



Vlaanderen
is wetenschap

21_128_1
WL rapporten

Complex Project ECA **Extra Containercapaciteit Antwerpen**

Deelrapport 1
Inschatting van de verandering in SSC met behulp van een
multivariaat model voor de continue meetstations

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Complex Project ECA – Extra Containercapaciteit Antwerpen

Deelrapport 1 – Inschatting van de verandering in SSC met behulp van een multivariaat model voor de continue meetstations

Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Meire, D.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2022
D/2022/3241/208

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Meire, D. (2022). Complex Project ECA – Extra Containercapaciteit Antwerpen: Deelrapport 1 – Inschatting van de verandering in SSC met behulp van een multivariaat model voor de continue meetstations. Versie 5.0. WL Rapporten, 21_128_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Port of Antwerp-Bruges	Ref.:	WL2022R21_128_1
Trefwoorden (3-5):	Sediment, Schelde-estuarium, scenario-analyse, CP ECA		
Kennisdomeinen:	Sediment > Cohesief sediment > Literatuur- en desktoponderzoek Sediment > Baggeren en storten > Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	24	Bijlagen (p.):	13
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

Auteur(s):	Plancke, Y.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Maerschalck, B.	Getekend door: Bart De Maerschalck (Sig) Getekend op: 2023-02-06 09:05:25 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed
	Meire, D.	Getekend door: Dieter Meire (Signature) Getekend op: 2023-02-24 11:56:58 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2023-02-07 14:22:20 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2023-02-06 09:19:39 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed
-----------------	---------------	---



Abstract

In het kader van het Complex project ECA dient het effect van de stortingen voor het onderhouden van een tweede getijdendok ingeschat te worden. Om het effect op de primaire productie te kunnen inschatten, dient de verandering in de zwevende stof concentratie (SSC) langsheen het Schelde-estuarium gekend te zijn. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een multivariaat model (MVM), waarbij op basis van verklarende parameters de SSC wordt ingeschat.

In voorliggend rapport wordt een MVM opgemaakt voor de verschillende locaties waar er continue metingen plaatsvinden van de turbiditeit (waaruit de SSC afgeleid wordt). In tegenstelling tot eerdere analyses, werd het model uitgebreid om de tijdsvertraging tussen de stortingen en de verandering in SSC op de verschillende locaties expliciet mee te beschouwen. Uit deze nieuwe analyse blijkt dat voor 4 van de 6 locaties een significante en logische relatie kan gevonden worden tussen de SSC en de stortingen. De meetgegevens ter hoogte van Overloop van Hansweert bleken onvoldoende betrouwbaar om een MVM op te stellen, terwijl voor Schellebelle geen significante invloed kon gevonden worden doordat deze locatie te ver opwaarts in het estuarium gelegen is.

Het MVM toegepast over de periode 2009-2013 voorspelt de sterkste toename ten gevolge van de extra stortingen ten behoeve van het onderhoud van het 2^e getijdendok (duplex-variant) in Oosterweel (+5,1%). Voor de dichtstbij (beiden binnen getijweglengte) de stortlocatie gelegen locaties, opwaarts (Kruibeke) en afwaarts (meetpaal Lillo) wordt een gelijkaardige toename voorspeld (resp. +2,7% en +2,2%). Voor Weert wordt geen verhoging in de SSC voorspeld.

In vergelijking met eerdere analyses, bleek het hier berekende effect kleiner te zijn dan dit met het MVM op basis van de OMES-dataset. Daarentegen, in vergelijking met het MVM gebruikt in het kader van het sMER, bleken de hier berekende toenames in sedimentconcentratie hoger te liggen voor de Beneden-Zeeschelde.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Methodologie	2
2.1 Doelstelling	2
2.2 Extra sedimentatie t.g.v. getijdedok.....	2
2.3 Verandering in SSC t.g.v. extra sedimentatie	2
2.4 Ecologische verandering t.g.v. verandering in SSC.....	3
3 Multivariaat model (basis).....	4
3.1 Eerdere analyses.....	4
3.2 Methodologie	4
3.3 Overloop van Hansweert.....	5
3.4 Resultaten.....	6
4 Tijdsvertraging effect stortingen	7
4.1 Tijdsvertraging	7
4.1.1 Concept.....	7
4.1.2 De residueel afgelegde afstand van het water.....	8
4.1.3 De residueel afgelegde afstand van het sediment	9
4.2 Reductiefactor	11
5 Multivariaat model (uitbreiding)	13
5.1 Methodologie	13
5.2 Resultaten.....	14
6 Inschatting effect extra stortingen	16
7 Ruimtelijke uitbreiding	18
8 Conclusies en aanbevelingen	21
8.1 Conclusies	21
8.2 Aanbeveling.....	22
9 Referenties	23

Bijlage 1	Coëfficiënten MVM (periodiek).....	B1
Bijlage 2	Gegevens Overloop van Hansweert	B3
Bijlage 3	Validatie MVM (basis).....	B6
Bijlage 4	Gevoeligheidsanalyse reductiefactor	B8
Bijlage 5	Validatie MVM (uitgebreid).....	B11

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht meetstations SSC en bijbehorende getijpost voor het bepalen van getij-gemiddelde karakteristieken.....	5
Tabel 2 – Overzicht lineaire coëfficiënten voor basis multivariaat model	6
Tabel 3 – Overzicht lineaire coëfficiënten voor het uitgebreide multivariaat model	15
Tabel 4 – Overzicht parameters multivariate modellen en effect duplex o.b.v. continue metingen (MONEOS-WL) en periodieke metingen (OMES)	17
Tabel 5 – Overzicht lineaire coëfficiënten voor het uitgebreide multivariaat model	B5

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Afgelegde weg van vlotter losgelaten te Antwerpen bij laagwater (springtij- doodtij) en hoogwater (springtij- doodtij).....	8
Figuur 2 – Invloedsparameters afgelegde weg	9
Figuur 3 – Residuele sedimentflux te Driegoten i.r.t. de bovenafvoer	10
Figuur 4 – Gecumuleerde afstand sediment voor het jaar 2019 voor locatie Driegoten	10
Figuur 5 – Effect reductiefactor gedurende één jaar	11
Figuur 6 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Weert	12
Figuur 7 – Concept invloed stortingen door residueel transport voor locatie Weert.....	14
Figuur 8 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek en continu).....	18
Figuur 9 – Maximaal afgelegde weg (oranje) en verblijftijd (blauw) over de periode 2007-2020	19
Figuur 10 – Ruimtelijke uitbreiding van het effect op SSC van extra stortingen voor het volledige estuarium Boven: periode 2009-2013 onder: periode 2018-2020	20
Figuur 11 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek): getijfactor	B1
Figuur 12 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek): verblijftijd	B1
Figuur 13 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek): stortingen	B2
Figuur 14 – Meetpaal Overloop van Hansweert (links) en detail van YSI multiparameter-sonde (rechts)	B3
Figuur 15 – Meetreeks turbiditeit te meetpaal Overloop van Hansweert: volledige meetperiode 2012-2014	B4
Figuur 16 – Meetreeks turbiditeit te meetpaal Overloop van Hansweert: detail zomer 2013.....	B4
Figuur 17 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Overloop van Hansweert	B5
Figuur 18 – Validatie MVM (BASIS) voor meetpaal Lillo onder	B6
Figuur 19 – Validatie MVM (BASIS) voor Oosterweel boven	B6
Figuur 20 – Validatie MVM (BASIS) voor Kruibeke	B7
Figuur 21 – Validatie MVM (BASIS) voor Weert	B7
Figuur 22 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Lillo	B8
Figuur 23 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Oosterweel.....	B9
Figuur 24 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Kruibeke	B10
Figuur 25 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor meetpaal Lillo onder	B11
Figuur 26 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Oosterweel boven	B11
Figuur 27 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Kruibeke	B12
Figuur 28 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Weert	B12
Figuur 29 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Schellebelle	B13

1 Inleiding

Op 31 januari 2020 stelde de Vlaamse Regering het Voorkeursbesluit van het complex project 'Realisatie van extra containerbehandelingscapaciteit in het havengebied Antwerpen' (CP ECA) definitief vast en rondde hiermee de onderzoeksfase conform het decreet complexe projecten af. Hiermee werden de locaties vastgelegd voor het bewerkstelligen van de extra containercapaciteit. Uiteraard is een essentieel onderdeel daarvan de Containercluster LinkerScheldeoever.

In de uitwerkingsfase (huidige fase) wordt het voorkeursbesluit verder geconcretiseerd tot realiseerbare en vergunbare projecten waarbij ook de uitvoeringswijze bepaald wordt. De projectonderzoeksnota (PON) (SHIP, 2020) vormt het startpunt van de uitwerkingsfase. In de afgelopen maanden werd door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een bijdrage geleverd aan het inschatten van de effecten van een 2^e getijdendok op de water- en sedimenthuishouding in het Schelde-estuarium (Plancke *et al.*, s.d.) en werd input geleverd om de ecologische effecten in te schatten (uitgevoerd door UAntwerpen).

Naar aanleiding van deze onderzoeksresultaten, bleek er een verschil aanwezig te zijn tussen de resultaten die in het kader van de sMER (Tractebel & KENTER, 2019) gerapporteerd werden en de nieuwe resultaten. Hoewel een gelijkaardige methodiek (multivariaat statistisch model) gehanteerd is om de effecten op de SSC in te schatten, is de onderliggende dataset verschillend: continue versus periodieke metingen. Om een ruimtelijke beeld van de effecten te krijgen, is er in de recente WL studie voor geopteerd om de multivariate analyse (MVA) uit te voeren op de volledige periode van de OMES-dataset [zie Bijlage 1: Coëfficiënten MVM (periodiek)].

Door het verschil in resultaten ten opzichte van de sMER, is vanuit de opdrachtgever (mail d.d. 29/11/2021) de vraag gesteld om een bijkomende analyse uit te voeren, nu op basis van de continue metingen. De verwachting hierbij was immers dat een MVM op basis van hoog-frequente metingen een betrouwbaarder resultaat zou opleveren vergeleken een MVM op basis van (half-)maandelijkse, getij onafhankelijke meetdata. Na bijkomend overleg (d.d. 9/12/2021) werden volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- 1) Wat is de verwachte toename in SSC ten gevolge van de bijkomende stortingen voor de duplex-variant, ingeschat door middel van een multivariaat model gebaseerd op de hoog-frequente continue metingen?
- 2) Hoe kunnen de resultaten van bovenstaande analyse doorvertaald worden naar ruimtelijk dekkend beeld van deze veranderingen?

Voorliggend rapport gaat in op deze vragen.

2 Methodologie

2.1 Doelstelling

In het kader van het CP ECA zal naast een beoordeling van de hydro-morfologie tevens een ecologische beoordeling moeten plaatsvinden van de verschillende varianten en zal er ook onderzocht worden welke mitigerende maatregelen hiervoor mogelijk én effectief zijn. Om deze ecologische effecten in te kunnen schatten zal per scenario eerst de wateruitwisseling tussen het dok en de Schelde moeten berekend worden. Hieruit kan vervolgens de extra sedimentatie berekend worden. In de volgende stap kan het effect van de extra storthoeveelheden op de sedimentconcentratie doorheen het estuarium ingeschat worden, waarna tenslotte de ecologische doorvertaling kan gebeuren. De verschillende stappen worden hierna kort toegelicht.

2.2 Extra sedimentatie t.g.v. getijdedok

De uitwisselingsstromen (getijvulling, neer- en densiteitsstroming) bepalen de sedimentatie die in het 2^e getijdendok (2GTD) zal optreden. In de PON wordt voorzien dat de aanslibbing van het 2GTD zal worden ingeschat met een empirisch aanslibbingsmodel dat is afgeregeld voor het Deurganckdok (DGD) en dat de uitwisselingsstromen als input heeft. De in- en uitwateringsvolumes van het DGD en het 2GTD werden bepaald aan de hand van het SCALDIS-model (Smolders *et al.*, 2016). De horizontale en verticale componenten van de uitwisseling worden ontbonden volgens de geometrische methode van Vanlede & Dujardin (2014) om de verschillende componenten te bepalen. Vervolgens wordt aan de hand van het empirisch aanslibbingsmodel de (extra) sedimentatie voor de verschillende inrichtingsvarianten bepaald. Deze extra sedimentmassa's (TDS/jaar) vormen de basis voor de berekening van de te verwachten verandering in de gesuspendeerde sediment concentratie (SSC).

2.3 Verandering in SSC t.g.v. extra sedimentatie

De extra sedimentatie in het 2GTD zal aanleiding geven tot bijkomende onderhoudsbaggerwerken. Het uitgangspunt is om de gebaggerde specie op dezelfde manier als in de huidige stortstrategie terug te storten. Deze stortingen zullen aanleiding geven tot veranderingen in de sedimentconcentratie doorheen het estuarium. Zowel International Marine and Dredging Consultants (2017) als Plancke *et al.* (2020) maken gebruik van een multivariate analyse om op basis van invloedsfactoren de veranderingen in SSC in de Schelde in te schatten. De drie belangrijkste verklarende factoren in deze studies zijn:

- Bovenafvoer (te Melle) of de verblijftijd
- Getijfactor
- Storthoeveelheden slib

Dit levert volgend empirisch model:

$$SSC = \alpha_{stort} \cdot STORT + \alpha_{VBT} \cdot VERBLIJFTIJD + \alpha_{GF} \cdot GETIJFACTOR + \delta \quad (1)$$

Met: SSC: de gemiddelde sedimentconcentratie over één getij [mg/l]

STORT: de hoeveelheid slib gestort in de Beneden-Zeeschelde gedurende het betreffende getij [m³ V']

VERBLIJFTIJD: de verblijftijd van een waterdeeltje in de volledige Boven-Zeeschelde voorafgaand aan het betreffende getij [dagen]

GETIJFACTOR: de getijfactor voor het betreffende getij [-]

α_i : een lineaire coëfficiënt die de bijdrage van elke factor beschrijft

δ : residu

Het multivariate model (MVM) laat toe de bijdrage van de verschillende verklarende factoren in te schatten. Met behulp van de coëfficiënten (één coëfficiënt per bijdrage via meervoudige lineaire regressie) kan dan ook de invloed van één of meer factoren bestudeerd worden. Voor een uitgebreide beschrijving van het model wordt verwezen naar Plancke *et al.* (2020).

In het kader van voorliggend onderzoek wordt de toename in de verwachte onderhoudsbaggerwerken (uit § 2.2) doorvertaald naar extra stortingen in het multivariaat model. Hieruit volgt de bijhorende verandering in sedimentconcentratie. De toename in sedimentconcentratie zorgt voor een bijkomende sedimentatie ter hoogte van baggerzones. Deze vertaalt zich lineair door. Op basis van eerder onderzoek (Plancke *et al.*, 2016) is gebleken dat deze 2^e orde effecten op de toename in sedimentconcentratie klein (< 1%) zijn. In de huidige analyse worden deze 2^e orde effecten niet meegenomen.

2.4 Ecologische verandering t.g.v. verandering in SSC

In de laatste stap zal het effect van de verandering van de sedimentconcentratie op de ecologie bestudeerd worden. Dit onderdeel wordt door de UA Antwerpen uitgevoerd. De werkwijze is gelijkaardig aan eerdere studies waarin het effect van het terugstorten van baggerspecie op de ecologie bestudeerd werd (Cox & Meire, 2015; Plancke *et al.*, 2016).

3 Multivariaat model (basis)

3.1 Eerdere analyses

Het multivariaat model uit International Marine and Dredging Consultants (2016, 2017) voorspelt de sedimentconcentratie aan de hand van 9 verschillende invloedsfactoren. Op basis van de resultaten uit deze studie werd in Plancke *et al.* (2020) een gelijkaardige analyse uitgevoerd waarbij slechts 3 verklarende parameters beschouwd werden: (1) de wekelijkse storthoeveelheid, (2) de verblijftijd en (3) de getijfactor. Deze parameters bleken uit de eerdere studie de belangrijkste bijdrage te leveren. IMDC beschouwt echter ook een auto-correlatie term (i.e. waarde in vorige tijdstep) in hun analyse, maar deze werd bewust niet meegenomen in voorliggend model aangezien deze niet toe te schrijven is aan een fysisch proces maar er eerder modelmatig voor zorgt dat de gemodelleerde waarden minder afwijken van de realiteit.

Tot op heden werd de multivariate analyse (MVA) uitgevoerd door IMDC op basis van (1) de continue metingen (International Marine and Dredging Consultants, 2016) en (2) de periodieke OMES-metingen (International Marine and Dredging Consultants, 2017). De analyse uitgevoerd door het WL in het kader van de Agenda voor de Toekomst (Plancke *et al.*, 2020) is eveneens gebaseerd op de periodieke metingen, maar maakt naast de OMES-dataset ook gebruik van bijkomende gegevens uit metingen van het Waterbouwkundig Laboratorium (schepstalen en halftij-eb-vaarten). Voor een uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar Plancke *et al.* (2020).

In het kader van voorliggende studie werd een MVA uitgevoerd gelijkaardig aan deze van International Marine and Dredging Consultants (2016) om invulling te geven aan de eerste onderzoeksvraag. Echter, er zijn een aantal verschillen met de analyse van IMDC die hier worden opgesomd:

- Slechts **3** (i.p.v. 9) **verklarende invloedsfactoren**, analoog aan de eerdere MVA uitgevoerd door WL op basis van de periodieke metingen.
- De MVA door IMDC richt zich op 3 stations (Boei 84, Oosterweel en Driegoten). In voorliggende analyse worden bijkomende meetstations (**6 locaties** in totaal) beschouwd (Kruikeke, Schellebelle, Overloop van Hansweert). Daarnaast werden een aantal van de meetstations verplaatst (Boei 84 => meetpaal Lillo en Driegoten => Weert) waardoor de datasets worden beschouwd ná de verplaatsing van de stations.
- De MVA door IMDC maakt gebruik van de metingen tot en met 2014 (aanvangsmoment verschillend per locatie). Aangezien in voorliggende analyse de huidige (nieuwe en verplaatste) locaties worden beschouwd, maakt deze MVA gebruik van de **meetgegevens van 1/1/2016 tot en met 31/12/2020**.
- De MVA wordt uitgevoerd op de **getij-gemiddelde gegevens** (SSC, getijfactor, verblijftijd, storthoeveelheid slib), waar dit door IMDC nog uitgevoerd werd op weekgemiddelde gegevens (door beperkte beschikbaarheid in de tijd van invloedsparameters, waardoor bepaalde variaties niet beschouwd werden, e.g. springtij-doodtij-variantie).

3.2 Methodologie

Het MVM stelt de beste lineaire relatie op tussen de te voorspellen parameter (SSC) en de verklarende parameters. Vooraleer het MVM werd opgemaakt, werden de gevalideerde meetgegevens verwerkt tot getij-gemiddelde waarden. Voor het bepalen van de getij-gemiddelde SSC, werd de gemiddelde SSC berekend over de periode tussen 2 opeenvolgende hoogwaters, met als randvoorwaarde dat minstens

80% “goede”¹ SSC metingen moesten beschikbaar zijn. De momenten van hoogwater werden beschouwd van de nabijgelegen getijposten (Tabel 1).

Voor de verklarende parameters werd volgende methode gevolgd:

- Getijfactor: de stijging voor het getij werd bepaald en gedeeld door de gemiddelde waarde van de stijging over de periode 2011-2020;
- Verblijftijd: de verblijftijd voor de Boven-Zeeschelde is in het kader van MONEOS berekend per dag sinds 1/1/1971; de waarde van de betreffende dag van het getij wordt als waarde overgenomen;
- Storthoeveelheid: op basis van de tripgegevens worden alle momenten waarop gestort² werd binnen de periode tussen de 2 opeenvolgende hoogwaters geselecteerd en opgeteld om te komen tot het totale stortvolume ($\text{m}^3 \text{ V}'$);

Op basis van de alzo samengestelde dataset, werd binnen het softwarepakket “Octave” (<https://www.gnu.org/software/octave/index>) de multivariate analyse (d.m.v. regress-functie) uitgevoerd. De lineaire coëfficiënten alsook de statistische parameters werden geëxporteerd voor verdere analyse.

Tabel 1 – Overzicht meetstations SSC en bijbehorende getijpost voor het bepalen van getij-gemiddelde karakteristieken

Meetstation SSC	Getijpost
Overloop van Hansweert	Hansweert
Meetpaal Lillo	Liefkenshoek
Oosterweel	Antwerpen-Loodsgebouw
Kruikeke	Hemiksem
Weert	Tielrode ³
Schellebelle	Dendermonde ⁴

3.3 Overloop van Hansweert

Bij het bekijken van de gemeten turbiditeiten voor het station Overloop van Hansweert, kwamen opmerkelijk temporele patronen naar boven. Hierbij neemt de turbiditeit in bepaalde periodes spectaculair toe. Uit de beschrijving van de metingen (Spronk, 2013; Van Zelst, 2019), blijkt dat de meetsensor beïnvloed wordt door een aangroei van algen. Dit is nefast voor de optische backscatter methode die ingezet wordt voor het meten van de turbiditeit. Een meer uitgebreide beschrijving is opgenomen in Bijlage 2: Gegevens Overloop van Hansweert. Gelet op deze onzekerheid in de bruikbaarheid van de data (data voor het optreden van de aangroei is bruikbaar, maar van zodra er aangroei optreedt, is het signaal verstoord – het moment van aangroei is echter niet exact te bepalen), zal er geen MVA uitgevoerd worden voor deze locatie.

¹ Het betreft hier de kwaliteitsvlag die aan alle metingen wordt toegekend tijdens de validatie van de meetgegevens.

² Het betreft de stortlocaties Oosterweel, Plaat van Boomke, Punt van Melsele en Ketelputten met als specie “slib”.

³ Omwille van hiaten in de tijdreeks te Driegoten werd gebruik gemaakt van de getijpost te Tielrode.

⁴ Doordat de aangrenzende getijposten (Wetteren, Uitbergen) hiaten kenden in de meetperiode van de turbiditeit, is gekozen om de hoog- en laagwaters van Dendermonde te gebruiken, met extra tijdsvertraging van 60' (dit betreft een inschatting op basis van de waarde uit het 5-jarig overzicht en toegepast voor zowel HW als LW).

3.4 Resultaten

Volgens de hierboven beschreven methodiek, werd per meetlocatie een multivariate analyse uitgevoerd. De resultaten (lineaire coëfficiënten en statistische parameters) worden weergegeven in Tabel 2. Hieruit blijkt dat de regressie-coëfficiënten (R^2) eerder klein zijn, gaande van 0,21 (Kruibeke) tot 0,47 (Oosterweel). Deze waarden liggen lager dan deze uit de eerdere analyse (International Marine and Dredging Consultants, 2016), doch hierin werden meer verklarende parameters meegenomen, waaronder een “autoregressieve term⁵” die voor alle locaties zeer belangrijk bleek (bijdrage van 44-65%).

Daarnaast blijkt dat voor het station Weert de bijdrage van de stortingen niet significant is (p-waarde > 0,05). Aangezien binnen dit model gewerkt wordt met getij-gemiddelde waarden, is dit niet onlogisch aangezien de meetlocatie Weert verder dan één getijweglengte (ca. 15 km, zie ook verder) gelegen is van de stortlocaties van slib specie.

Voor Schellebelle blijkt de bijdrage van stortingen wel significant te zijn (p-waarde = 0,008), echter de bijhorende lineaire coëfficiënt is negatief, wat induceert dat stortingen zouden leiden tot een verlaging van de SSC. Dit is fysisch niet mogelijk. Ook hier geldt dus dat de invloed van de stortingen tijdens het betreffende getij niet als verklarende parameter kunnen worden beschouwd. Daarnaast is het opvallend dat de lineaire coëfficiënt voor de getijfactor hier niet significant blijkt. Aangezien de getijfactor quasi gelijk is doorheen het estuarium voor een bepaald getij, kan dit niet toegeschreven worden aan de keuze van Dendermonde als getijstation. Vermoedelijk is de sterke invloed van de bovenafvoer op het getij in Schellebelle hiervoor een verklaring.

Aangezien het gebruik van week-gemiddelde storthoeveelheden wel een significante bijdrage oplevert, zal getracht worden om de invloed ervan in de opwaartse delen van het estuarium op een fysisch verklaarbare manier toe te voegen (zie Hoofdstuk 4).

De vergelijking van de gemodelleerde waarden op basis van het MVM en de meetwaarden is opgenomen in Bijlage 3: Validatie MVM (basis).

Tabel 2 – Overzicht lineaire coëfficiënten voor basis multivariaat model
Waarden in het *grijs* geven aan dat relatie **NIET SIGNIFICANT** (p-waarde > 0,05) is

Lineaire coëfficiënt	Getijfactor	Verblijftijd	Storting	R^2
Overloop Hansweert	<i>Niet berekend omwille van dubieuze turbiditeitsdata</i>			
Meetpaal Lillo	3,5E+02	-1,6E+00	8,0E-03	0,47
Oosterweel	1,4E+02	-8,3E-01	2,1E-02	0,36
Kruibeke	1,2E+02	2,8E-01	6,2E-03	0,21
Weert	1,3E+02	2,3E+00	<i>-1,4E-04</i>	0,29
Schellebelle	<i>9,4E-01</i>	1,3E+00	-5,3E-04	0,41

⁵ IMDC kiest ervoor de SSC van week X te verklaren door de SSC in week X-1. In voorliggende analyse is er bewust voor gekozen dit niet mee te nemen aangezien dit een “controlerende” factor is zonder fysische betekenis.

4 Tijdsvertraging effect stortingen

In het basis multivariaat model wordt de verandering in SSC deels verklaard door de gestorte slib hoeveelheden in de Beneden-Zeeschelde. Voor de continue metingen wordt het MVM opgesteld op basis van parameters op een tijdschaal van één getij (i.e. totaal stortvolume over één getij of getij-gemiddelde SSC). Voor de stations gelegen binnen één getijweglengte (ca. 15 km) is deze opzet gerechtvaardigd, voor de stations op grotere afstand zal de gestorte specie onmogelijk op een tijdschaal van één getij de meetlocatie kunnen bereiken. Daarom wordt een bijkomende verklarende parameter opgesteld die rekening tracht te houden met de tijdsvertraging van de stortingen doorheen het estuarium. Hiertoe worden 2 aspecten beschouwd die in volgende paragrafen in detail worden beschreven:

- De tijdsvertraging: het zwaartepunt van de SSC verhoging ten gevolge van een storting zal zich verplaatsen doorheen het estuarium; afhankelijk van bv. het debiet zal dit zich naar op- dan wel afwaarts kunnen verplaatsen met een bepaalde snelheid, die de tijdsvertraging zal bepalen;
- De reductiefactor: het effect van de stortingen zal afnemen in de tijd, aangezien een deel van de gestorte specie zich bv. zal afzetten in stroomluwe gebieden;

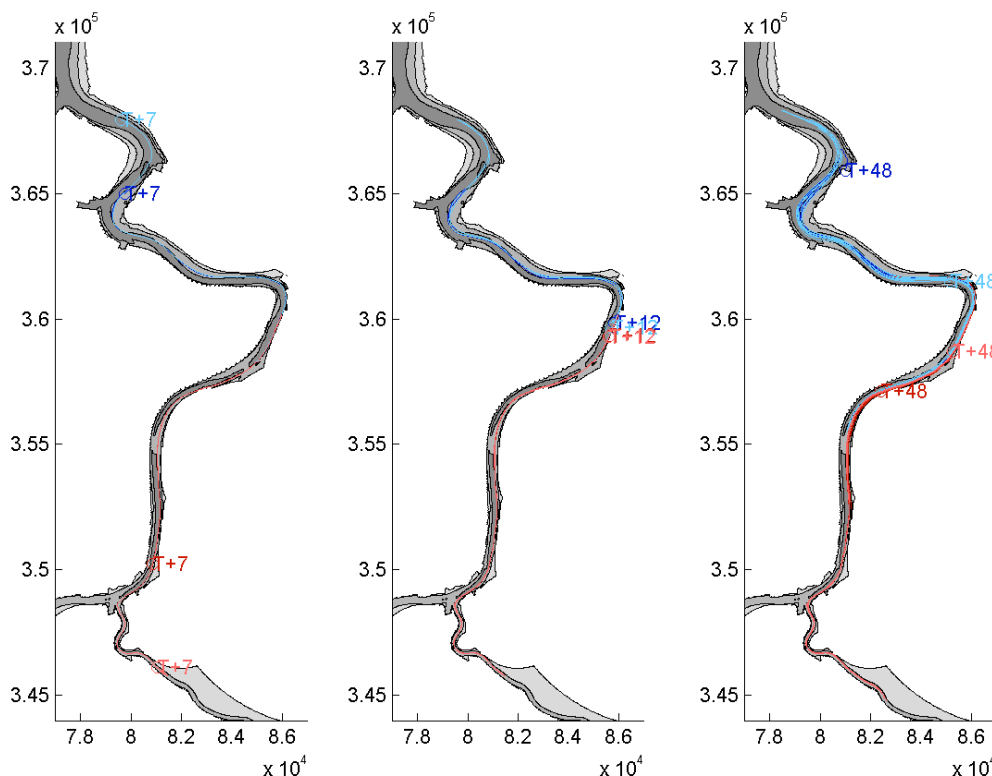
4.1 Tijdsvertraging

4.1.1 Concept

Het ontbreken van de tijdsvertraging tussen het uitvoeren van een storting en een verhoging van de SSC is de belangrijkste lacune uit het basis MVM. Wanneer een storting plaatsvindt in het estuarium ontstaat een sedimentwolk die zich zal verspreiden in het estuarium. Twee tijdschalen zijn hierbij belangrijk:

- Binnen één getijcyclus: de sedimentwolk zal heen en weer bewegen onder invloed van de eb- en vloedstroming; uit vlotter simulaties met het NeVla-model (Maximova *et al.*, 2009) blijkt dat de getijweglengte ca. 15 km bedraagt in de Zeeschelde (Figuur 1); na één volledige cyclus bevindt een waterdeeltje zich echter ongeveer op de beginpositie;
- Langer dan één getijcyclus: onder invloed van de bovenafvoer zullen waterdeeltjes zich doorheen het estuarium van op- naar afwaarts bewegen; per getijcyclus zal, afhankelijk van de bovenafvoer, een waterdeeltje zich een bepaalde afstand (aanzienlijk kleiner dan een getijweglengte) voortbewegen;

Waar het effect op de eerste tijdschaal vervat zit in de relatie tussen de gemiddelde SSC en de bijbehorende storthoeveelheid binnen de getijcyclus, zal de tweede tijdschaal van belang zijn voor de locaties die buiten de getijweglengte vallen. In de volgende paragrafen wordt hierop ingegaan waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen water en sediment.



Figuur 1 – Afgelegde weg van vlotter losgelaten te Antwerpen bij laagwater (springtij- doodtij) en hoogwater (springtij- doodtij)
Positie na 7u (links) | na 12u (midden) | na 48u (rechts)

4.1.2 De residueel afgelegde afstand van het water

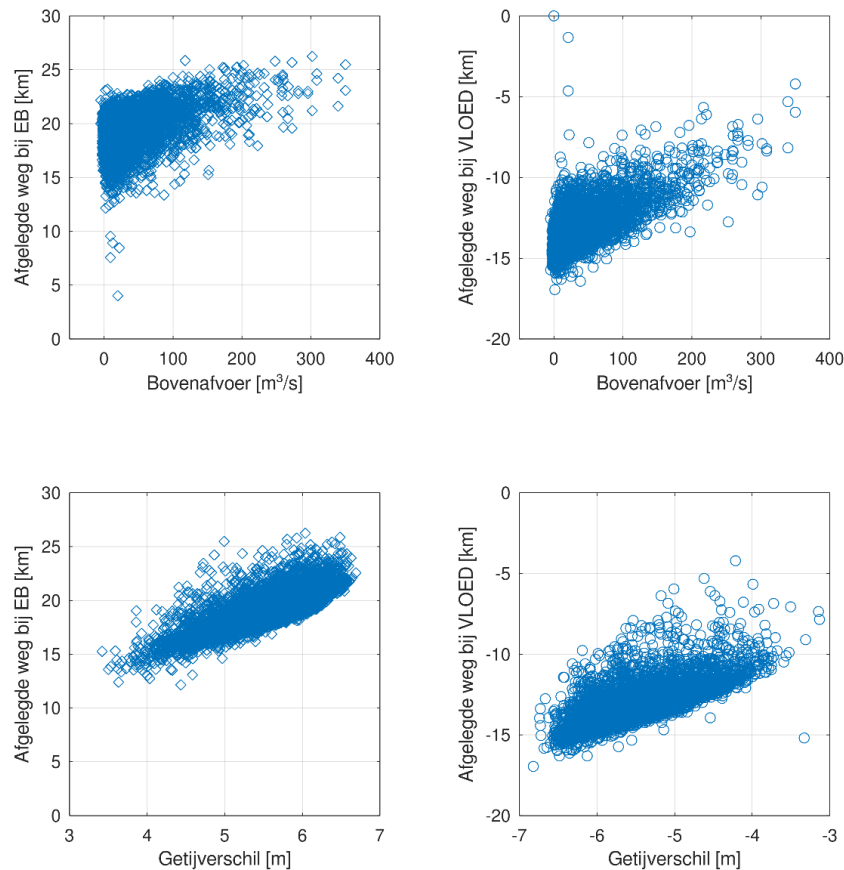
Een waterdeeltje zal onder invloed van de getijden (heen en weer) en de bovenafvoer (van op- naar afwaarts) bewegen doorheen het estuarium. Om de residuele beweging in te schatten, is gebruik gemaakt van numerieke modelsimulaties uitgevoerd in het kader van eerder onderzoek (Plancke *et al.*, 2021). Het numerieke model dat hiervoor ingezet werd, is het 1D-model⁶ van het Schelde-estuarium opgemaakt in de MIKE11-software. Dit model berekent de waterstanden en de getijdebieten doorheen het estuarium, waaruit de snelheden (gemiddelde over de dwarssectie) kunnen worden afgeleid. In het eerdere onderzoek werden langetermijn simulaties 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 het berekenen van de residueel afgelegde afstand werd, vertrekkende van de gesimuleerde snelheden, de totale afstand per getijfase (eb en vloed apart) berekend voor het station Driegoten-Weert⁷. Er kan opgemerkt worden dat dit niet perfect overeenstemt met de reële afstand die een waterdeeltje zal afleggen: hiervoor dient een Lagrangiaanse berekeningswijze te gebeuren, wat echter met de beschikbare resultaten onmogelijk is; de verschillen met de hier uitgevoerde Euleriaanse berekeningswijze worden echter niet significant verschillend geacht.

⁶ Het inzetten van het Scaldis model voor dergelijke lange periode zorgt voor extreem lange rekentijden, waardoor gekozen is het 1D-model hiervoor in te zetten.

⁷ Dit station werd gekozen omdat dit de enige locatie is waarvoor een analyse van sedimentfluxen voorhanden was. Idealiter wordt deze analyse ook uitgevoerd voor representatieve stations in de Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde. Voor de Westerschelde stelt zich echter het probleem van het ontbreken van continue SSC-metingen, nodig voor het berekenen van de sedimentflux.

Figuur 2 geeft de relatie van de afgelegde weg bij eb en vloed weer in relatie tot enerzijds de bovenafvoer te Melle (boven) en anderzijds het getijverschil (onder). Hieruit blijkt dat de afgelegde weg voor zowel de eb- als de vloedfase toeneemt bij toenemend getijverschil. Bij een toename van de bovenafvoer zal de afgelegde weg toenemen in de ebfase, terwijl deze afneemt in de vloedfase. Dit is toe te schrijven aan de versterkte invloed van de bovenafvoer tegenover het getij.



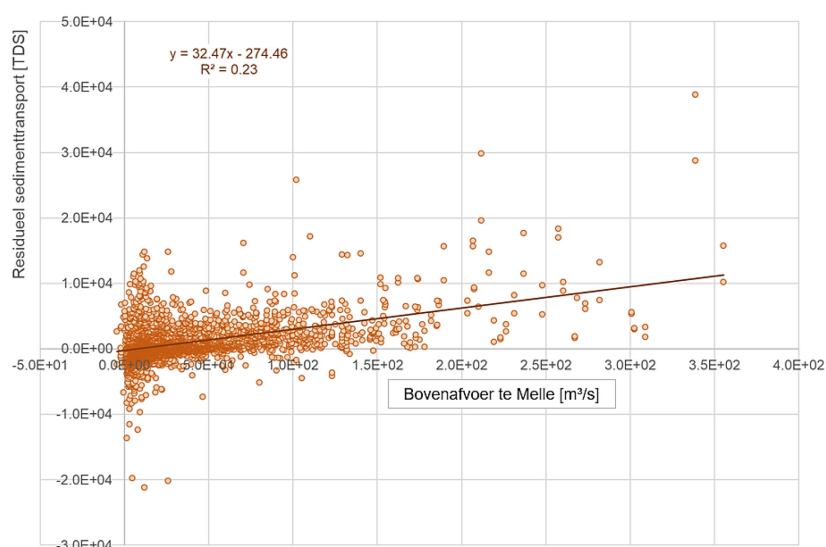
Figuur 2 – Invloedsparameters afgelegde weg

4.1.3 De residueel afgelegde afstand van het sediment

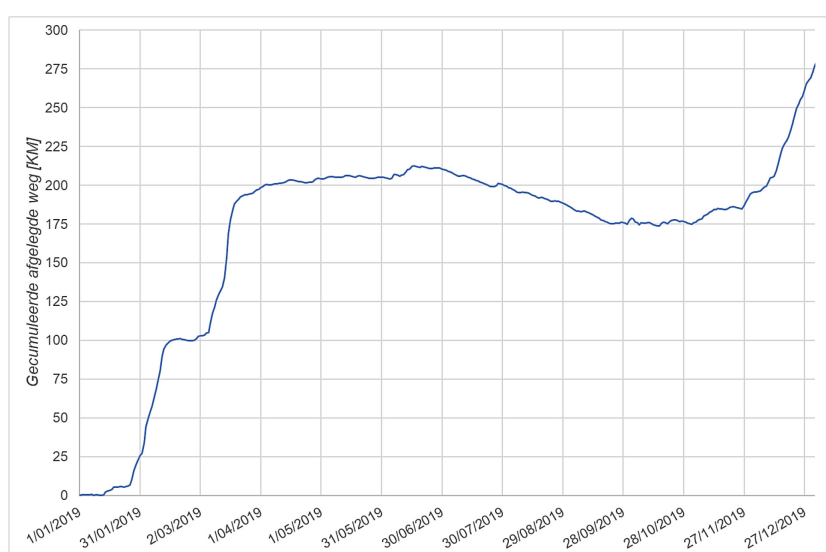
In bovenstaande berekening blijkt dat een waterdeeltje over één getijcyclus steeds een beweging aflegt waarbij het meer stroomafwaarts terechtkomt. Uit eerder onderzoek (Plancke *et al.*, 2014 & Schramkowski *et al.*, 2019) is gebleken dat het estuarien turbiditeitsmaximum (ETM) zich in periodes met lage bovenafvoer naar opwaarts kan bewegen. Het één op één vertalen van residuele afgelegde afstand van een waterdeeltje naar sediment, is dus niet gerechtvaardigd. Dit verschillend gedrag is toe te schrijven aan het bezinken van sediment gedurende periodes met lage snelheden (i.e. rond de kentering) in combinatie met het verschil in dit bezinkingspatroon bij respectievelijk kentering hoogwater en kentering laagwater. In eerder onderzoek (Plancke *et al.*, 2021) werd een relatie opgesteld tussen de residuele sedimentflux en de dagelijkse bovenafvoer (Figuur 3). Uit deze relatie, weliswaar gekenmerkt door een grote spreiding, kan worden afgeleid dat het residuele sedimenttransport te Driegoten gelijk is aan 0 voor een bovenafvoer (te Melle) van 8,5 m³/s. Het combineren van de afgelegde weg van water (§ 4.1.2) en de verschuiving gerelateerd aan het verschil tussen het gedrag van water en sediment (§ 4.1.3), laat toe een inschatting te maken van de residuele afgelegde weg van sediment in functie van de bovenafvoer. Dit wordt toegepast zodat de residuele afgelegde weg 0 km is voor een debiet van 8,5 m³/s. Bij lagere debieten is er dan een negatieve afgelegde weg, oftewel een opwaarts transport.

Het resultaat van dit concept wordt voor het jaar 2019 weergegeven in Figuur 4: in de eerste 3 maanden neemt de afgelegde weg van het sediment toe, wat duidt op een afwaarts gericht transport (uitspoeling). In de volgende 3 maanden varieert de afgelegde weg weinig, wat betekent dat het sediment ter plaatse blijft. Vanaf juli neemt de afgelegde weg af, wat dan weer aangeeft dat het sediment opwaarts getransporteerd zou worden.

Dit concept zal worden toegepast om het effect van de stortingen in een bijkomende parameter te vervatten: sediment gestort op bv. 1/8/2019 zal ca. 25 km opwaarts getransporteerd worden, wat betekent dat het sediment vanuit de stortzones (KM 70-75) tot in het afwaartse deel van de Boven-Zeeschelde (KM 90-100) kan worden getransporteerd. Op deze wijze wordt het effect van de stortingen expliciet meegenomen, rekening houdend met de tijd die het sediment nodig heeft om zich op- of afwaarts te verschuiven.



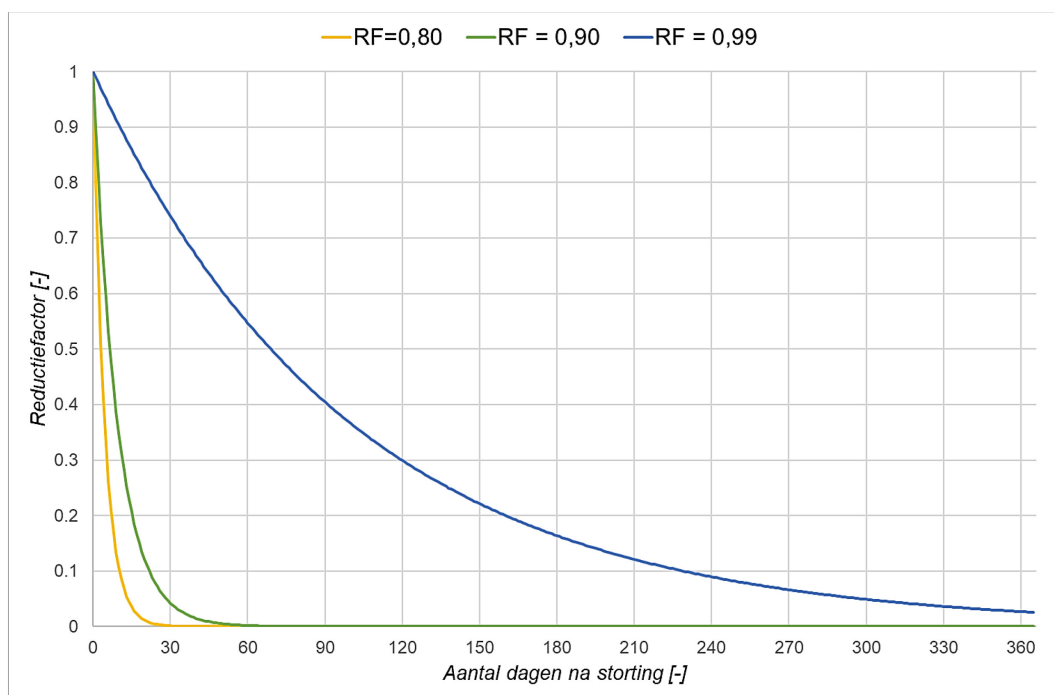
Figuur 3 – Residuele sedimentflux te Driegoten i.r.t. de bovenafvoer



Figuur 4 – Gecumuleerde afstand sediment voor het jaar 2019 voor locatie Driegoten

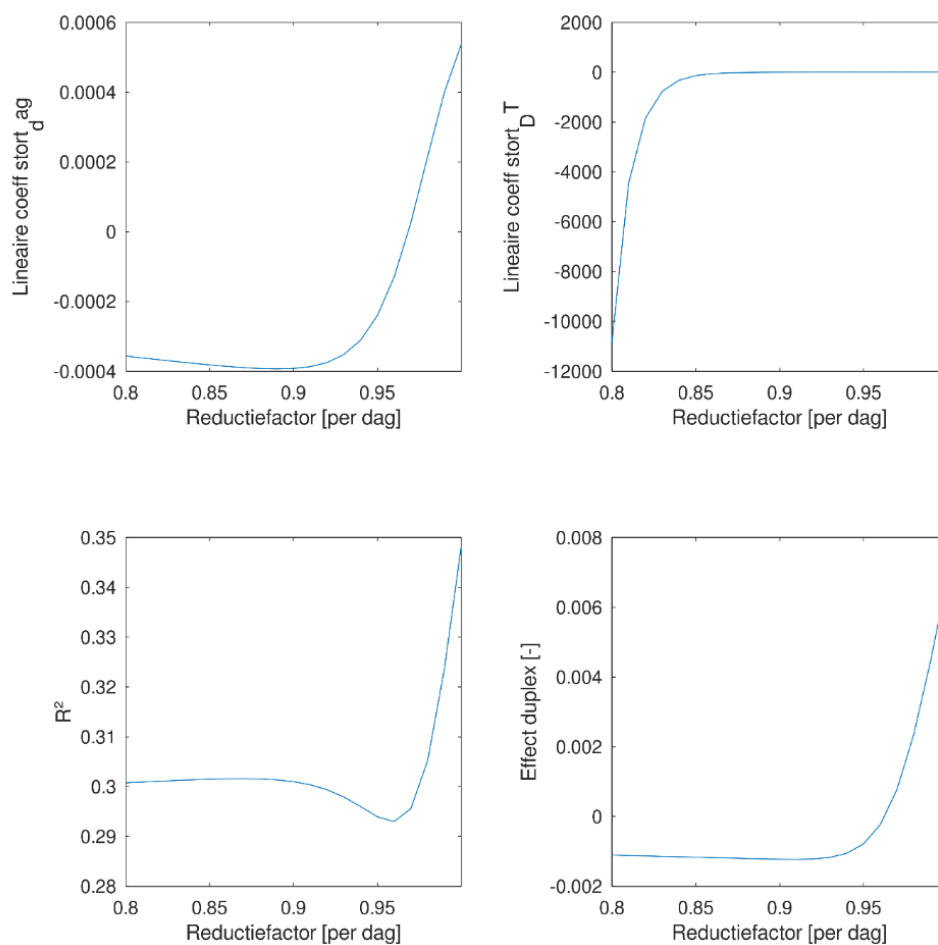
4.2 Reductiefactor

In de vorige paragraaf werd beschreven hoe het tijdsaspect voor het effect van stortingen kan worden meegenomen in het multivariaat model. Per meetlocatie wordt - volgens dit concept - de periode bepaald waarin stortingen een bijdrage kunnen leveren aan de SSC op een bepaalde locatie. Deze periode kan variëren in duur (één dag tot verschillende weken) en in tijdsvertraging (één dag tot enkele maanden). Aangezien het effect van een storting afneemt doorheen de tijd (doordat sediment zich op bepaalde stroomluwe locaties kan afzetten), wordt een reductiefactor (RF) berekend op basis van tijd tussen de dag van de storting en de dag van de SSC meting, en wordt deze toegepast op de gestorte volumes. Hierbij wordt uitgegaan van een exponentiële reductie: $RF^{\text{aantal dagen}}$. Figuur 5 geeft de invloed van de reductiefactor weer op het effect doorheen het jaar behorende bij een bepaalde reductiefactor. Voor een reductiefactor van 0,80 zal het effect van de stortingen quasi verdwenen zijn na 30 dagen, terwijl bij een reductiefactor van 0,99 er na een half jaar een aandeel van ca. 20% meegerekend wordt.



Figuur 5 – Effect reductiefactor gedurende één jaar

Om de meest realistische reductiefactor te bepalen, is voor de verschillende meetstations een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de reductiefactor (zie Bijlage 4: Gevoeligheidsanalyse reductiefactor). Voor waarden variërend tussen 0,80 en 0,99 werd het MVM opgemaakt. Figuur 6 toont de berekende lineaire coëfficiënten van het MVM, de R^2 en het effect van extra stortingen voor de Duplex variant voor de verschillende waarden van de reductiefactor. Het patroon is gelijkaardig voor de verschillende locaties: de hoogste R^2 wordt bereikt voor een reductiefactor van 0,99. Daarnaast kan worden opgemerkt dat de lineaire coëfficiënt voor de stortingen (zowel storthoeveelheid per getij als deze rekening houdend met de tijdsvertraging (DT)) ter hoogte van Weert een negatieve waarde heeft voor een reductiefactor kleiner dan 0,97. Dit is onlogisch aangezien verwacht kan worden dat stortingen aanleiding geven tot toename in SSC in plaats van een afname. Op basis van deze resultaten wordt dan ook gekozen om een reductiefactor van 0,99 te hanteren in het MVM.



Figuur 6 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Weert
Boven: lineaire coëfficiënten voor storing instantaan (links) en met tijdsvertraging (rechts)
Onder: R² van MVM (links) en toename in SSC door extra stortingen bij duplex-variant (rechts)

5 Multivariaat model (uitbreiding)

5.1 Methodologie

Als uitbreiding van het basis MVM (Hoofdstuk 3), wordt een bijkomende verklarende parameter beschouwd in het uitgebreide MVM. Per meetlocatie wordt nagegaan of vroegere stortingen een invloed kunnen hebben op de SSC ter hoogte van de meetlocatie. Dit wordt berekend op basis van (1) de afgelegde afstand van een sedimentdeeltje (§ 4.1.3), de afstand tussen de stortlocaties en de SSC meetlocatie en de reductiefactor (§4.2). De afstand tussen de stortlocaties en de meetlocaties wordt berekend op basis van de afstand van de locaties volgens de thalweg van het Schelde-estuarium (Vandenbruwaene *et al.*, 2021). Voor de verschillende stortlocaties wordt een gewogen gemiddelde berekend op basis van de procentuele bijdrage van de verschillende stortlocaties (Oosterweel 45% | Punt van Melsele 30% | Ketelputten 25%) over de periode 2017-2020 (i.e. sinds de ingebruikname van de vigerende vergunning, incl. de stortlocatie Ketelputten).

Dit levert volgend, uitgebreid empirisch model:

$$SSC = \alpha_{stort} \cdot STORT(instantaan) + \alpha_{vBT} \cdot VERBLIJFTIJD + \alpha_{GF} \cdot GETIJFACTOR \quad (2) \\ + \alpha_{stort_{DT}} \cdot STORT_DT(tijdsvertraging) + \delta$$

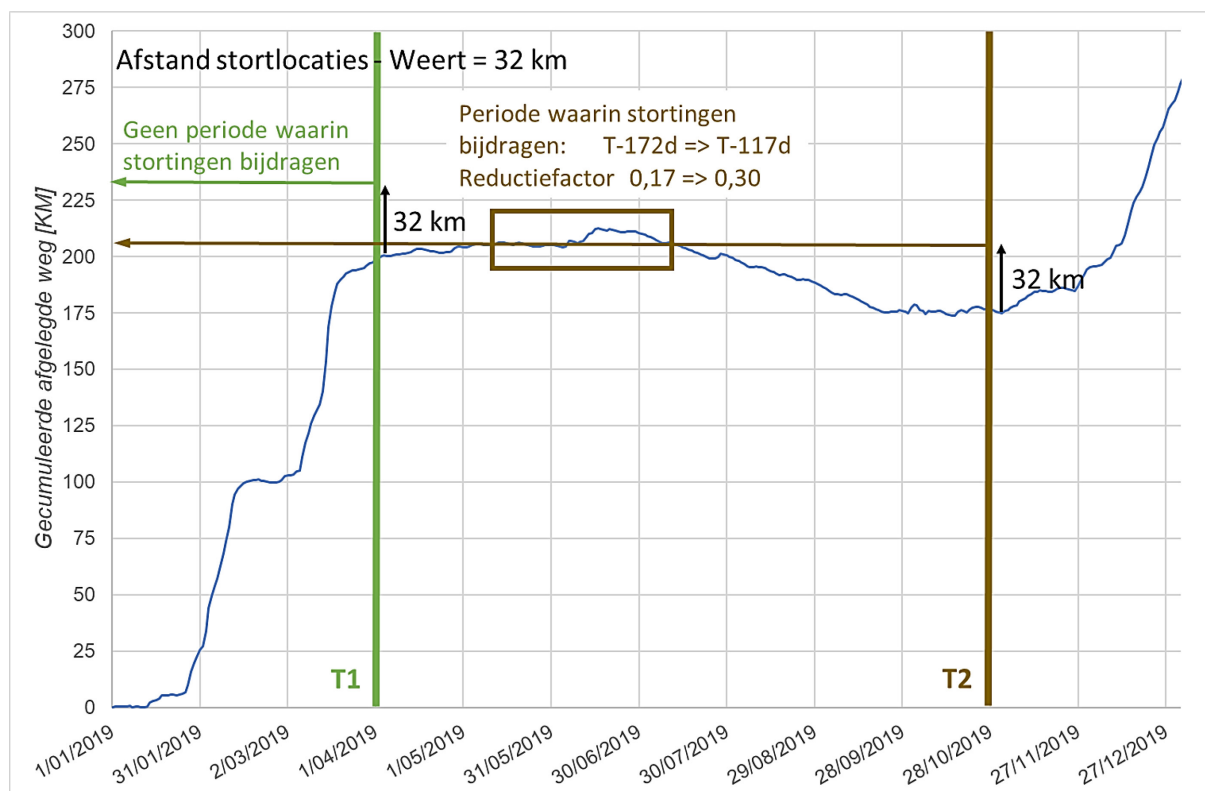
Voor de afgelegde afstand zal er voor de meetlocaties Oosterweel, Kruibeke, Weert en Schellebelle gekeken worden of er residueel opwaarts transport heeft plaatsgevonden in de periode voorafgaand aan moment T. Voor meetpaal Lillo betreft het afwaarts gericht transport. Indien zich periodes voordoen waarvoor het residuele transport de afstand tot de meetlocatie kan overbruggen, zal per storting die valt in deze periode, de reductiefactor toegepast worden (functie van het aantal dagen tussen moment T en het moment van de betreffende storting). De “gereduceerde” stortvolumes worden vervolgens opgeteld om tot een bijkomende verklarende parameter te komen die in het multivariate model wordt meegenomen.

Figuur 7 illustreert de methodiek voor het meetstation Weert, 32 km opwaarts van de stortlocaties gelegen. Moment T1 (1/4/2019) valt net na een periode met hoge bovenafvoer. Stortingen die ervoor afwaarts gebeurd zijn, zullen onder invloed van de bovenafvoer verder uitgespoeld worden en zullen niet tot in Weert geraken (geen overlap groene horizontale pijl-lijn en blauwe curve). Moment T2 (1/11/2019) valt na een lange droge periode, waardoor sediment opwaarts kan getransporteerd worden. Dit blijkt ook uit de figuur, aangezien er een periodes is waarin de bruine horizontale pijl-lijn en blauwe curve snijdt (T2-172 dagen tot T2 - 117 dagen). De stortingen die binnen deze periode (aangegeven door bruine rechthoek) gebeurd zijn, kunnen dus door residueel opwaarts transport tot in Weert geraken. Naarmate de storting eerder heeft plaatsgevonden, zal het effect kleiner zijn, wat meegenomen wordt door het toepassen van de reductiefactor: de vroegste stortingen (T2 – 172 d) worden voor 17% meegenomen, de meest recente (T2 - 117 d) voor 30%. Alle stortingen binnen deze periode, mits toepassen van de reductiefactor voor het moment van de storting ten opzichte van het beschouwde moment van de SSC meting, worden samengeteld en vormen een bijkomende verklarende parameter (“stort_DT”).

5.2 Resultaten

Volgens de hierboven beschreven methodiek, werd per meetlocatie een nieuwe multivariate analyse uitgevoerd. De resultaten (lineaire coëfficiënten en statistische parameters) worden weergegeven in Tabel 3. Hieruit blijkt dat de regressie-coëfficiënten (R^2) ietwat zijn toegenomen doch nog steeds eerder klein zijn (0,25 (Kruibeke) tot 0,50 (meetpaal Lillo). Waar de stortingen binnen het beschouwde getij niet significant bleken voor Weert op basis van het basis MVM (en ook in het uitgebreide MVM niet zijn), is de bijdrage van de stortingen rekening houdend met de tijdsvertraging wel significant. Dit is logisch en komt beter overeen met de verwachting. Dit uitgebreide model zal dan ook ingezet worden voor het inschatten van de effecten van de bijkomende stortingen. Voor Schellebelle bleek er geen bijdrage van de stortingen te zijn binnen de beschouwde periode, ook wanneer er rekening gehouden wordt met de tijdsvertraging. De afstand tussen de stortlocatie en meetstation Schellebelle was in de beschouwde hydrodynamische condities te groot om te overbruggen voor het gestorte slib. Op basis van de resultaten waarbij het residueel transport van sediment ingeschat wordt op basis van eerder beschreven methode, blijkt dat er ter hoogte van Schellebelle geen effecten van de stortingen verwacht worden (negatieve waarde lineaire coëfficiënt stortingen in het betreffende getij is onrealistisch, zie hoger).

De vergelijking van de gemodelleerde waarden op basis van het uitgebreide MVM en de meetwaarden is opgenomen in Bijlage 5: Validatie MVM (uitgebreid).



Figuur 7 – Concept invloed stortingen door residueel transport voor locatie Weert

Tabel 3 – Overzicht lineaire coëfficiënten voor het uitgebreide multivariaat model
Waarden in het *grijs* geven aan dat relatie NIET SIGNIFICANT (p-waarde > 0,05) is

Lineaire coëfficiënt	Getijfactor	Verblijftijd	Storting	Stort_DT	R ²
Overloop Hansweert	<i>Niet berekend omwille van dubieuze turbiditeitsdata</i>				
Meetpaal Lillo	3,6E+02	-2,2E+00	7,8E-03	8,7E-05	0,50
Oosterweel	1,6E+02	-2,3E+00	2,2E-02	2,1E-04	0,38
Kruibeke	1,2E+02	-2,8E-01	6,6E-03	1,9E-04	0,25
Weert	1,4E+02	2,0E+00	<i>4,0E-04</i>	6,9E-04	0,32
Schellebelle	<i>9,4E-01</i>	1,3E+00	-5,3E-04	-	0,41

6 Inschatting effect extra stortingen

Met behulp van het uitgebreide multivariate model kan het effect van de bijkomende stortingen ten behoeve van het onderhoud van het 2^e getijdedok op de SSC ingeschat worden. Op basis van de hydrodynamische simulaties en het empirisch aanslibbingsmodel, is berekend dat jaarlijks 708000 TDS extra onderhoudsbaggerwerk nodig is bij de DUPLEX-variant. Dit onderhoudsbaggerwerk wordt in het multivariate model meegenomen door een dagelijkse extra storthoeveelheid van 1207 m³V' te beschouwen. Er wordt in het basis-stortscenario geen temporele variatie aangebracht in de stortintensiteit (constante dagelijkse storthoeveelheid doorheen het volledig jaar). Aangezien het uitgebreide model rekening houdt met opwaarts transport van gestorte specie afhankelijk van de residuele afgelegde weg, dient deze bijdrage expliciet berekend te worden voor de verschillende meetlocaties.

Aangezien de multivariate analyse uitgevoerd werd voor de periode 1/7/2016 – 31/12/2020, wordt ook het effect van de extra stortingen voor deze periode berekend. Tabel 4 geeft het overzicht weer van de te verwachten toename in SSC ten gevolge van de extra stortingen. Ter vergelijking wordt ook de toename op basis van het oorspronkelijk MVM (op basis van de OMES-data - zie Plancke *et al.* (s.d.)) weergegeven. Voor Overloop van Hansweert (dubieuze turbiditeitsdata, zie § 3.3) en Schellebelle (geen effect stortingen) werd geen berekening uitgevoerd. Een belangrijke opmerking is dat dit de gemiddelde toename over de volledige rekenperiode betreft. Door het toepassen van het uitgebreide MVM zal er een belangrijke temporele variatie aanwezig zijn in de toename in SSC. **Het verdient dan ook de aanbeveling expliciet rekening te houden met deze temporele variatie.**

De maximale toename wordt teruggevonden ter hoogte van Oosterweel, gelegen vlakbij de belangrijkste stortlocaties. De toename bedraagt hier +5,9% ($\Leftrightarrow$ +7,0% volgens MVM-OMES). Voor de locatie meetpaal Lillo bedraagt de toename +3,8% ($\Leftrightarrow$ +5,9% volgens MVM-OMES), terwijl ook voor Kruibeke de toename in dezelfde grootteorde zit (+3,4%). Voor Weert is de toename het kleinst (+0,5%). Het hier berekende patroon is gelijkaardig aan dit volgens het MVM op basis van de OMES-data. De toenames volgens het MVM op basis van de continue metingen liggen wel systematisch lager (3 – 54% in de Beneden-Zeeschelde). Voor Weert is de afwijking groter, al dient hier opgemerkt te worden dat de bijdrage van stortingen in het MVM op basis van de OMES-data niet significant is (p-waarde > 0,05), waardoor toepassing ervan voor dit aspect (stortingen) onzeker is (zie Tabel 4). Ook voor het MVM op basis van de continue metingen is de bijdrage van de stortingen niet significant wanneer naar de ogenblikkelijke getijwaarden wordt gekeken, doch is dit wel significant wanneer de tijdsvertraging expliciet wordt meegenomen. Aangezien het MVM opgemaakt op basis van de continue data dichter aansluit bij de fysische processen, wordt verwacht dat deze resultaten nauwer aansluiten bij de realiteit.

Tabel 4 – Overzicht parameters multivariate modellen en effect duplex o.b.v. continue metingen (MONEOS-WL) en periodieke metingen (OMES)

Uitgebreid MVM o.b.v. continue metingen								Ratio O/C	MVM o.b.v. OMES-data (Plancke <i>et al.</i> , s.d.)						
Locatie	#	R ²	GF	VB	STg	STt	ΔSSC		ΔSSC	STw	VB	GF	R ²	#	Zone
Overloop Hansweert	<i>Dubieuze turbiditeitsdata</i>							-	<i>Geen SSC-metingen beschikbaar</i>					KM20-30	
Meetpaal Lillo	2805	0,50					+3,81%	1,54	+5,85%				0,27	340	KM60-70
Oosterweel	2825	0,38					+5,86%	1,20	+7,03%				0,30	678	KM70-80
Kruikeke	3117	0,25					+3,36%	1,03	+3,45%				0,22	398	KM80-90
Weert	2099	0,32					+0,45%	-	0,00 %				0,33	196	KM100-110
Schellebelle	2680	0,41					0,00 %	-	0,00 %				0,04	388	KM140-150

Legende:

= aantal metingen gebruikt voor het opstellen van het multivariate model

R² = regressie-coëfficiënt voor multivariaat model

GF = getijfactor (**groen** = p-waarde < 0,05 | **rood** = p-waarde > 0,05)

VB = verblijftijd (**groen** = p-waarde < 0,05 | **rood** = p-waarde > 0,05)

STg = storthoeveelheid “slib” per getij (**groen** = p-waarde < 0,05 | **rood** = p-waarde > 0,05)

STt = storthoeveelheid “slib” rekening houdend met tijdsvertraging (**groen** = p-waarde < 0,05 | **rood** = p-waarde > 0,05)

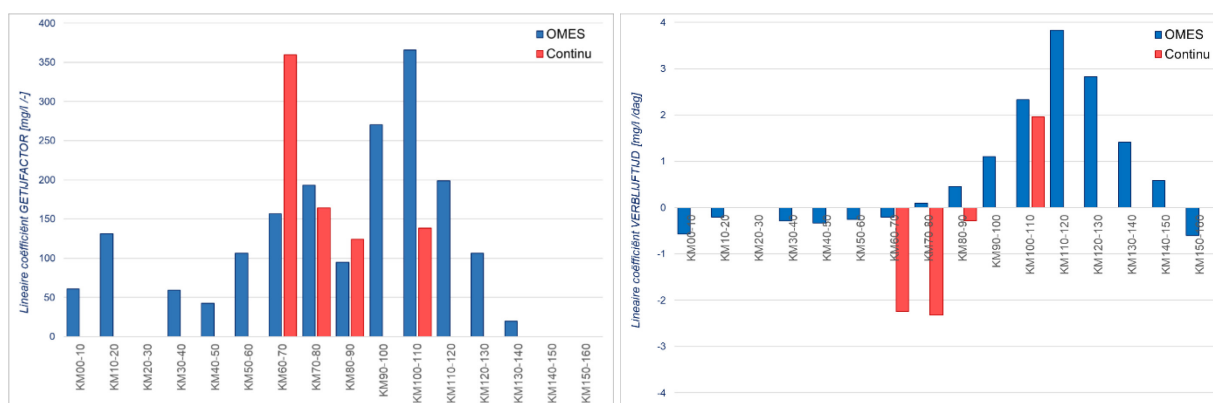
STw = storthoeveelheid “slib” per week (**groen** = p-waarde < 0,05 | **rood** = p-waarde > 0,05)

ΔSSC = verandering (scenario DUPLEX t.o.v. referentie) in gemiddelde SSC over de periode 1/7/2016-31/12/2020 berekend met MVM

Ratio O/C = verhouding van ΔSSC o.b.v. OMES t.o.v. Continue metingen

7 Ruimtelijke uitbreiding

De effecten van de extra stortingen op de SSC dienen ingeschat te worden over het volledige Schelde-estuarium. Op basis van de OMES-dataset was het mogelijk over het grootste deel van het estuarium (segmenten van 10 km) de lineaire coëfficiënten te bepalen. Op basis van de continue metingen is dit slechts op een beperkt aantal punten beschikbaar, wat de ruimtelijke uitbreiding bemoeilijkt. Gelet op het verschil in coëfficiënten tussen het MVM op basis van de OMES-dataset en dit op basis van de continue metingen, is een doorvertaling tussen beiden niet evident (Figuur 8). Om een inschatting van de effecten op SSC te maken, is een ruimtelijke uitbreiding van de individuele coëfficiënt niet mogelijk. Daarom wordt een alternatieve benadering gevolgd, waarbij de berekende effecten (toename in SSC) ruimtelijk uitgebreid zullen worden. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de afwaartse en opwaartse uitbreiding.

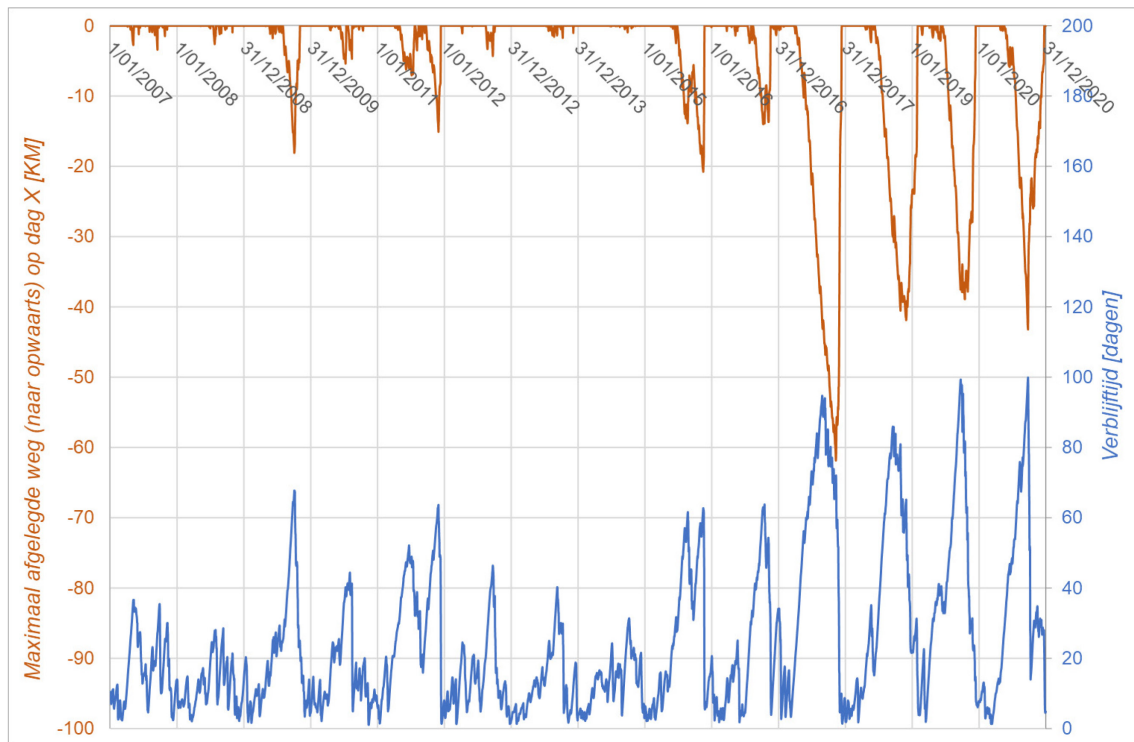


Figuur 8 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek en continu): getijfactor (links) en verblijftijd (rechts)

Het grootste effect wordt verwacht ter hoogte van de stortlocaties. De continue meetpost Oosterweel is gelegen vlakbij de stortlocaties Oosterweel en Punt van Melsele, waar het merendeel (ca. 80%) van de stortingen de dag van vandaag plaatsvindt. Er mag dan ook verwacht worden dat de maximale toename in SSC op deze locatie plaatsvindt. Dit volgt trouwens ook uit de MVA op basis van de OMES-dataset, waar het grootste effect werd gevonden in het segment 70-80 km, waarin ook Oosterweel (KM75) is gelegen.

De opwaartse uitbreiding van de inschatting van de effecten gebeurt aan de hand van de ingeschatte effecten op basis van de MVA van de continue meetstations in het opwaartse deel. Aanvullend wordt een inschatting gemaakt van de meest opwaartse locatie tot waar een effect kan verwacht worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de maximale opwaartse verplaatsing die ingeschat wordt volgens eerder beschreven methodiek. Voor de periode 2018-2020 blijkt de maximale opwaartse locatie te liggen op KM119 (enkele km afwaarts van Dendermonde), terwijl voor de periode 2009-2013 (simulatieperiode van het OMES-model) geen effect is ter hoogte van Driegoten-Weert. Er dient opgemerkt te worden dat de recente periode gekenmerkt wordt door aanzienlijk langere en drogere periodes dan de meeste jaren ervoor (Figuur 9), wat zich ook manifesteert in hogere verblijftijd: 2019 en 2020 kenden een gemiddelde verblijftijd van 100 dagen, in de jaren ervoor bleef deze beperkt tot 60 dagen. Dit resulteert in een meer opwaarts gelegen locatie van dit nulpunt vergeleken met de jaren voordien. Aanvullend aan de met het MVM berekende verandering in SSC, wordt een extra punt (0% op KM XX met XX = 119 voor 2018-2020 en XX = 103,5 voor 2009-2013) toegevoegd voor de ruimtelijke uitbreiding naar opwaarts. Verder opwaarts wordt geen verandering in SSC ten gevolge van stortingen verwacht, wat ook overeenstemt met het resultaat uit het MVM van Schellebelle.

Het longitudinaal profiel van de verandering in SSC in het opwaartse deel wordt in Figuur 10 voor beide periodes getoond.



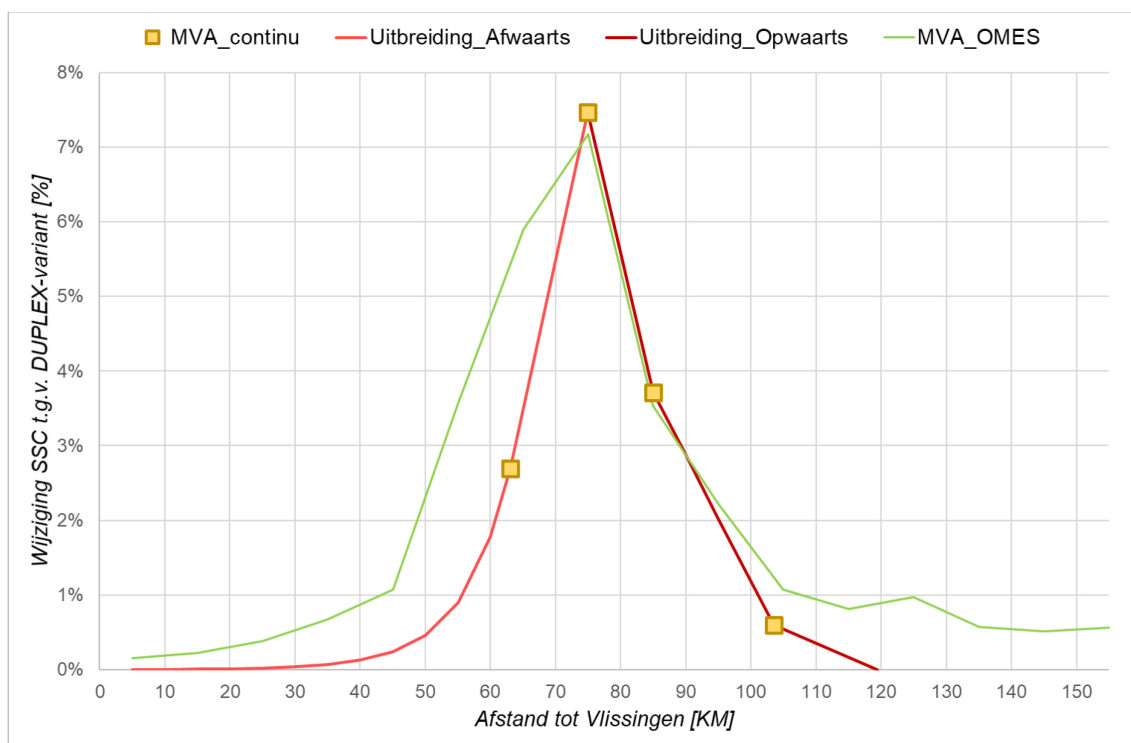
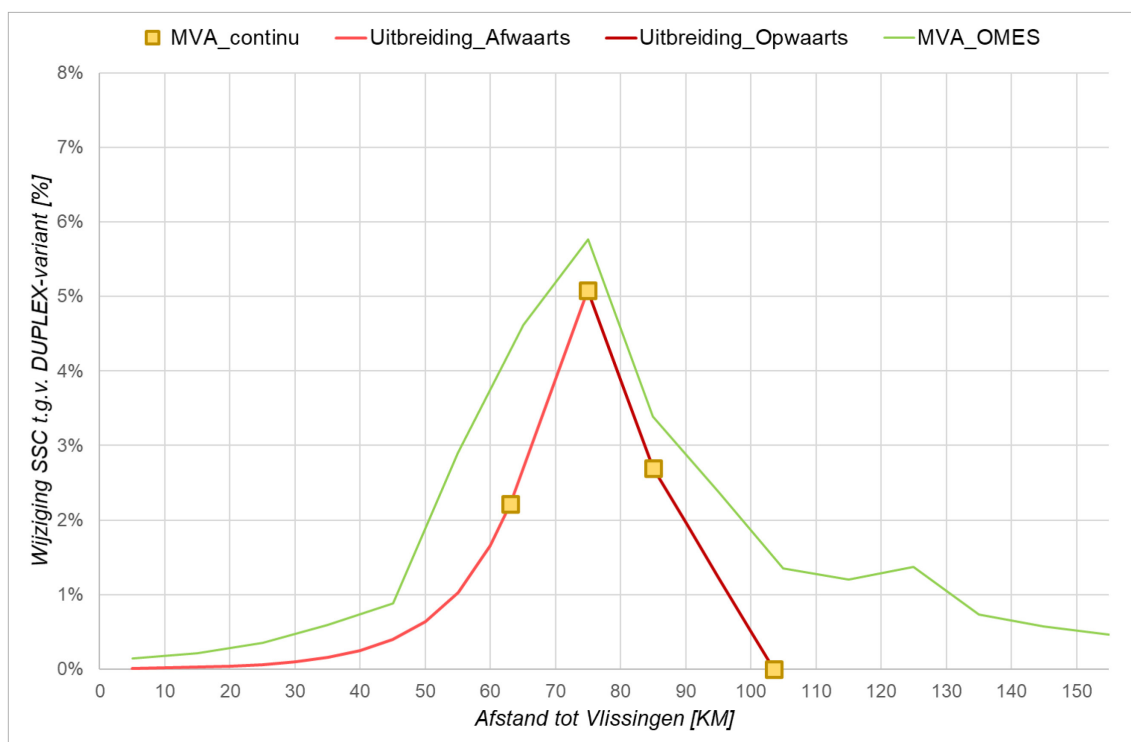
Figuur 9 – Maximaal afgelegde weg (oranje) en verblijftijd (blauw) over de periode 2007-2020

Voor de ruimtelijke uitbreiding naar afwaarts is dezelfde methodiek niet mogelijk, doordat hiervoor slechts één bijkomende meetlocatie (meetpaal Lillo) voorhanden is. De ruimtelijke uitbreiding dient op een andere manier gerealiseerd te worden. Twee methodes werden onderzocht:

- (1) Schaling van het effect van het 2GTD volgens de OMES-dataset volgens een factor die de verhouding is van het effect volgens het MVM o.b.v. de OMES-dataset en de continue metingen; voor Oosterweel bedraagt de factor 0,83 en voor meetpaal Lillo 0,71.
- (2) Schaling van het effect van het 2GTD op basis van de ruimtelijke variatie van de getijvolumes; hierbij is het uitgangspunt dat de toename in sedimentmassa gelijk blijft en er verdunning optreedt door de toename van getijvolume naar afwaarts; deze benadering is conservatief en houdt geen rekening met sedimentatie doorheen het estuarium (e.g. retourstroom naar baggerlocaties).

Beide methodes kunnen toegepast worden vertrekkend van Oosterweel of meetpaal Lillo. Wanneer vertrokken wordt van de waarde te Oosterweel, wordt een effect berekend te Lillo, waardoor een afwijking ontstaat ten opzichte van het berekende effect op basis van de continue metingen alhier. Er wordt dan ook geadviseerd om de uitbreiding te gebruiken vertrekkend vanaf meetpaal Lillo. Tussen Oosterweel en Lillo wordt een lineaire interpolatie van het effect toegepast.

Beide methodes hebben een vergelijkbaar verloop afwaarts Lillo, waarbij de methode gebruik makend van de getijvolumes aanleiding geeft tot grotere effecten dan de schaling met de factor. Aangezien de methode op basis van de getijvolumes dichter bij de fysische realiteit ligt, wordt gekozen om deze methode toe te passen. Dit resulteert in het ruimtelijke verloop weergegeven in Figuur 10, opnieuw voor beide periodes.



Figuur 10 – Ruimtelijke uitbreiding van het effect op SSC van extra stortingen voor het volledige estuarium
Boven: periode 2009-2013 | onder: periode 2018-2020

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Door het verschil in het berekende effect op de SSC door middel van het MVM opgesteld op basis van de OMES-metingen ten opzichte van de sMER, is de vraag gesteld om een bijkomende analyse uit te voeren, waarbij het MVM opgemaakt wordt op basis van de continue metingen. De verwachting hierbij is dat een MVM op basis van continue meetdata een betrouwbaarder resultaat oplevert vergeleken met een MVM op basis van periodieke getij-afhankelijke meetdata. Hiermee wordt eenzelfde methodiek gevolgd als tijdens het sMER, al zijn er een aantal verschillen (o.a. huidige i.p.v. vroegere meetlocaties en recente i.p.v. oude analyseperiode).

Op basis van de nieuwe analyse blijkt dat voor 4 van de 6 locaties een significante (en logische⁸) relatie kan gevonden worden tussen de SSC en de instantane stortingen. De meetgegevens ter hoogte van Overloop van Hansweert bleken onvoldoende betrouwbaar om de MVA uit te voeren. In tegenstelling tot eerdere analyse, werd het model uitgebreid om de tijdsvertraging tussen de stortingen en de verandering in SSC op de verschillende locaties expliciet mee te beschouwen. Deze uitbreiding werd gerealiseerd door (1) de residuele transportafstand van een sedimentdeeltje in te schatten in functie van de bovenafvoer en (2) een reductiefactor gerelateerd aan het moment van storting toe te passen (bijdrage oude stortingen kleiner dan recente).

De sterkste toename ten gevolge van de extra stortingen ten behoeve van het onderhoud van het 2^e getijdendok (duplex-variant), is voor de periode 2009-2013 terug te zien in Oosterweel (+5,1%). Voor de dichtstbij (beiden binnen getijweglengte) gelegen locaties, opwaarts (Kruibeke) en afwaarts (meetpaal Lillo) wordt een gelijkaardige toename voorspeld (resp. +2,7% en +2,2%). Voor Weert wordt voor de periode geen verhoging in de SSC voorspeld. Wanneer een recentere periode (2018-2020) wordt beschouwd, wordt er wel een effect berekend ter hoogte van Weert. Dit is toe te schrijven aan de bijdrage rekening houdend met de tijdsvertraging. Het directe effect van de stortingen bleek hier, net zoals voor het MVM op basis van de OMES-dataset, niet significant te zijn. Voor Schellebelle wordt geen toename in SSC verwacht ten gevolge van de extra stortingen: zowel op basis van de continue als periodieke OMES metingen bleek het effect van de stortingen hier niet significant.

De hier berekende toename in sedimentconcentratie ligt voor de Beneden-Zeeschelde hoger dan de waarden berekend voor "Alternatief 9" in het sMER: voor meetpaal Lillo (B84) is in het sMER sprake van een toename van +2%, voor Oosterweel van +4%. Voor Driegoten stelt het sMER een toename < 1% vast, wat vergelijkbaar is met de hier berekende toename. Het verschil kan toegeschreven worden aan ietwat andere aannames voor het MVM, alsook het verschil in periode waarvoor de verschillen werden berekend.

Voor de ruimtelijke uitbreiding naar het effect op het volledige estuarium werd een verschillende methode toegepast voor het op- en afwaartse deel. De opwaartse uitbreiding gebeurt op basis van de berekende waarden volgens het MVM voor de continue metingen voor de stations Oosterweel, Kruibeke en Weert, met daarnaast een inschatting van de meest opwaartse locatie waar een effect kan verwacht worden volgens de afgelegde weg. Voor de afwaartse uitbreiding wordt het verloop berekend volgens het MVM ter hoogte van Lillo en wordt een schaling volgens het getijvolume toegepast. Dit komt overeen met het fysische proces waarbij de afwaartse toename in getijvolume wat voor een verdunning zorgt op vlak van

⁸ Voor Schellebelle werd ook een significante relatie gevonden, doch dit resulteert in een negatieve coëfficiënt, wat niet volgens de verwachting is. Daarnaast is het ook onmogelijk dat het effect van een storting zich tijdens hetzelfde getij manifesteert ca. 70 km opwaarts.

sedimentconcentraties. Aan de hand van deze ruimtelijke uitbreidingen, kan het effect begroot worden over het volledige estuarium.

8.2 Aanbeveling

Binnen deze analyse werd een uitbreiding van het MVM uitgevoerd waardoor het effect van de stortingen met een tijdsvertraging in rekening kon gebracht worden. Dit stemt overeen met wat in de realiteit verwacht wordt. De uitbreiding is echter, omwille van beschikbaarheid van data, gebaseerd op de residuele (per getijcyclus) transportafstand van sediment voor de locatie Driegoten-Weert. Een uitbreiding van deze methode voor de volledige Beneden-Zeeschelde zal het model verder ten goede kunnen komen. Het verdient dan ook de aanbeveling om de analyse van de residuele transportafstanden uit te voeren voor de stations Kruibeke en meetpaal Lillo, waarvoor de gegevens beschikbaar zijn.

9 Referenties

Cox, T.; Meire, P. (2015). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: deelrapport 6. Effecten op primaireproductie van verschillende scenario's voor het terugstorten van slib. ECOBE 016-. ECOBE: Antwerp. Available at: <http://www.vliz.be/nl/open-marien-archief?module=ref&refid=284550>

International Marine and Dredging Consultants. (2016). Multivariate analyse van metingen van sedimentconcentratie in de Zeeschelde.

International Marine and Dredging Consultants. (2017). Multivariate analyse van de sedimentconcentraties in de Zeeschelde op basis van Omes oppervlakte stalen. 59 pp.

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). Verbetering randvoorwaardenmodel: deelrapport 4. Extra aanpassingen in de Zeeschelde. *WL Rapporten*, 753_09. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Plancke, Y.; Smolders, S.; Mostaert, F. (2020). Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: deelrapport 14. Data-analyse met behulp van een multivariaat model naar invloedsfactoren op de sedimentconcentratie in de Zeeschelde. versie 3.0. *WL Rapporten*, 17_088_14. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=325582>

Plancke, Y.; Smolders, S.; Vanlede, J. (S.d.). Complex Project ECA – Extra Containercapaciteit Antwerpen: Deelrapport 3 – Inschatting van de verandering in SSC met behulp van een multivariaat model

Plancke, Y.; Van Braeckel, A.; Cox, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Sedimentstrategie Beneden-Zeeschelde: deelrapport 8. Samenvatting. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_025. Antea Group: Antwerpen

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. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=336667>

Plancke, Y.; Vereecken, H.; Claeys, S.; Mostaert, F. (2018). Hydro- en sedimentdynamica in het mondingsgebied van het Schelde-estuarium: deelrapport 1. Factual data rapport frame- en puntmetingen periode augustus 2014. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_083_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://www.vliz.be/nl/open-marien-archief?module=ref&refid=294898>

Plancke, Y.; Vereecken, H.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Slibbalans-Zeeschelde: deelrapport 5. Metingen halftij-eb Boven-Zeeschelde 2013. *WL Rapporten*, 00_029. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Schramkowski, G.P.; Smolders, S.; Mostaert, F. (2019). Sedimentstrategie Schelde-estuarium: Gesimuleerde seizoenseffecten met iFlow

SHIP. (2020). Complex project 'Realisatie van extra containerbehandelingscapaciteit in het havengebied Antwerpen' - Projectonderzoeksnota CCL. 655 pp.

Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal plan Bovenzeeschelde: Subreport 1. SCALDIS: a 3D Hydrodynamic model for the Scheldt Estuary. *WL Rapporten*, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Spronk, G. (2013). Continue metingen op de Overloop van Hansweert. 26 pp.

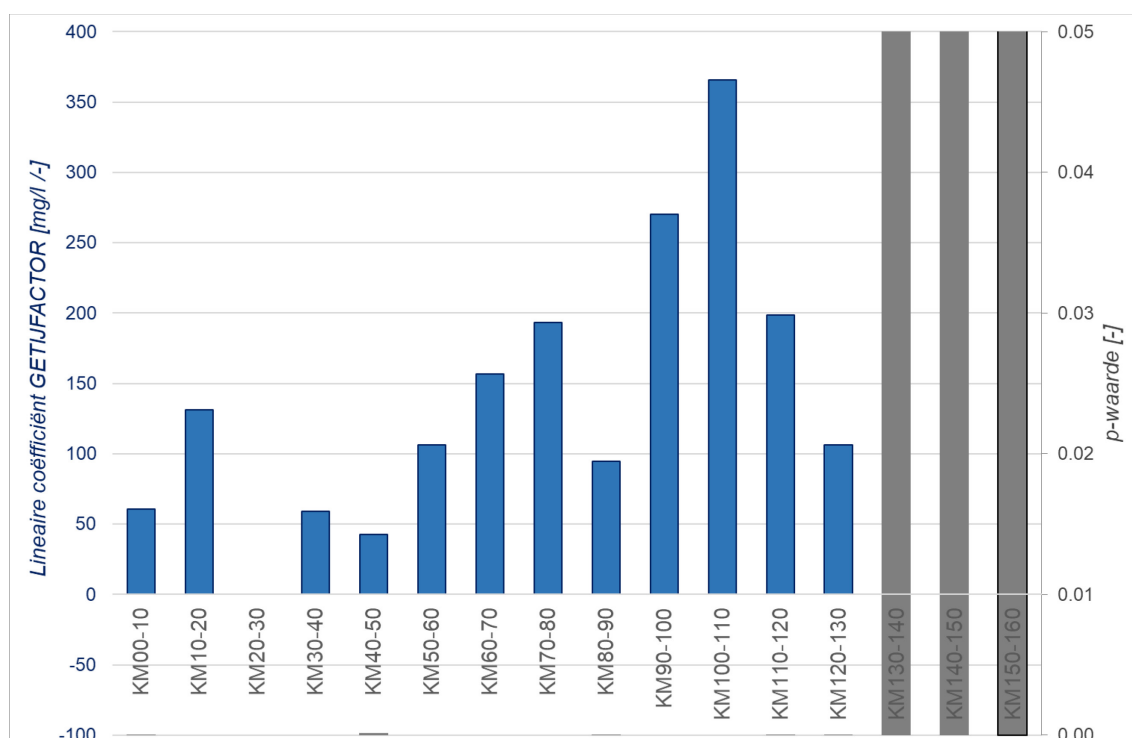
Tractebel; KENTER. (2019). Complex Project Extra Containerbehandelingscapaciteit Havengebied Antwerpen (CP ECA) - Geïntegreerd onderzoek Strategisch Milieueffectrapport. 1442 pp.

Van Zelst, V. (2019). Continuous measurements Overloop van Hansweert for the years 2012, 2013 and 2014. 13 pp.

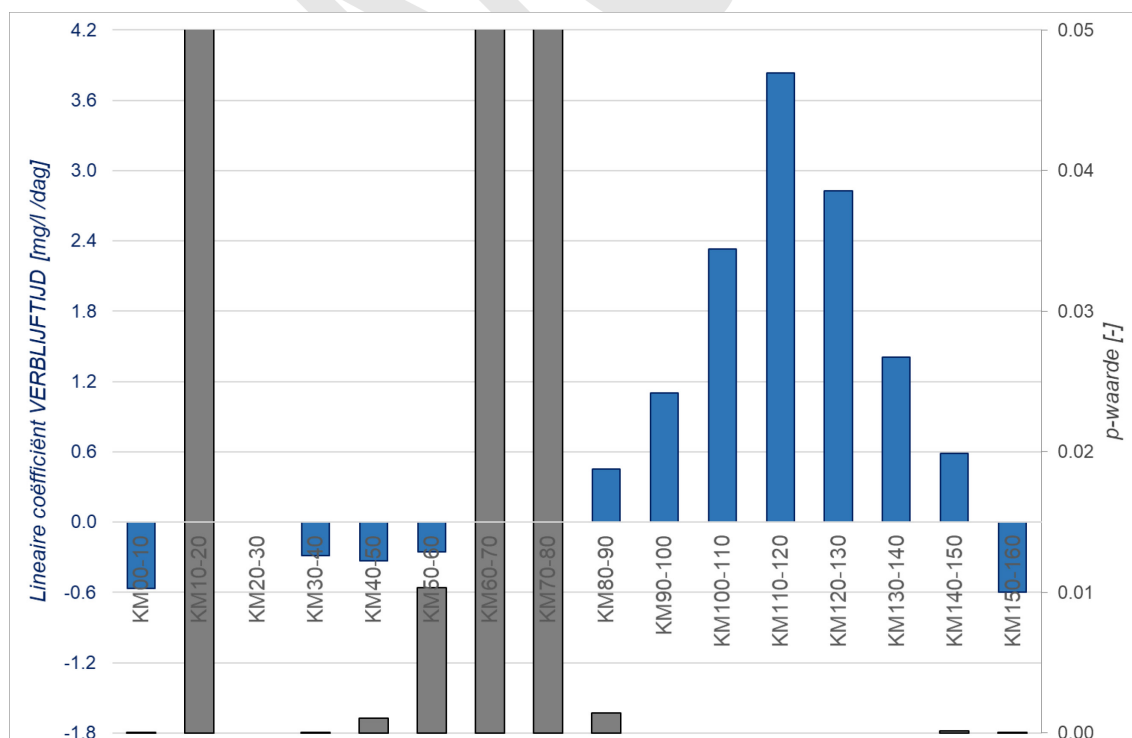
Vandenbruwaene, W.; Bertels, J.; Michielsen, S.; Thant, S.; Van Den Berg, M.; Brackx, M.; Hertoghs, R.; Claey, S.; Plancke, Y.; Vereecken, H.; Meire, D.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2021). Monitoring Effecten Ontwikkelingsschets (MONEOS) – Jaarboek monitoring 2020: data rapportage monitoring waterbeweging en fysische parameters in Zeeschelde en bijrivieren. versie 4.0. *WL Rapporten*, PA047_10. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:
<http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=344006>

Vanlede, J.; Dujardin, A. (2014). A geometric method to study water and sediment exchange in tidal harbors. *Ocean Dyn.* 64(11): 1631–1641. doi:10.1007/s10236-014-0767-9

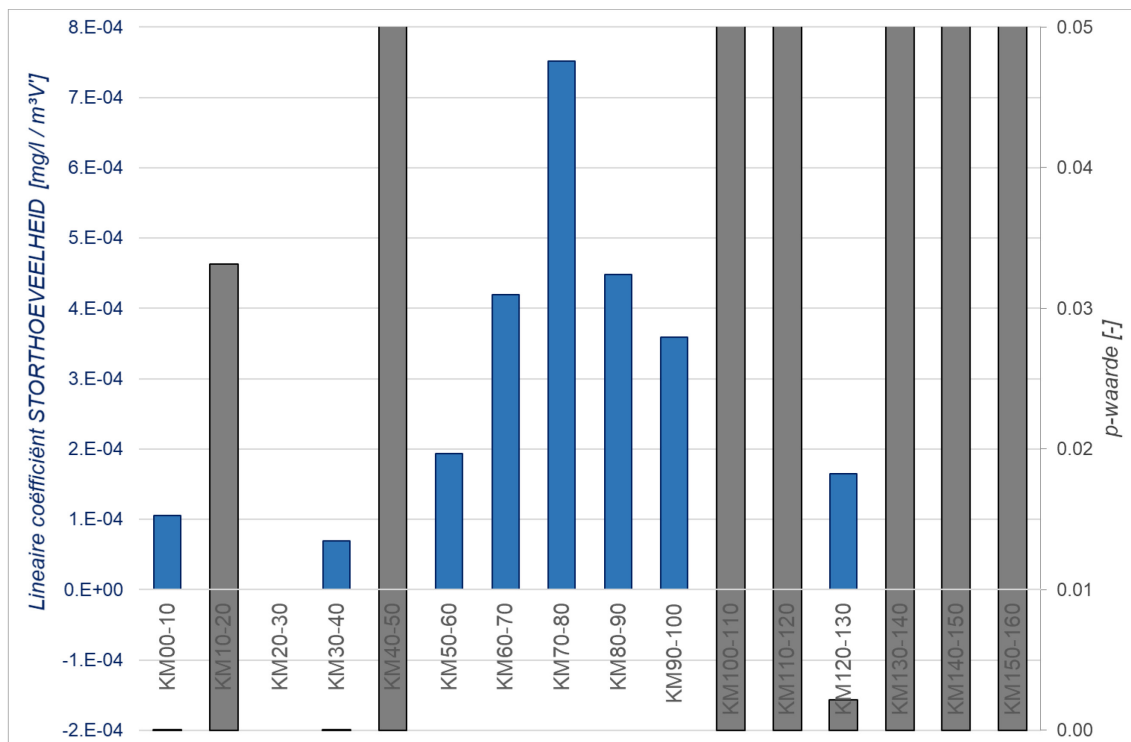
Bijlage 1 Coëfficiënten MVM (periodiek)



Figuur 11 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek): getijfactor
Grijze balken geven p-waarde weer; schaal zo gekozen dat wanneer p-waarde > 0,05 coëfficiënt niet zichtbaar is



Figuur 12 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek): verblijftijd
Grijze balken geven p-waarde weer; schaal zo gekozen dat wanneer p-waarde > 0,05 coëfficiënt niet zichtbaar is



Figuur 13 – Lineaire coëfficiënten MVM (periodiek): stortingen
Grijze balken geven p-waarde weer; schaal zo gekozen dat wanneer p-waarde > 0,05 coëfficiënt niet zichtbaar is

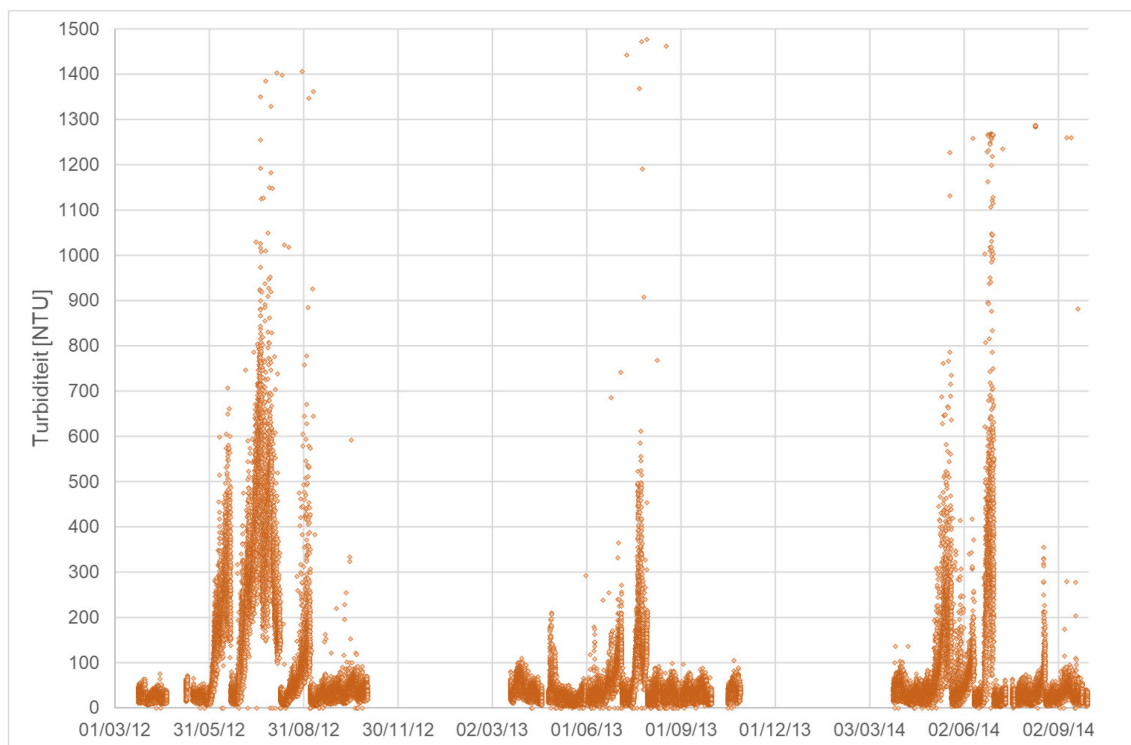
Bijlage 2 Gegevens Overloop van Hansweert

In het kader van het MONEOS-programma werden door Rijkswaterstaat metingen uitgevoerd ter hoogte van de meetpaal Overloop van Hansweert voor het meten van de primaire productie (Figuur 14). Gedurende 3 jaren (2012-2014) werden gedurende een halfjaar (maart – september) telkens verschillende parameters gemeten. Met behulp van een multiparameter-sonde (YSI – 6600v2) werden de verschillende parameters continu (10'-interval) gemeten, waaruit finaal de primaire productie kon berekend worden. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar (Spronk, 2013). Eén van de gemeten parameters is de turbiditeit, die met behulp van een optische backscatter (OBS) sensor werd opgemeten. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 15.

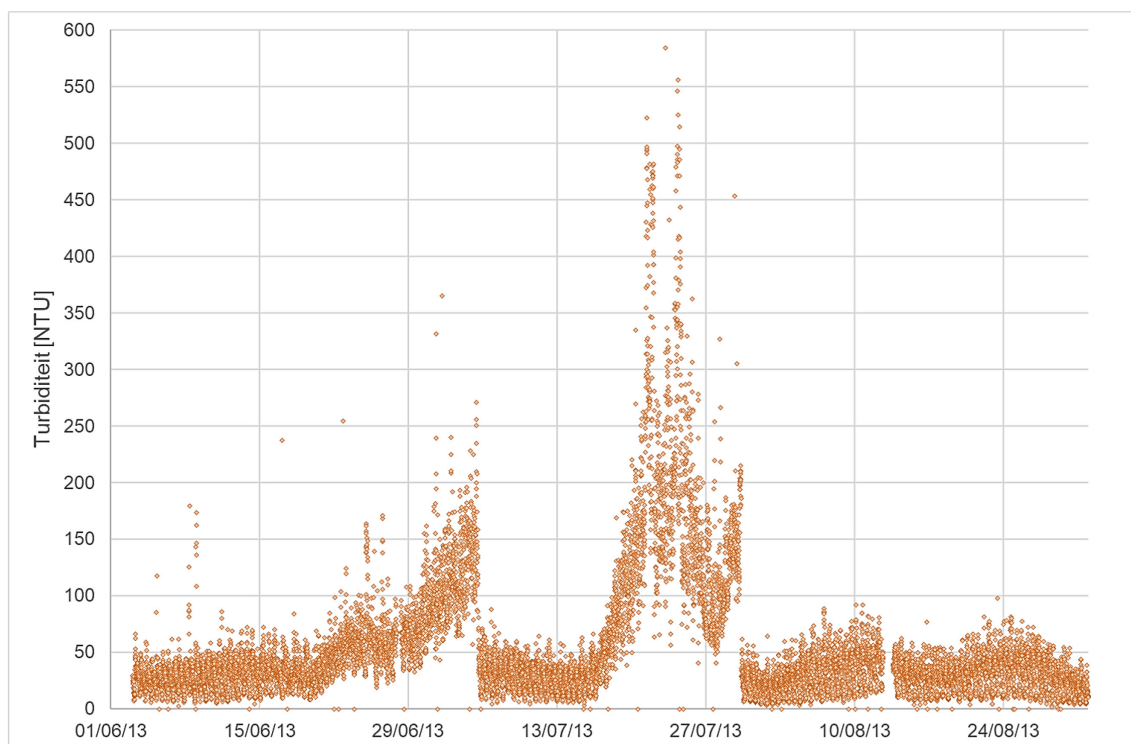
Uit Figuur 14 blijkt dat het meten met deze techniek in deze omgeving uitdagend is. De algengroei die zichtbaar is op de foto, zal het optische signaal verstoren, waardoor metingen gericht op de turbiditeit gerelateerd aan de zwevende sedimenten, verstoord kunnen worden. Aangezien de opgeleverde gegevens geen kwaliteitsvlag bevatten, is het vermoeden dat de door algengroei beïnvloede metingen niet uit de meetreeks werden verwijderd. Dit zorgt ervoor dat de meetreeks niet als turbiditeit gerelateerd aan zwevende sedimenten mag/kan geïnterpreteerd worden.



Figuur 14 – Meetpaal Overloop van Hansweert (links) en detail van YSI multiparameter-sonde (rechts)
Source: (Spronk, 2013)



Figuur 15 – Meetreeks turbiditeit te meetpaal Overloop van Hansweert: volledige meetperiode 2012-2014



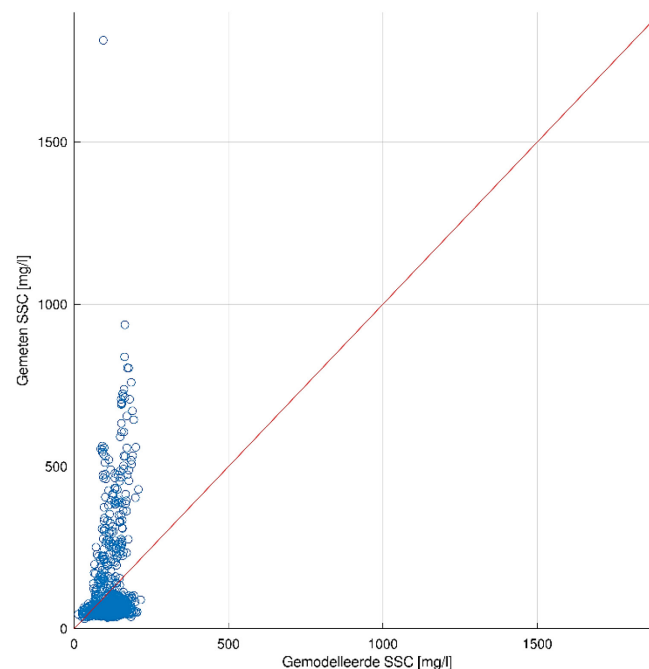
Figuur 16 – Meetreeks turbiditeit te meetpaal Overloop van Hansweert: detail zomer 2013

Figuur 16 toont het verloop van de opgemeten turbiditeit tijdens de zomer van 2013. Hierbij valt het op dat zowel begin juli als begin augustus 2013, er een belangrijke sprong aanwezig is in de data. Hoewel er geen aanvullende informatie beschikbaar is, is het vermoeden dat de toename voor de sprong gerelateerd kan worden aan de aangroei van algen, terwijl de sprong het gevolg is van het kuisen van het toestel. Opgemerkt kan worden dat dergelijke aangroei van algen ook bij eerdere eigen meetcampagnes is vastgesteld (Plancke *et al.*, 2018) en ervoor hebben gezorgd dat meetgegevens slechts gedeeltelijk bruikbaar zijn.

Het toepassen van het multivariate model op de meetgegevens is in principe mogelijk. Tabel 5 geeft de lineaire coëfficiënten voor het MVM. Echter, doordat de meetgegevens verstoord zijn door de algengroei tijdens de meetcampagne, zijn **deze coëfficiënten niet representatief om de variatie in de SSC in te schatten**. Dit model zal dan ook niet verder ingezet worden binnen deze studie. De zeer kleine performantie van het MVM wordt tevens geïllustreerd in Figuur 17 en de zeer lage regressiecoëfficiënt ($R^2 = 0,06$).

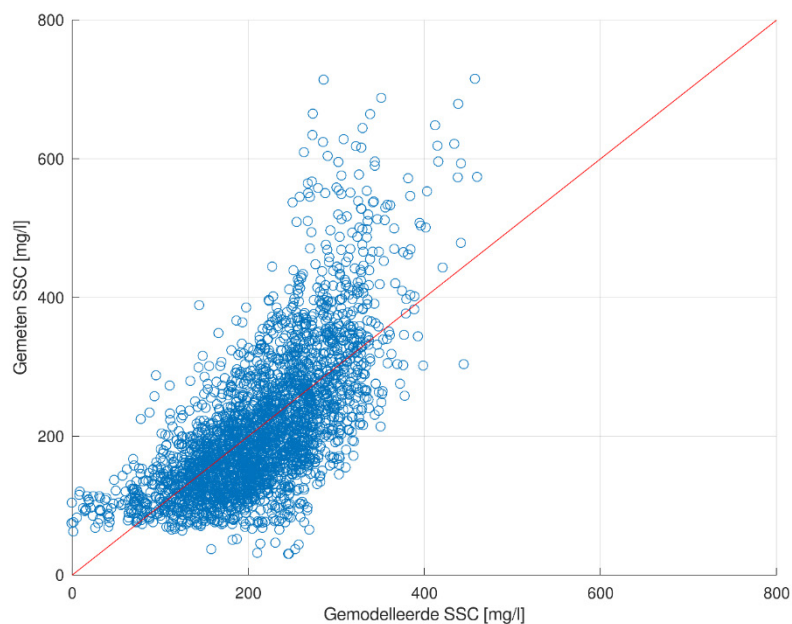
Tabel 5 – Overzicht lineaire coëfficiënten voor het uitgebreide multivariaat model
Waarden in het grijs geven aan dat relatie NIET SIGNIFICANT (p-waarde > 0,05) is

Lineaire coëfficiënt	Getijfactor	Verblijftijd	Storting	Stort_DT	R ²
Overloop Hansweert	1,2E+02	-3,4E+00	6,7E-03	4,1E-05	0,06

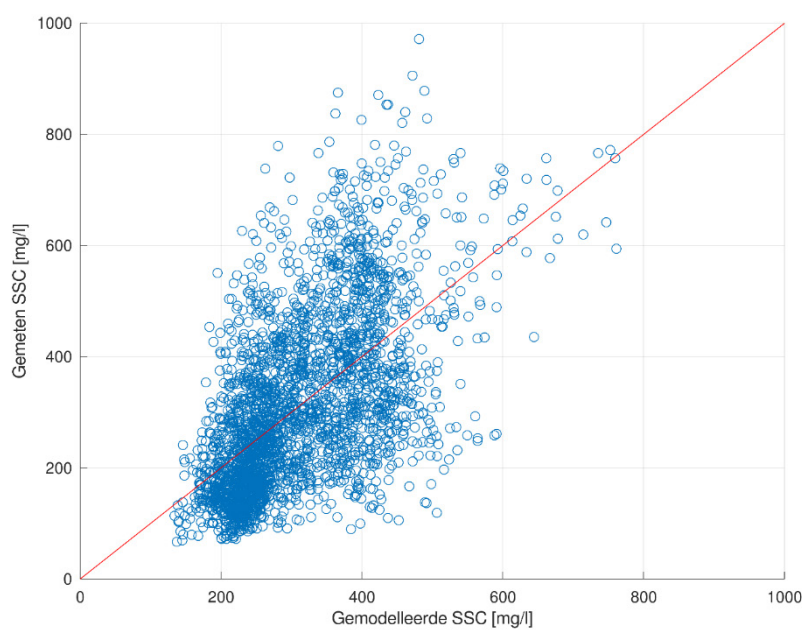


Figuur 17 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Overloop van Hansweert

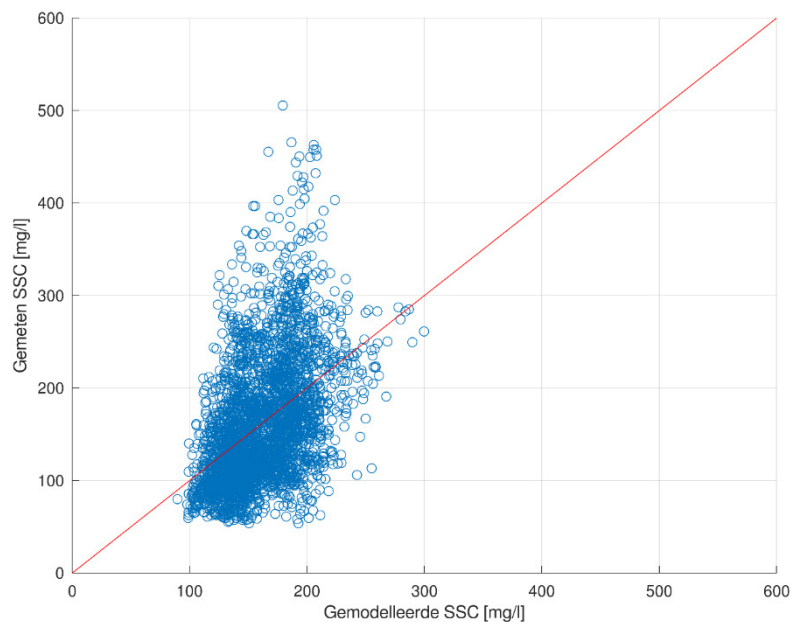
Bijlage 3 Validatie MVM (basis)



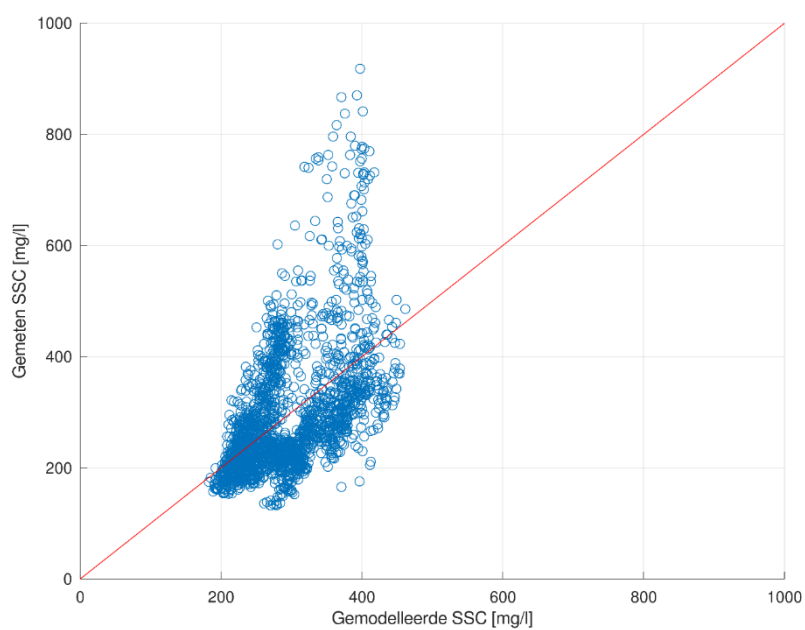
Figuur 18 – Validatie MVM (BASIS) voor meetpaal Lillo onder



Figuur 19 – Validatie MVM (BASIS) voor Oosterweel boven

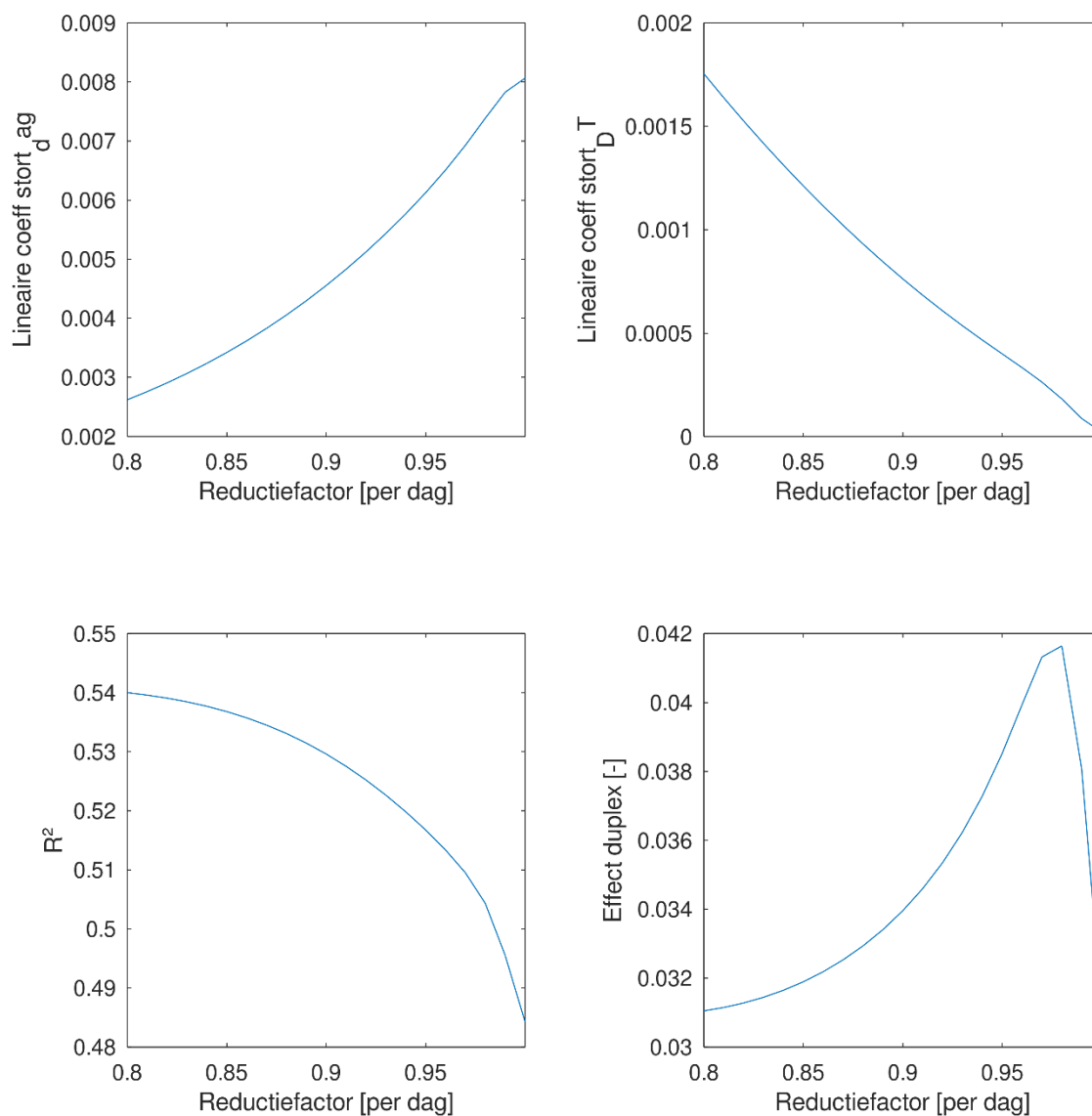


Figuur 20 – Validatie MVM (BASIS) voor Kruibeke

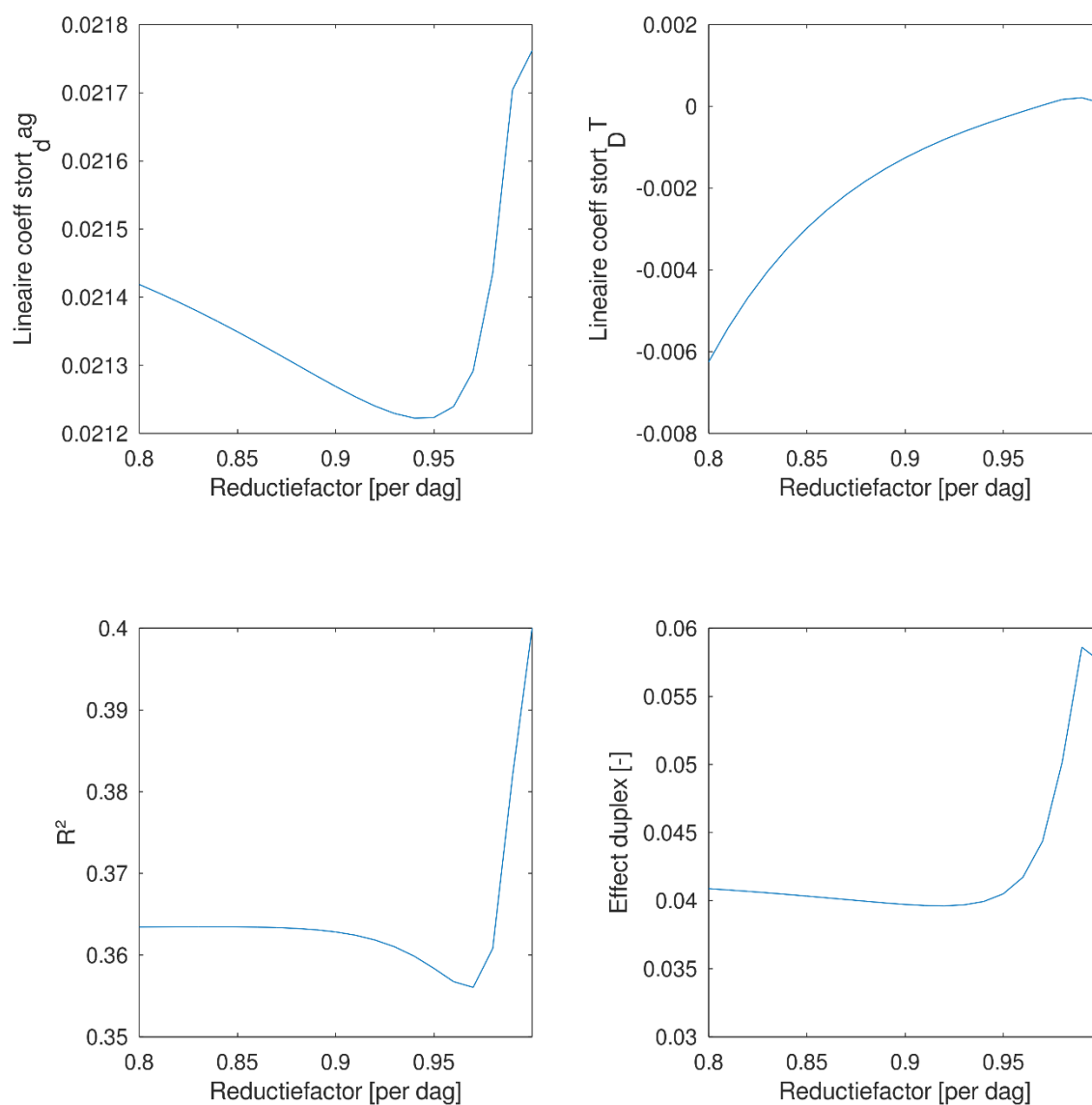


Figuur 21 – Validatie MVM (BASIS) voor Weert

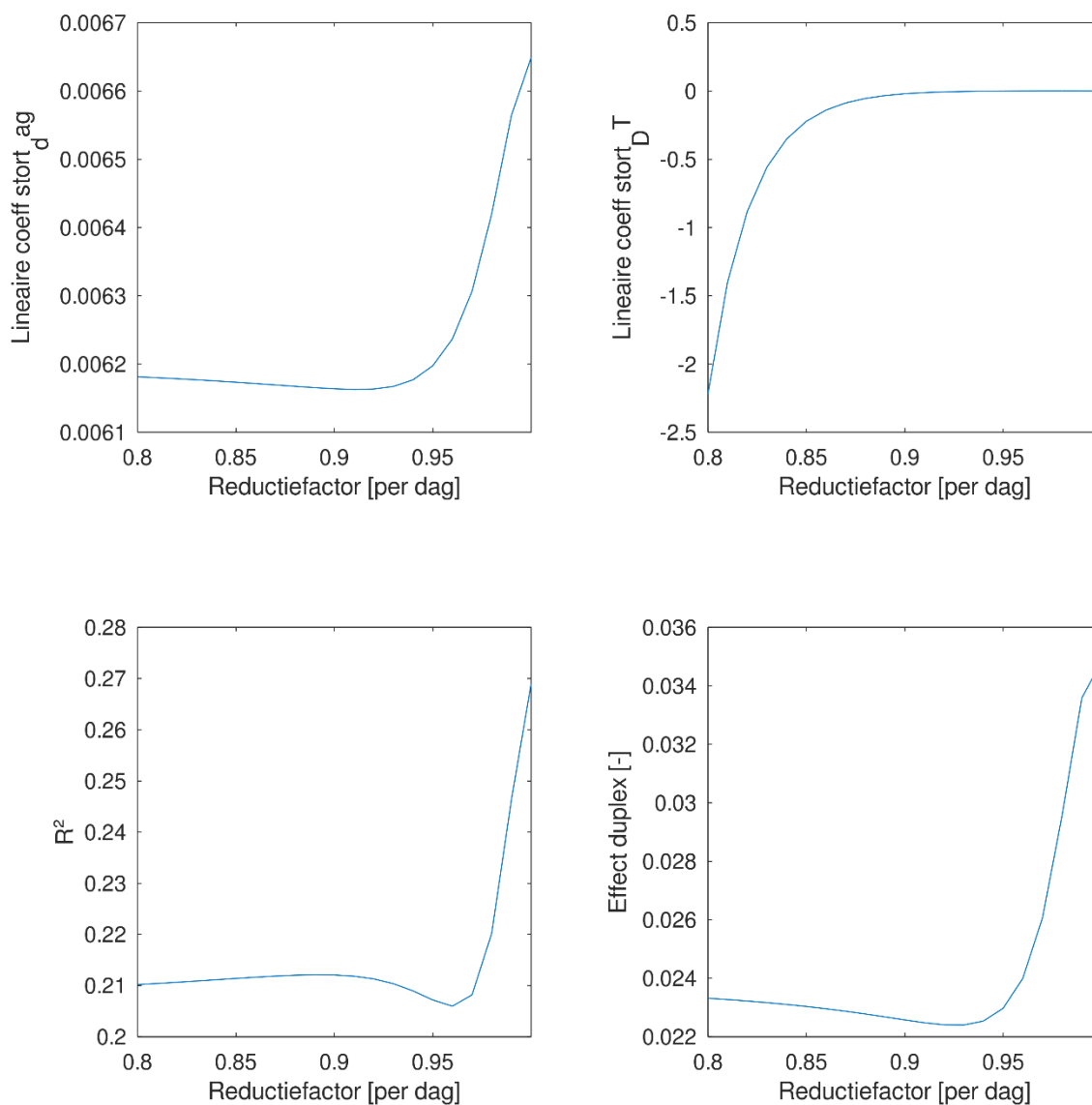
Bijlage 4 Gevoeligheidsanalyse reductiefactor



Figuur 22 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Lillo

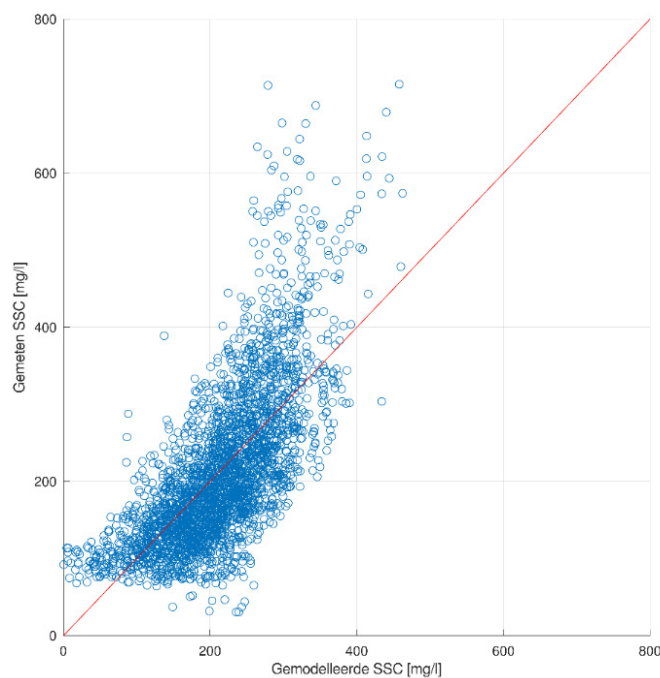


Figuur 23 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Oosterweel

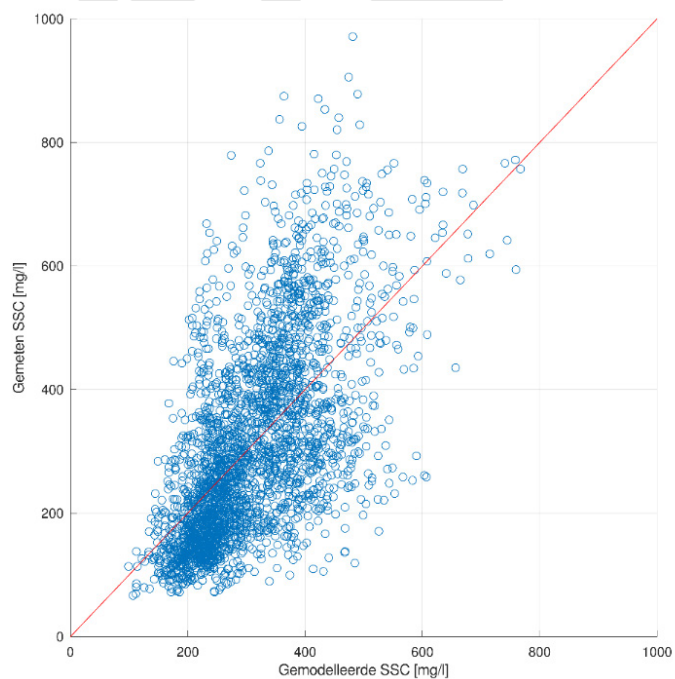


Figuur 24 – Invloed van de reductiefactor op de parameters van het MVM voor Kruibeke

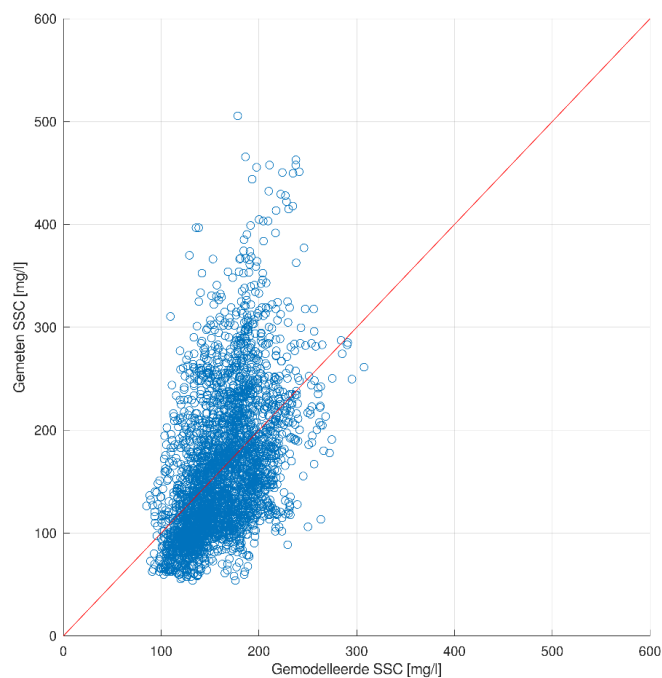
Bijlage 5 Validatie MVM (uitgebreid)



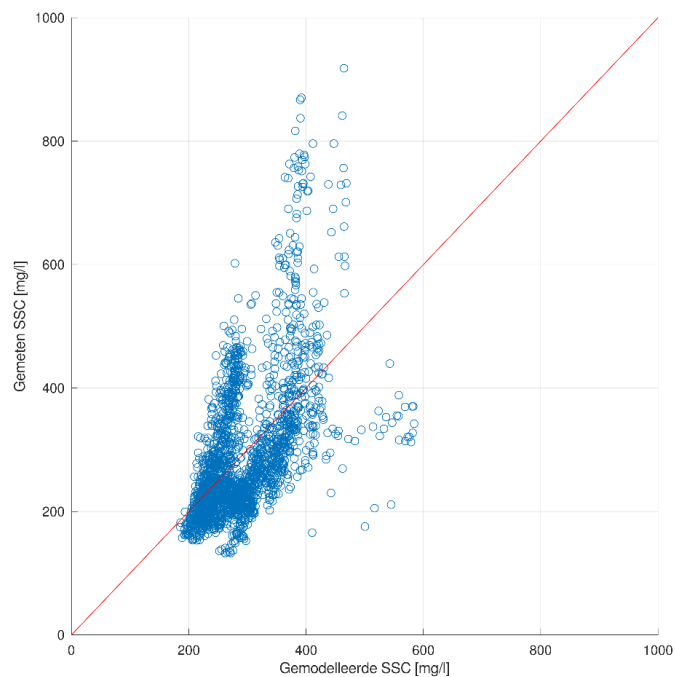
Figuur 25 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor meetpaal Lillo onder



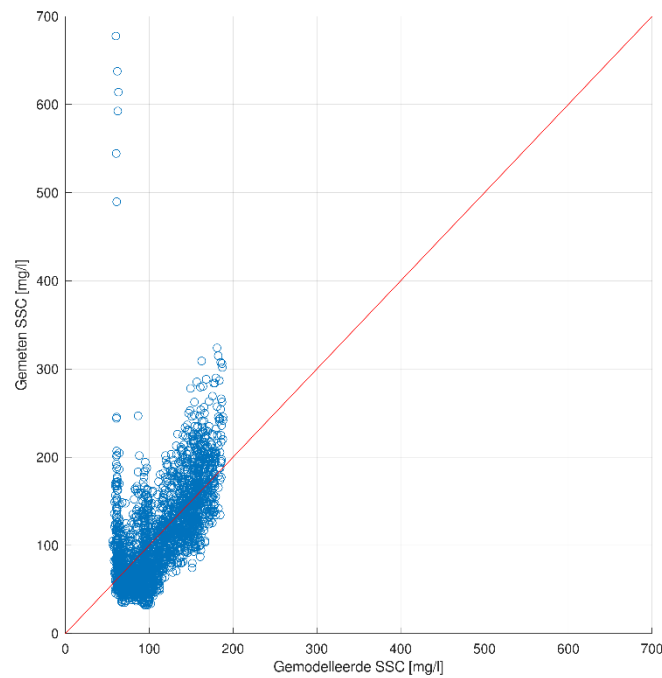
Figuur 26 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Oosterweel boven



Figuur 27 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Kruibeke



Figuur 28 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Weert



Figuur 29 – Validatie MVM (UITGEBREID) voor Schellebelle

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