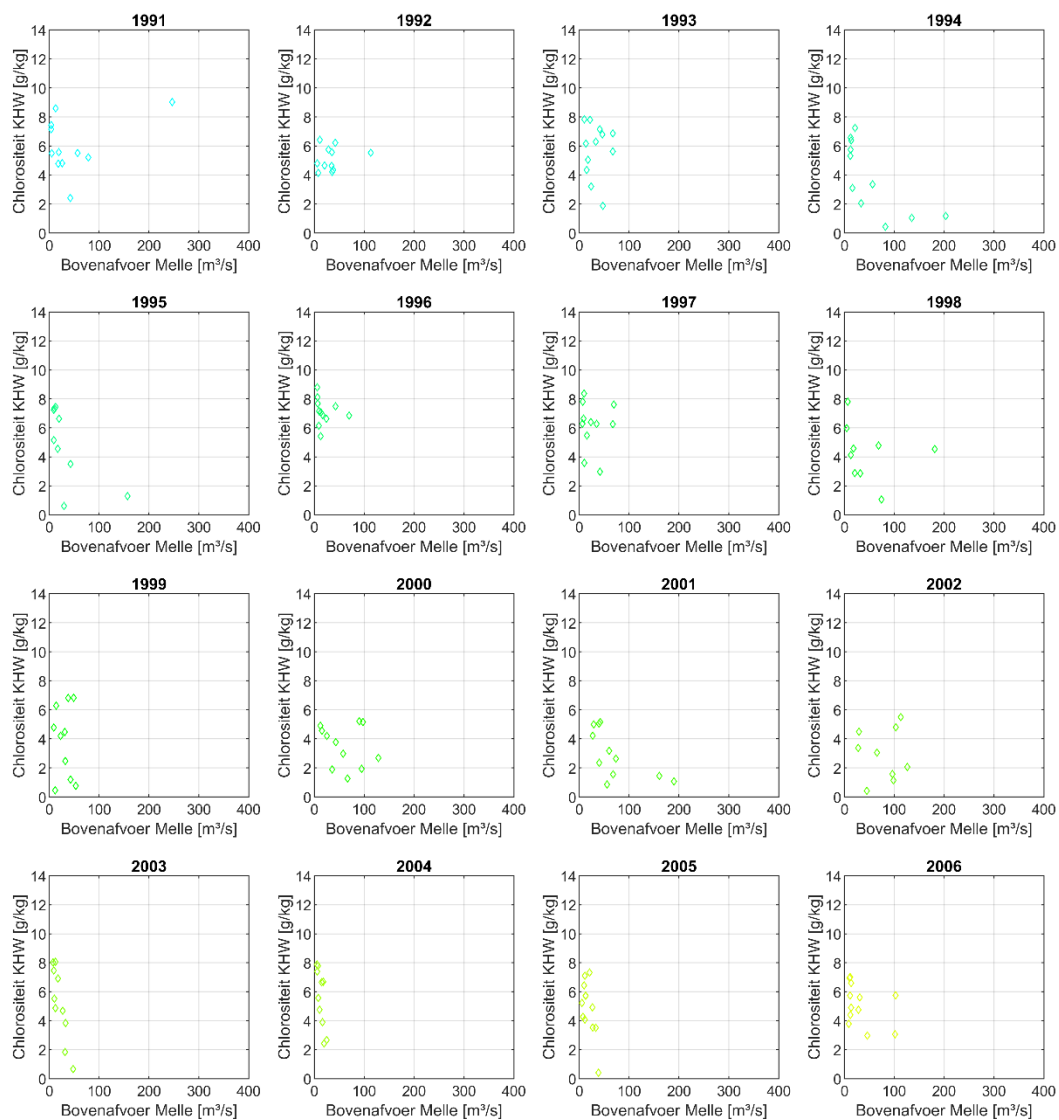
Figuur 74 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Prosperpolder o.b.v. de continue metingen



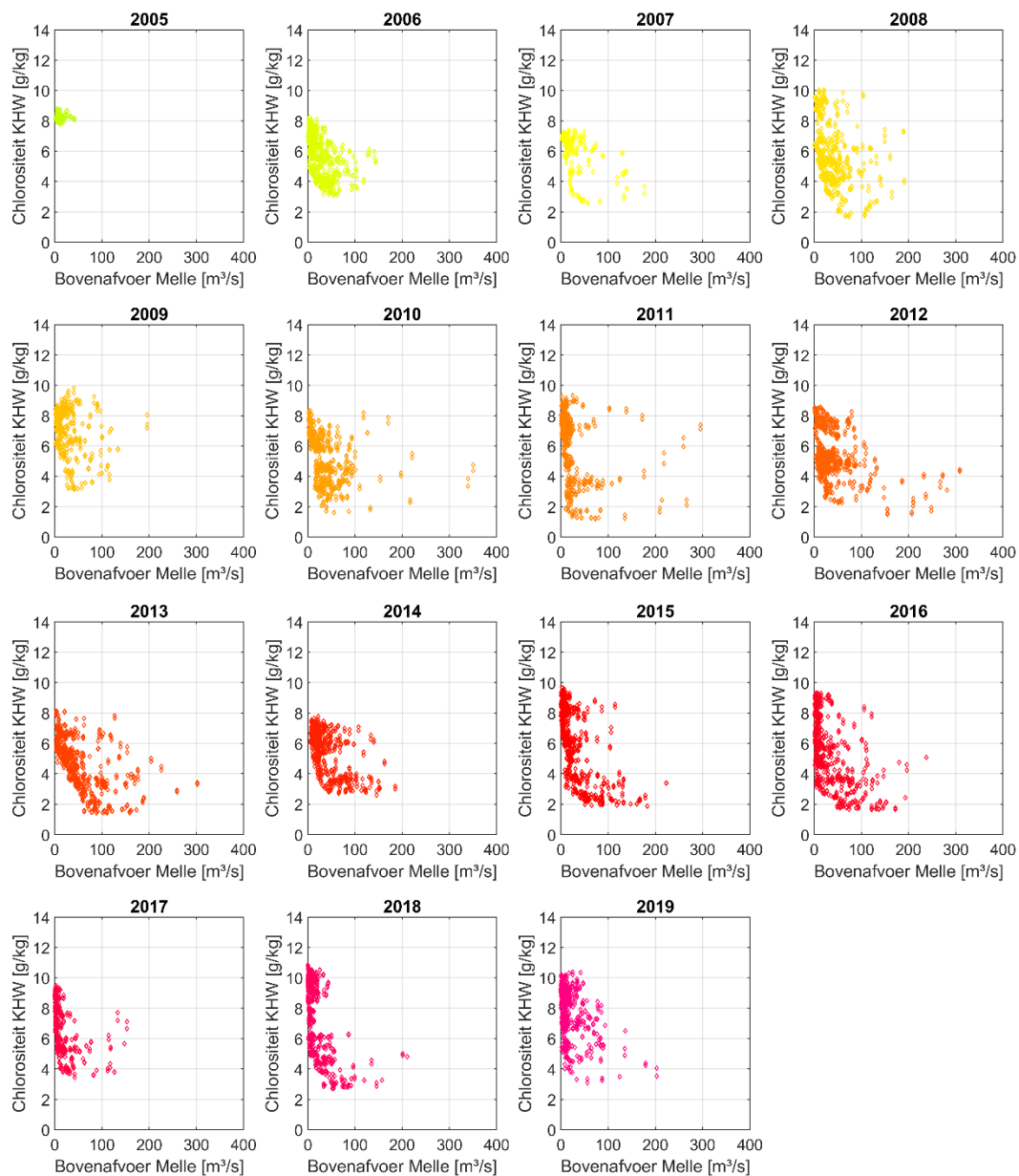
Figuur 75 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Boei84/Lillo o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)



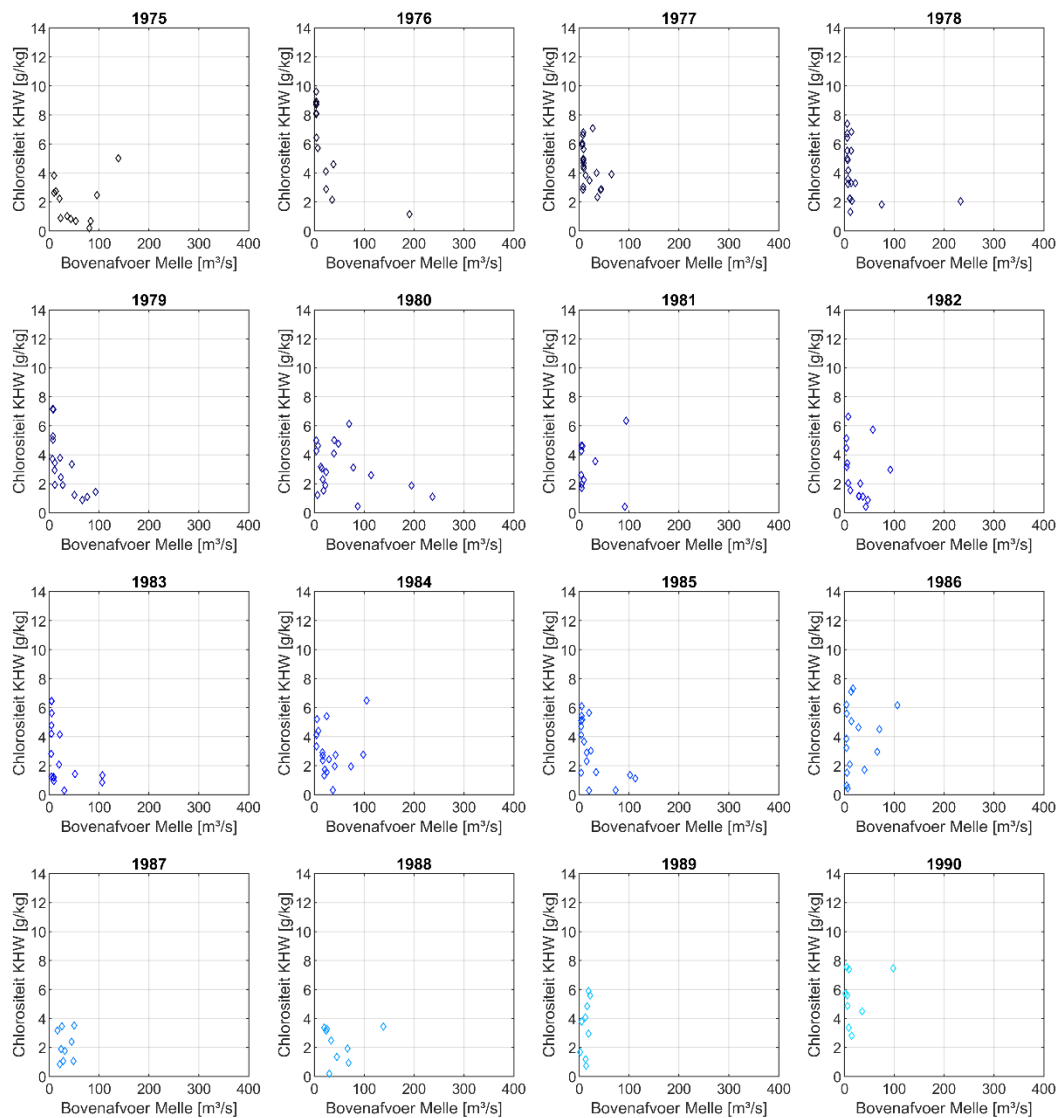
Figuur 76 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Boei84/Lillo o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)



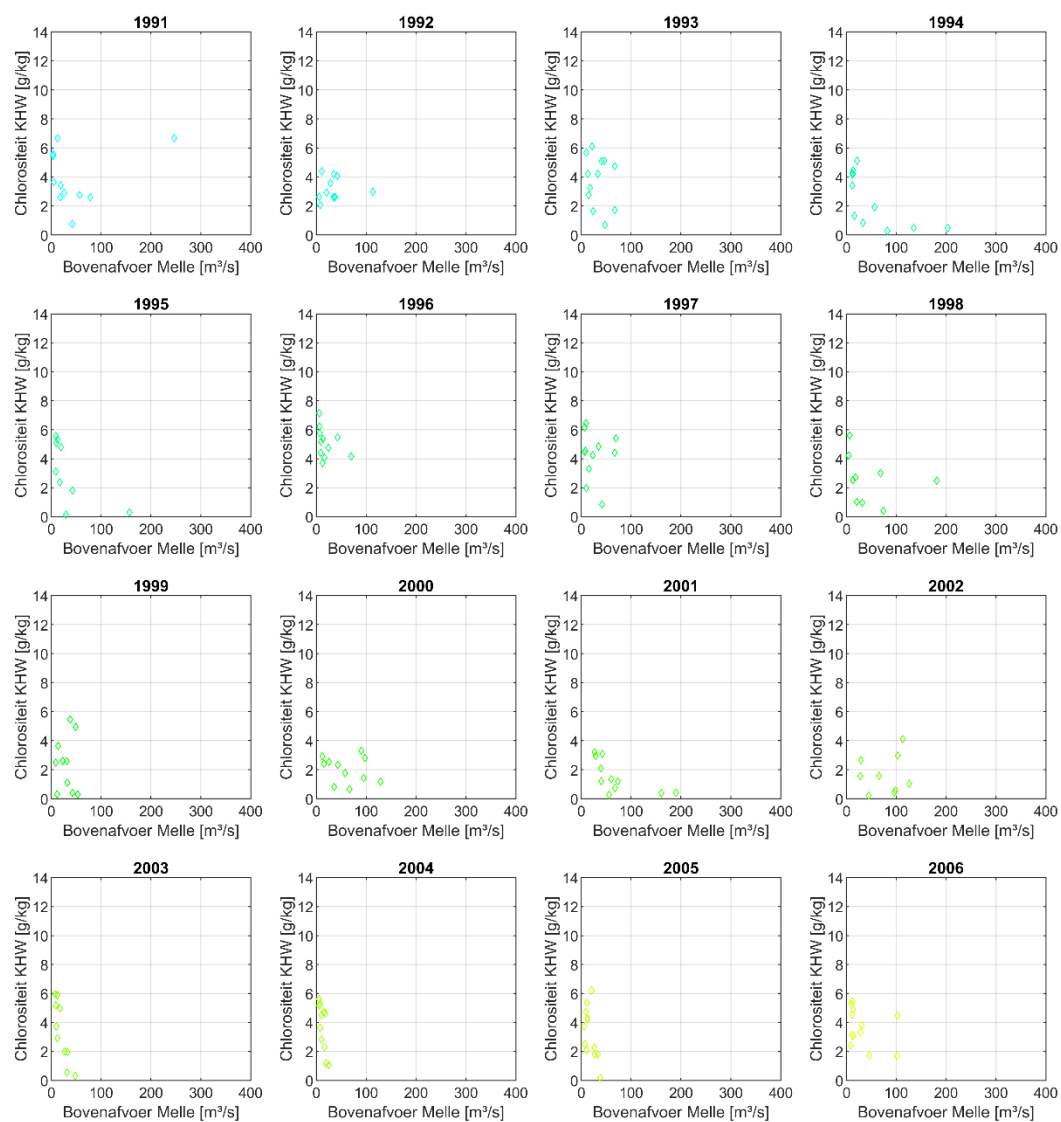
Figuur 77 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Boei84/Lillo o.b.v. de continue metingen



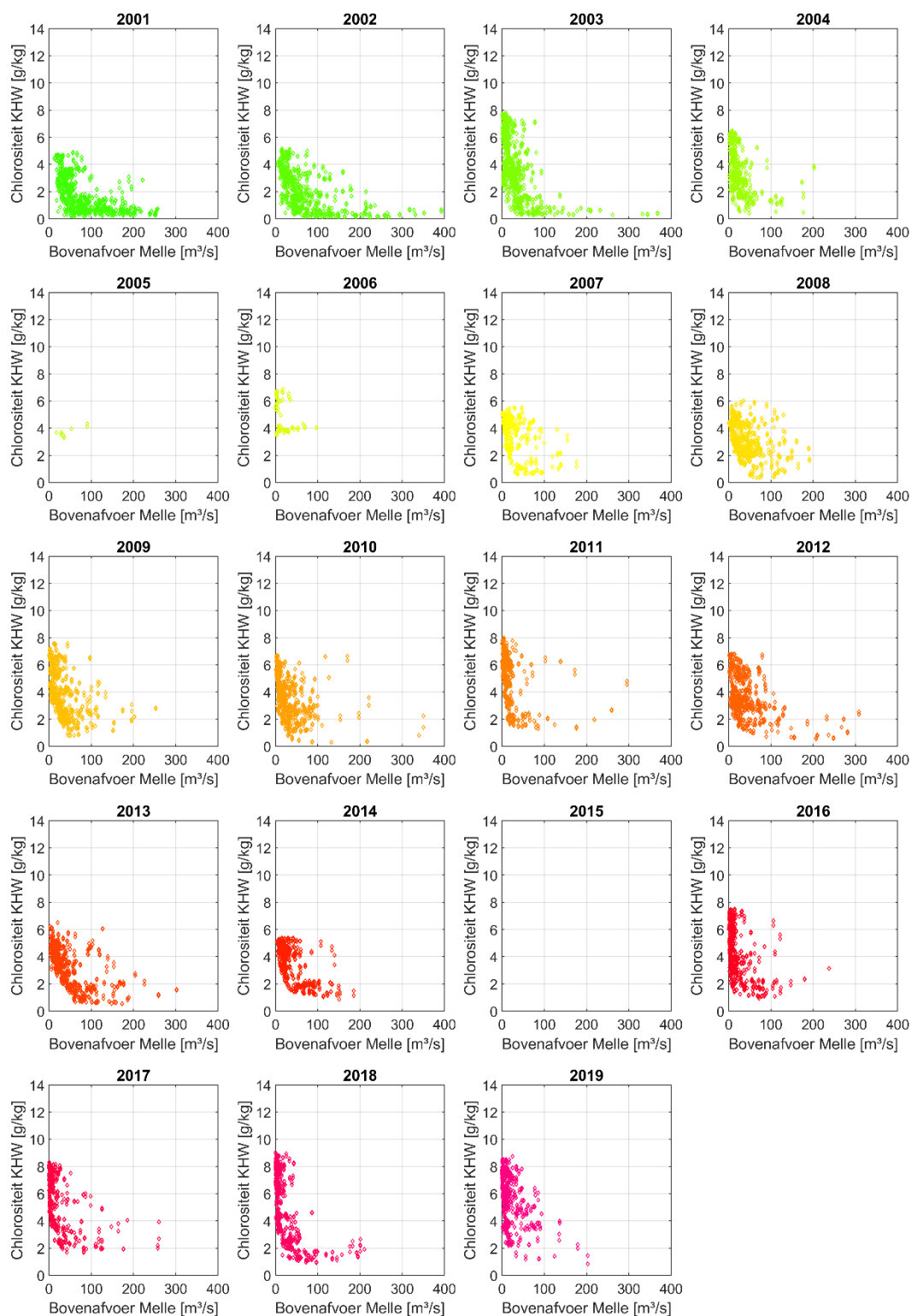
Figuur 78 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Oosterweel o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)



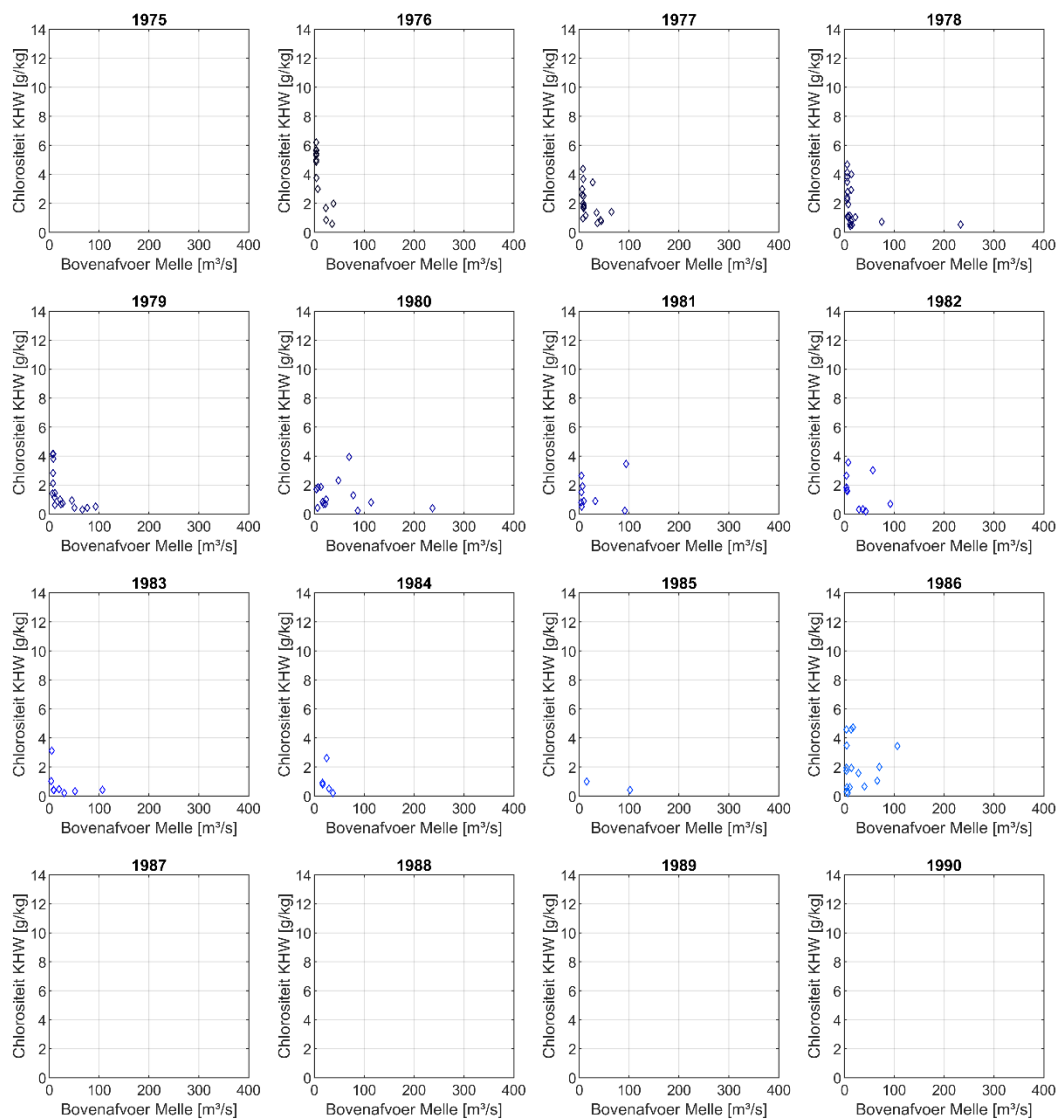
Figuur 79 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Oosterweel o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)



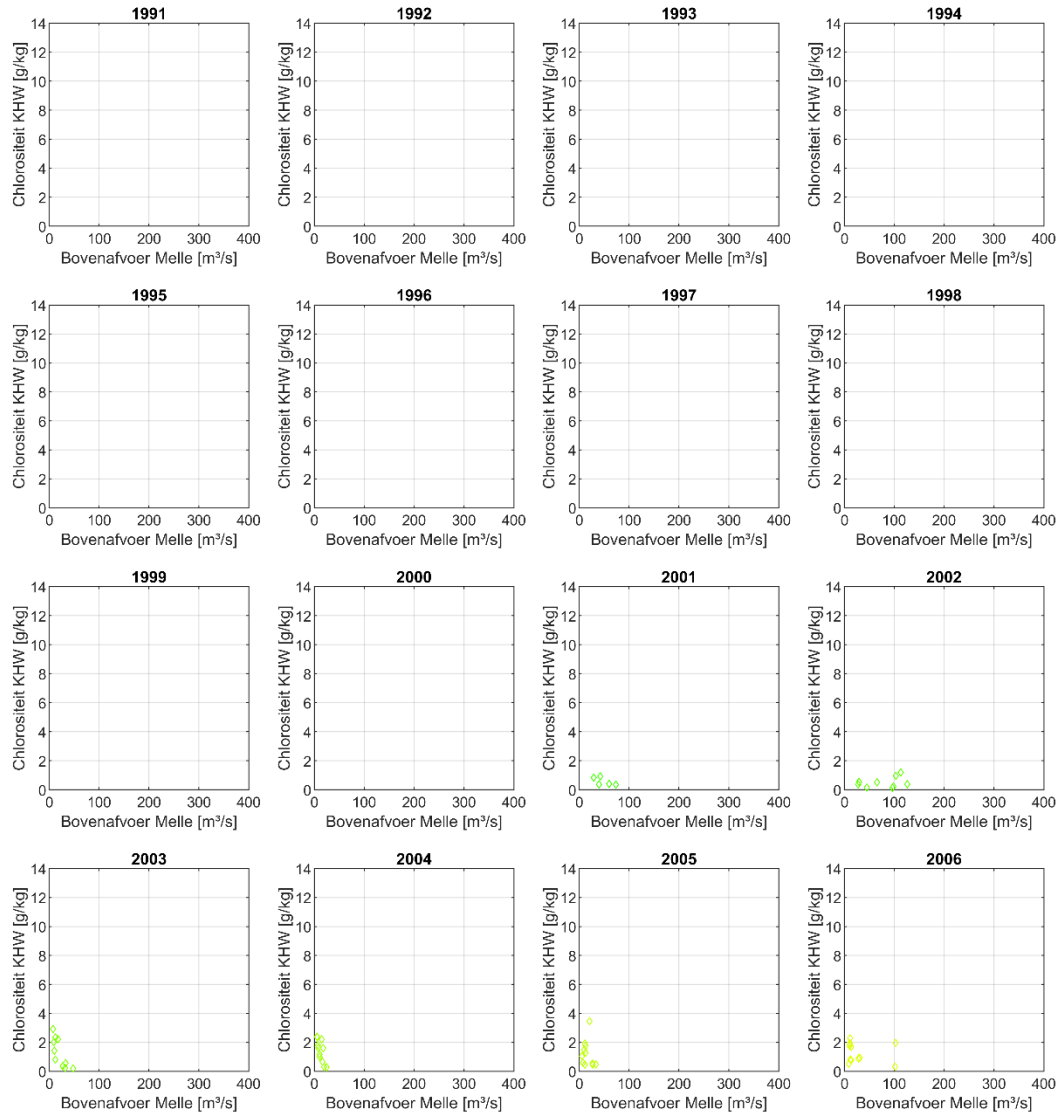
Figuur 80 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Oosterweel o.b.v. de continue metingen



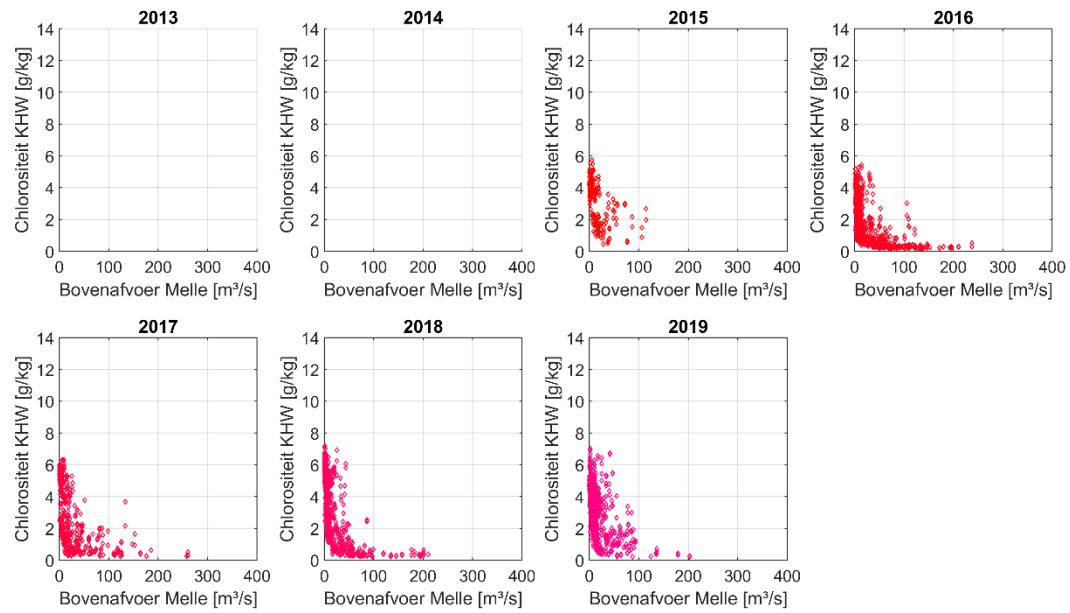
Figuur 81 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Kruibeke o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)



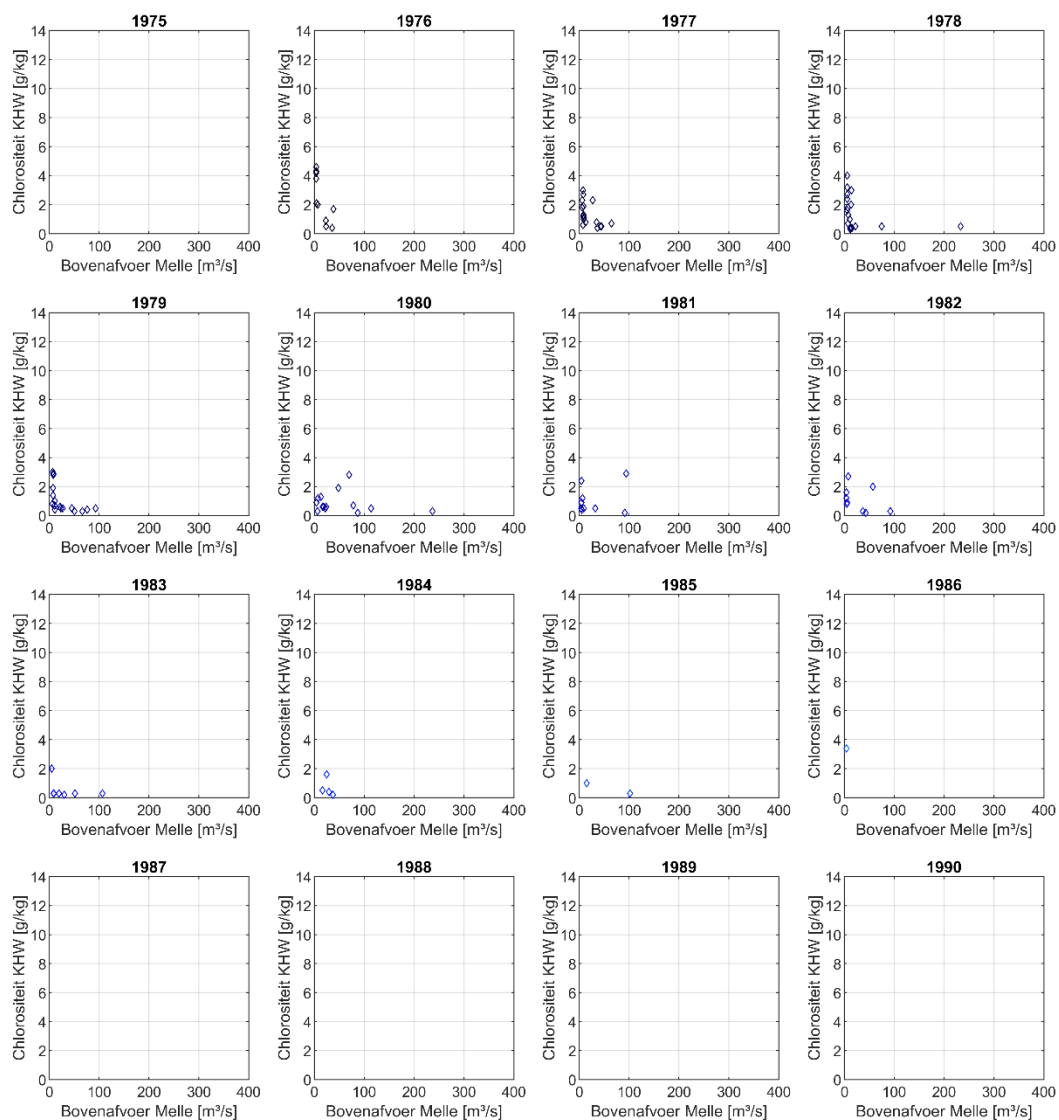
Figuur 82 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Kruibeke o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)



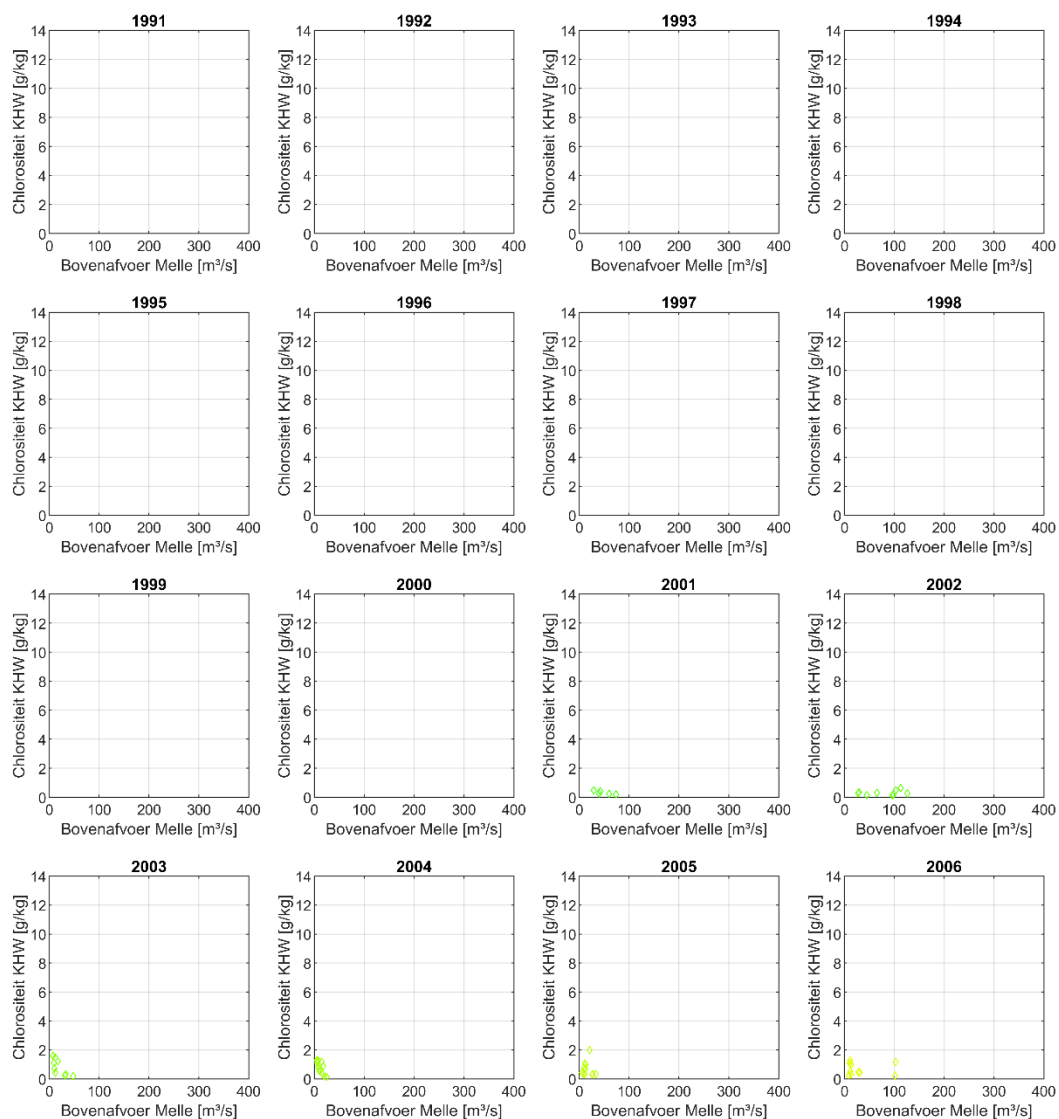
Figuur 83 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Kruibeke o.b.v. de continue metingen



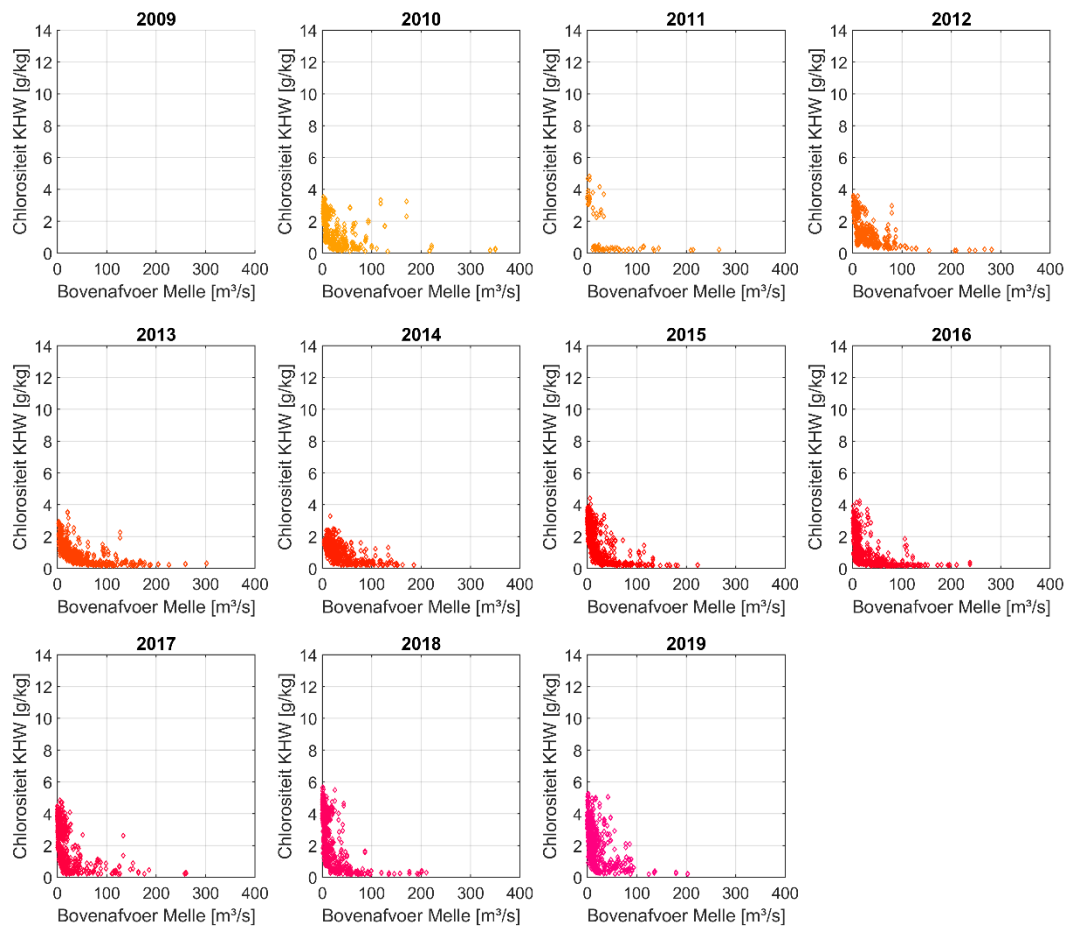
Figuur 84 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Hemiksem o.b.v. de langsvaarten (1975-1990)



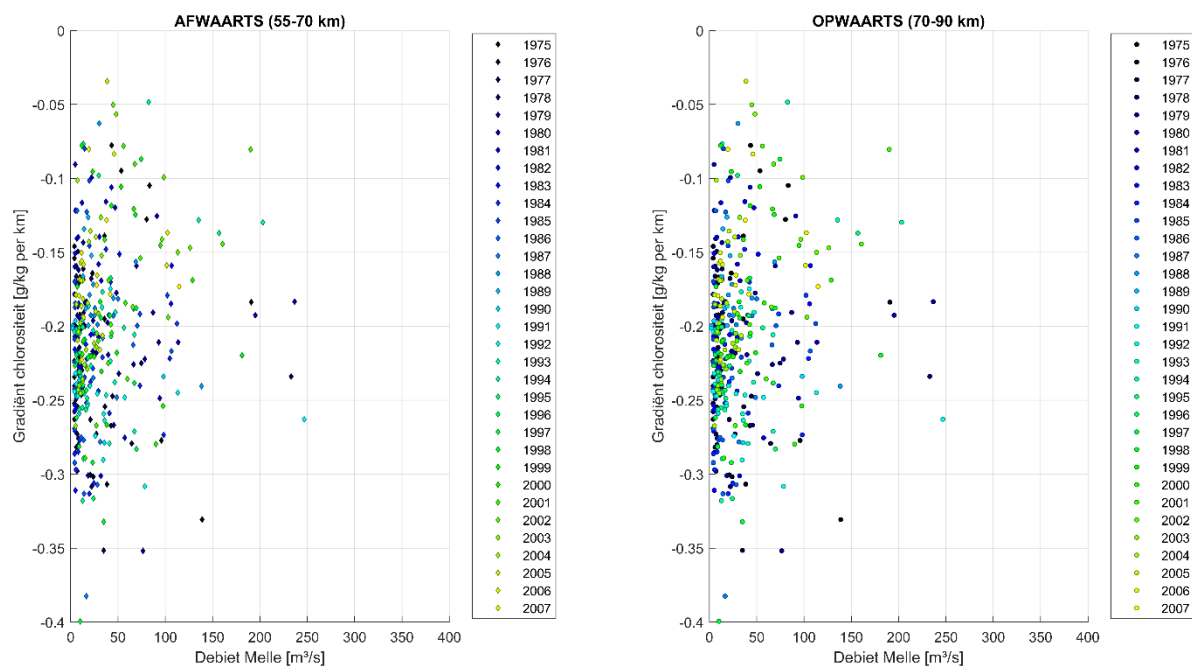
Figuur 85 – Relatie tussen zoutgehalte (chlorositeit) en debiet voor Hemiksem o.b.v. de langsvaarten (1991-2006)



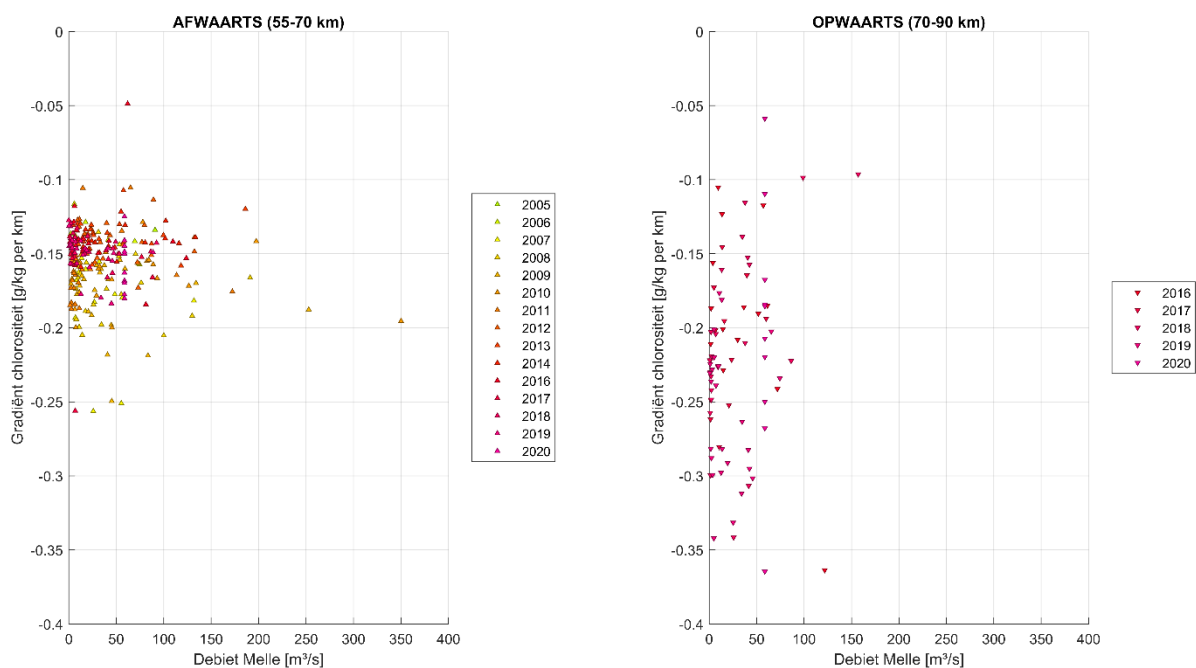
Figuur 86 – Relatie tussen het zoutgehalte (chlorositeit) en het debiet voor Hemiksem o.b.v. de continue metingen



Figuur 87 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het debiet voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. de langsvaarten

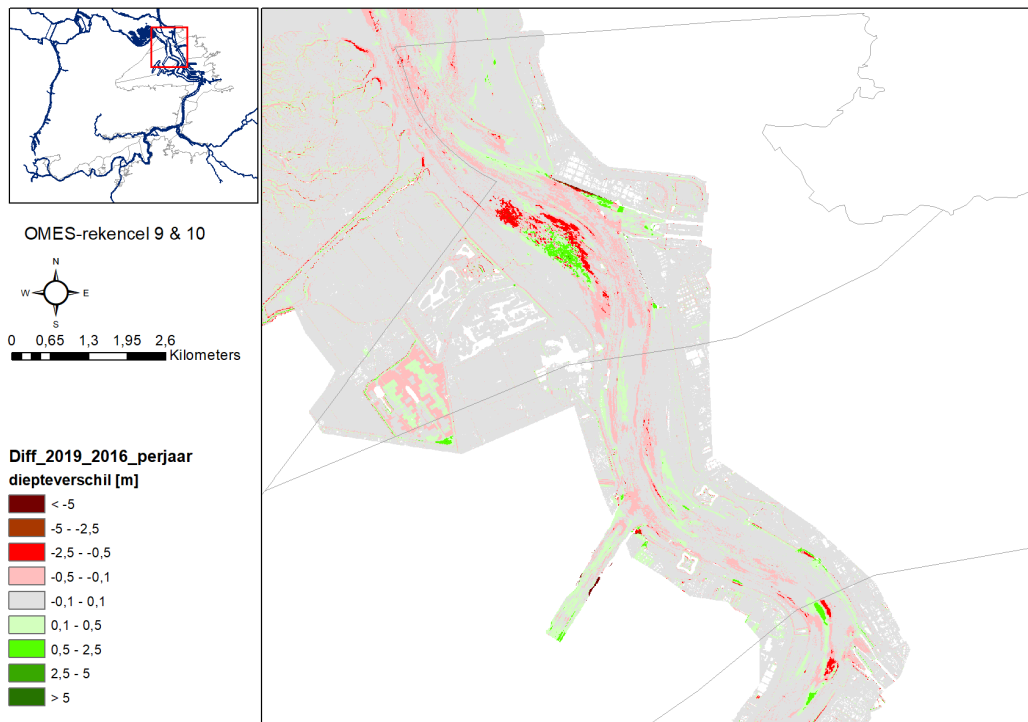


Figuur 88 – Langsgradiënt van het zoutgehalte (chlorositeit) in functie van het debiet voor het afwaartse (KM55-70, links) en opwaartse (KM70-90, rechts) deel van de Beneden-Zeeschelde o.b.v. de continue metingen

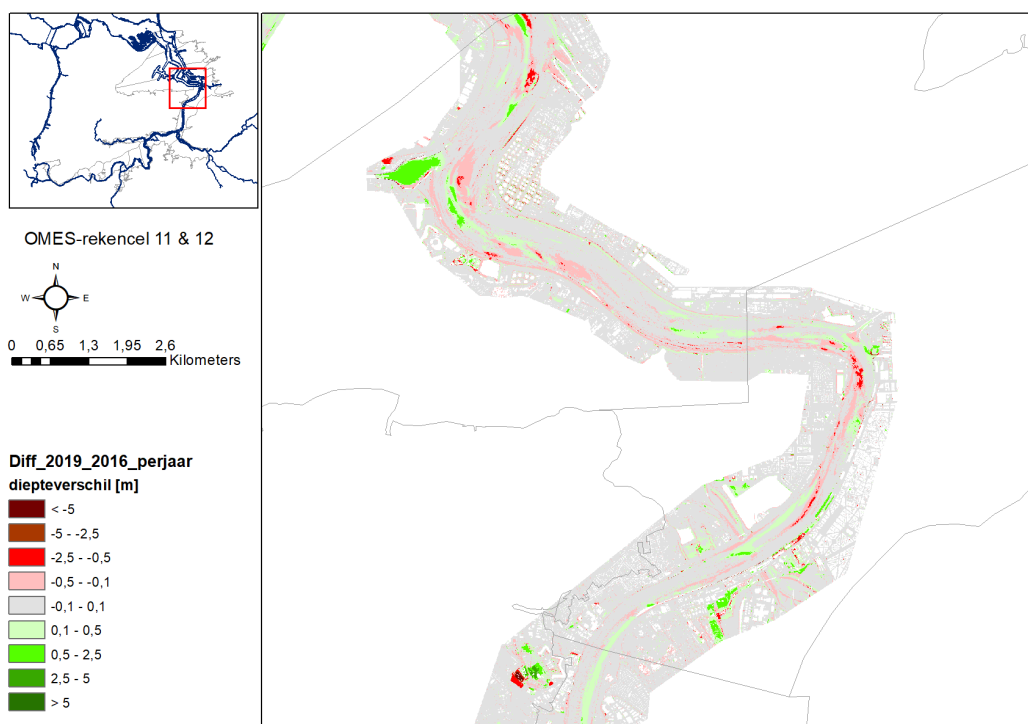


Bijlage 3 Verschilkaarten

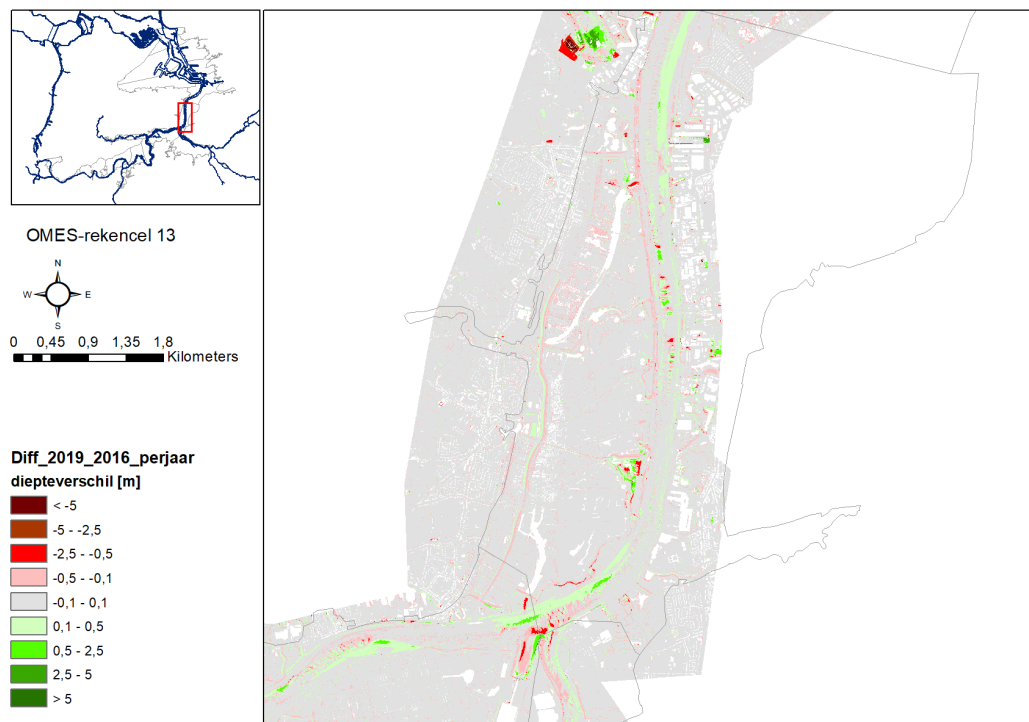
Figuur 89 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegmenten 9 en 10



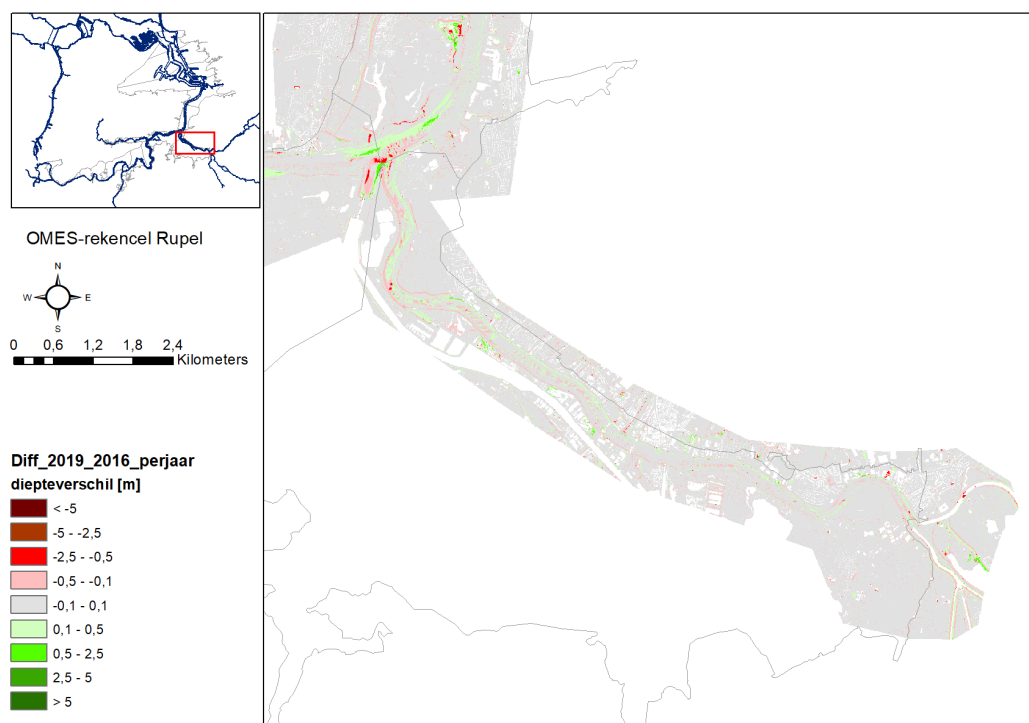
Figuur 90 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegmenten 11 en 12



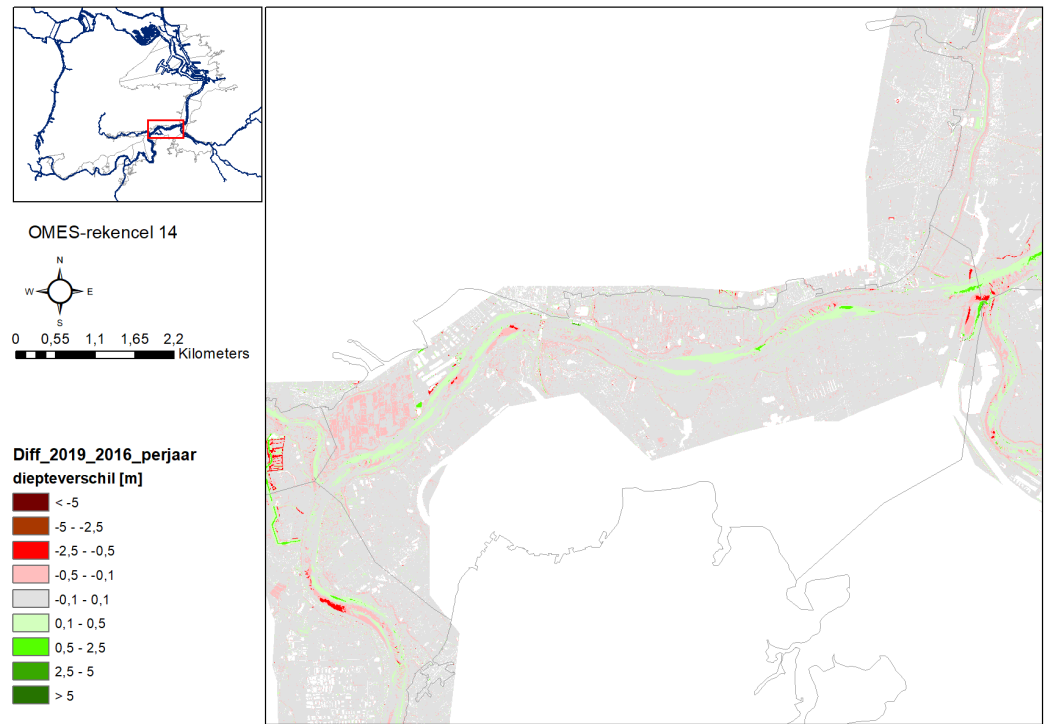
Figuur 91 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment 13



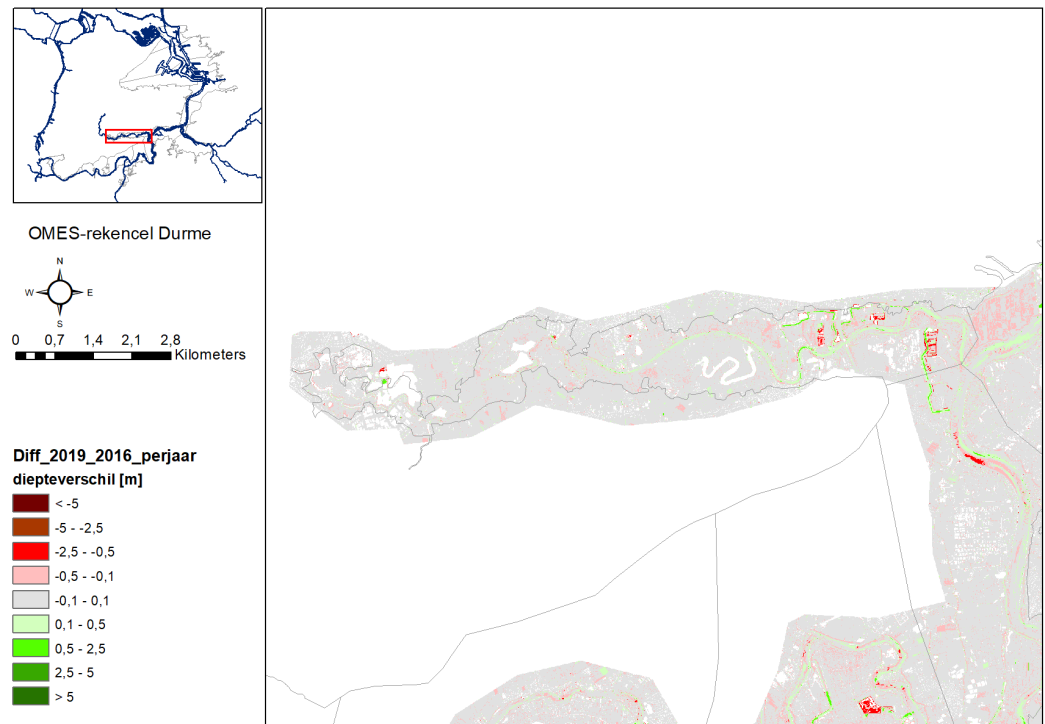
Figuur 92 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment Rupel



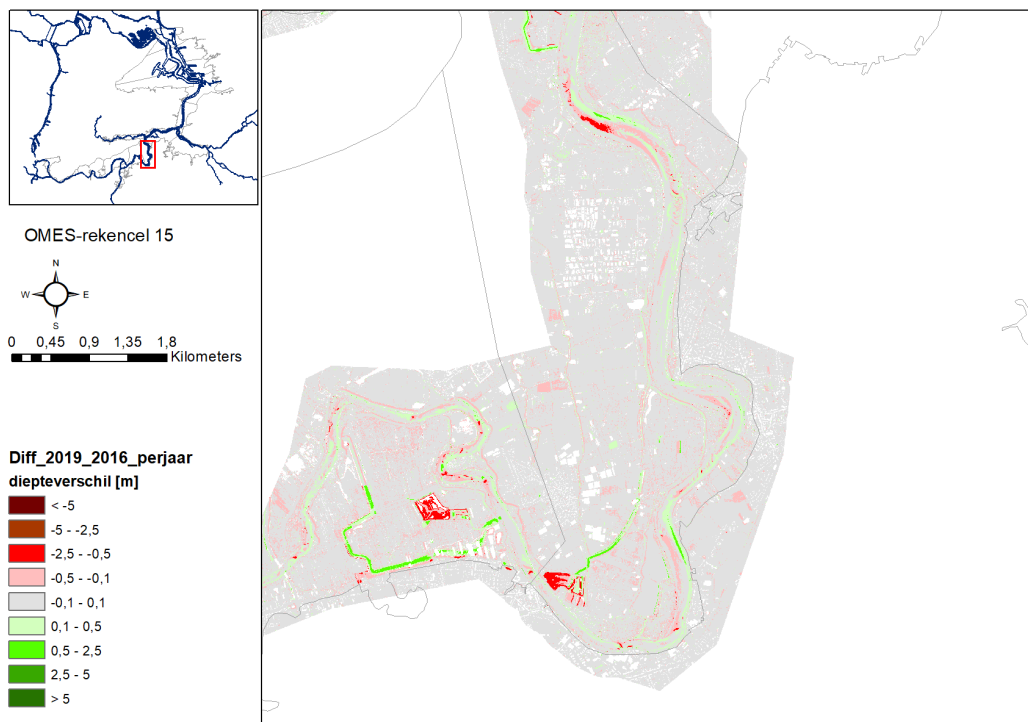
Figuur 93 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment 14



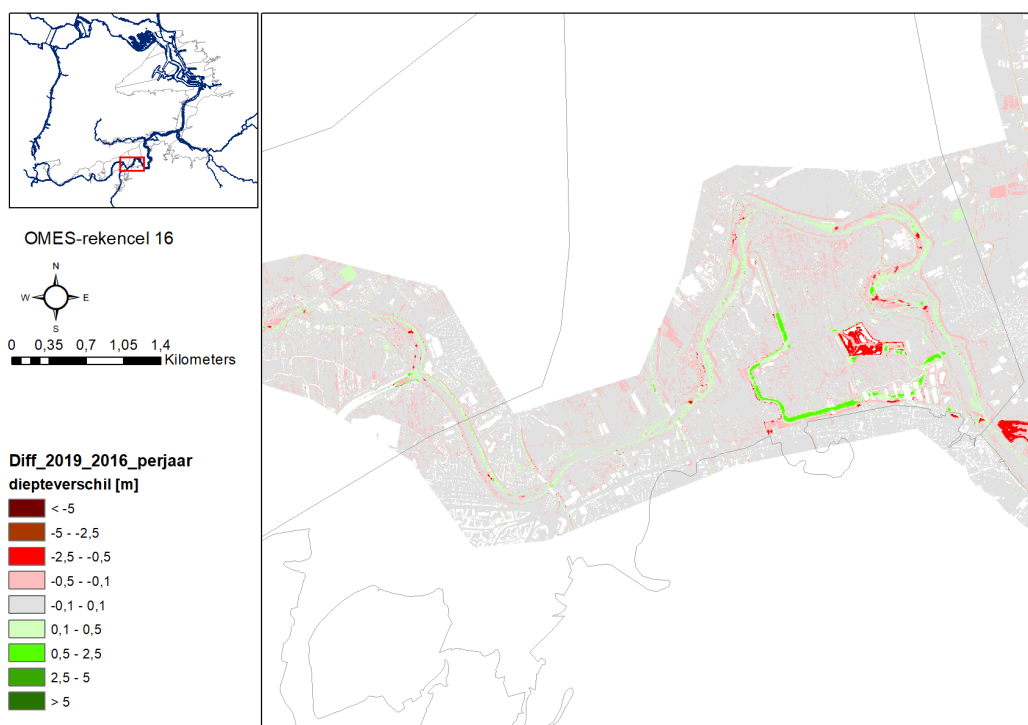
Figuur 94 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment Durme



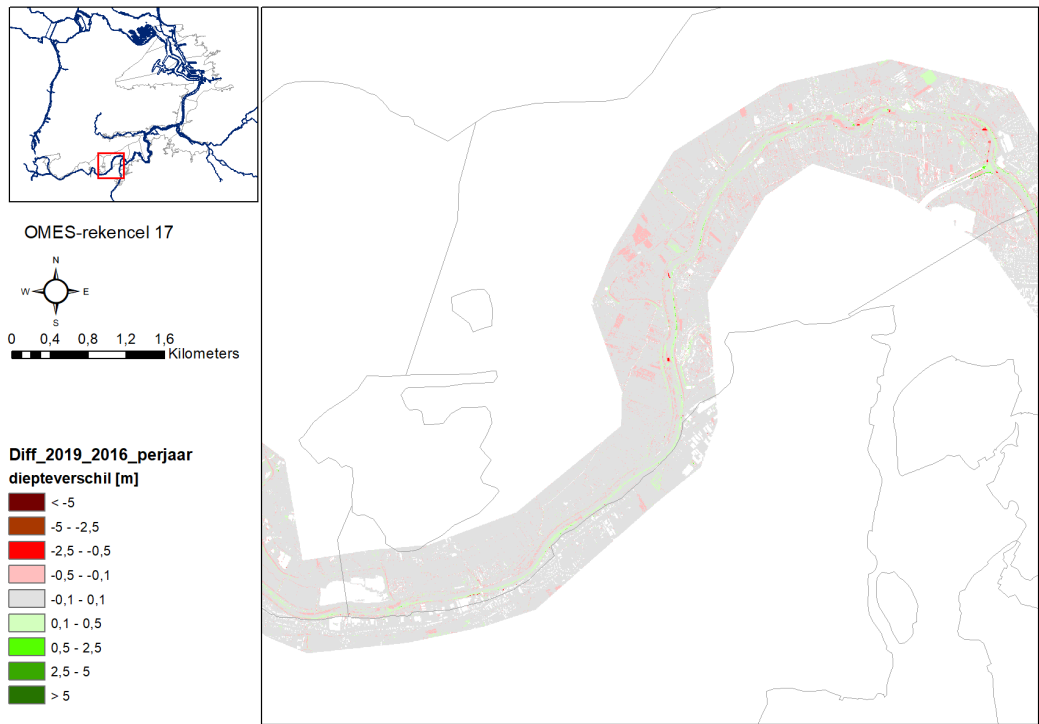
Figuur 95 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment 15



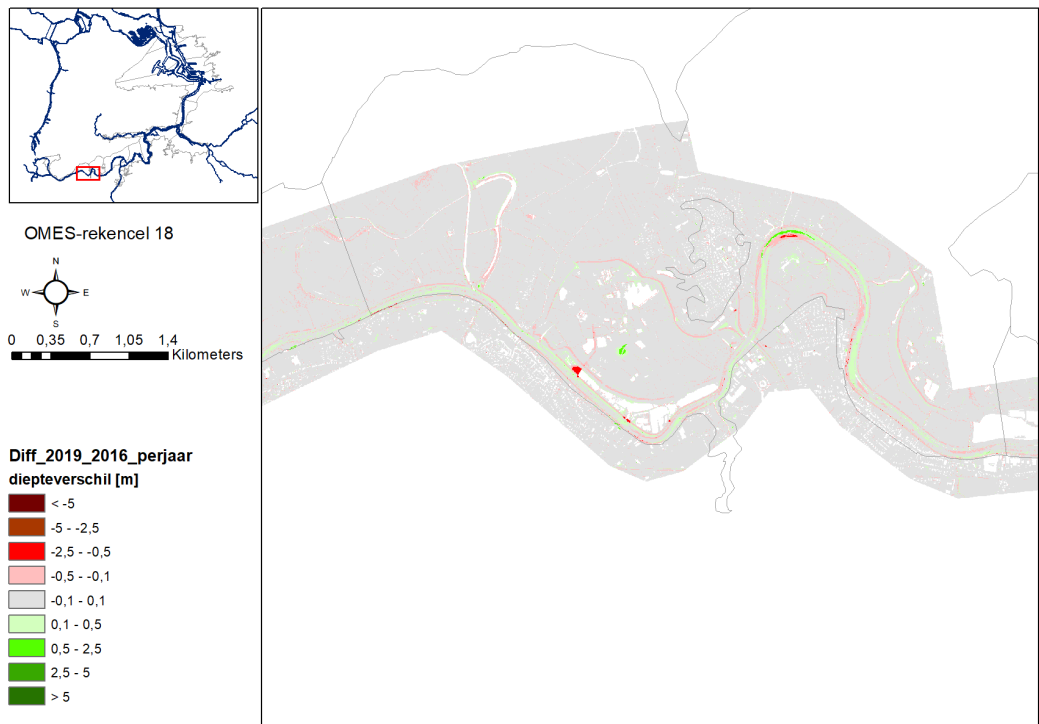
Figuur 96 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment 16



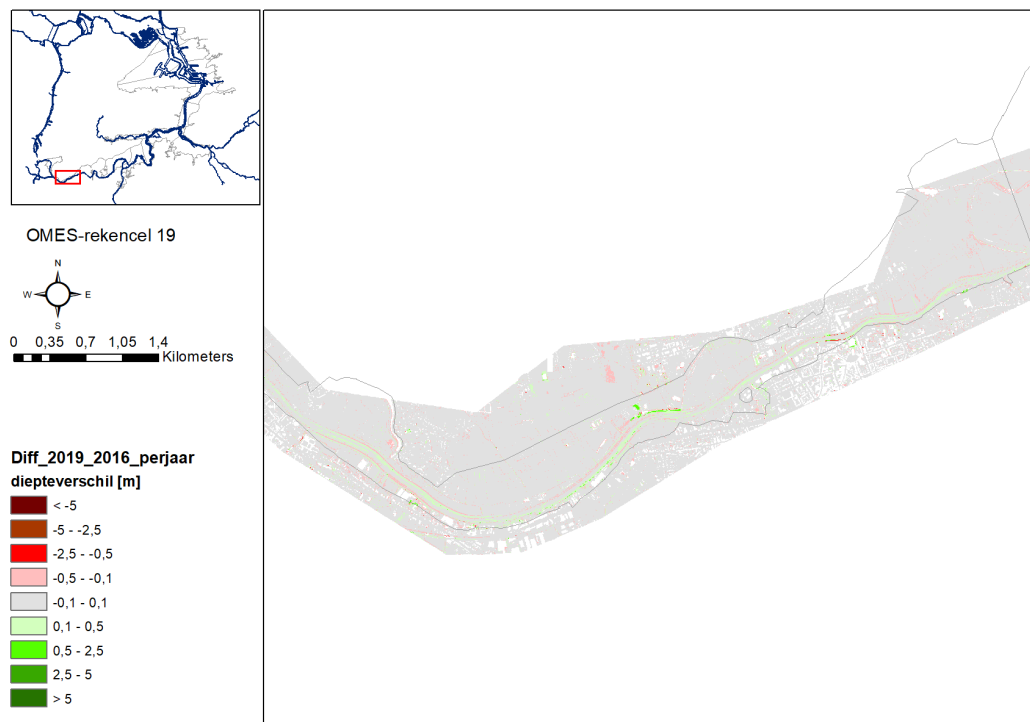
Figuur 97 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment 17



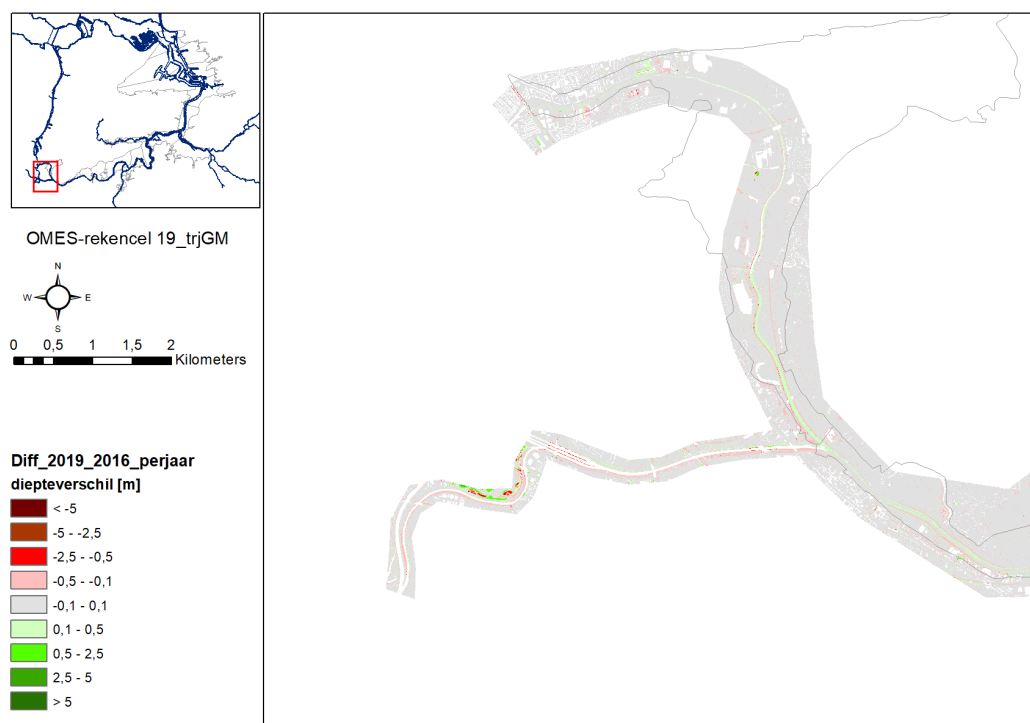
Figuur 98 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omessegment 18



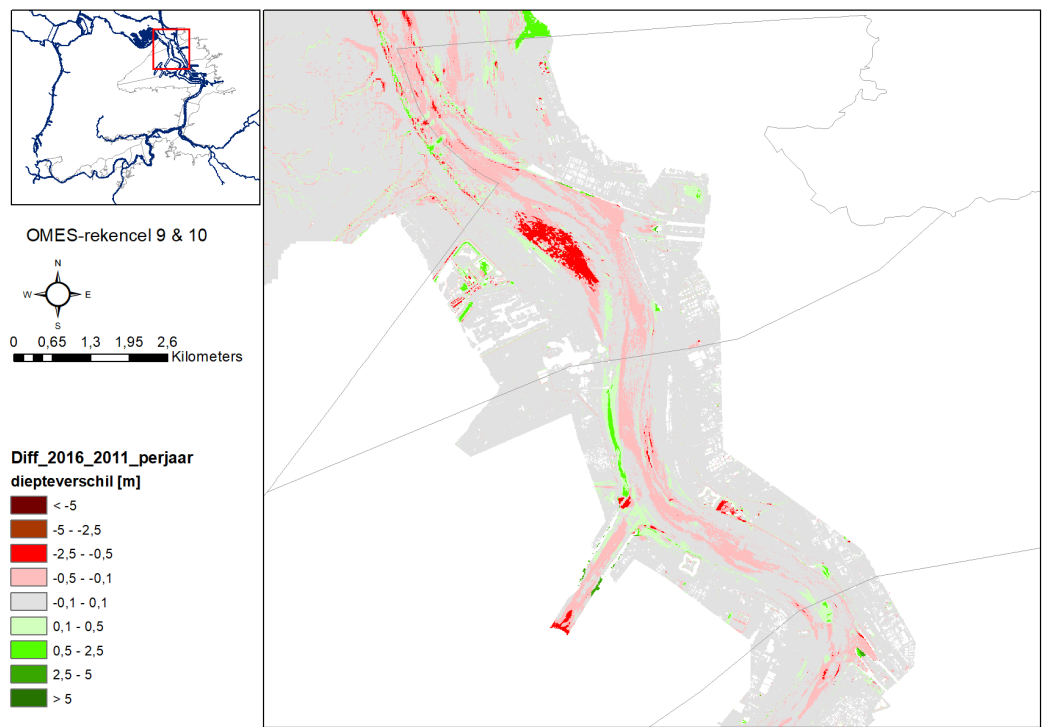
Figuur 99 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 19



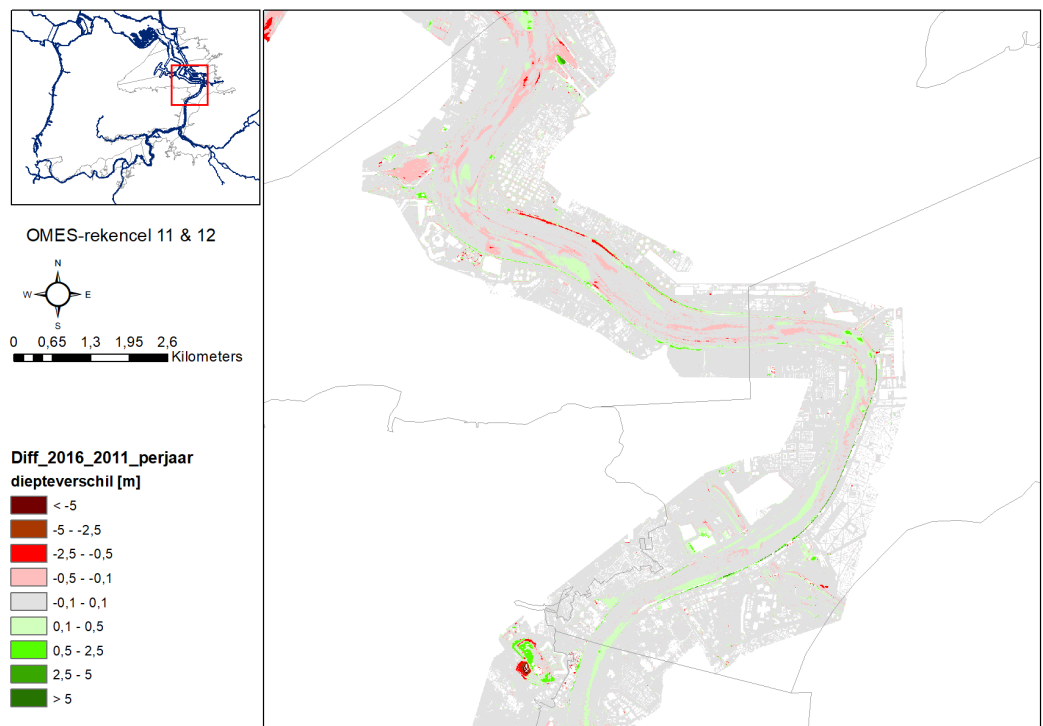
Figuur 100 – Bathymetrische verschilkaart 2019-2016 voor omesegment 19 trjGM



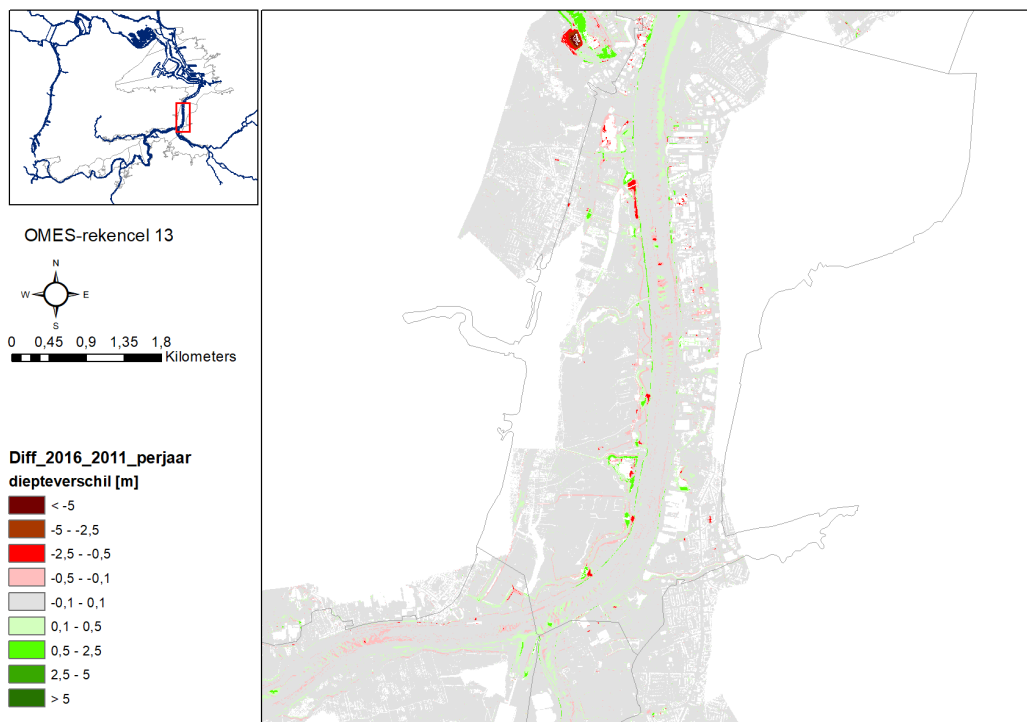
Figuur 101 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omessegmenten 9 en 10



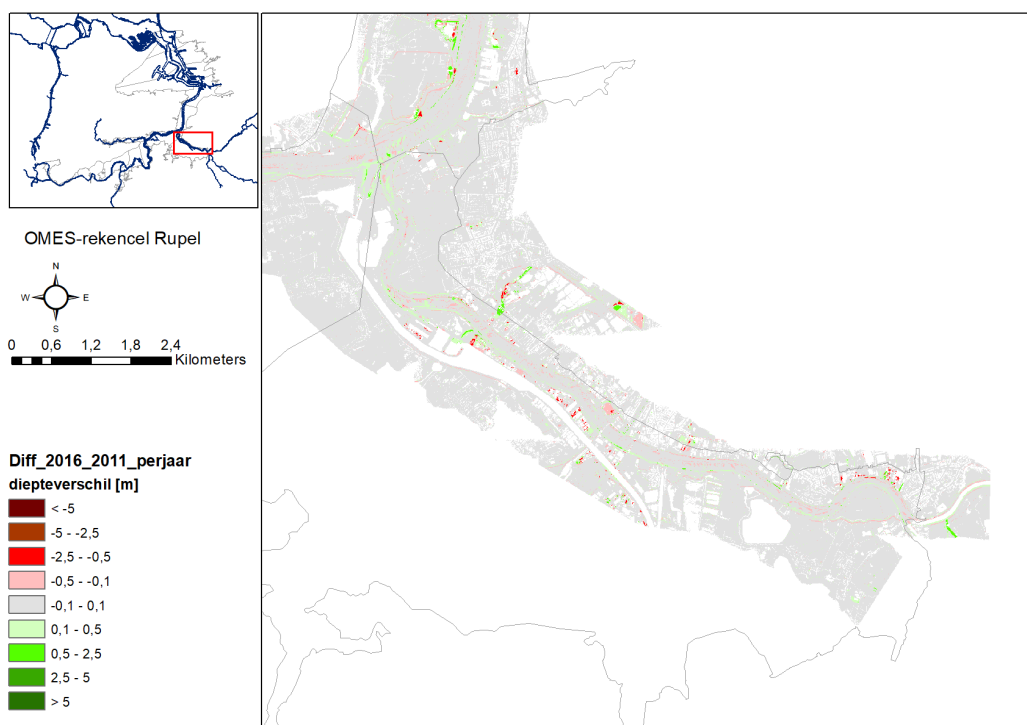
Figuur 102 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omessegmenten 11 en 12



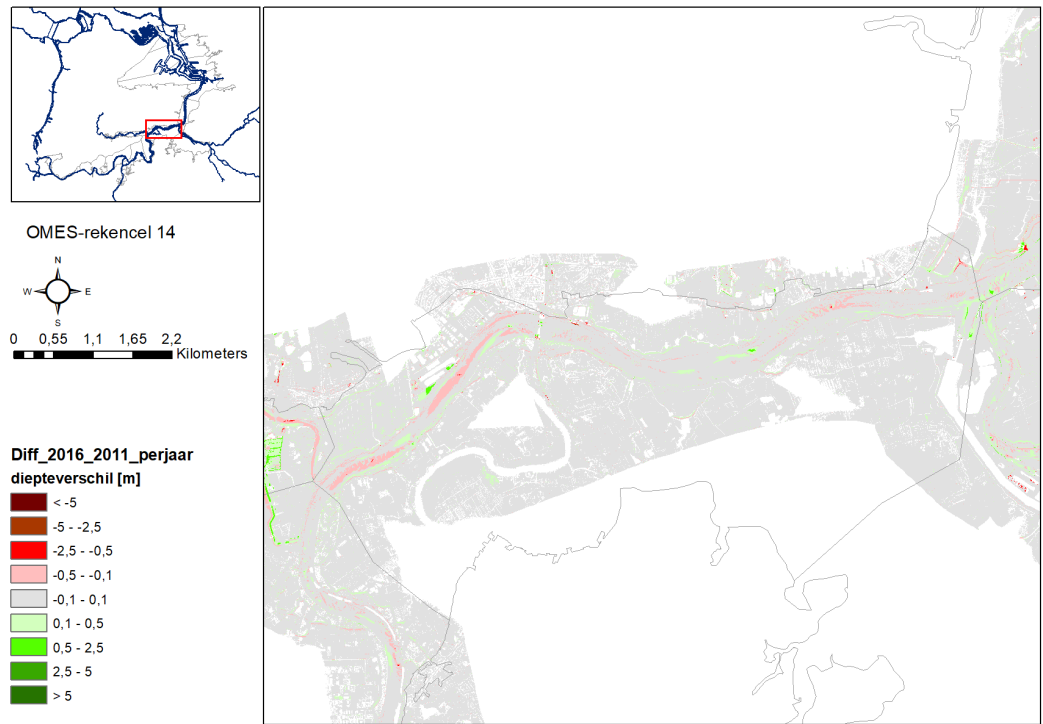
Figuur 103 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omessegmenten 13



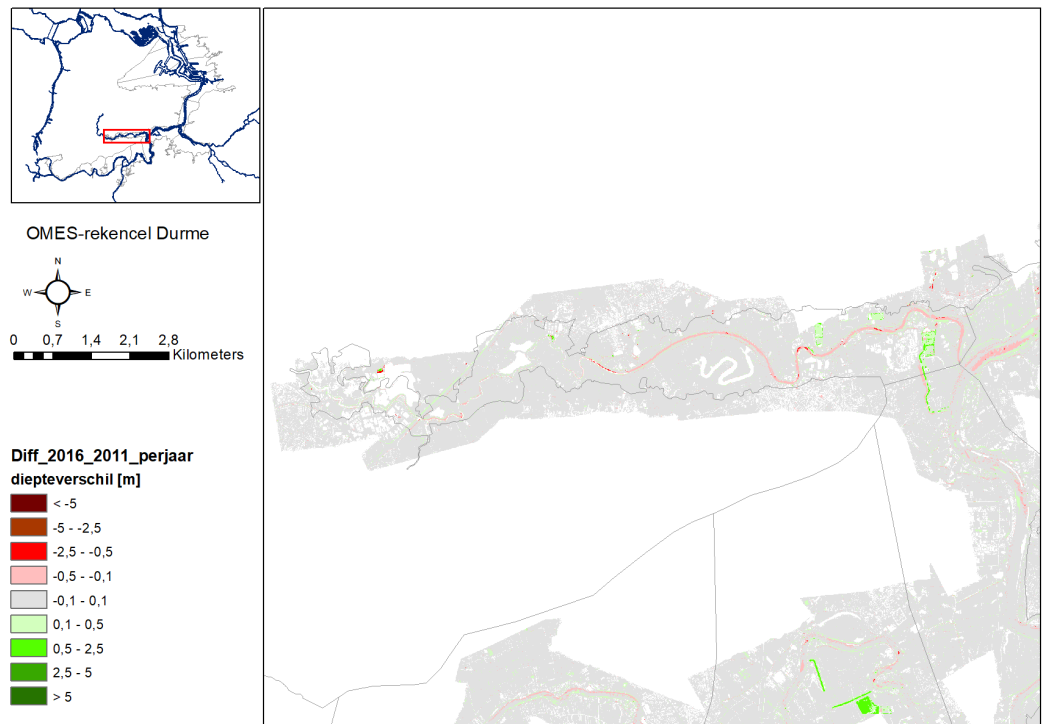
Figuur 104 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omessegment Rupel



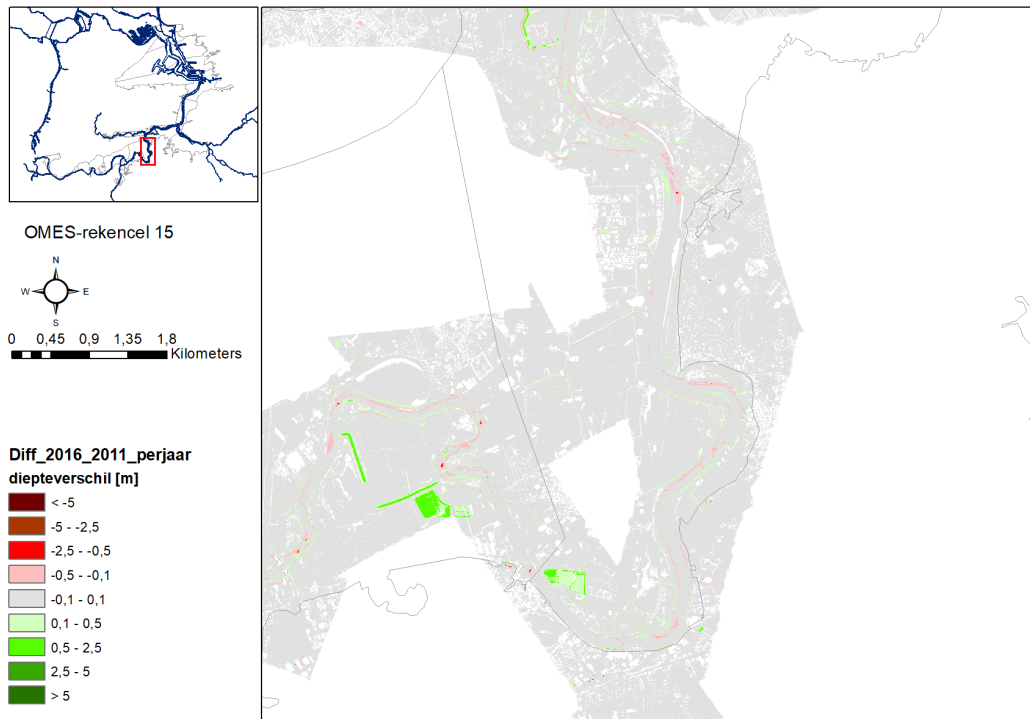
Figuur 105 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 14



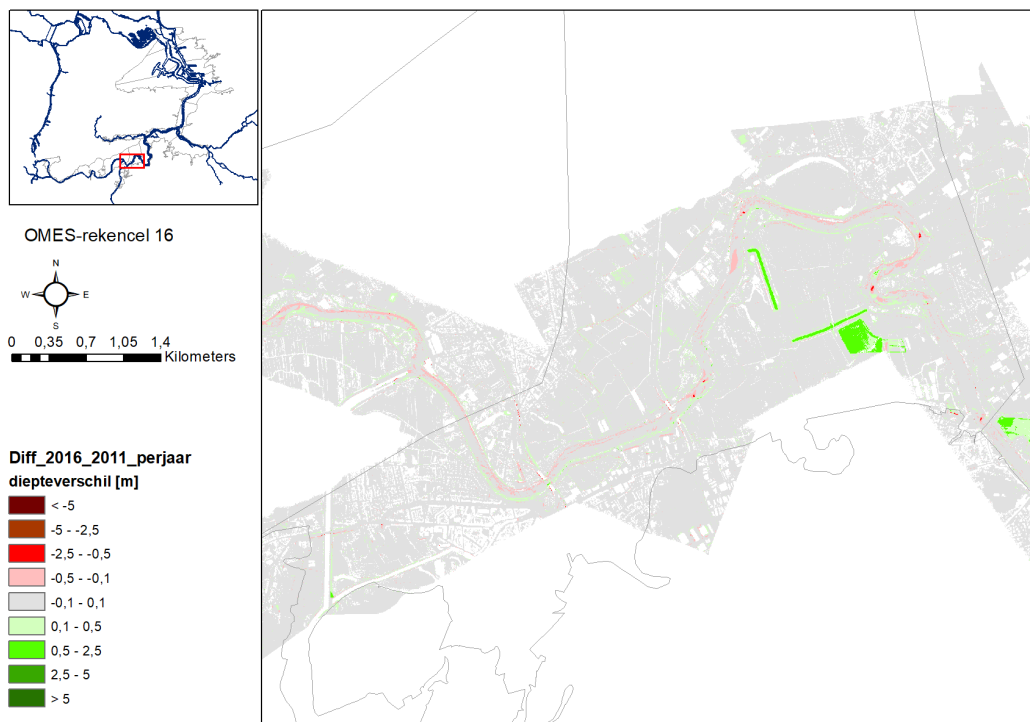
Figuur 106 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment Durme



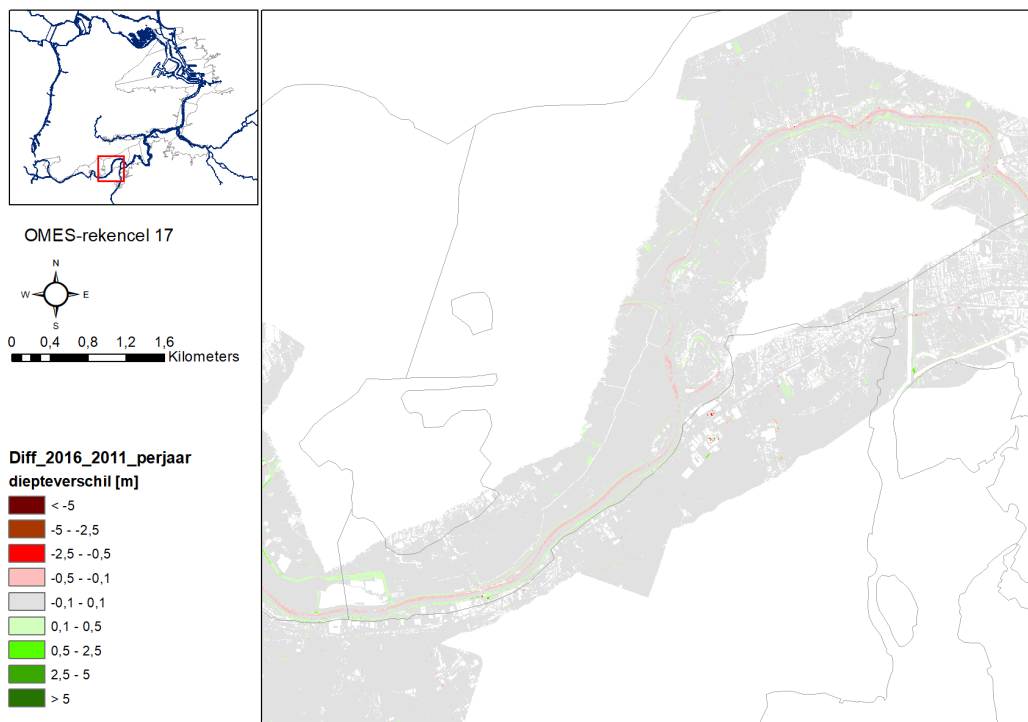
Figuur 107 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 15



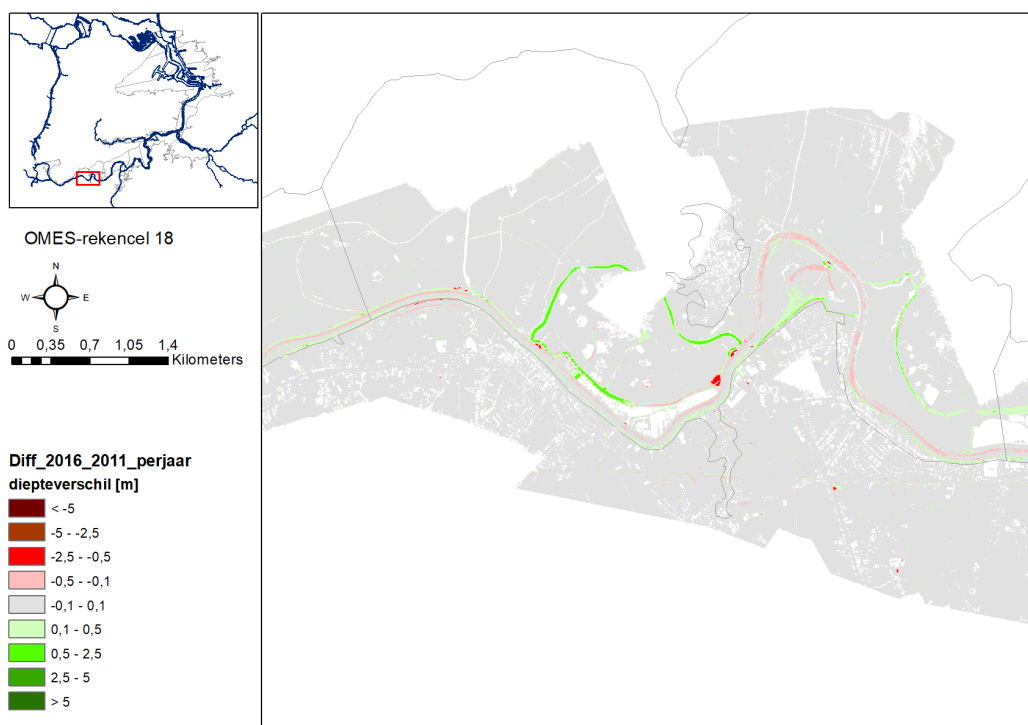
Figuur 108 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 16



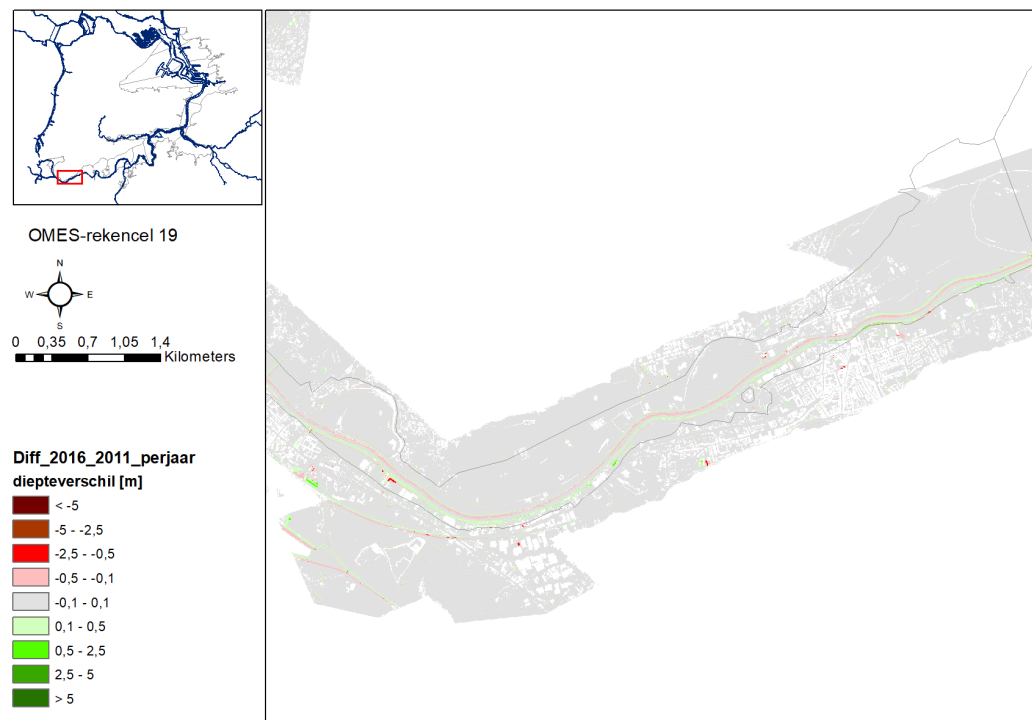
Figuur 109 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 17



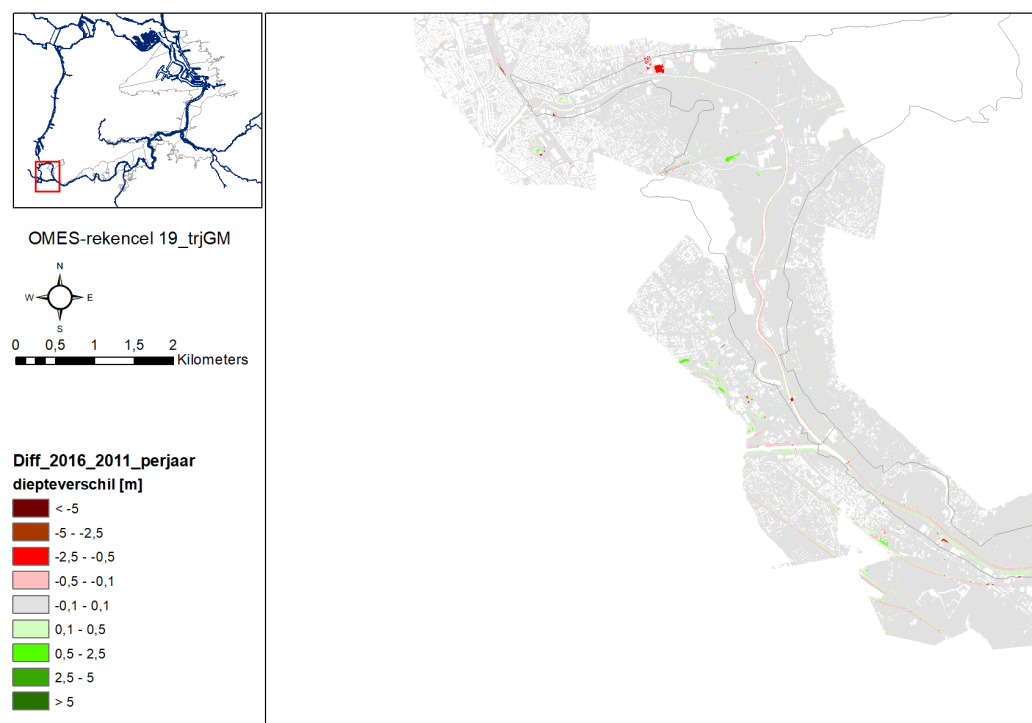
Figuur 110 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 18



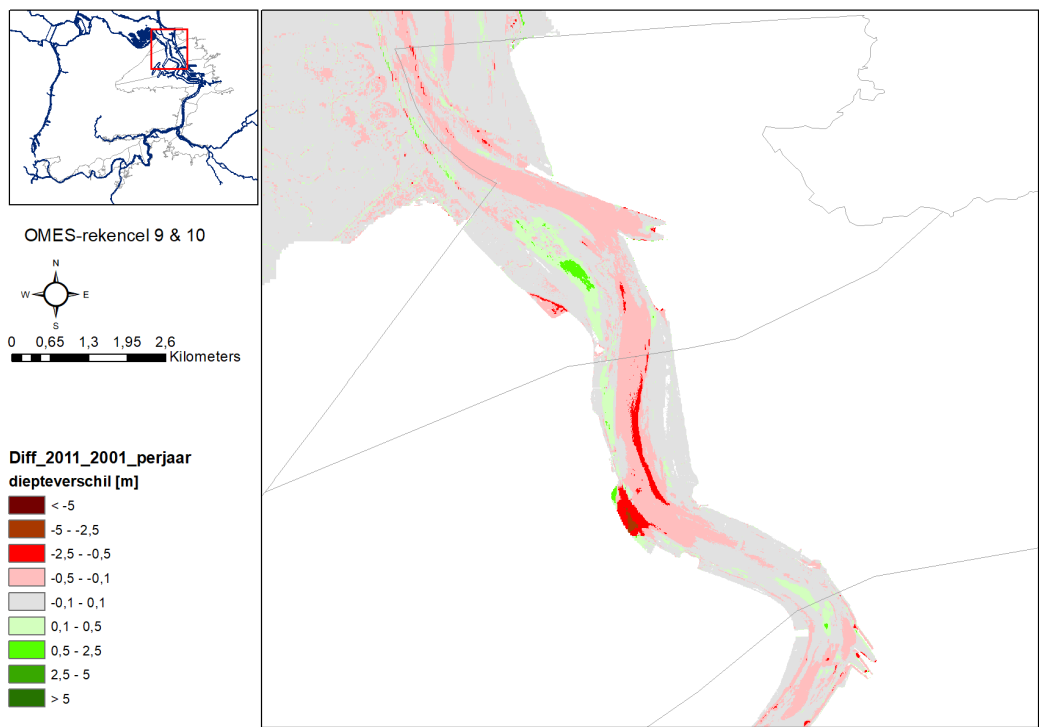
Figuur 111 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 19



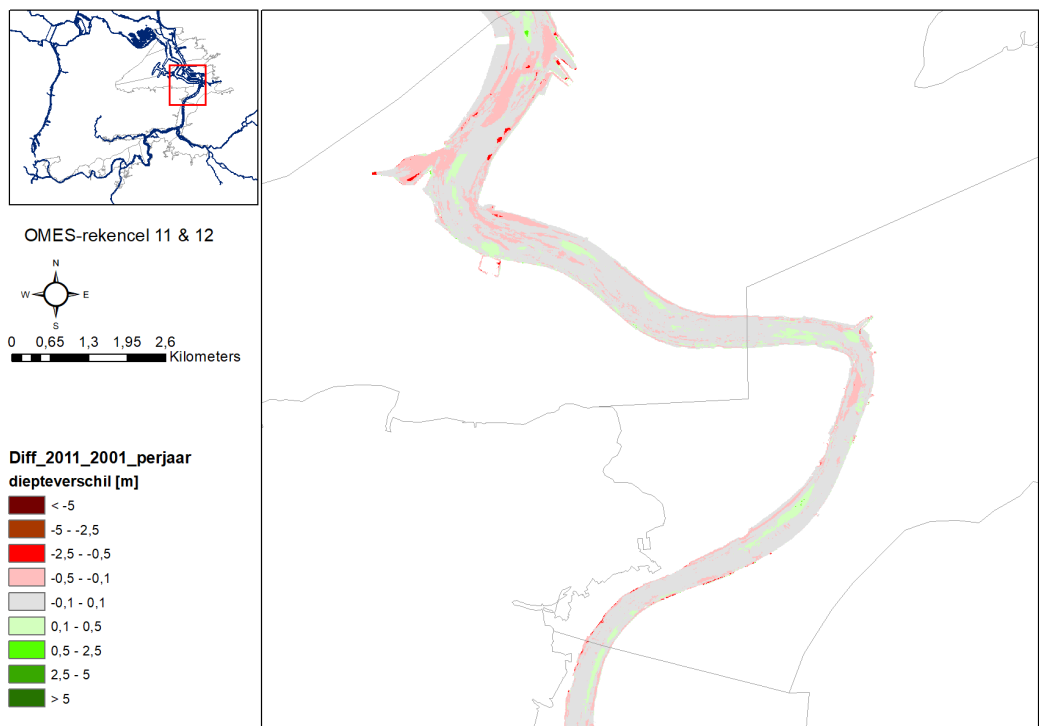
Figuur 112 – Bathymetrische verschilkaart 2016-2011 voor omesegment 19_trjGM



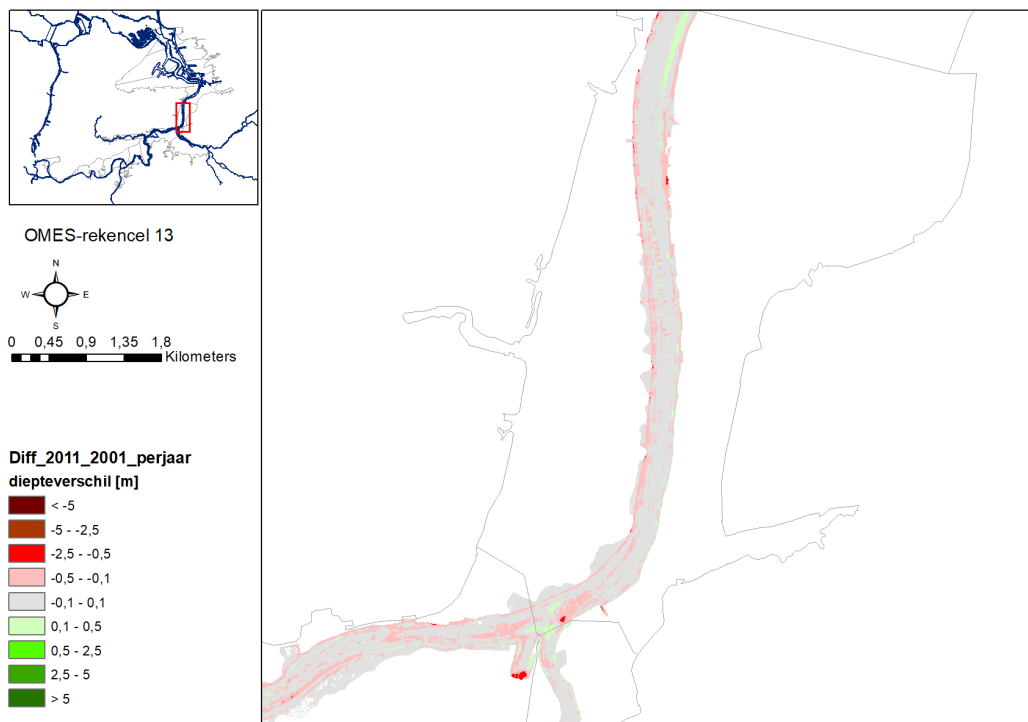
Figuur 113 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omessegmenten 9 en 10



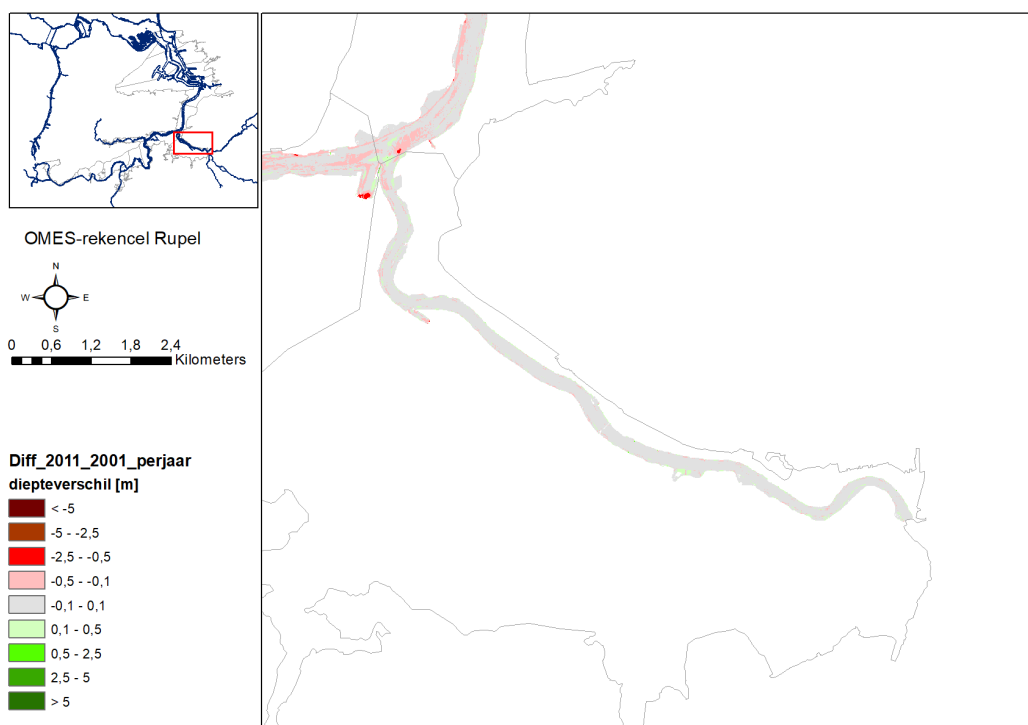
Figuur 114 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omessegmenten 11 en 12



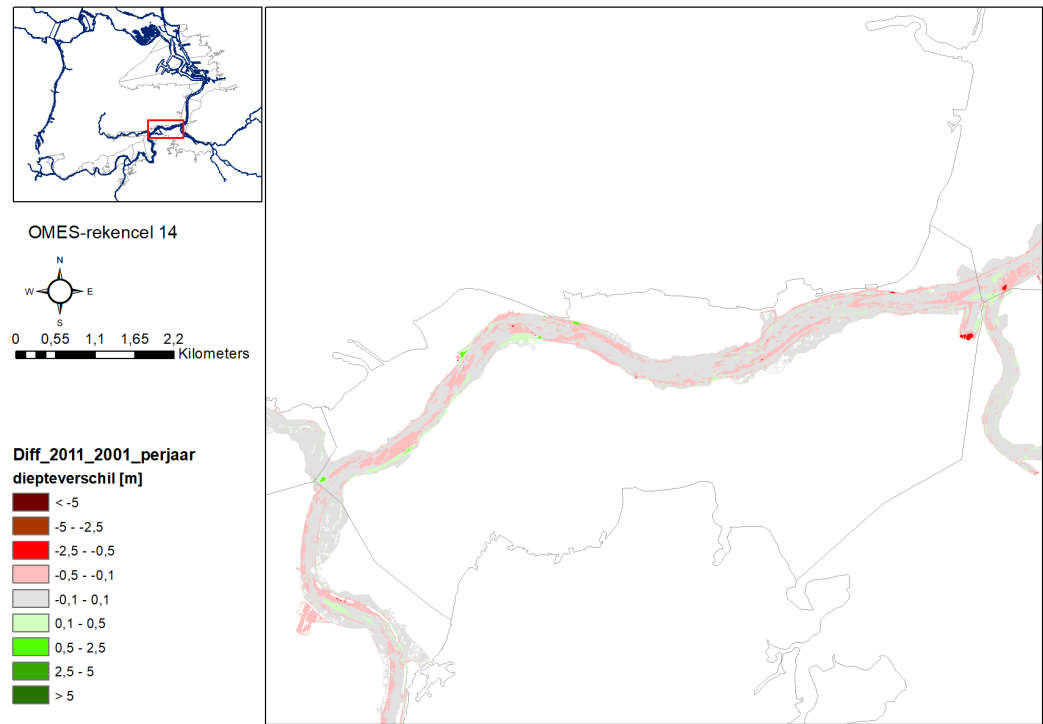
Figuur 115 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 13



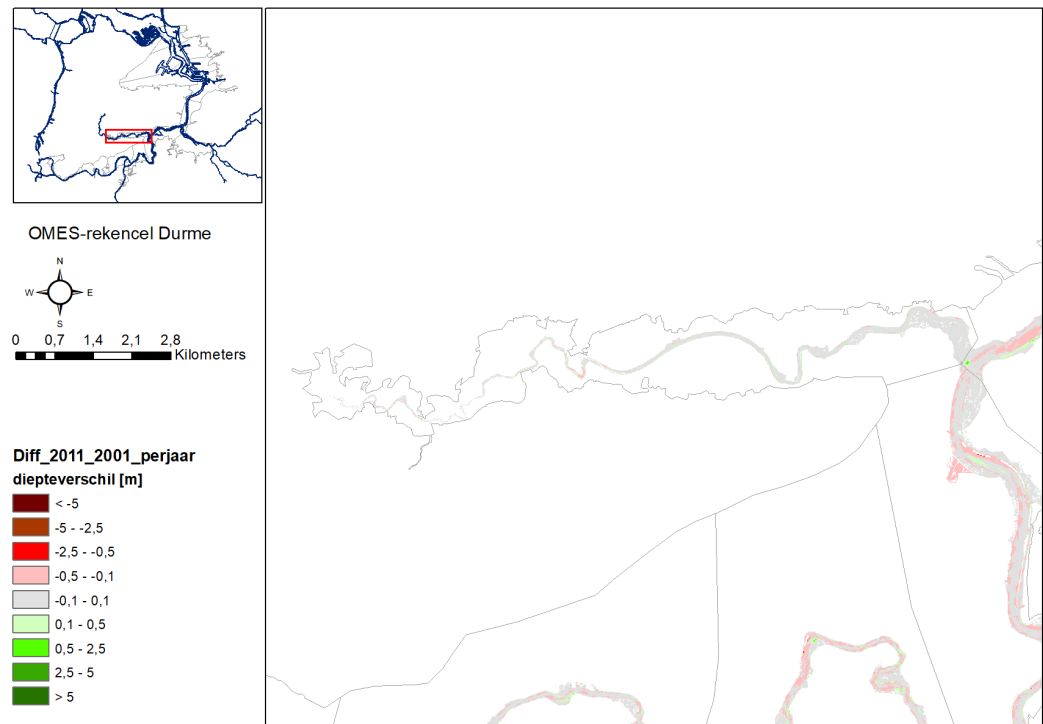
Figuur 116 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment Rupel



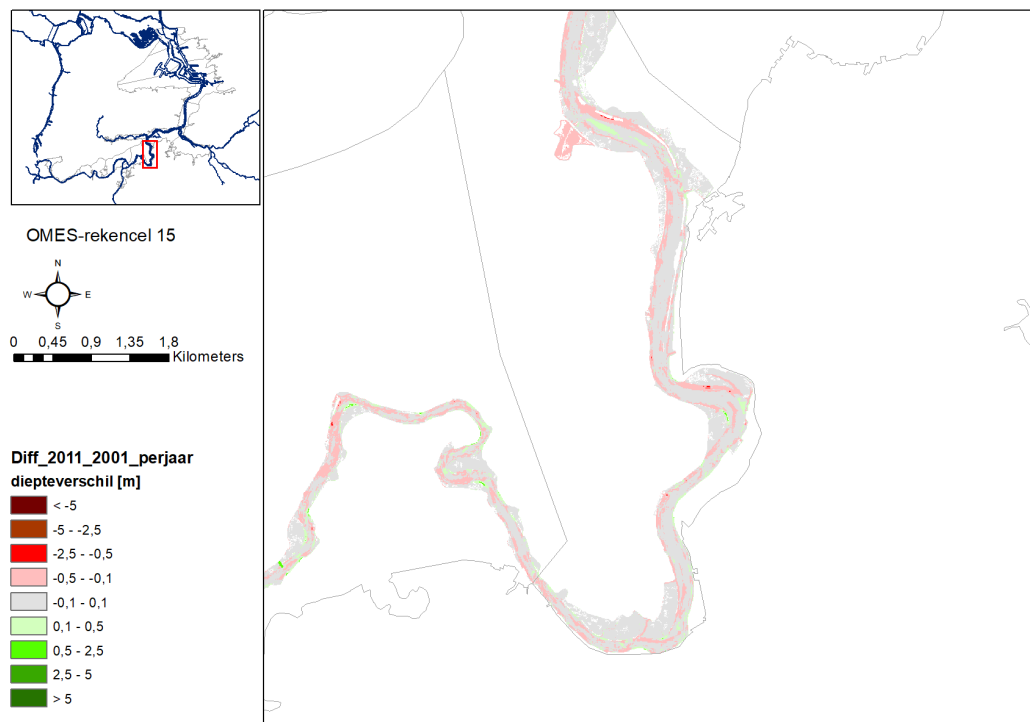
Figuur 117 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 14



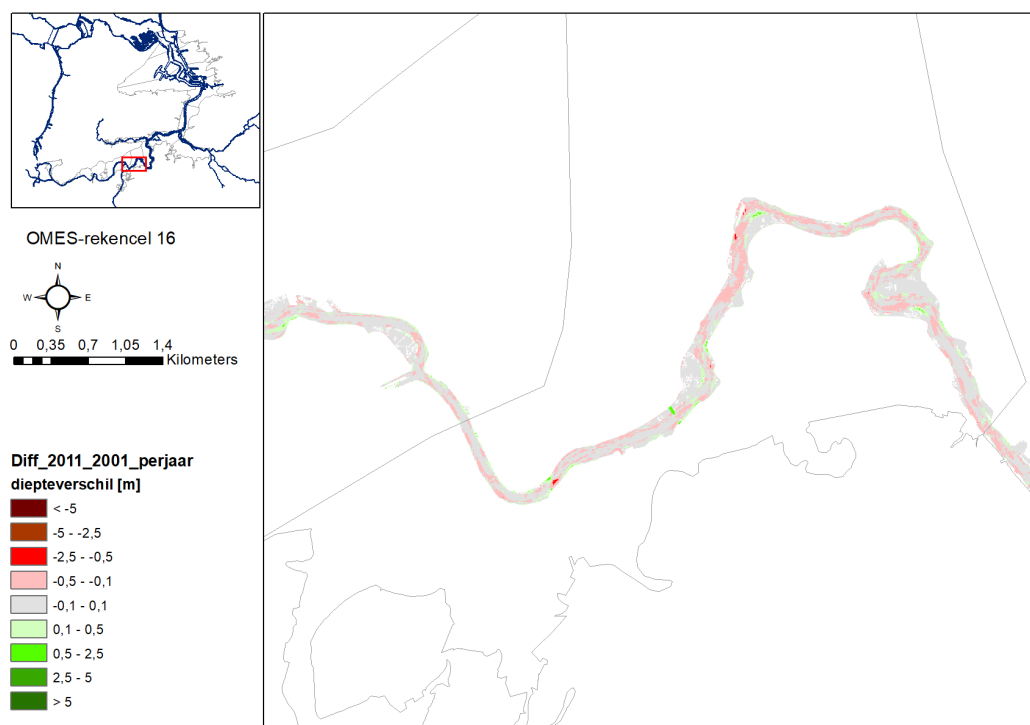
Figuur 118 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment Durme



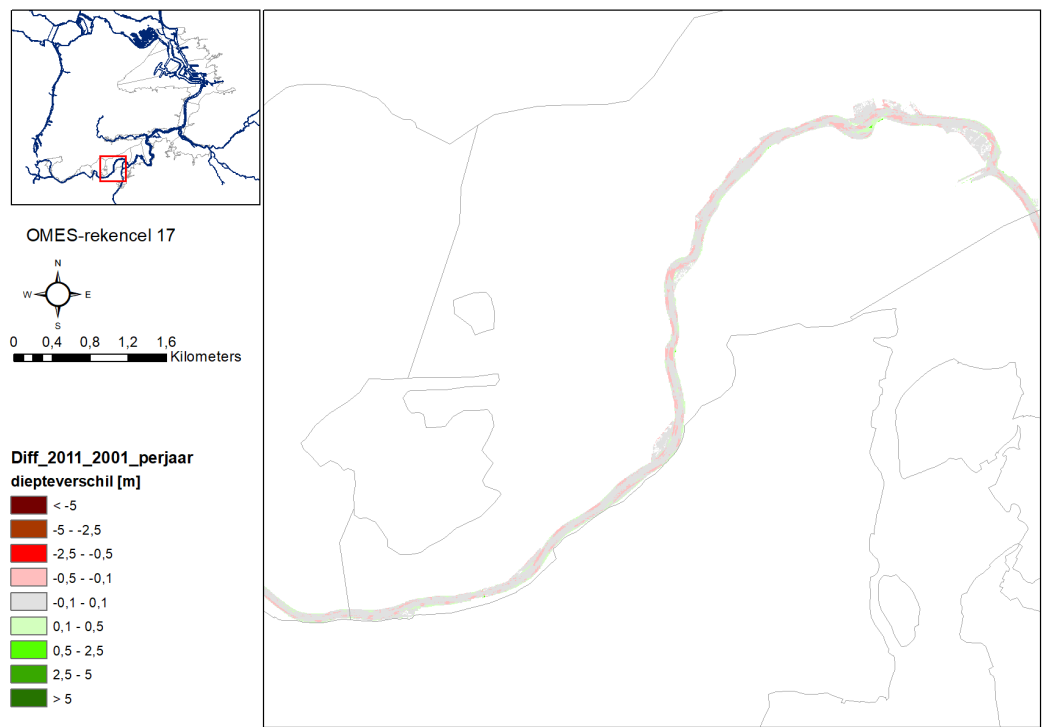
Figuur 119 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 15



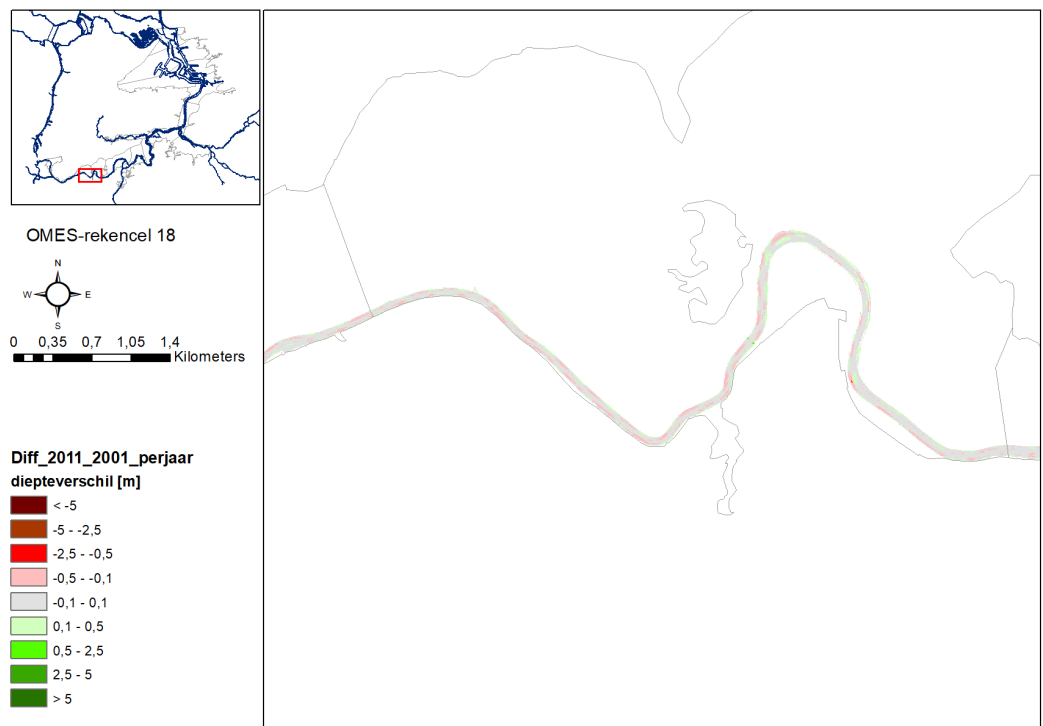
Figuur 120 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 16



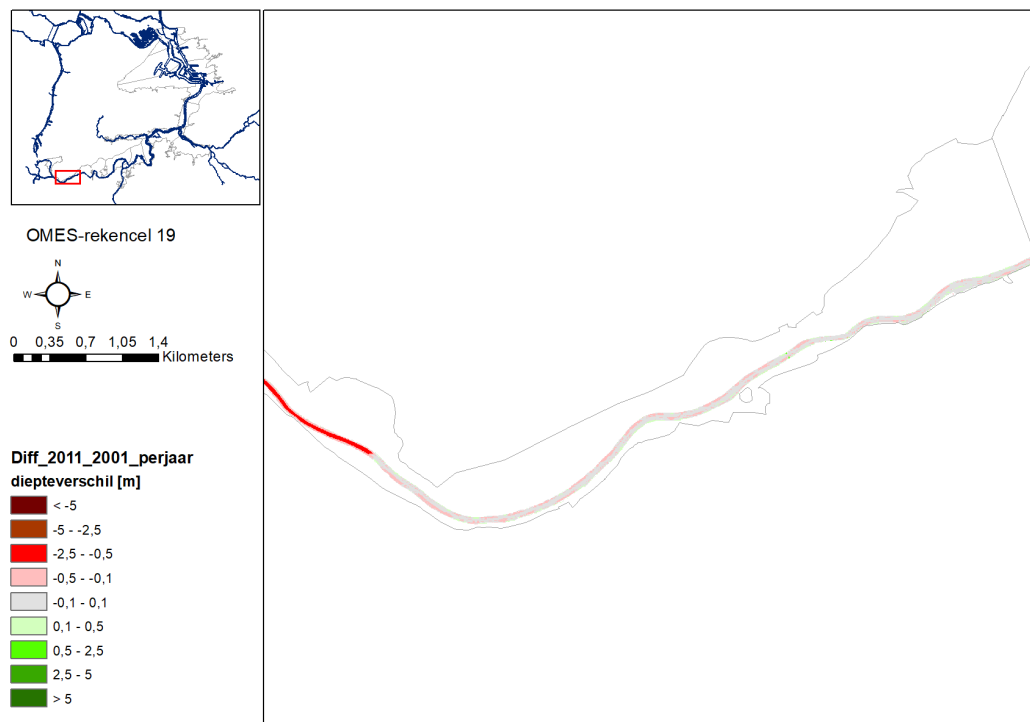
Figuur 121 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 17



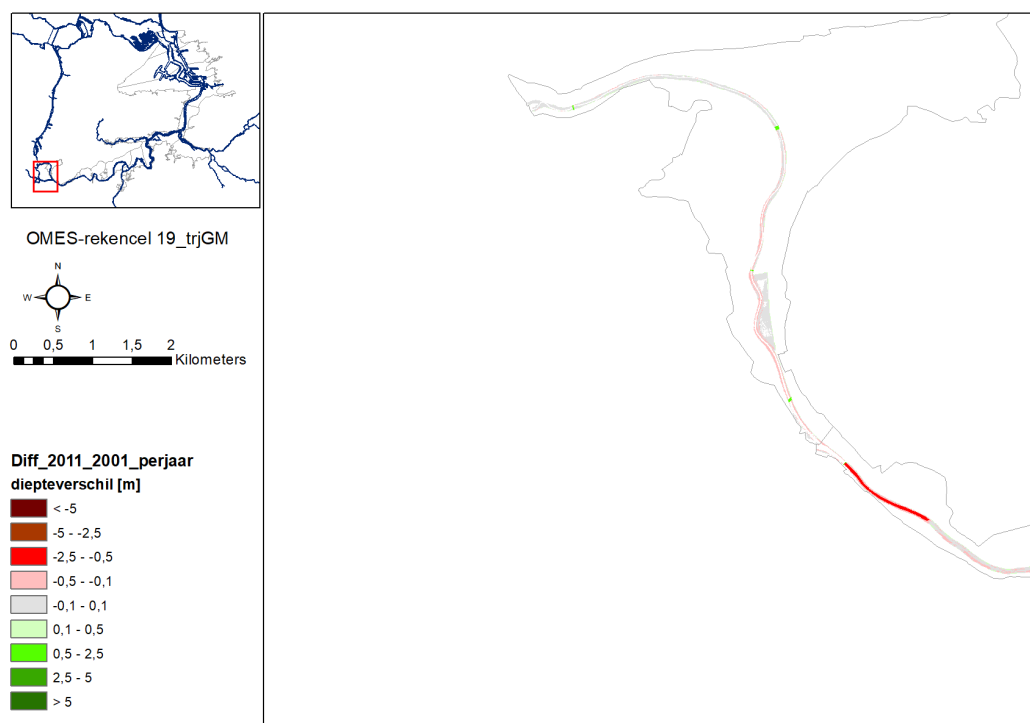
Figuur 122 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 18



Figuur 123 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 19



Figuur 124 – Bathymetrische verschilkaart 2011-2001 voor omesegment 19 trjGM



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