



Vlaanderen
is wetenschap

16_005_1
WL rapporten

Sedimentfluxen in het Schelde-estuarium

Deelrapport 1
Analyse van de uitgevoerde metingen en de
kubaturberekening ter hoogte van Duffel-sluis

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Sedimentfluxen in het Schelde-estuarium

Deelrapport 1 – Analyse van de uitgevoerde metingen en de kubatuurberekening ter hoogte van Duffel-sluis

Plancke, Y.; Claeys, S.; Deschamps, M.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017
D/2017/3241/266

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Claey, S.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2017). Sedimentfluxen in het Schelde-estuarium: Deelrapport 1 – Analyse van de uitgevoerde metingen en de kubatuurberekening ter hoogte van Duffel-sluis. Versie 2.0. WL Rapporten, 16_005_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie


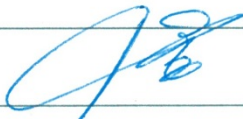
Oprachtgever:	Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen	Ref.:	WL2017R16_005_1
Keywords (3-5):	Monitoring, sediment, stroming, data-analyse, Beneden-Nete		
Tekst (p.):	23	Bijlagen (p.):	30
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Claeys, S.	
Projectleider:	Plancke, Y.	

Goedkeuring

Verantwoordelijke (Steunpunt) HIC:	Deschamps, M.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

Terreinmetingen zijn cruciaal om bepaalde fysische processen in beeld te brengen. In het Schelde-estuarium wordt er de laatste jaren extra veel aandacht besteed aan de sedimenthuishouding, dit omwille van een mogelijke omslag naar een hypertroebel systeem in de Zeeschelde. Om aanvullende kennis te vergaren naar de optimale meetopstelling om sedimentfluxen in beeld te brengen, is een analyse uitgevoerd op de operationele meetpost te Duffel-sluis.

Dit rapport vergelijkt enerzijds de inzetbaarheid van de kubatuurberekening voor het inschatten van debieten in het estuarium, en vergelijkt anderzijds optische en akoestische meettechnieken voor het inschatten van de sedimentconcentratie. Deze 2 parameters leveren samen de sedimentflux in het systeem. Uit de analyse blijkt dat de kubatuur een goede inschatting geeft van de debieten in het estuarium, en dat de optische meettechniek een betere inschatting geeft van de sedimentconcentratie bij fijnere sedimentfracties ("slib"). Deze conclusies worden meegenomen in de optimalisatie van het meetnet in het Schelde-estuarium.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Onderzoeksvragen.....	1
1.3 Opbouw van het rapport.....	1
2 Methodologie	2
2.1 Meetlocatie	2
2.2 Meettechnieken	3
2.2.1 Debiet	3
2.2.2 Sedimentconcentratie	3
2.3 Meetcampagne.....	5
2.3.1 Langdurige metingen.....	5
2.3.2 Testmeting.....	6
2.4 Kubatuurberekening.....	7
2.4.1 Het belang van de kubatuurberekening.....	7
2.4.2 Methodiek voor het uitvoeren van de kubatuurberekening	7
2.4.3 Opzet kubatuurberekening.....	8
3 Testmeting januari 2017.....	9
3.1 Kalibratie indirecte meettechnieken	10
3.1.1 Akoestische backscatter	10
3.1.2 Optische backscatter	10
3.2 Vergelijking afgeleide SSC.....	11
3.3 Variatie over de breedte.....	12
4 Langdurige metingen.....	13
4.1 Debiet	13
4.2 Kalibratie indirecte meettechnieken	15
4.2.1 Akoestische backscatter	15
4.2.2 Optische backscatter	17
4.3 Vergelijking afgeleide SSC.....	18

4.4	Berekening sedimentfluxen.....	19
4.4.1	Methodologie	19
4.4.2	Resultaten.....	19
5	Conclusies en aanbevelingen	21
5.1	Conclusies	21
5.2	Aanbevelingen	22
6	Referenties	23
	Bijlage A – Kalibratie indirecte technieken.....	B1
	Bijlage B – Tijdreeksen – debiet en druk	B3
	Bijlage C –Tijdreeksen - SSC.....	B17
	Bijlage D –Tijdreeksen - sedimentflux	B24

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht beschikbare langdurige metingen	5
Tabel 2 – Overzicht beschikbare metingen tijdens testmeting	6

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Geografische ligging meetlocatie te Duffel-sluis	2
Figuur 2 – Meetopstelling ADP te Duffel-sluis (links) en meetprincipe SL-ADP (rechts).....	3
Figuur 3 – ISCO-staalnametoestel (links), buis waarin YSI is bevestigd (midden) en detail YSI-sensoren (rechts).....	4
Figuur 4 – Principe kubatuurberekening.....	8
Figuur 5 – Verloop van waterstand (boven), stroomsnelheid (midden) en snelheidsrichting (onder) tijdens testmeting	9
Figuur 6 – Relatie gecorrigeerde ABS – SSC (links) en OBS – SSC (rechts) voor alle stalen	10
Figuur 7 – Verloop SSC bepaald op basis van ABS (eerste cel) en OBS tijdens testmeting te Duffel-sluis.....	11
Figuur 8 – Verloop van de ruwe ABS (boven), gecorrigeerde ABS (midden) en afgeleide SSC (onder) tijdens testmeting te Duffel-sluis	12
Figuur 9 – Vergelijking gemeten en berekend debiet te Duffel-sluis.....	13
Figuur 10 – Vergelijking gemeten en berekende afgeleide debietparameters te Duffel-sluis	14
Figuur 11 – Variatie D50 suspensie transport ter hoogte van de meetlocatie Duffel-sluis	15
Figuur 12 – Relatie turbiditeit – SSC (links) en ABS – SSC (rechts) voor alle stalen.....	16
Figuur 13 – Relatie turbiditeit – SSC (boven) en ABS – SSC (onder) met onderscheid tussen eb (links) en vloed (rechts).....	17
Figuur 14 – Relatie SSC op basis van ABS en OBS met onderverdeling volgens de grootte van het debiet en getijfase	18
Figuur 15 – Berekende cumulatieve sedimentflux op basis van ABS (boven) en OBS (onder) over totale meetperiode.....	20
Figuur 16 – Relatie ABS – SSC met onderscheid tussen de verschillende maanden.....	B1
Figuur 17 – Relatie turbiditeit – SSC met onderscheid tussen de verschillende maanden.....	B1
Figuur 18 – Relatie ABS-SSC met onderverdeling volgens de grootte van de snelheden [25-percentiel hoogste (links), 25-50-percentiel hoge (midden) en 50-percentiel laagste snelheden (rechts)] en getijfase [vloed (boven) en eb (onder)]	B2
Figuur 19 – Relatie turbiditeit-SSC met onderverdeling volgens de grootte van het debiet [25-percentiel hoogste (links), 25-50-percentiel hoge (midden) en 50-percentiel laagste debieten (rechts)] en getijfase [vloed (boven) en eb (onder)]	B2
Figuur 20 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 1.....	B3
Figuur 21 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 2.....	B3
Figuur 22 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 3.....	B4
Figuur 23 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 4.....	B4
Figuur 24 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 5.....	B5
Figuur 25 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 6.....	B5
Figuur 26 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 7.....	B6

Figuur 27 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 8	B6
Figuur 28 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 9	B7
Figuur 29 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 10	B7
Figuur 30 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 11	B8
Figuur 31 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 12	B8
Figuur 32 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 13	B9
Figuur 33 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 1	B10
Figuur 34 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 2	B10
Figuur 35 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 3	B11
Figuur 36 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 4	B11
Figuur 37 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 5	B12
Figuur 38 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 6	B12
Figuur 39 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 7	B13
Figuur 40 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 8	B13
Figuur 41 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 9	B14
Figuur 42 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 10	B14
Figuur 43 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 11	B15
Figuur 44 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 12	B15
Figuur 45 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 13	B16
Figuur 46 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 1	B17
Figuur 47 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 2	B17
Figuur 48 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 3	B18
Figuur 49 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 4	B18
Figuur 50 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 5	B19

Figuur 51 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 6.....	B19
Figuur 52 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 7.....	B20
Figuur 53 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 8.....	B20
Figuur 54 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 9.....	B21
Figuur 55 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 10.....	B21
Figuur 56 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 11.....	B22
Figuur 57 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 12.....	B22
Figuur 58 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 13.....	B23
Figuur 59 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 1.....	B24
Figuur 60 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 2.....	B24
Figuur 61 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 3.....	B25
Figuur 62 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 4.....	B25
Figuur 63 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 5.....	B26
Figuur 64 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 6.....	B26
Figuur 65 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 7.....	B27
Figuur 66 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 8.....	B27
Figuur 67 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 9.....	B28
Figuur 68 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 10.....	B28
Figuur 69 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 11.....	B29
Figuur 70 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 12.....	B29
Figuur 71 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 13.....	B30

1 Inleiding

1.1 Situering

In de Evaluatie Verdrag Beleid en Beheer Schelde-estuarium (Vlaams-Nederlandse Scheldec commissie, 2013) wordt een mogelijke omslag naar een hypertroebel systeem in de Zeeschelde als een potentieel risico omschreven. Deze systeemomslag hangt samen met de residuele transporten van fijn sediment in het estuarium en wordt als prioritair onderzoekstopic opgenomen in de Agenda voor de Toekomst (Beirinckx *et al.*, 2013). Het onderzoek spitst zich vooral toe op de achterliggende processen van een potentiële systeemomslag, waarbij gebruik gemaakt wordt van verschillende modellen.

Echter, metingen zijn cruciaal om de fysische processen in beeld te brengen. In voorliggend rapport wordt dan ook een analyse gepresenteerd van verschillende meettechnieken die de sedimentfluxen in het estuarium kunnen in beeld brengen. Deze analyse wordt uitgevoerd voor de operationele meetpost te Duffel-sluis waar, in het kader van MONEOS (Vanlierde, Ferket *et al.*, 2016), al metingen plaatsvinden. De resultaten van deze analyse zullen gebruikt worden om de optimale set-up te vinden voor opstellingen op andere locaties langsheen het estuarium.

1.2 Onderzoeksvragen

In dit onderzoek wordt antwoord gegeven op volgende vragen:

1. Is het mogelijk om de sedimentflux voldoende nauwkeurig in beeld te brengen op een locatie (Duffel-sluis) in het Schelde-estuarium?
2. Indien vraag 1 positief beantwoord kan worden, wat is de optimale meetopstelling om de sedimentflux in beeld te brengen?
3. Wat zijn de randvoorwaarden om de sedimentflux ook op andere locaties langsheen het estuarium nauwkeurig in beeld te brengen?

1.3 Opbouw van het rapport

In het volgende hoofdstuk wordt de meetlocatie te Duffel-sluis besproken, alsook de gebruikte meettechnieken. In hoofdstuk 3 worden de resultaten getoond van een testmeting die gedurende 1 dag plaatsvond. In hoofdstuk 4 worden de resultaten getoond van de langdurige metingen die uitgevoerd worden in het kader van MONEOS. Hoofdstuk 5 geeft een antwoord op bovenstaande onderzoeksvragen en geeft een aantal aanbevelingen voor verder onderzoek.

2 Methodologie

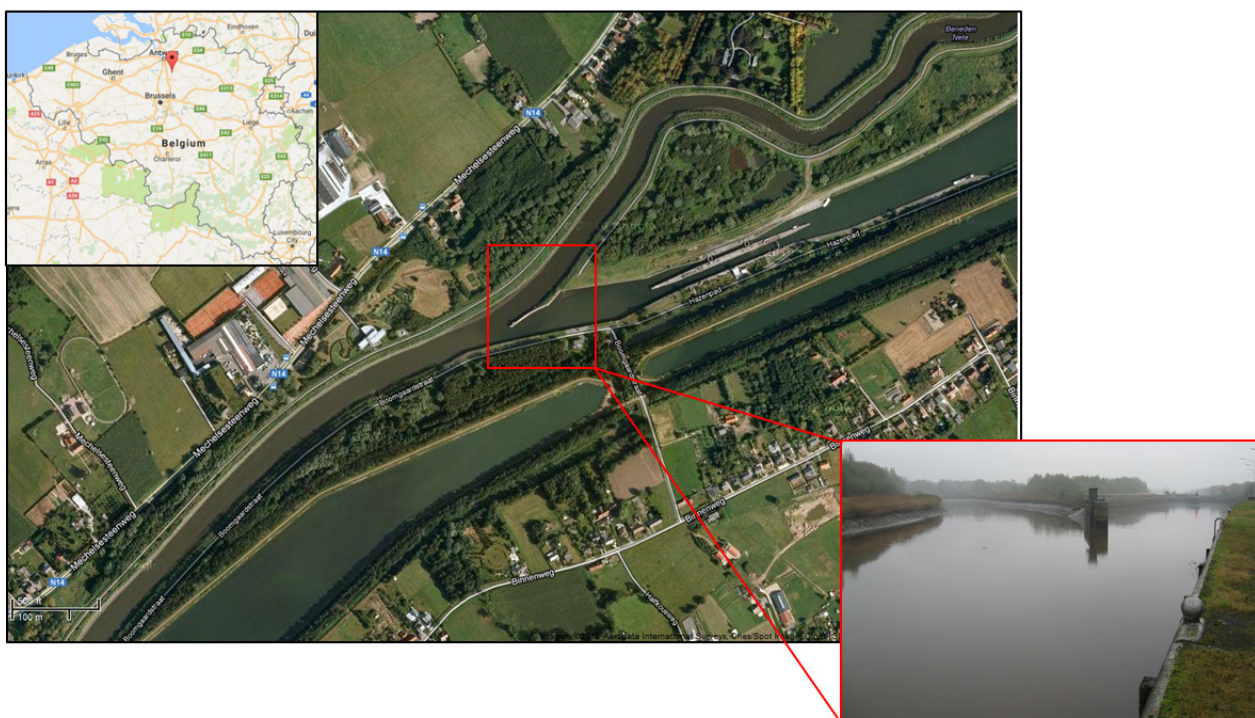
2.1 Meetlocatie

Als meetlocatie werd geopteerd voor Duffel-sluis (HIC-station “bnt03a”) omwille van de beschikbaarheid van verschillende operationele meettoestellen. Duffel-sluis is gelegen op de Beneden-Nete, enkele kilometers stroomafwaarts van de samenvloeiing van de Kleine Nete en de Grote Nete te Lier. De meetlocatie bevindt ter hoogte van de toegang tot het Netekanaal, op het uiteinde van een betonnen geleidingsmuur (Figuur 1).

Sinds het begin van de 20^e eeuw worden op deze locatie de waterstanden gemeten. Voor het decennium 2001-2010 is de jaargemiddelde hoogwaterstand +5,59 m TAW en de jaargemiddelde laagwaterstand +1,28 m TAW (Vanlierde, Michielsens *et al.*, 2016).

Vanaf april 2010 wordt hier ook continu het debiet en verschillende fysische parameters gemeten. Door de ligging in het getijgebied, treden op deze locatie eb- en vloedstromingen op. In 2016 bedroeg het maximale ebdebiet +130 m³/s, terwijl het maximale vloeddebiet -149 m³/s bedroeg. Op basis van de continue registraties, kunnen ook de daggemiddelde debieten berekend worden. In 2016 bedroeg het 50^e percentiel van het daggemiddelde debiet 14,5 m³/s.

Figuur 1 – Geografische ligging meetlocatie te Duffel-sluis



2.2 Meettechnieken

Voorliggend rapport heeft tot doel de sedimentfluxen te bepalen ter hoogte van Duffel-sluis. De sedimentflux Q_s [g/s] wordt berekend door het product te nemen van het debiet Q [m³/s] en de sedimentconcentratie **SSC** [g/m³]. Deze 2 laatste parameters kunnen gemeten worden, waarbij voor het meten van de sedimentconcentratie verschillende technieken gebruikt worden.

2.2.1 Debiet

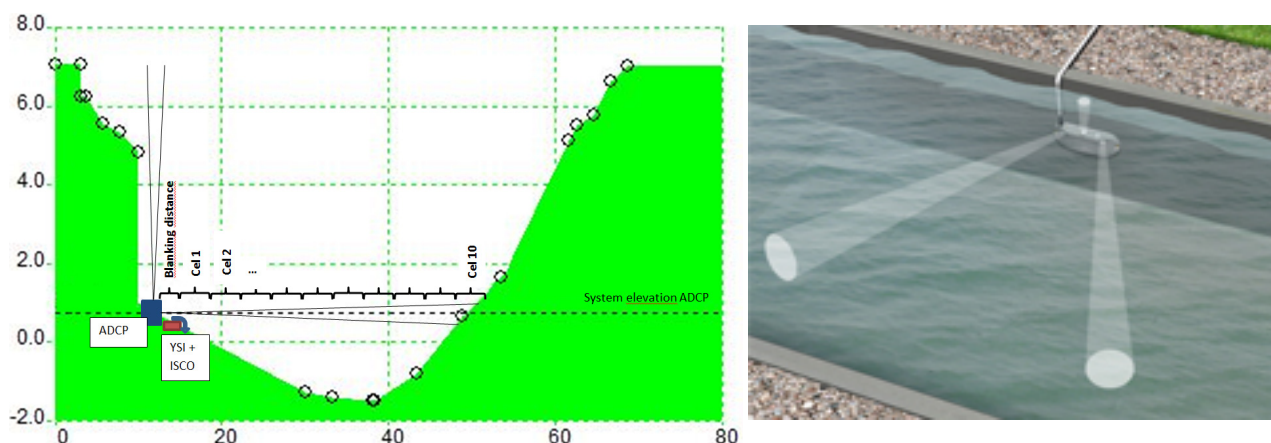
Het debiet wordt gemeten met behulp van de SonTek-SL500 akoestische stroming- en debietmeter. Het meetprincipe van deze Acoustic Doppler Profiler (ADP) is gebaseerd op akoestische Döppler verschuiving tussen het uitgezonden en het (door deeltjes in het water) gereflecteerde signaal. De frequentieverandering is gerelateerd aan de stroomsnelheid van het water en laat dus toe deze te meten.

Het toestel is gemonteerd op een metalen profiel dat aan de geleidingsmuur is bevestigd. De SonTek-SL500 zendt een akoestisch signaal uit met frequentie van 0,5 MHz. Er zijn 2 bundels ("beams") die onderling een hoek maken van 45° en horizontaal (SL = Side-Looking) uitgestuurd worden over de breedte van de dwarssectie. Er zijn geen metingen mogelijk in de zone nabij het instrument ("blanking distance"), alsook in een zone nabij de tegenoverliggende oever. Wanneer het akoestische signaal de tegenoverliggende oever bereikt treedt het zgn. side-lobe effect op waarbij er een verstoring is van het hoofdsignaal ("main lobe") door nevensignalen ("side lobes"). Ook is het mogelijk dat bij hoge sedimentconcentratie het akoestische signaal in het water gedempt wordt en de tegenoverliggende oever niet bereikt.

Afhankelijk van de instelling kan zowel informatie bekomen worden van de stroomsnelheid over verschillende cellen verdeeld over de breedte van de rivier (cfr. testmeting met 10 cellen van 4 m) of kunnen de gemeten stroomsnelheden intern verwerkt worden tot een totaal debiet over de volledige dwarssectie (cfr. langdurige metingen).

Figuur 2 – Meetopstelling ADP te Duffel-sluis (links) en meetprincipe SL-ADP (rechts)

Bron figuur rechts: <http://www.sontek.com/productsdetail.php?SonTek-SL-8>



2.2.2 Sedimentconcentratie

De sedimentconcentratie kan op verschillende manieren gemeten worden. Op de gekozen meetlocatie was zowel een direct meettechniek als 2 verschillende indirecte meettechnieken beschikbaar. Deze indirecte meettechnieken maken gebruik van de directe techniek om het geregistreerde signaal door te vertalen naar een sedimentconcentratie.

Directe meting met behulp van ISCO-staalnametoestel

Het nemen van pompstalen geeft de beste inschatting van de sedimentconcentratie in de waterkolom. Deze techniek heeft echter temporele en ruimtelijke beperkingen: temporeel is het quasi onmogelijk om hoogfrequent (i.e. elke 5 à 10 minuten in een getijomgeving) stalen te nemen omwille van de nabewerking (transport, filtratie) die nodig is; ruimtelijk is het vanuit praktisch standpunt heel moeilijk deze staalnames uit te voeren op verschillende locaties over de breedte en de diepte.

Ter hoogte van de meetlocatie is een ISCO automatisch staalnametoestel aanwezig (Figuur 3 - links). Dit toestel bevat een carrousel met 24 staalnameflessen (500 ml). Elke 7u wordt een staal opgepompt nabij de linkeroever. De inlaatopening van de pompdarm is gemonteerd op de geleidingsmuur, 60 cm boven de bodem en ca. 1 m onder het wateroppervlak bij laagwater. Elke week worden de stalen opgehaald en worden deze door middel van filtratie (0,45 µm filter) op sedimentconcentratie geanalyseerd. Op een selectie van de stalen wordt ook de korrelgrootte bepaald op basis van laserdiffractie.

Figuur 3 – ISCO-staalnametoestel (links), buis waarin YSI is bevestigd (midden) en detail YSI-sensoren (rechts)



Indirecte meting op basis van akoestische backscatter

Het akoestische signaal dat gebruikt wordt voor het meten van de stroomsnelheden en het debiet, wordt slechts gedeeltelijk teruggekaatst. De intensiteit van het teruggekaatste signaal (acoustic backscatter, ABS) is gerelateerd aan o.a. de sedimentconcentratie in het water. Water- en sedimentstalen zijn noodzakelijk om het akoestische signaal te kalibreren en om te rekenen naar een sedimentconcentratie. Het is belangrijk dat het gebruikte sediment representatief is voor de meetlocatie, aangezien de afmetingen, vorm en samenstelling van het sediment de respons van het akoestische signaal beïnvloeden.

Wanneer een volledig profiel met verschillende cellen wordt gemeten, dient de gemeten intensiteit van het gereflecteerde signaal gecorrigeerd te worden voor de afgelegde afstand, geluidsverliezen in het water en absorptie door het sediment. De methodiek, die binnen voorliggend rapport is gebruikt, is analoog aan deze van (Landers *et al.*, 2016), waarbij de sedimentabsorptiecoëfficiënt volgens de hybride manier (Urlick, 1948) en (Sheng & Hay, 1988) werd bepaald. Voor de volledige formules wordt verwezen naar § 2.3.2.

Voor de langdurige metingen werd de informatie reeds geaggregeerd tot één gemiddelde waarde van de ABS voor het volledige dwarsprofiel. Een correctie zoals in de vorige paragraaf besproken is niet mogelijk. Wel zal er getracht worden een relatie te leggen tussen de gemiddelde ABS en de sedimentconcentratie.

Bij deze relatie dient men rekening te houden dat de gemiddelde ABS ook ABS informatie bevat van de randen van de doorsnede. Deze randen bevatten akoestische terugverstrooiing door reflectie op de bodem, profielranden en water-lucht oppervlakte. Deze sterke reflecties beïnvloeden de ABS die op de sedimentdeeltjes weerkaatst. Door het verschil in waterstanden, resulterend in een verschillend reflectieprofiel, is het uitfilteren van deze invloed complex.

Indirecte meting op basis van optische backscatter

De 6-series YSI multiparametersonde (Figuur 3 - rechts) beschikt over een turbiditeitsensor die de optische terugverstrooiing (optical backscatter, OBS) technologie gebruikt om gesuspendeerde partikels in het water te monitoren als surrogaat voor SSC. De sensor kijkt loodrecht op de lengteas van de sensor. Het hart van de sensor is een Nabij Infra-Rood laser (860 nm) en fotodiode om de intensiteit van door in het water gesuspendeerde deeltjes terugverstrooid licht te detecteren onder een hoek van 90°. De meting van turbiditeit wordt hierbij uitgedrukt in NTU. Algemeen wordt gesteld dat de turbiditeit toeneemt naarmate de concentratie aan gesuspendeerde deeltjes (en dus ook sediment) in het water toeneemt. De optische sensoren zoals een OBS zijn gevoelig aan de afmetingen, vorm en samenstelling van de gesuspendeerde partikels. Kalibratie met representatief in-situ materiaal wordt aanbevolen.

Het toestel is om de meetlocatie onderaan in een open buis gepositioneerd. De buis is bevestigd aan de betonnen geleidingsmuur (Figuur 3 - midden) en heeft onderaan (60 cm boven de bodemen ca. 1m onder het wateroppervlak bij laagwater) een opening zodat het meettoestel in contact komt met voorbij stromend water.

2.3 Meetcampagne

2.3.1 Langdurige metingen

De metingen ter hoogte van Duffel-sluis vinden plaats in het kader van MONEOS, het Vlaams-Nederlandse programma van systeemmonitoring in het Schelde-estuarium. Tabel 1 geeft een overzicht van de beschikbare langdurige metingen ter hoogte van Duffel-sluis. Aangezien de ABS niet systematisch wordt geregistreerd, werd dit ten behoeve van deze analyse aangepast. Deze aanpassing gebeurde op 15 februari 2016. De metingen werden uitgevoerd tot 15 november 2016, waarna de meetpost (voorlopig) werd stopgezet. De analyse wordt uitgevoerd voor de periode 15 februari 2016 – 15 november 2016.

Tabel 1 – Overzicht beschikbare langdurige metingen

<i>Parameter</i>	<i>Meettechniek</i>	<i>Meettoestel</i>	<i>Meetpositie</i>	<i>Meetfrequentie</i>
Debiet	ADP	SonTek-SL500	1 waarde over volledige breedte	1 per 300 s
SSC	Pompstaal	ISCO	Linkeroever, nabij geleidingsmuur	1 per 7 u
SSC via turbiditeit	OBS	YSI (6-series)	Linkeroever, nabij geleidingsmuur	1 per 300 s
Extra metingen t.b.v. deze analyse				
SSC via ABS	ABS	SonTek-SL500	1 waarde over volledige breedte	1 per 10 s

2.3.2 Testmeting

Om de haalbaarheid van de verschillende meettechnieken te onderzoeken, werd op 25 en 26 januari 2017 een aanvullende meting uitgevoerd. Hierbij werd de instellingen van de meettoestellen aangepast zodat met grotere meetfrequentie gegevens werden geregistreerd (Tabel 1). De pompstalen werden elke 5 minuten genomen bij de vloedfase. Na deze eerste set metingen (24 stalen, i.e. één carrousel) werd een nieuwe carrousel geplaatst en werden er tijdens de eb fase elke 10 minuten waterstalen genomen.

Tabel 2 – Overzicht beschikbare metingen tijdens testmeting

Parameter	Meettechniek	Meettoestel	Meetpositie	Meetfrequentie
Debiet	ADP	SonTek-SL500	10 cellen over volledige breedte	1 per 10 s
SSC	Pompstaal	ISCO	Linkeroever, nabij geleidingsmuur	1 per 300 s bij vloed, 1 per 600 s bij eb
SSC via turbiditeit	OBS	YSI (6-series)	Linkeroever, nabij geleidingsmuur	1 per 60 s
SSC via ABS	ABS	SonTek-SL500	10 cellen over volledige breedte	1 per 10 s

Aangezien tijdens de testmeting informatie van de ADP beschikbaar was in meerdere cellen, werd het signaal gecorrigeerd voor de verschillende verliestermen. Dit werd uitgevoerd conform (Landers *et al.*, 2016):

$$SCB = MB + 20 \cdot \log(\Psi \cdot r) + 2 \cdot r \cdot \alpha_w + 2 \cdot r \cdot \alpha_s$$

Met: SCB: sediment gecorrigeerde backscatter [dB]

MB: ruwe backscatter [dB]

Ψ : near-field correctie coëfficiënt [1/m]

r: afstand tot de transducer volgens akoestische as [m]

α_w : water-absorptie coëfficiënt [dB/m]

α_s : sediment-absorptie coëfficiënt [dB/m]

Daarbij is:

$$MB = K \cdot Amp$$

Met: K: echo intensity scale factor [dB/count]

Amp: amplitude [count]

$$\alpha_w = 8,69 \cdot \left(\frac{S \cdot A_w \cdot f_T \cdot f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{B_w \cdot f^2}{f_T} \right) \cdot (1 - 6,54 \cdot 10^{-4} \cdot P)$$

Met: S: saliniteit [ppt]

A_w : ionische relaxatie in zeewater [-]

f_T : temperatuur-afhankelijke relaxatie frequentie [kHz]

f: akoestische frequentie [kHz]

B_w : viscositeitskarakteristiek zuiver water [-]

P: druk [atm]

$$\alpha_s = SSC_v \cdot \left(k \cdot (\gamma - 1)^2 \cdot \left\{ \frac{s}{s^2 + (\gamma + \tau)^2} \right\} + \frac{k^4 \cdot a^3}{5 \cdot (1 + 1,3 \cdot k^2 \cdot a^2 + 0,24 \cdot k^4 \cdot a^4)} \right) \cdot 4,34$$

Met: SSC_v : volumetrische sediment concentratie [-]

k: golfgetal [1/cm]

γ : specifieke graviteit sediment [-]

$s = \frac{9}{4 \cdot \beta \cdot a} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta \cdot a} \right)$: vormparameter [-]

$$\text{met } \beta = \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot v}} \text{ [1/cm]}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \text{ [kHz]}$$

v: kinematische viscositeit [stokes]

$\tau = 0,5 + \frac{9}{4 \cdot \beta \cdot a}$: vormparameter [-]

a: gemiddelde sediment straal [cm]

2.4 Kubatuurberekening

Op basis van de ADP wordt het debiet gemeten ter hoogte van Duffel-sluis. Het debiet kan echter ook afgeleid worden uit simulaties met complexe numerieke modellen of via eenvoudige berekeningen via een kubatuurberekening. Binnen dit onderzoek is ervoor geopteerd een vergelijking te maken tussen deze laatste methode en de metingen.

2.4.1 Het belang van de kubatuurberekening

De kubatuurberekening laat toe op een eenvoudig manier een beeld te krijgen van de waterbeweging in het Schelde-estuarium. De eenvoud van de methodiek ligt in het feit dit louter gebruik gemaakt wordt van gemeten basisgegevens, nl. de topo-bathymetrie en de waterstanden. Vertrekkende van deze 2 grootheden worden, uitgaande van de continuïteitsvergelijking, de debieten berekend. In (Plancke *et al.*, 2014) worden de methodiek en de resultaten beschreven voor de kubatuurberekening voor de karakteristieke getijparameters uit de periode 1991-2000.

2.4.2 Methodiek voor het uitvoeren van de kubatuurberekening

De getijbeweging in een waterloop wordt in de één-dimensionale vorm beschreven door de 2 basisvergelijkingen:

$$(1) \text{ Continuïteitsvergelijking: } \frac{\partial Q}{\partial x} + B(x) \cdot \frac{\partial z}{\partial t} - f = 0$$

$$(2) \text{ Dynamische vergelijking: } \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u \cdot |u|}{C^2 \cdot R} = 0$$

met: x: abscis van een dwarsdoorsnede van het estuarium

z: waterpeil t.o.v. horizontaal referentievlak (hier = TAW)

t: tijd

Q: debiet, positief gerekend van opwaarts naar afwaarts (eb = + | vloed = -)

A: natte sectie van een dwarsdoorsnede x bij waterpeil z: A(x,z)

B: kombergende breedte van een dwarsdoorsnede x bij waterpeil z: $B(x,z)$

u: sectiegemiddelde stroomsnelheid: $u = Q/A$

g: gravitatieconstante (9,81 m/s²)

C: weerstandscoefficiënt volgens Chézy (ruwheidcoëfficiënten C volgens Chézy)

f: zijdelingse toevoer

De kubatuurberekening is gebaseerd op de integratie van de continuïteitsvergelijking over een fragment van de waterloop tussen 2 dwarsdoorsnedes (Figuur 4). Door toepassing van de trapeziumregel bekomt men volgende formule die de basis vormt voor de kubatuurberekening:

$$Q_{n+1} - Q_n = -\frac{1}{2} \left[\frac{B_n^{t+1} + B_n^t}{2} \cdot \Delta z_n^{t,t+1} + \frac{B_{n+1}^{t+1} + B_{n+1}^t}{2} \cdot \Delta z_{n+1}^{t,t+1} \right] \Delta x \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

met: Q_n : debiet in dwarsdoorsnede n (opwaarts)

Q_{n+1} : debiet in dwarsdoorsnede n+1 (afwaarts)

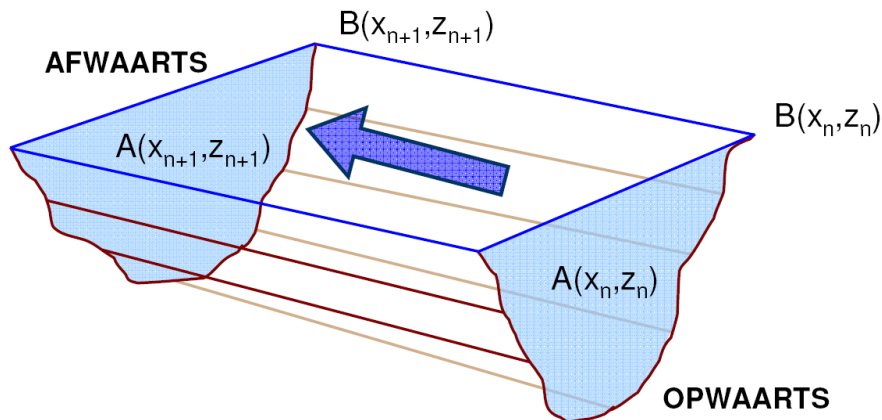
B_n^t : kombergende breedte in dwarsdoorsnede n op tijdstip t

$\Delta z_n^{t,t+1}$: verandering van het waterpeil in dwarsdoorsnede n tussen tijdstip t en t+1

Δx : afstand tussen dwarsdoorsnede n en n+1 (variërend tussen 300 m (Westerschelde) en 100 m (Zeeschelde en bijrivieren))

Δt : tijdsinterval tussen 2 opeenvolgende momenten (hier = 10 minuten)

Figuur 4 – Principe kubatuurberekening



2.4.3 Opzet kubatuurberekening

Binnen voorliggend onderzoek is een kubatuurberekening uitgevoerd voor het interessegebied dat de Kleine Nete, Grote Nete, Beneden-Nete en een deel van de Rupel omvat. De opwaartse grens ligt ter hoogte van Grobbendonk (Kleine Nete) en Itegem (Grote Nete), terwijl de afwaartse grens ter hoogte van de tijpost van Walem ligt. Deze afbakening laat toe de debieten te berekenen ter hoogte van Duffel-sluis op basis van de afgeleide bathymetrische parameters “breedte ter hoogte van de waterlijn” en natte sectie. De 10-minuutswaarden van de gevalideerde waterstanden en debieten van volgende meetstations werden meegenomen:

- Kleine Nete: Grobbendonk (tevens debiet), Emblem
- Grote Nete: Itegem (tevens debiet), Kessel, Lier-Maasfort
- Beneden-Nete: Lier-Molbrug, Duffel-sluis
- Rupel: Walem

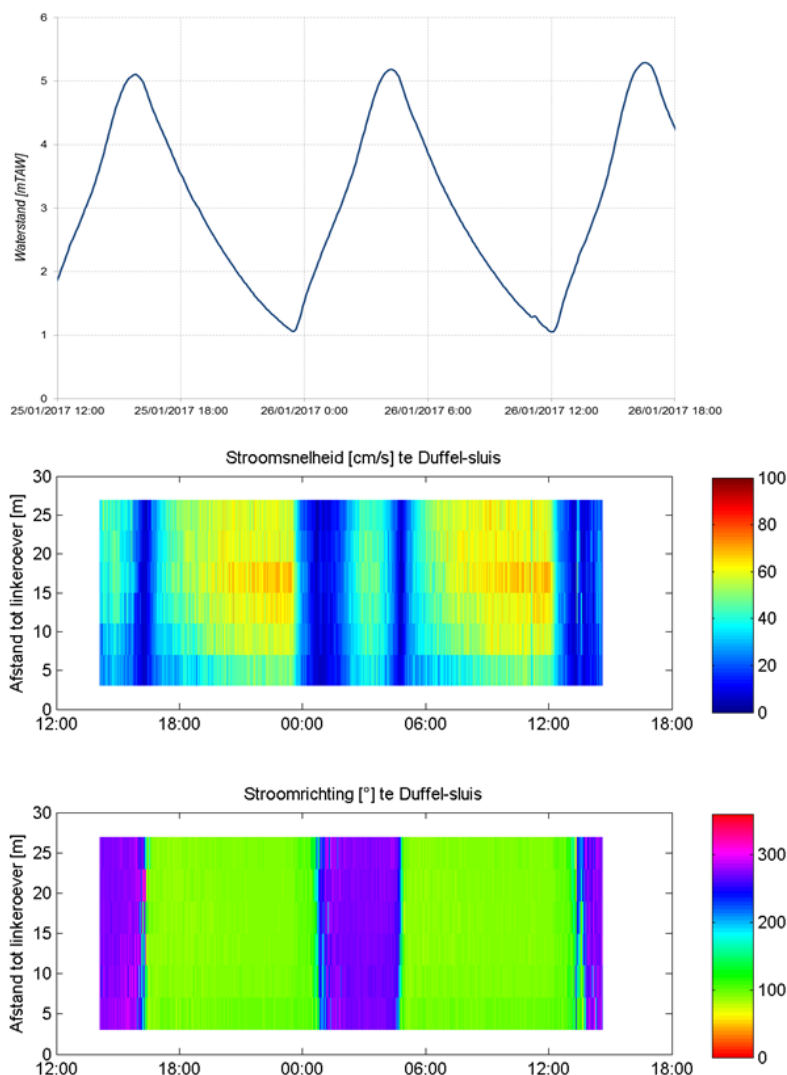
De kubatuurberekening werd uitgevoerd voor het volledige jaar 2016.

3 Testmeting januari 2017

De testmeting werd uitgevoerd op 25 en 26 januari 2017. De toestellen werden geprogrammeerd om te beginnen meten om 14:00, wat ca. 2 uur voor hoogwater was. Op basis van de lokale breedte van de dwarsdoorsnede (Figuur 2) en de resultaten van het akoestische signaal werd slechts 7 van de 10 bemeten cellen weerhouden. De overige 3 cellen bleken onbruikbaar door reflectie op de rechteroever.

Figuur 5 geeft het verloop van de waterstand en de stroming weer tijdens de testmeting. Het getijverschil bedraagt ca. 4 m wat overeenkomt met een zwak gemiddeld getij. De bovenafvoer was ca. 15 m³/s wat overeenkomt met het 50^e percentiel. Op de stromingsfiguren zijn duidelijk de momenten van kentering te zien net na elk hoog- en laagwater: de stroomsnelheid valt op deze momenten terug tot minder dan 20 cm/s en de stroomrichting draait met ca. 180°. De maximale stroomsnelheden treden op op het einde van de eb fase, en situeren zich centraal in de geul. Daarnaast is het opmerkelijk dat de vloedsnelheden kleiner zijn dan de ebsnelheden, mogelijks te verklaren door het zwakke getij in combinatie met een redelijke bovenafvoer.

Figuur 5 – Verloop van waterstand (boven), stroomsnelheid (midden) en snelheidsrichting (onder) tijdens testmeting



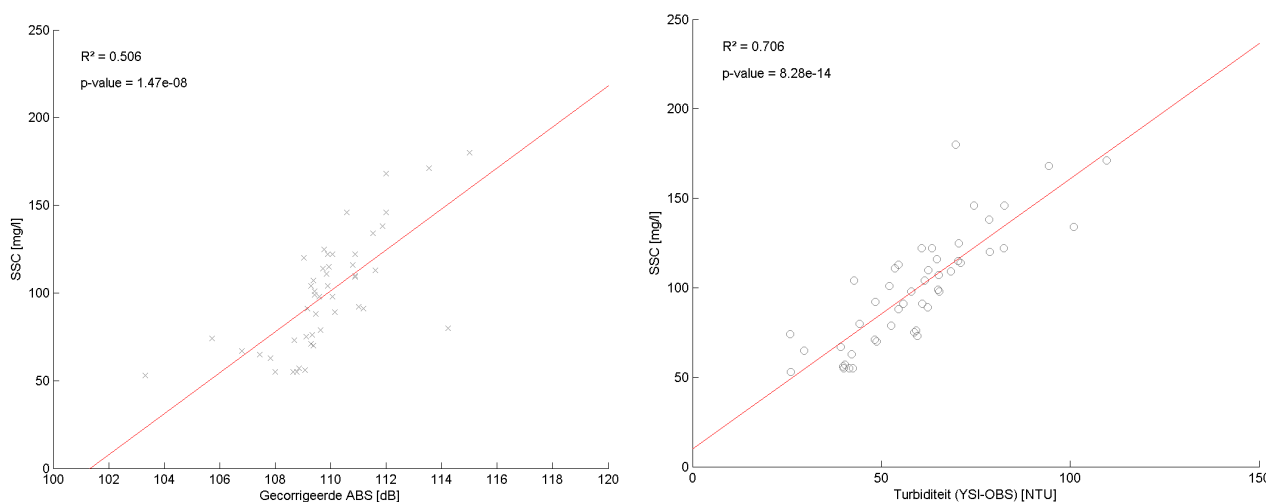
3.1 Kalibratie indirecte meettechnieken

Het kalibreren van de indirecte meettechnieken gebeurt aan de hand van pompstalen waarvan de sedimentconcentratie werd bepaald via filtratie. Tijdens de testmeting werden 48 stalen genomen, 24 tijdens de vloed (5 minuten interval), 24 tijdens de eb (10 minuten interval). Per staal wordt gezocht naar de dichtstbij gelegen waarde van de gecorrigeerde ABS (cABS) en OBS, met een maximaal tijdsverschil van 5 minuten. Dit levert een set puntenkoppels op die gebruikt worden voor de kalibratie van zowel het ABS-sigitaal als het OBS-sigitaal.

3.1.1 Akoestische backscatter

Figuur 6 (links) geeft de relatie weer tussen de cABS en de sedimentconcentratie op hetzelfde moment. Het betreft de waarde van de cABS voor de eerste cel, aangezien deze het dichtst bij de inlaatopening van het staalnametoestel is gelegen. Er is gekozen voor een lineaire relatie. Er moet opgemerkt worden dat de werkelijke relatie complexer is: voor lage cABS (< 108 dB) varieert de SSC weinig; voor waarden van de cABS tussen 108 dB en 112 dB is er een sterke toename in SSC; bij hogere waarden van cABS lijkt de variatie in SSC opnieuw af te nemen. De lineaire relatie is significant (p-value < 0,05) en heeft een R^2 gelijk aan 0,51.

Figuur 6 – Relatie gecorrigeerde ABS – SSC (links) en OBS – SSC (rechts) voor alle stalen



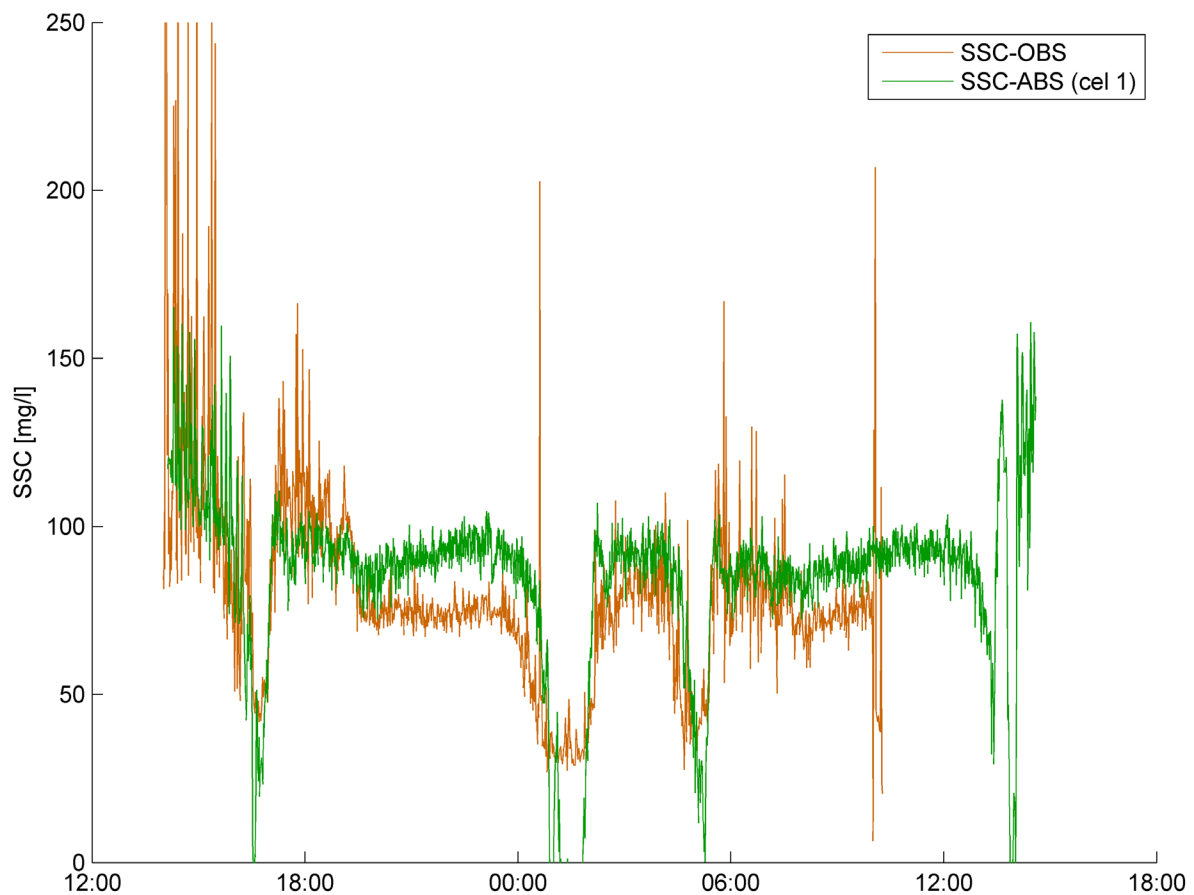
3.1.2 Optische backscatter

Figuur 6 (rechts) geeft de relatie weer tussen de turbiditeit gemeten met de YSI-OBS en de sedimentconcentratie op hetzelfde moment. Ook hier is er gekozen voor een lineaire relatie. Deze is significant (p-value < 0,05) en heeft een R^2 gelijk aan 0,71.

3.2 Vergelijking afgeleide SSC

Op basis van bovenstaande kalibratiecurves, kan uit de indirecte metingen een sedimentconcentratie berekend worden. Figuur 7 geeft het verloop weer van de afgeleide sedimentconcentratie van beide indirecte meettechnieken. Voor de ABS is gekozen om de waarde weer te geven voor de eerste cel, aangezien deze het dichtst bij de positie van de YSI-OBS is gelegen. De waarden van de sedimentconcentratie zijn sterk vergelijkbaar voor beide meettechnieken. Bij aanvang de testmeting geven beide technieken een sterke variatie. Op dit moment was er een ploeg (“sweepbeam”) werkzaam ter hoogte van de toegangsgoed tot het Netekanaal (net afwaarts gelegen t.o.v. de meetlocatie), wat voor een aanvoer van sediment kan gezorgd hebben bij vloed. Een verschil tussen beide technieken is te zien bij de ebfase: de akoestische meting geeft aanleiding tot een eerder constante sedimentconcentratie over de volledige fase, terwijl de optische techniek meer variatie toont, met hogere waarden bij het begin van de eb, en lagere waarde waarden in de tweede helft van de eb. Ook rond de kentering verschillen de afgeleide waarden, waarbij de ABS waarden geeft kleiner dan 0. Dit kan toegeschreven worden aan de keuze voor de lineaire relatie bij de kalibratie: bij c_{ABS} -waarden kleiner dan 108 dB is er geen afname te zien in de sedimentconcentratie, terwijl de lineaire relatie wel een lagere sedimentconcentratie geeft. Eveneens kan het verschil veroorzaakt worden door verschil in sediment types. Beide methode hebben een andere gevoeligheid voor bepaald type sediment (korrelgrootte).

Figuur 7 – Verloop SSC bepaald op basis van ABS (eerste cel) en OBS tijdens testmeting te Duffel-sluis

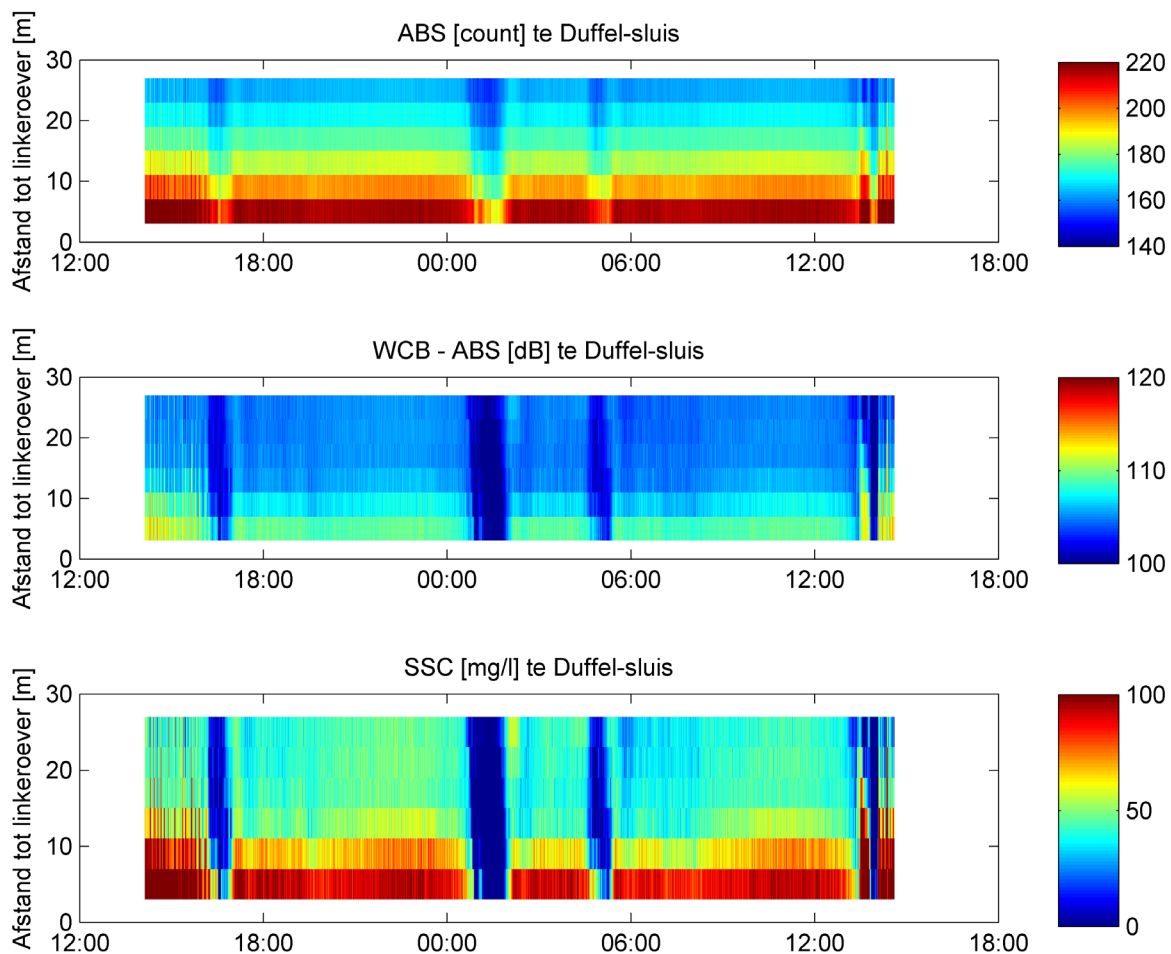


3.3 Variatie over de breedte

Daar waar de pompstalen en de YSI-OBS puntmetingen zijn, biedt de ABS de mogelijkheid een beeld te geven over de breedte. Figuur 8 geeft het verloop weer van de ruwe en gecorrigeerde ABS (zie § 2.3.2 voor beschrijving) en de hieruit afgeleide sedimentconcentratie. Het verloop van de sedimentconcentratie geeft het verwachte patroon in de tijd. De variatie in de breedte is minder logisch, met hogere sedimentconcentraties nabij de oever. Een mogelijke fysieke verklaring kan gegeven worden door de vaststelling dat de verschillende cellen horizontaal gelegen zijn, op een vaste hoogte. Aangezien het dwarsprofiel varieert in diepte, betekent dit dat de cellen nabij de oever dichterbij de bodem liggen dan de cellen in het centrale deel. Uitgaande van het logaritmisches profiel van de sedimentconcentratie over de diepte, biedt dit een mogelijke verklaring voor de hogere sedimentconcentratie nabij de oevers. Een andere verklaring zou kunnen teruggevonden worden in de meettechniek en de verwerking die nodig is: er worden een aantal aannames gedaan om de verschillende verliestermen in te schatten. Dit kan aanleiding geven tot afwijkingen ten opzichte van de werkelijke sedimentconcentraties. Eveneens is invloed van de harde akoestische reflectie op de oever en bij het weerkaatsen van het signaal op de bodem niet uit te sluiten. Het identificeren van een plotse afwijking van de terugverstrooiingswaarden van de verschillende cellen geeft de mogelijkheid om de maximale (verste cel) te definiëren die kan gebruikt worden in de analyse.

De aanbeveling wordt gemaakt om bij soortgelijke meetcampagnes stalen te nemen op verschillende locaties in de dwarssectie op de verliestermen te kunnen valideren.

Figuur 8 – Verloop van de ruwe ABS (boven), gecorrigeerde ABS (midden) en afgeleide SSC (onder) tijdens testmeting te Duffel-sluis



4 Langdurige metingen

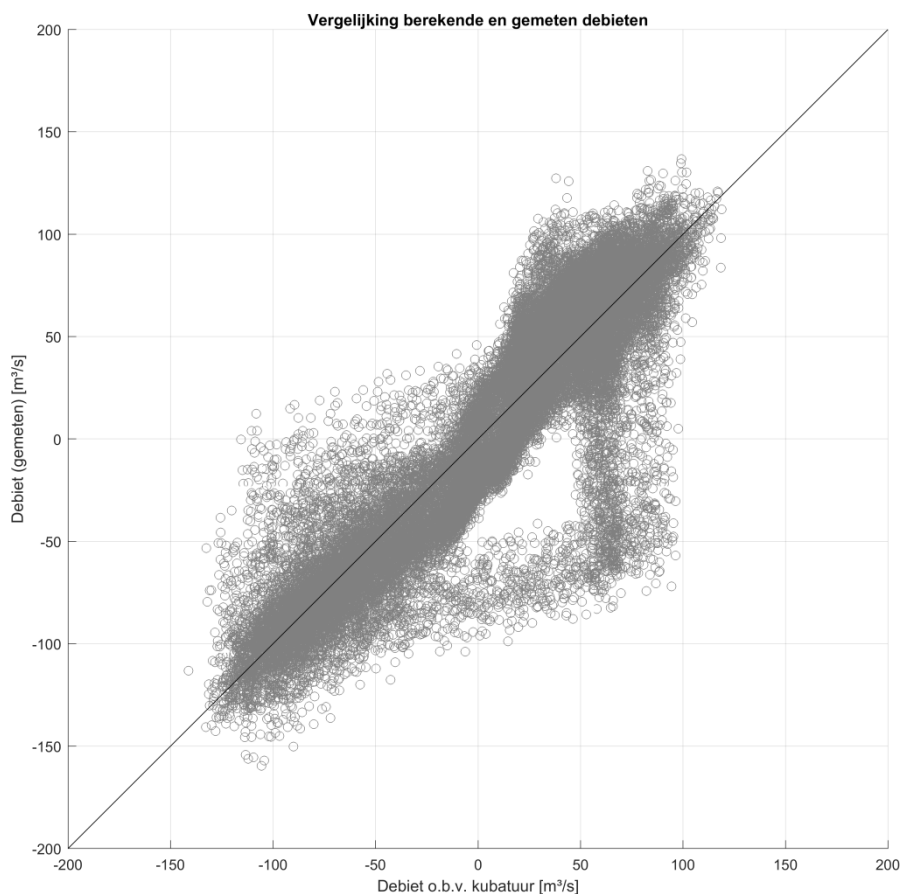
De sedimentflux wordt berekend als het product van het debiet en de sedimentconcentratie. Het debiet werd gemeten, maar kan ook via een kubatuurberekening worden bepaald. Alvorens een sedimentflux te kunnen berekenen dienen de indirecte meting gekalibreerd te worden om hieruit een sedimentconcentratie te kunnen bepalen. Dit wordt in de volgende paragrafen beschreven.

4.1 Debiet

Bijlage B – Tijdreeksen – debiet en druk (Figuur 20 t.e.m. Figuur 32) geeft het verloop van het debiet en druk weer. De druk is representatief voor de variatie in de waterstand.

Bijlage B – Tijdreeksen – debiet en druk (Figuur 33 t.e.m. Figuur 45) geeft het verloop van het gemeten en berekende debiet weer, alsook het verschil tussen beide. Figuur 9 geeft de scatterplot weer van de gemeten en berekende debieten voor alle tijdstappen. In het merendeel van de tijd is de overeenstemming zeer goed. Voor bepaalde periodes (mei-juni 2016 – zie Figuur 37 en Figuur 38) treedt een defasering op waardoor de instantane verschillen groot worden (al eb in kubatuur terwijl het nog vloed is volgens de meting).

Figuur 9 – Vergelijking gemeten en berekend debiet te Duffel-sluis

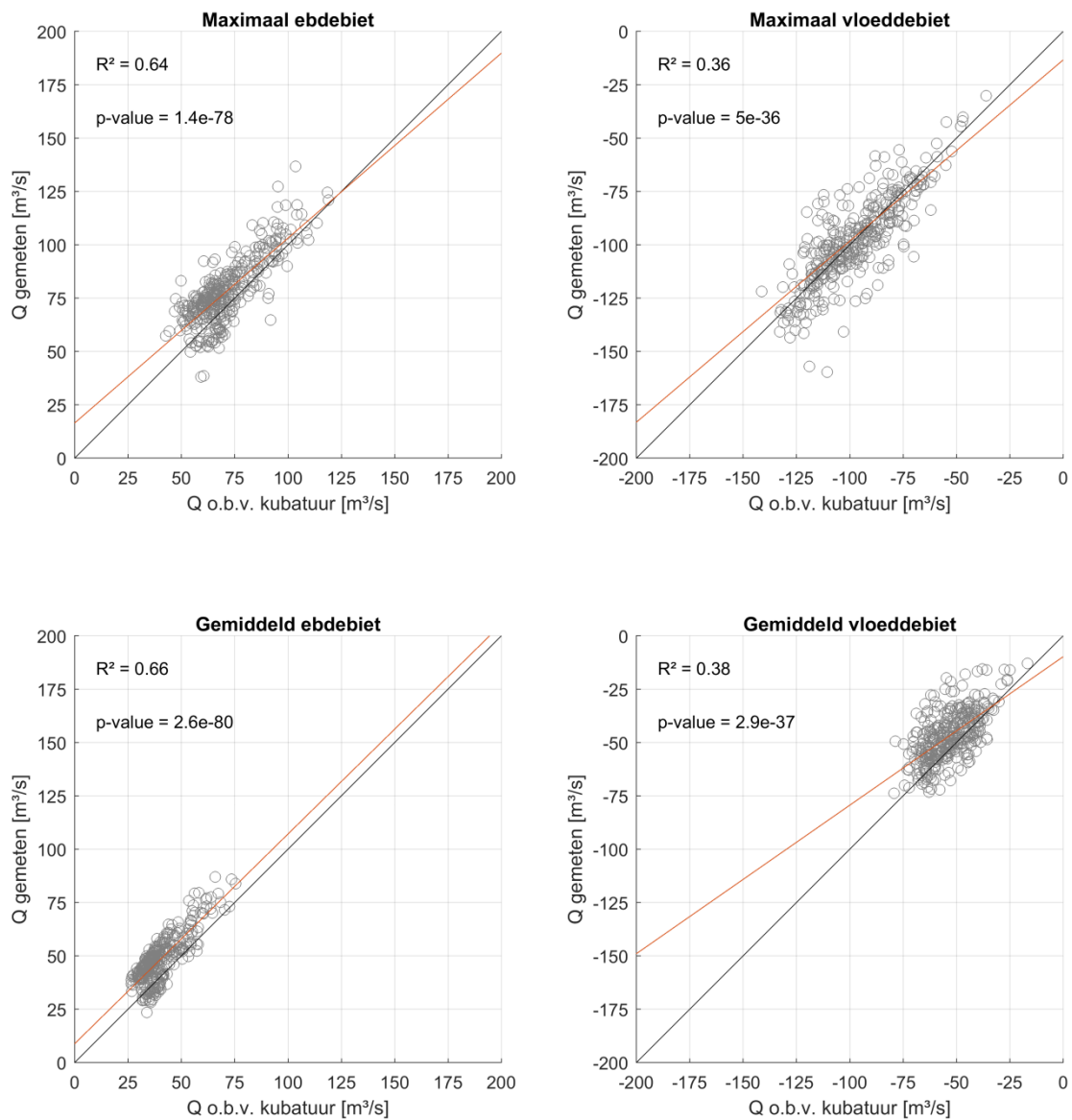


Naast de vergelijking van de instantane debieten, zijn ook een aantal afgeleide parameters onderling vergeleken. Het betreft volgende parameters, die allemaal bepaald werden op 2 getijcycli om het effect van de dagelijkse ongelijkheid uit te schakelen:

- Maximaal eb- en vloeddebiet: resp. het maximum (eb) en minimum (vloed) over 24u50
- Gemiddeld eb- en vloeddebiet: resp. het gemiddelde van alle positieve (eb) en negatieve (vloed) debieten over 24u50

Figuur 10 toont de vergelijking tussen deze parameters afgeleid uit de metingen en de kubatuur. Voor de ebfase is er een zeer goede overeenstemming tussen de metingen en de kubatuurberekening. Voor de vloedfase is de afwijking groter. Mogelijks speelt de defasering tussen beide methodes hier een rol in de afwijkingen.

Figuur 10 – Vergelijking gemeten en berekende afgeleide debietparameters te Duffel-sluis
Zwarte lijn = 1-1-lijn | rode lijn = lineaire fit met bijbehorende R^2 en p-waarde

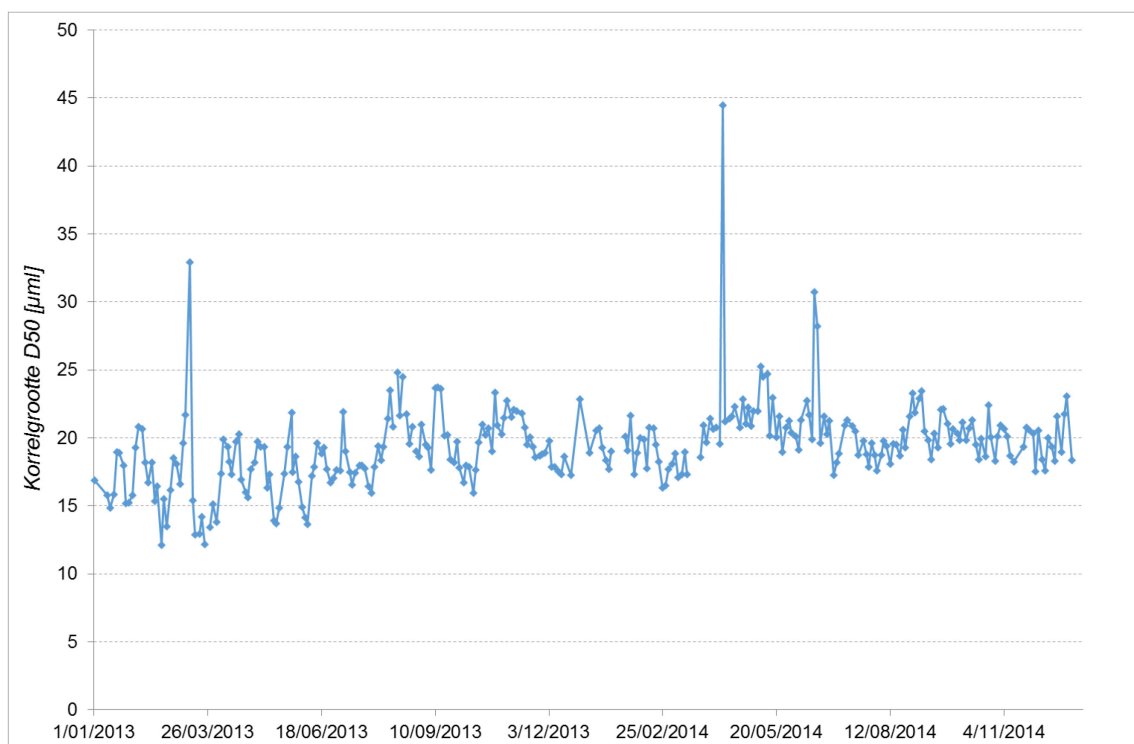


4.2 Kalibratie indirecte meettechnieken

Het kalibreren van de indirecte meettechnieken (optische en akoestisch) gebeurt aan de hand van de beschikbare directe metingen van de sedimentconcentratie (oppompen en filteren). Hiervoor worden de 7-uurlijkse automatische pompstalen gebruikt. Per pompstaal wordt gezocht naar de dichtstbij gelegen waarde van de ABS en OBS, met een maximaal tijdsverschil van 5 minuten. Dit levert een set puntenkoppels op die gebruikt worden voor de kalibratie van zowel het ABS-sigitaal als het OBS-sigitaal.

Aangezien de automatische stalen om de 7u gebeuren, zal de staalname op een willekeurig moment in het getij plaatsvinden. Aangezien de stroomsnelheden variëren binnen een getijcyclus, zowel om de korte termijn van 1 getijcyclus (eb en vloed) als op de middellange termijn van een springtij-doodtij-cyclus, is er een variatie van het getransporteerde sediment mogelijk. Figuur 11 geeft de variatie weer van de mediane korrelgrootte D50 bepaald om de pompstalen voor de jaren 2013-2014. Hoewel de variatie in D50 beperkt blijft tot de range 15 μm tot 25 μm , kan deze variatie groter worden voor de uiterste waarden (D90). Deze gegevens zijn echter niet onmiddellijk voorhanden. De lezer dient bewust te zijn van dat de korrelgrootte bepaald in het sediment laboratorium kan afwijken van de in-situ korrelgrootte. Deze afwijking ontstaat door het manipuleren van het waterstaal (opzuigen, transport, bewaring, sonicatie enz.) waardoor bv. aanwezig vlokken opgebroken worden.

Figuur 11 – Variatie D50 suspensie transport ter hoogte van de meetlocatie Duffel-sluis



4.2.1 Akoestische backscatter

Figuur 12 (rechts) geeft de relatie weer tussen de ABS en de sedimentconcentratie op hetzelfde moment. Bij toenemende ABS-waarde neemt ook de SSC toe, maar het is vooral de grote spreiding die opvalt ($R^2 = 0,14$).

Aangezien de pompstalen willekeurig in de getijfase werden genomen, werd een onderscheid gemaakt tussen de eb- en de vloedfase (op basis van de snelheid) en werd de ABS-SSC-relatie opnieuw bepaald (Figuur 13 - onder). Ook hier blijft een zeer grote spreiding aanwezig.

Een verdere analyse werd uitgevoerd waarbij enerzijds een indeling werd gemaakt in de tijd (maandelijkse basis) om de seizoenale variatie in beeld te brengen, en anderzijds een indeling op basis van de snelheids grootte en de getijfase. Hierbij werden 6 klassen gedefinieerd:

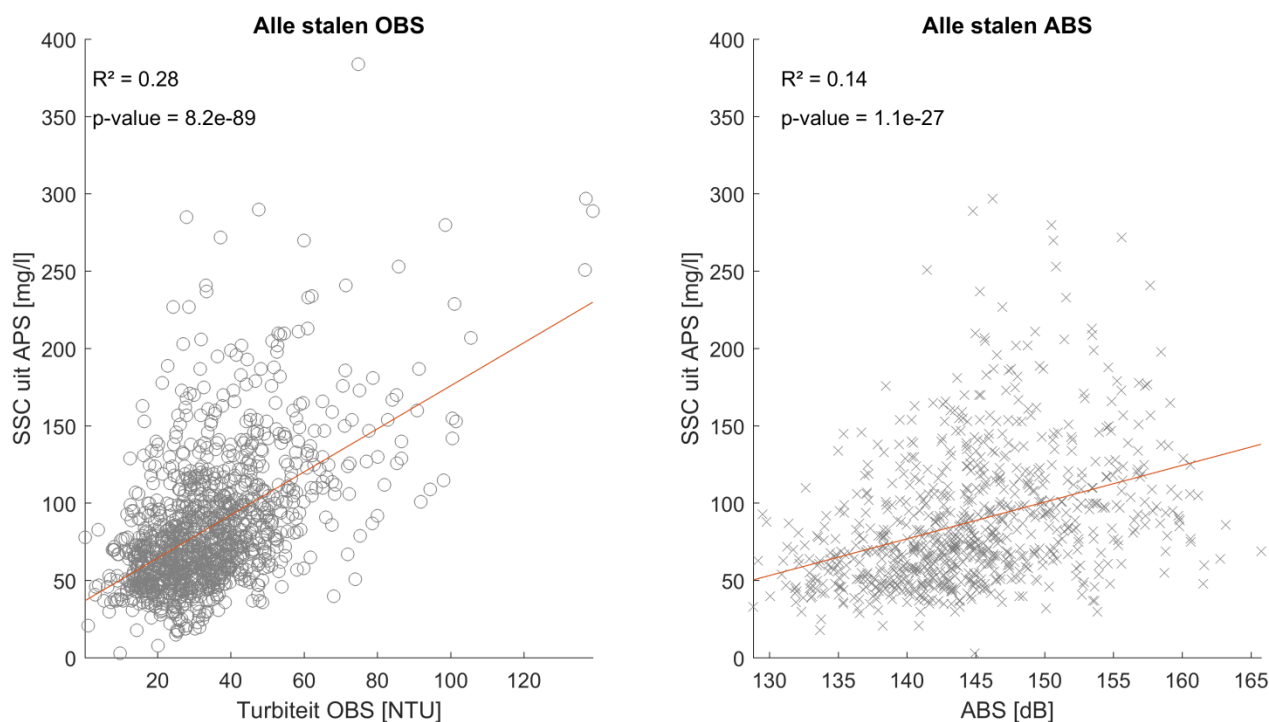
1. 25-percentiel hoogste snelheden bij vloed
2. 25-50 hoge snelheden bij vloed
3. 50-percentiel laagste snelheden bij vloed
4. 25-percentiel hoogste snelheden bij eb
5. 25-50 hoge snelheden bij eb
6. 50-percentiel laagste snelheden bij eb

Noch de indeling volgens de maanden, noch de indeling volgende de stroomsnelheden en getijfase leverde een reductie van de spreiding op.

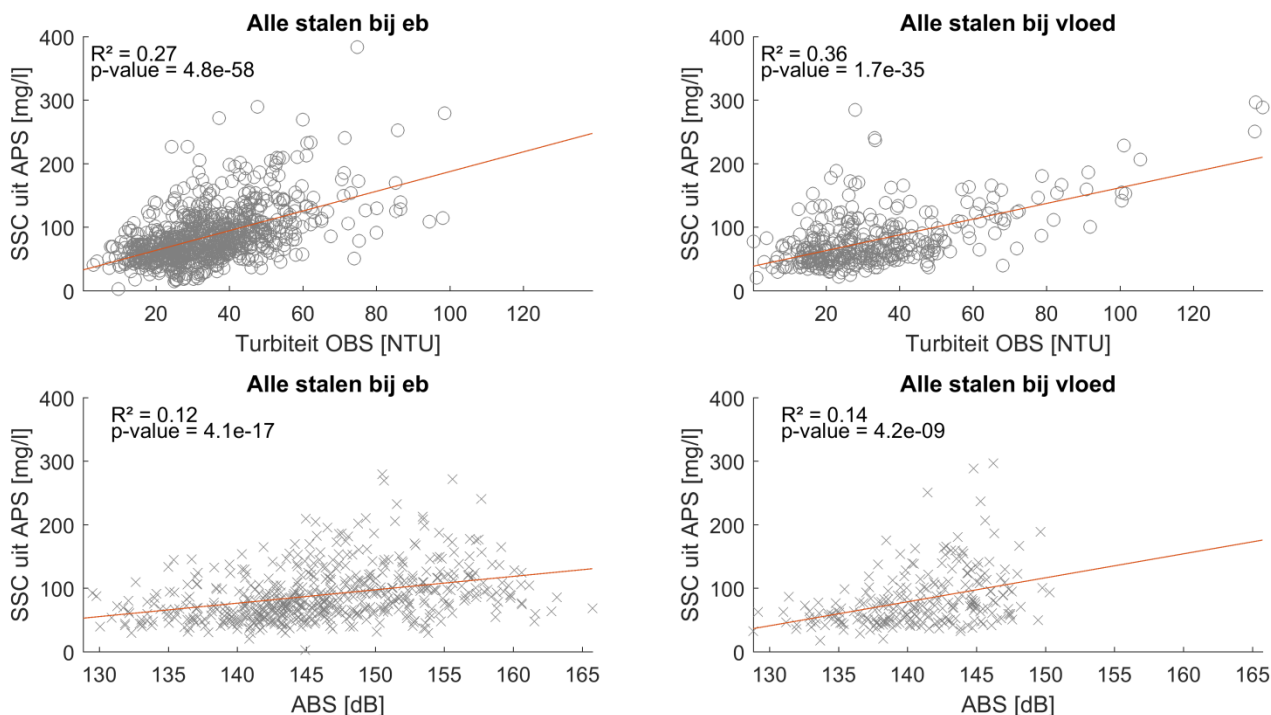
Een mogelijke oorzaak is de gevoeligheid van de akoestische meettechniek voor bepaalde sedimenttypen. Zo zal een toestel met frequentie van 0,5 MHz vooral een respons geven op sediment met zandfractie (inclusief vlokken) ($d_{50} \sim 300 \mu\text{m}$) en zou men voor de fijnere sedimenten die op deze locatie voorkomen eerder een hogere frequentie ($\sim 3 \text{ MHz}$) moeten gebruiken.

Voor de berekening van de fluxen werd de relatie gehanteerd op basis van alle stalen. Hierbij dient echter bovenstaande conclusie steeds meegenomen te worden.

Figuur 12 – Relatie turbiditeit – SSC (links) en ABS – SSC (rechts) voor alle stalen



Figuur 13 – Relatie turbiditeit – SSC (boven) en ABS – SSC (onder) met onderscheid tussen eb (links) en vloed (rechts)



4.2.2 Optische backscatter

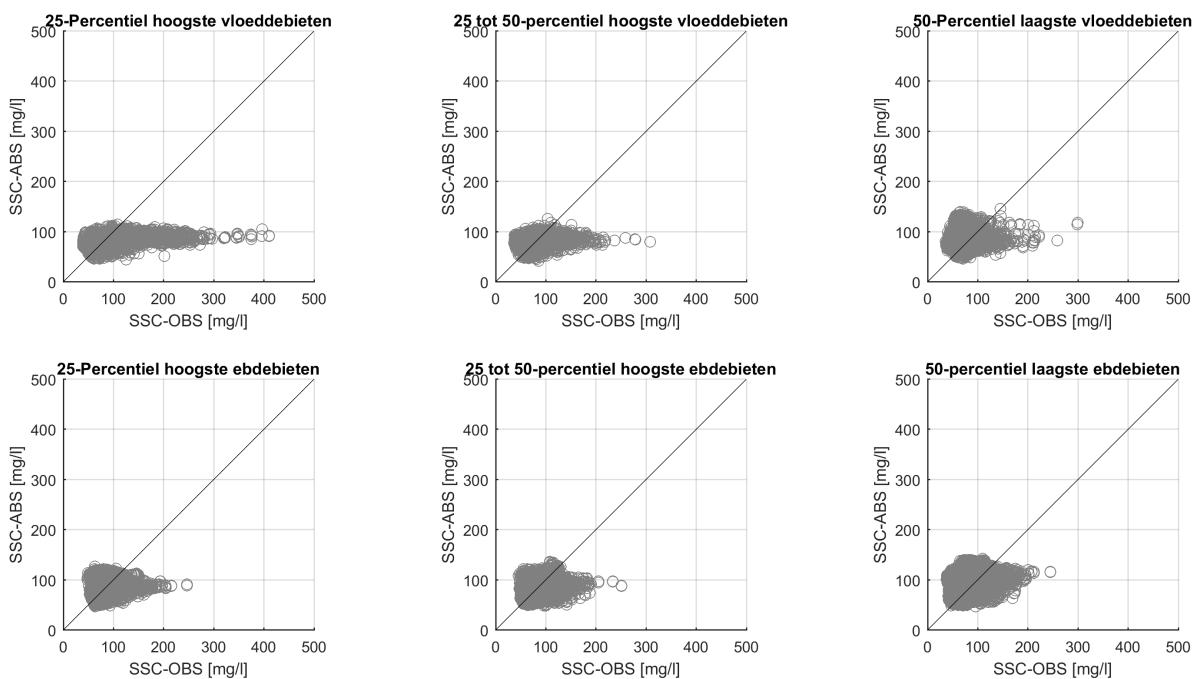
Figuur 12 (links) geeft de relatie weer tussen de OBS en de sedimentconcentratie op hetzelfde moment. Bij toenemende OBS-waarde neemt ook de SSC toe, al is ook hier de spreiding groot. Net zoals voor de ABS, werd een onderscheid gemaakt tussen de eb- en de vloedfase (op basis van het debiet) en werd de OBS-SSC-relatie opnieuw bepaald (Figuur 13 - boven). Hierbij valt het op dat bij de vloedfase de spreiding vermindert.

Ook voor de OBS-metingen werd een verdere analyse uitgevoerd waarbij enerzijds een indeling werd gemaakt in de tijd (maandelijkse basis) om de seizoenale variatie in beeld te brengen, en anderzijds een indeling op basis van de snelheids grootte en de getijfase. Bij de indeling op maandelijkse basis, kan overal een grote spreiding vastgesteld, met uitzondering van de maand februari. Bij de indeling op basis van de debieten, wordt een goede relatie teruggevonden bij de hoogste vloeddebieten ($R^2 = 0,67$), terwijl de relatie voor de overige klassen minder goed is.

4.3 Vergelijking afgeleide SSC

In Bijlage C –Tijdreeksen - SSC worden de volledige tijdreeksen weergegeven voor de afgeleide sedimentconcentratie op basis van zowel de OBS als de ABS. Figuur 14 toont de vergelijking van de afgeleide sedimentconcentratie op basis van enerzijds de OBS en anderzijds de ABS, en dit voor de verschillende debietsklassen en de getijfase. Voor de 6 klassen ligt het zwaartepunt van de punten wolk weliswaar rond de 1-1-lijn, maar valt het op dat met name bij de hogere vloeddebieten de sedimentconcentratie op basis van de OBS een veel grotere variatie kent dan deze op basis van de ABS. Dit is toe te schrijven aan de grotere variatie in gemeten turbiditeiten (vooral op het einde van de zomer) in vergelijking met de variatie in ABS. Dit wordt nog versterkt door de lineaire relatie die toegepast wordt waarbij hogere turbiditeiten aanleiding geven tot hogere sedimentconcentraties (factor 1,4).

Figuur 14 – Relatie SSC op basis van ABS en OBS met onderverdeling volgens de grootte van het debiet en getijfase [25-percentiel hoogste (links), 25-50-percentiel hoge (midden) en 50-percentiel laagste debieten (rechts)] getijfase [vloed (boven) en eb (onder)]



4.4 Berekening sedimentfluxen

4.4.1 Methodologie

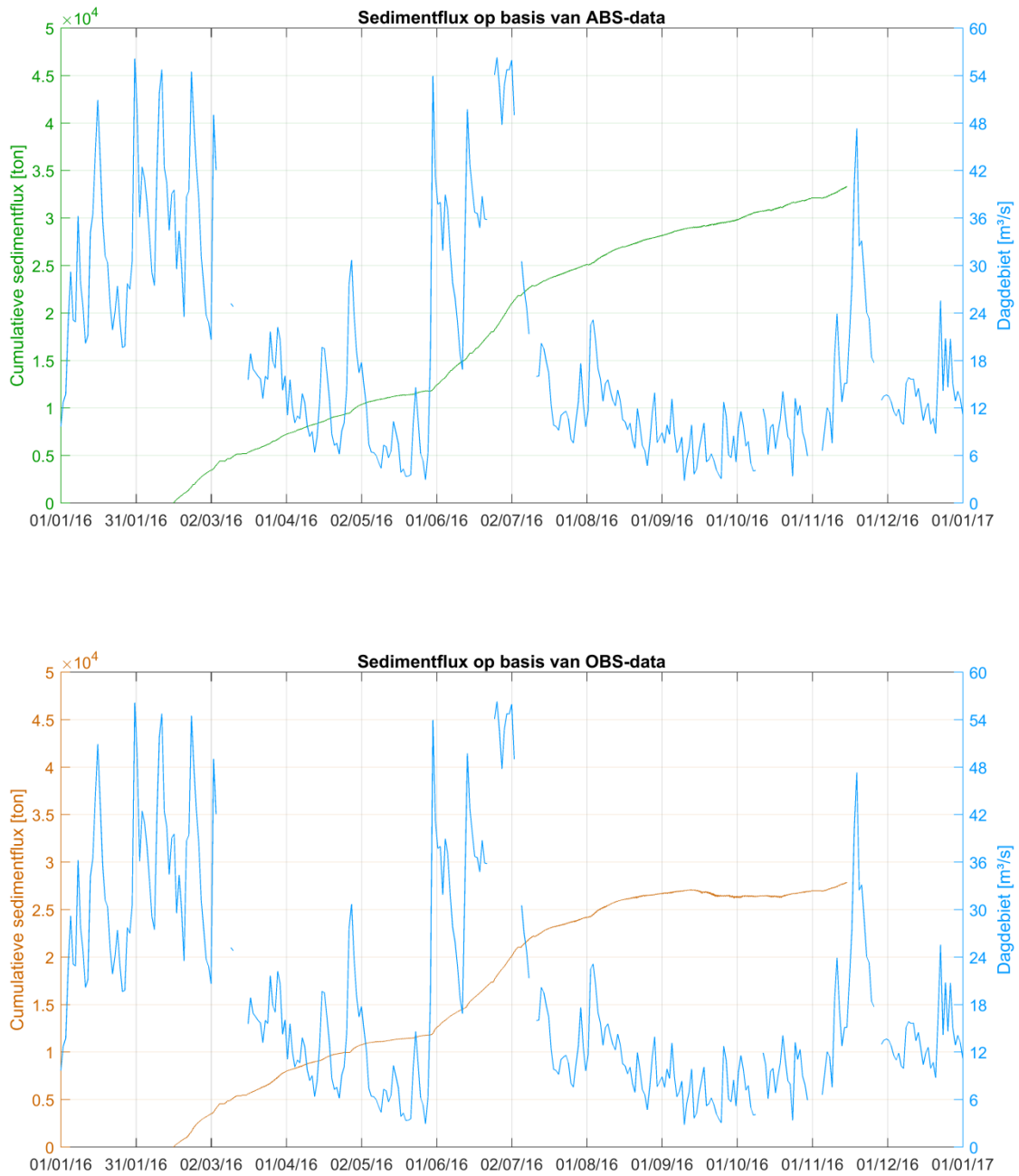
Om de grootschalige sedimentbewegingen in beeld te brengen, zijn de sedimentfluxen van belang. De instantane sedimentflux wordt berekend als het product van het debiet en de sedimentconcentratie. Deze wordt hier berekend op basis van de gemeten debieten (1 waarde per 5 minuten) en de uit de indirecte metingen afgeleide sedimentconcentratie op hetzelfde moment. De resultaten zijn opgenomen in Bijlage D –Tijdreeksen - sedimentflux.

De integratie in de tijd van de instantane flux levert de cumulatieve sedimentflux. Deze laatste laat toe na te gaan of een systeem sediment-importerend of sediment-exporterend is.

4.4.2 Resultaten

Aangezien het verloop van de instantane sedimentflux gelijkaardig is aan dat van de sedimentconcentratie (zowel deze op basis van de OBS als ABS werden vermenigvuldigd met hetzelfde debiet), wordt hier niet verder op ingegaan. Figuur 15 toont de cumulatieve sedimentflux voor beide indirecte meettechnieken. Over de volledige meetperiode (15 februari tot 15 november 2016) levert de sedimentconcentratie op basis van de ABS een totale flux van 33374 ton, terwijl de totale flux op basis van de OBS 27923 ton bedraagt, wat een verschil van 20% is. In het midden van de meetperiode (1 juli 2016) was het verschil aanzienlijk kleiner, amper 4% (ABS = 20627 ton | OBS = 19777 ton). Het grootste verschil ontstaat in de tweede helft van de meetperiode (ABS = 12747 ton | OBS = 8146 ton). De oorzaak hiervan is het verschil in grootte van de sedimentflux tijdens de vloedfase in de zomer. In de maanden september en oktober was de bovenafvoer zeer laag. Het residuele transport op basis van de OBS is in deze periode stroomopwaarts gericht, terwijl dit op basis van de ABS nog steeds afwaarts gericht is. Deze vaststelling is belangrijk, aangezien de residuele sedimenttransporten in het estuarium de achterliggende hoofdvraag zijn van dit onderzoek.

Figuur 15 – Berekende cumulatieve sedimentflux op basis van ABS (boven) en OBS (onder) over totale meetperiode



5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Dit onderzoek werd uitgevoerd met het doel een antwoord te geven op 3 onderzoeksvragen. Hieronder worden deze 3 vragen beantwoord.

Is het mogelijk om de sedimentflux voldoende nauwkeurig in beeld te brengen op een locatie (Duffel-sluis) in het Schelde-estuarium?

Op basis van de uitgevoerde analyses kan bevestigd worden dat de sedimentflux ter hoogte van Duffel-sluis in beeld kan gebracht worden. Echter, er dient onmiddellijk opgemerkt worden dat de gebruikte meettechniek voor het bepalen van de sedimentconcentratie (enerzijds direct of indirect, anderzijds akoestisch of optisch bij de indirecte technieken) van groot belang is, met name in periode met lage bovenafvoer.

Indien vraag 1 positief beantwoord kan worden, wat is de optimale meetopstelling om de sedimentflux in beeld te brengen?

Zowel op basis van de akoestische als optische backscatter kan een inschatting gemaakt worden de sedimentconcentratie. Op basis van de testmeting, uitgevoerd in januari 2017, werd een goede correlatie gevonden voor beide indirecte meettechnieken. Wanneer echter naar de langdurige metingen wordt gekeken, ontstaat een grote spreiding op de correlatie. Hierbij lijkt de OBS beter de grotere variatie in sedimentconcentratie te volgen. Dit is waarschijnlijk toe te schrijven aan de hogere gevoeligheid van de optische meettechniek voor de fijnere sedimentfracties die in dit deel van het estuarium worden getransporteerd.

Uit de vergelijking tussen de gemeten (SonTek SL-500) en berekende (kubatuur) debieten, blijken de verschillen beperkt te zijn, zowel in de tijdsreeks als in de afgeleide parameters. De kubatuurberekening blijkt dan ook een valabele techniek om op basis van louter bathymetrische gegevens en waterstanden debieten op een willekeurige plaats in het estuarium te berekenen.

Als conclusie wordt dan ook voorgesteld de optische meettechniek voorkeur te geven op de akoestische meettechniek. Een kubatuurberekening kan gebruikt worden om het debiet te berekenen.

Wat zijn de randvoorwaarden om de sedimentflux ook op andere locaties langsheen het estuarium nauwkeurig in beeld te brengen?

Zoals hierboven gesteld, is de sedimentfractie die getransporteerd wordt cruciaal voor de toepasbaarheid van een bepaalde indirecte meettechniek. Aangezien voor het Vlaamse deel van het Schelde-estuarium vooral de fijne fractie (< 63 μm) belangrijk is met het oog op een potentiële systeemomslag, zal ook de optische meettechniek op andere locaties te prefereren zijn. Wanneer echter ook een belangrijk aandeel van het getransporteerde sediment uit zand bestaat, zal ook de akoestische techniek ingezet moeten worden (voorkeur om beide techniek naast elkaar te gebruiken).

Een ander aandachtspunt bij de locatiekeuze zijn de lokale stromings- en sedimenttransportpatronen. De verdeling van de stroming, de sedimentconcentraties en als dusdanig ook sedimentfluxen, zijn bepalend in plaatskeuze van het meetpunt. De voorkeur moet sowieso uitgaan naar rechte stukken, waar de stroming uniform verdeeld is over de dwarssectie. Stromingsconcentraties, zoals optreden bij bochten, moeten vermeden worden. Daarnaast verdient het de aanbeveling meting uit te voeren op meerdere punten op de dwarssectie, bv. zowel nabij de linker- als de rechteroever.

Tenslotte dienen de indirecte meettechnieken gekalibreerd te worden op basis van directe technieken (staalnames). Deze dienen uitgevoerd te worden met “representatief” sediment van de meetlocatie.

Daarnaast is het aan te raden om deze campagnes meermaals (minstens 2 keer, bij voorkeur 4 keer) per jaar uit te voeren om seizoenale variatie in beeld te brengen, en stalen te nemen op verschillende plaatsen in de bemeten dwarssectie.

5.2 Aanbevelingen

Testmeting uitvoeren in zomerperiode daar is het verschil ABS OBS het grootst.

De aanbeveling wordt gemaakt om bij soortgelijke meetcampagnes stalen te nemen op verschillende locaties in de dwarssectie op de verliestermen te kunnen valideren.

Gericht kalibratiecampagnes met extra staalname bij hogere concentraties

6 Referenties

Beirinckx, K.; Taal, M.; Plancke, Y.; Van den Bergh, E. (2013). Plan van Aanpak Onderzoek Agenda voor de Toekomst

Landers, M.N.; Straub, T.D.; Wood, M.S.; Domanski, M.M. (2016). Sediment Acoustic Index Method for Computing Continuous Suspended-Sediment Concentrations. *U.S. Geol. Surv. Tech. Methods, B. 3, Chap. C5*. ISBN 9781411340619. Available at: <http://pubs.usgs.gov/tm/03/c05/tm3c5.pdf>

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

Sheng, J.; Hay, A.E. (1988). An examination of the spherical scatter approximation in aqueous suspensions of sand. *J. Acoust. Soc. Am.* 83(2): p.598–610

Urick, R.J. (1948). The absorption of sound in suspensions of irregular particles. *J. Acoust. Soc. Am.* 20: 283–289

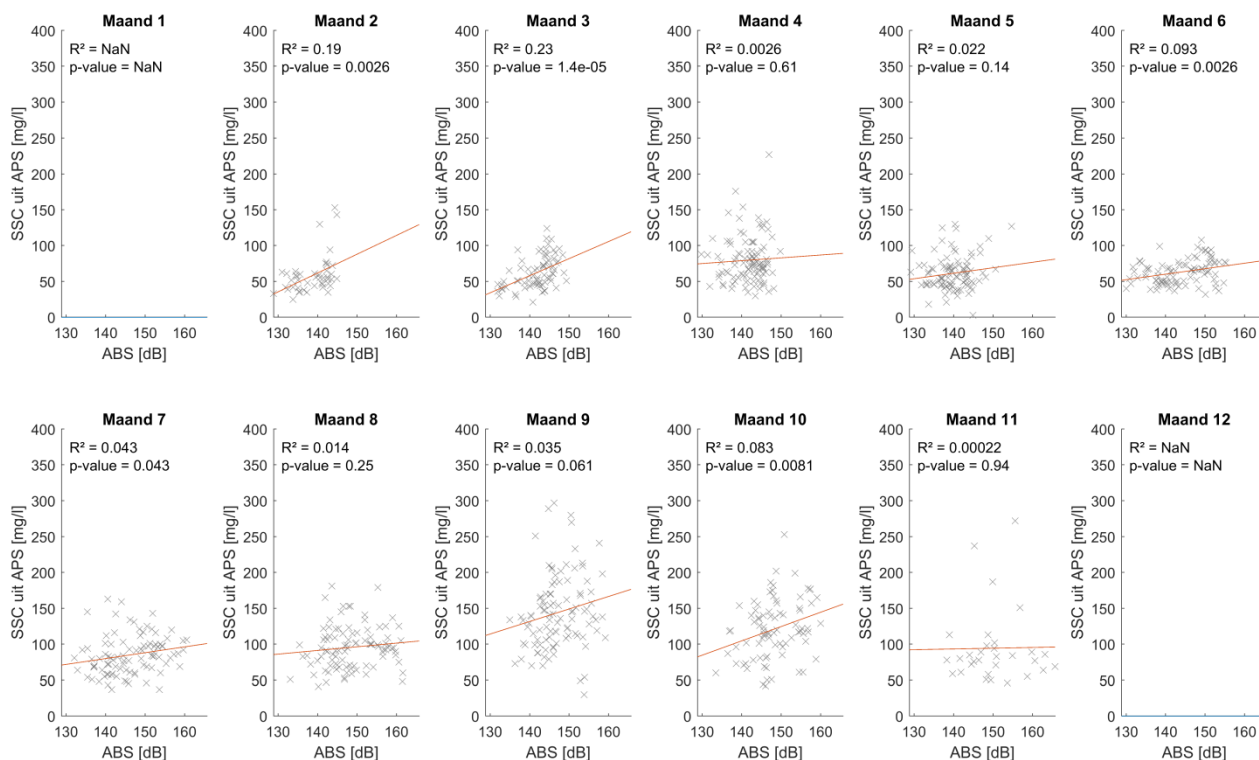
Vanlierde, E.; Ferket, B.; Pauwaert, Z.; Michielsen, S.; Van De Moortel, I.; Levy, Y.; Plancke, Y.; Meire, D.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). MONEOS - jaarboek monitoring WL 2015: factual data rapportage van monitoring hydrodynamiek en fysische parameters zoals gemeten door WL in het Zeescheldebekken in 2015. Versie 3.0. *RPRT. WL Rapporten, 12_070*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://www.vliz.be/nl/open-marien-archief?module=ref&refid=260354>

Vanlierde, E.; Michielsen, S.; Vereycken, K.; Hertoghs, R.; Meire, D.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Tienjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: decennium 2001-2010. *RPRT. WL Rapporten, 12_071*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

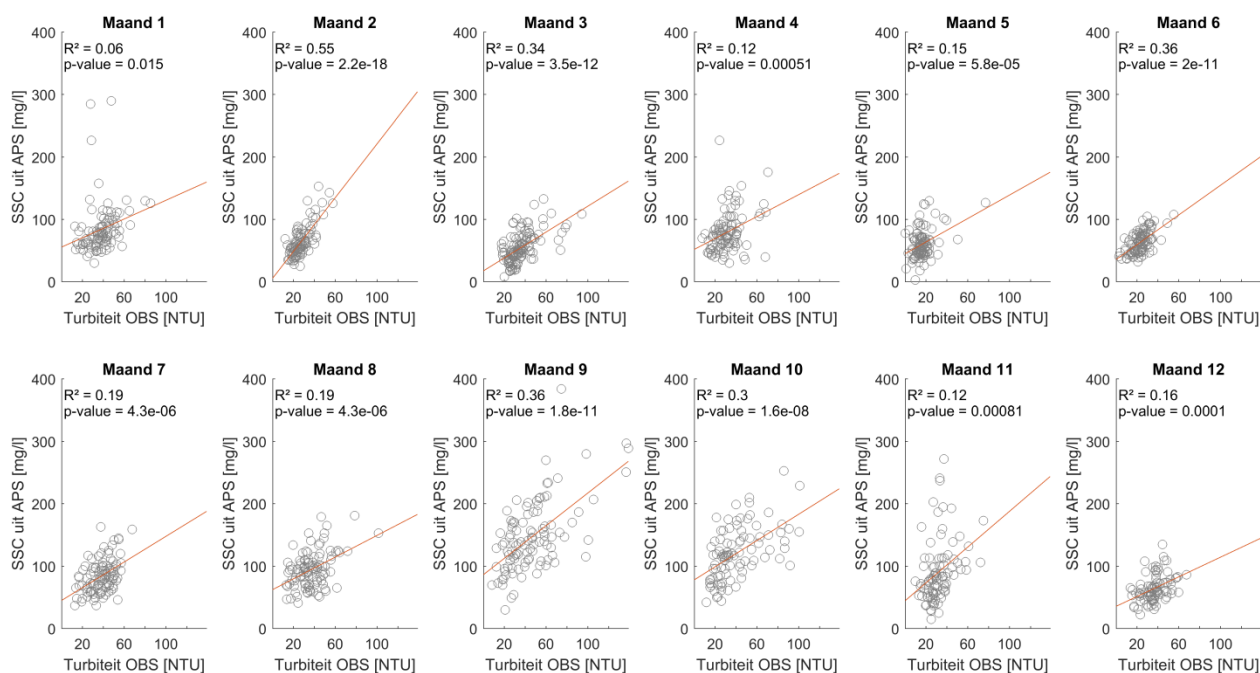
Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie. (2013). Evaluatie Verdrag Beleid en Beheer Schelde-estuarium

Bijlage A – Kalibratie indirecte technieken

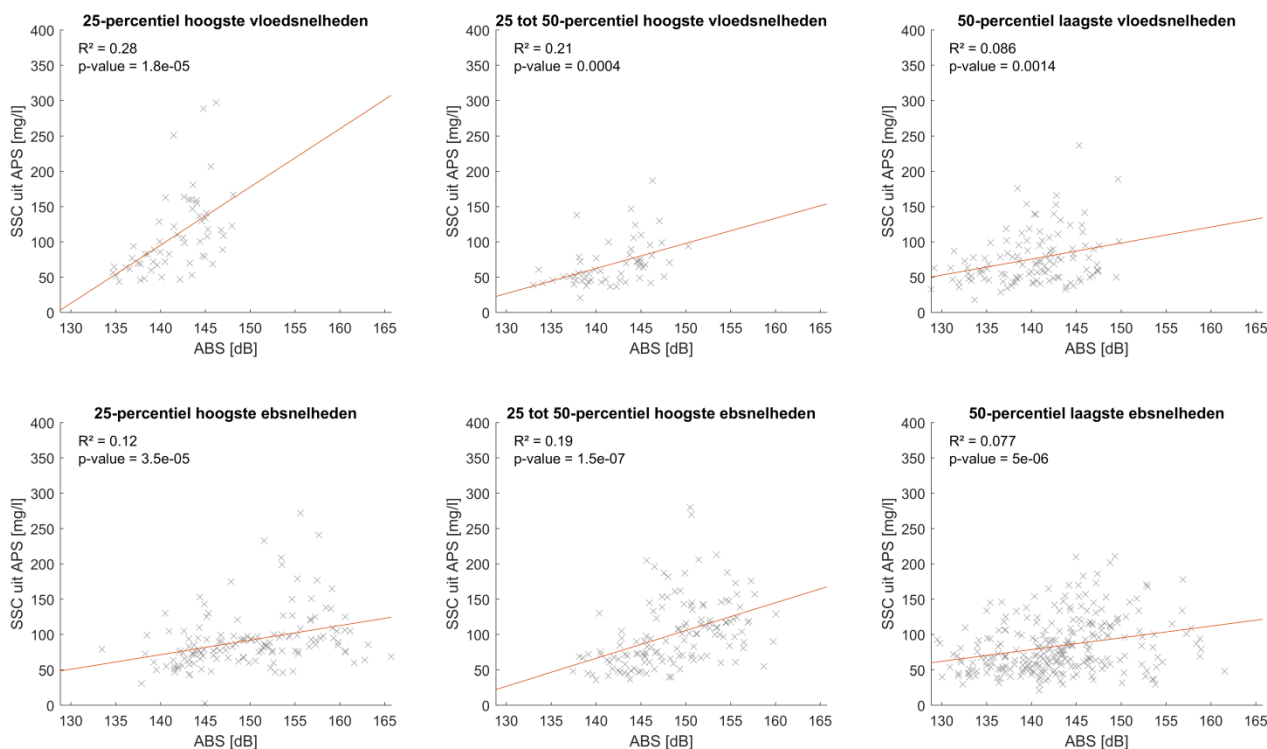
Figuur 16 – Relatie ABS – SSC met onderscheid tussen de verschillende maanden



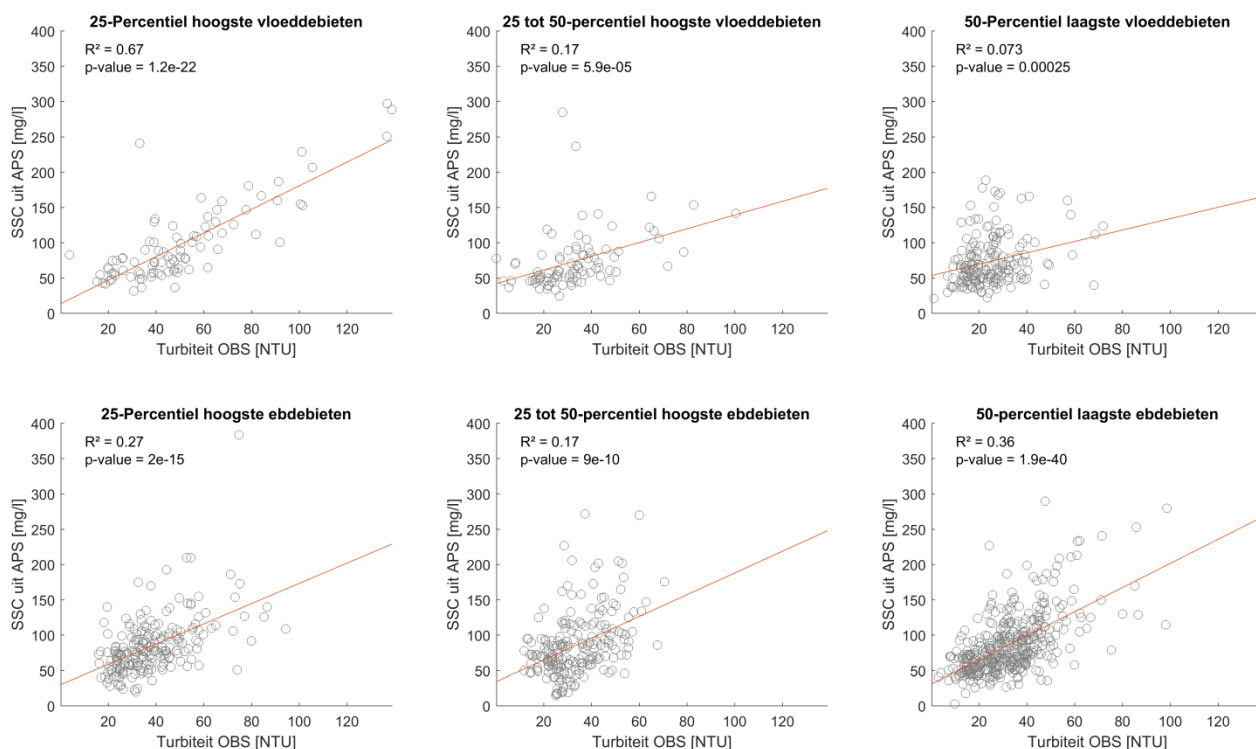
Figuur 17 – Relatie turbiditeit – SSC met onderscheid tussen de verschillende maanden



Figuur 18 – Relatie ABS-SSC met onderverdeling volgens de grootte van de snelheden [25-percentiel hoogste (links), 25-50-percentiel hoge (midden) en 50-percentiel laagste snelheden (rechts)] en getijfase [vloed (boven) en eb (onder)]

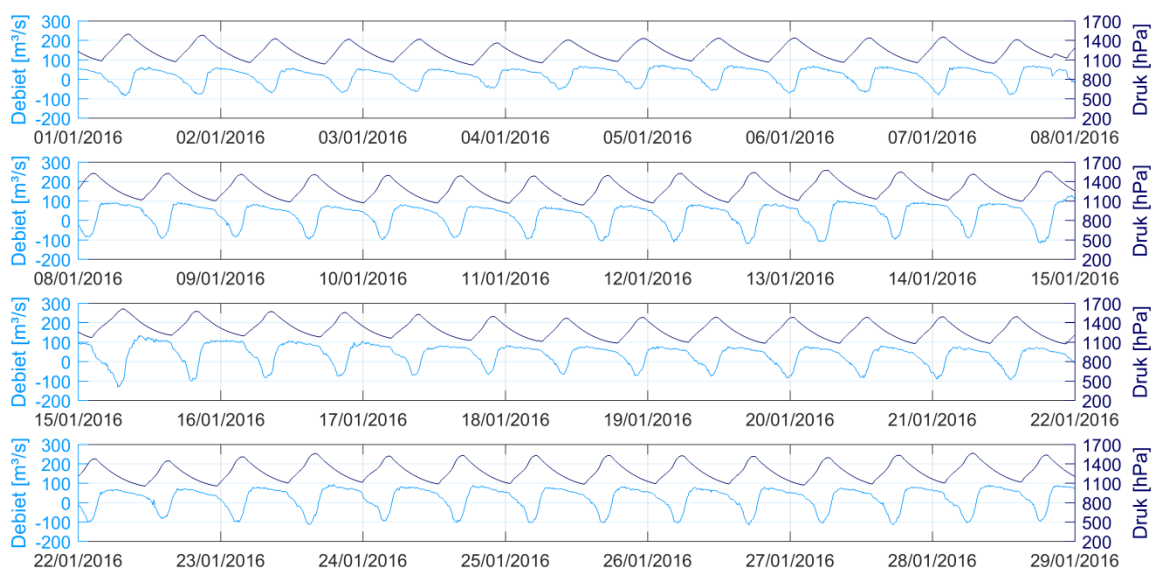


Figuur 19 – Relatie turbiditeit-SSC met onderverdeling volgens de grootte van het debiet [25-percentiel hoogste (links), 25-50-percentiel hoge (midden) en 50-percentiel laagste debieten (rechts)] en getijfase [vloed (boven) en eb (onder)]

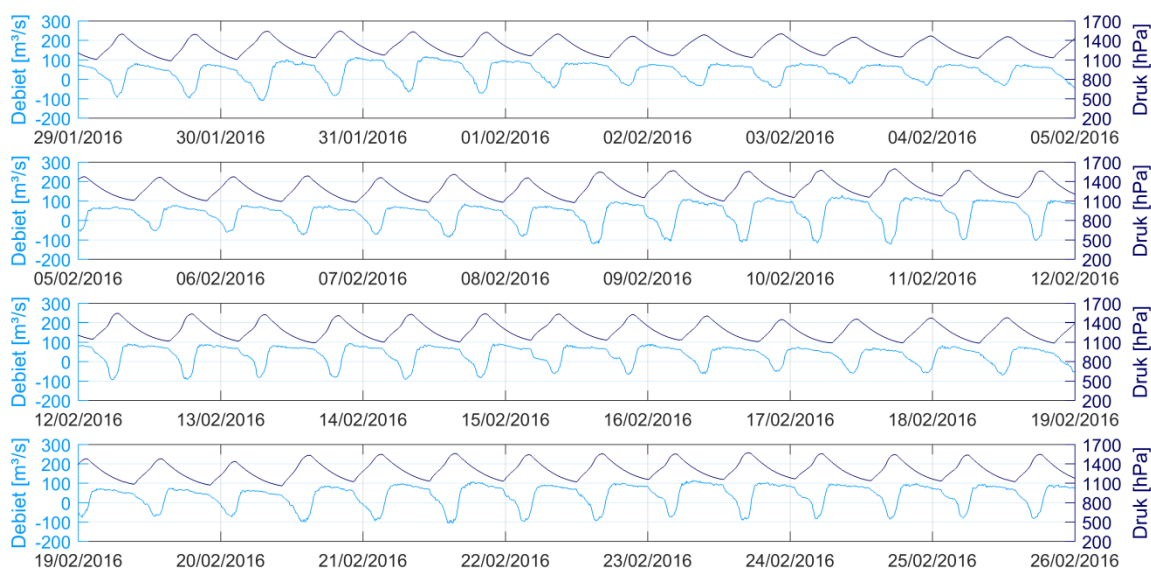


Bijlage B – Tijdreeksen – debiet en druk

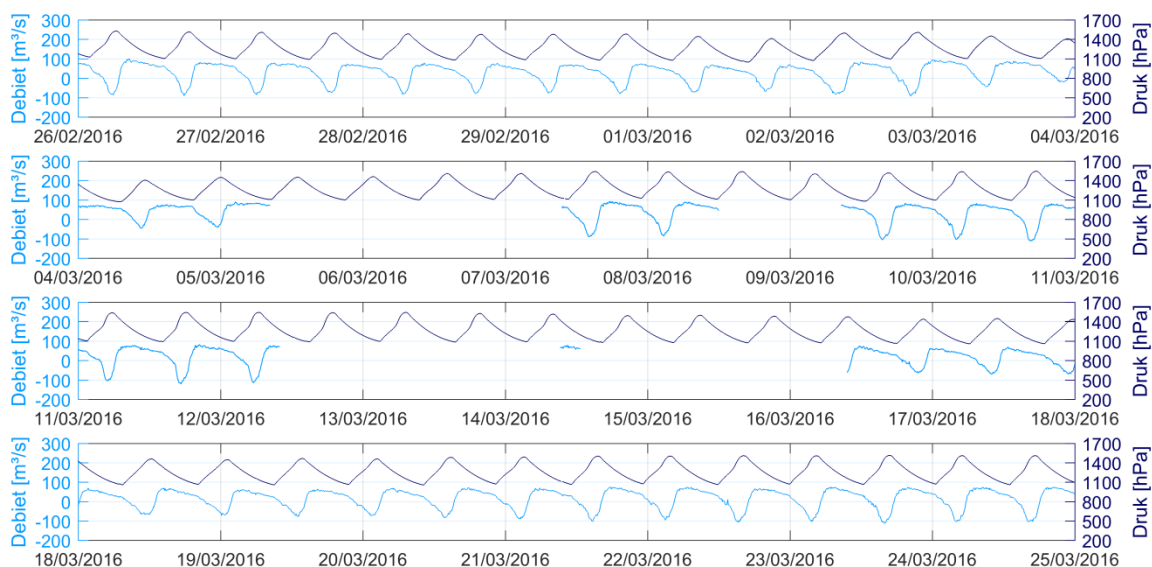
Figuur 20 –Tijdreeksen gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 1



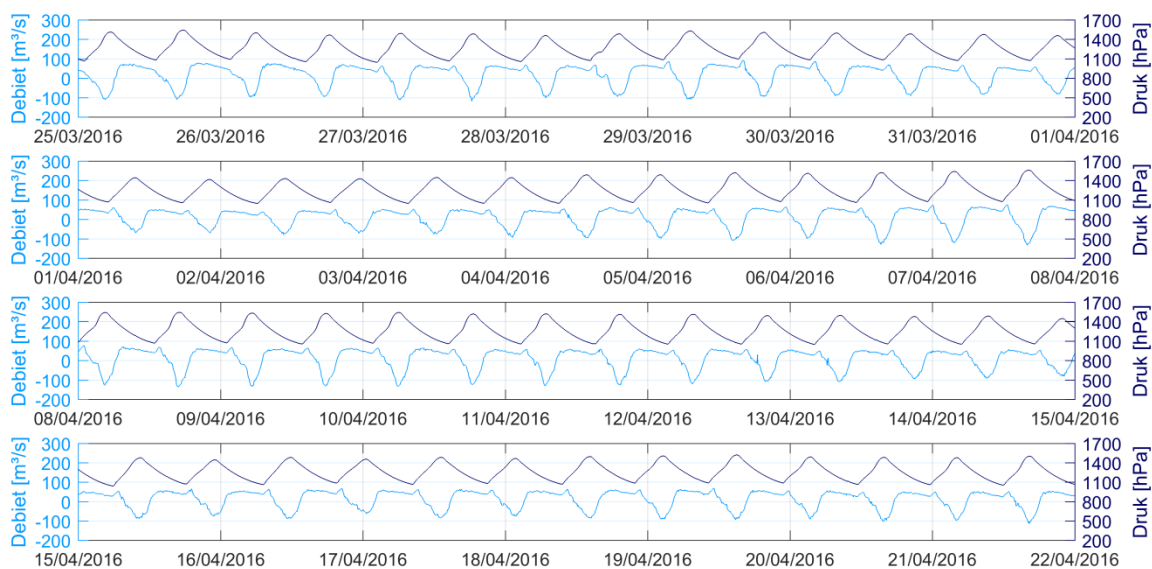
Figuur 21 –Tijdreeksen gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 2



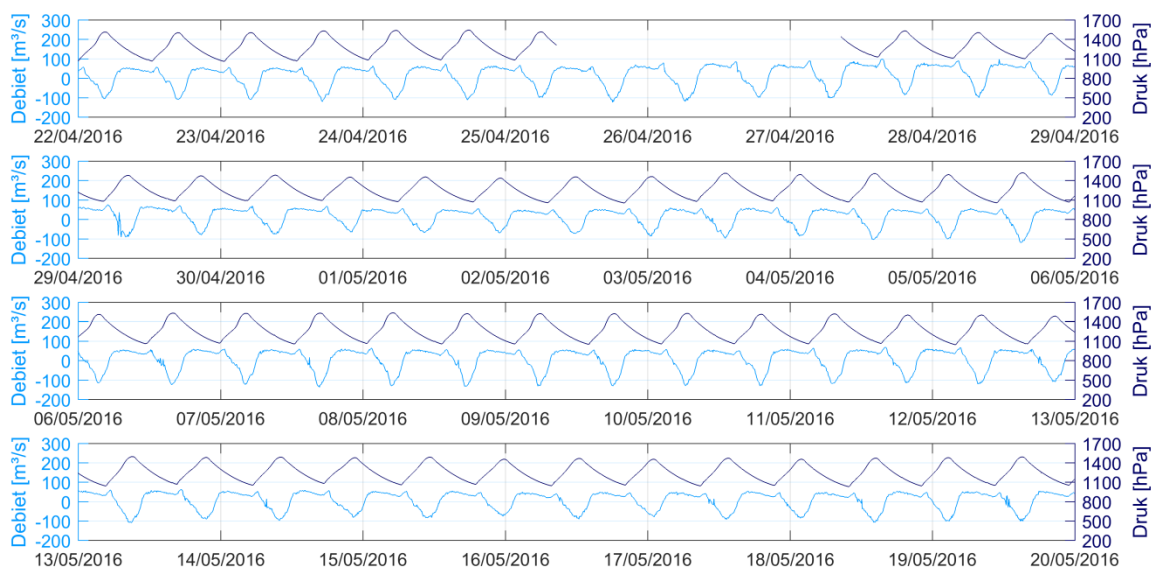
Figuur 22 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 3



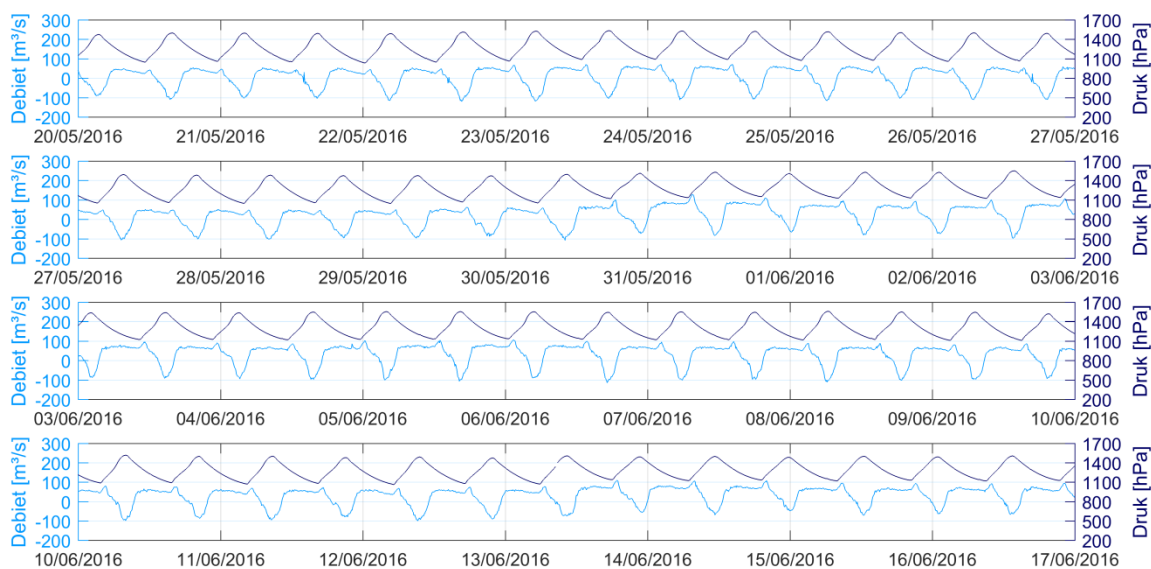
Figuur 23 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 4



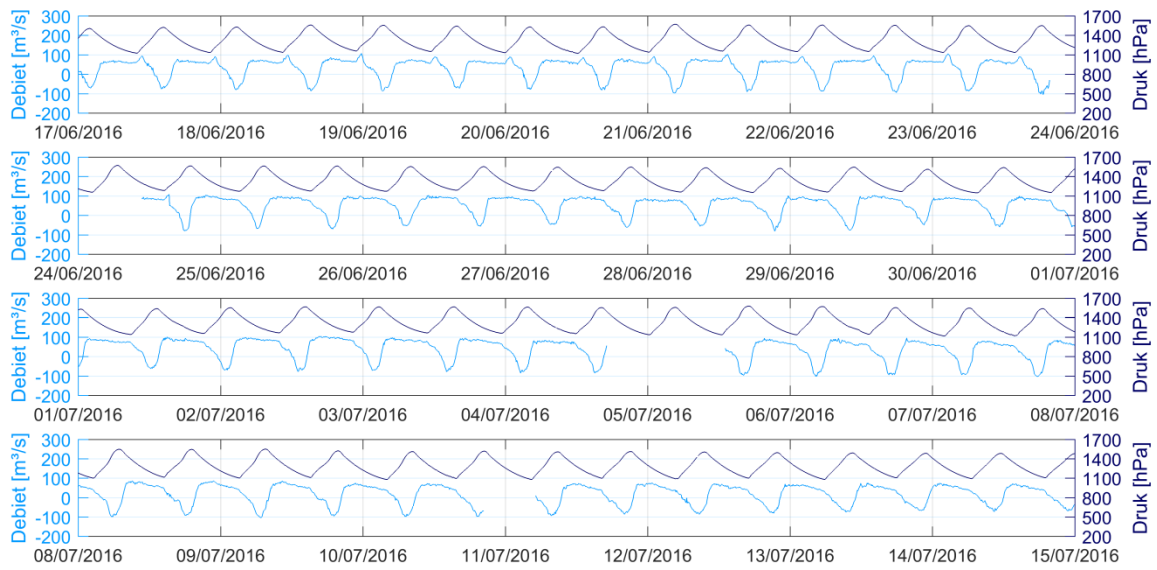
Figuur 24 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 5



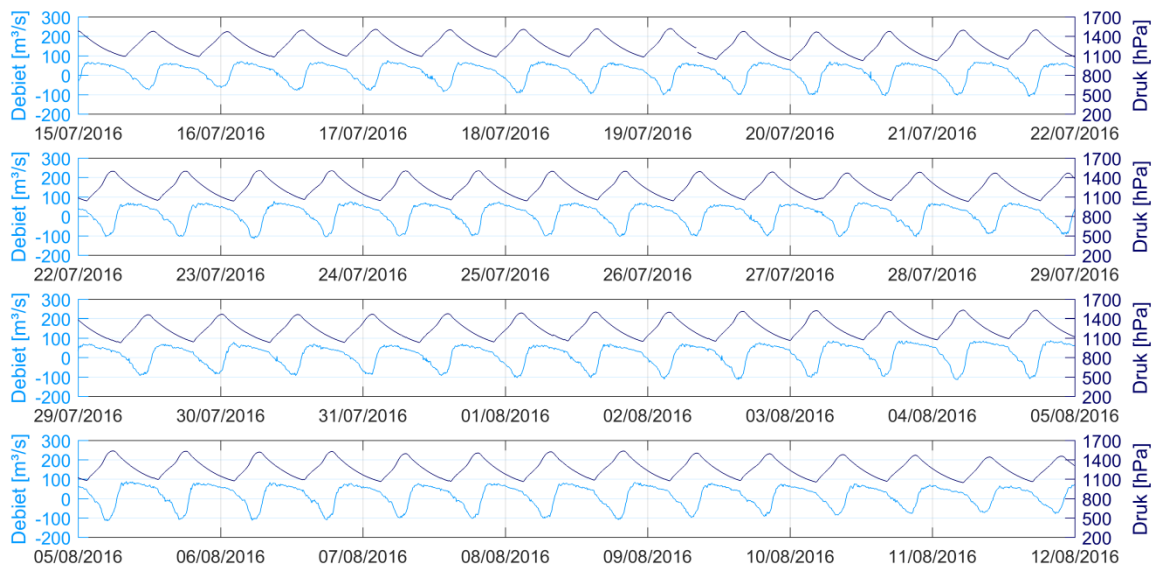
Figuur 25 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 6



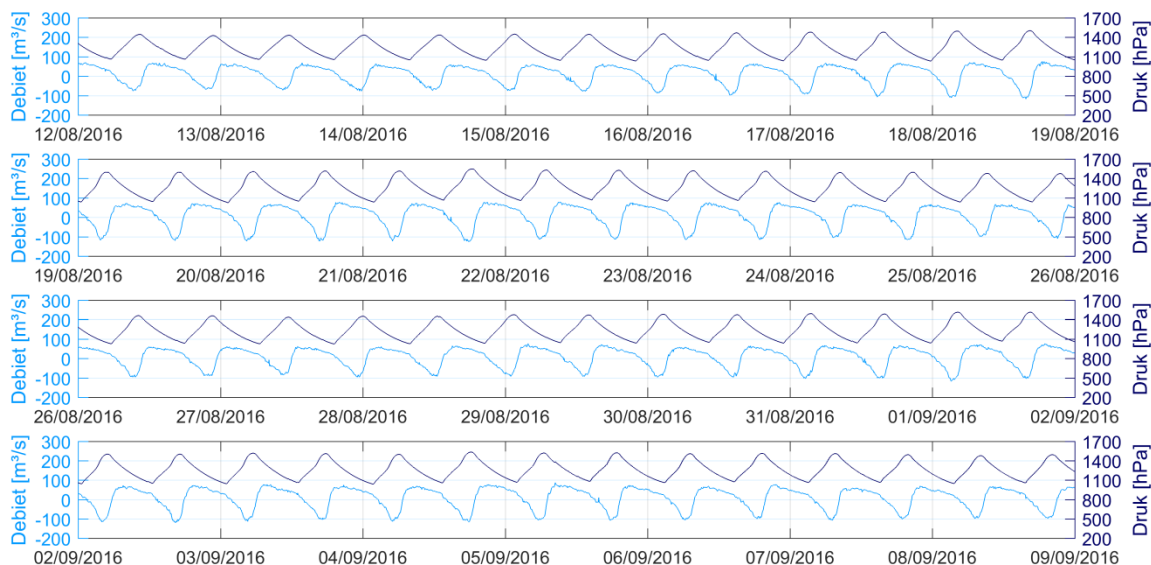
Figuur 26 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 7



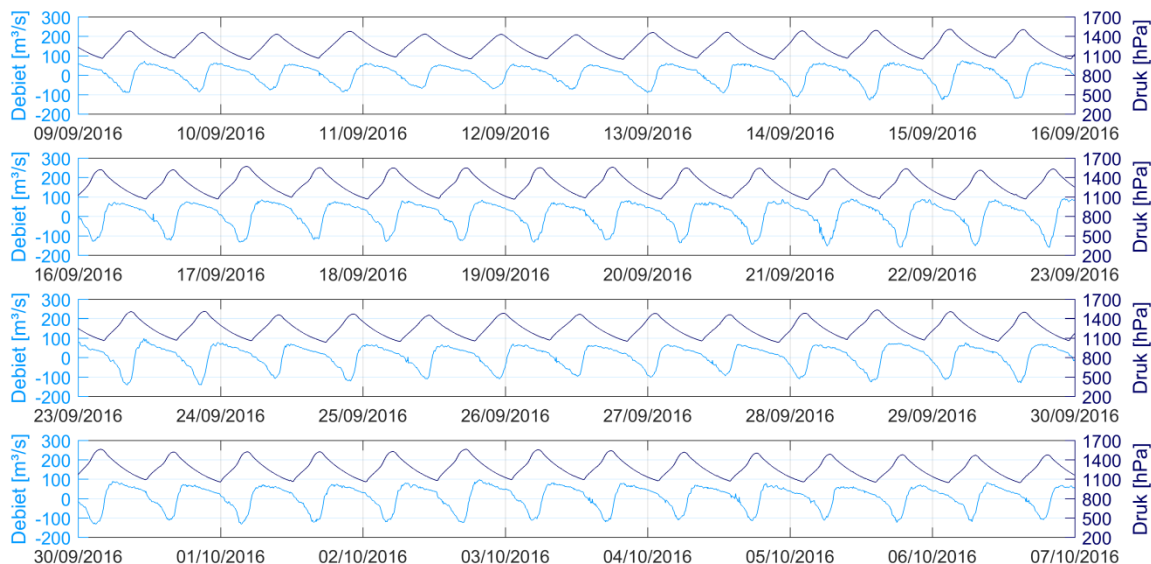
Figuur 27 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 8



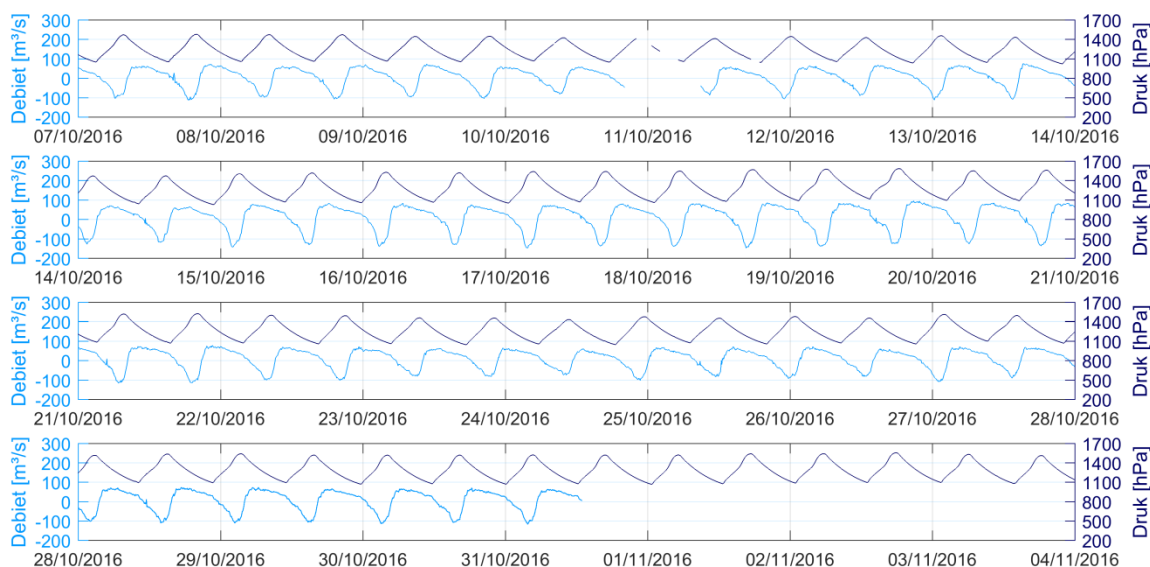
Figuur 28 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 9



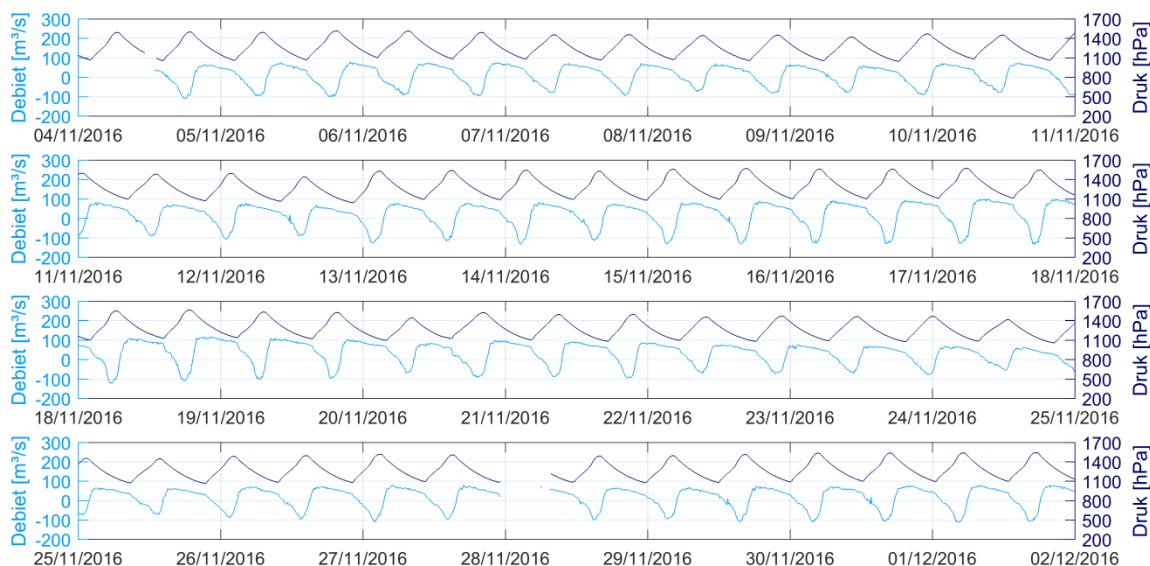
Figuur 29 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 10



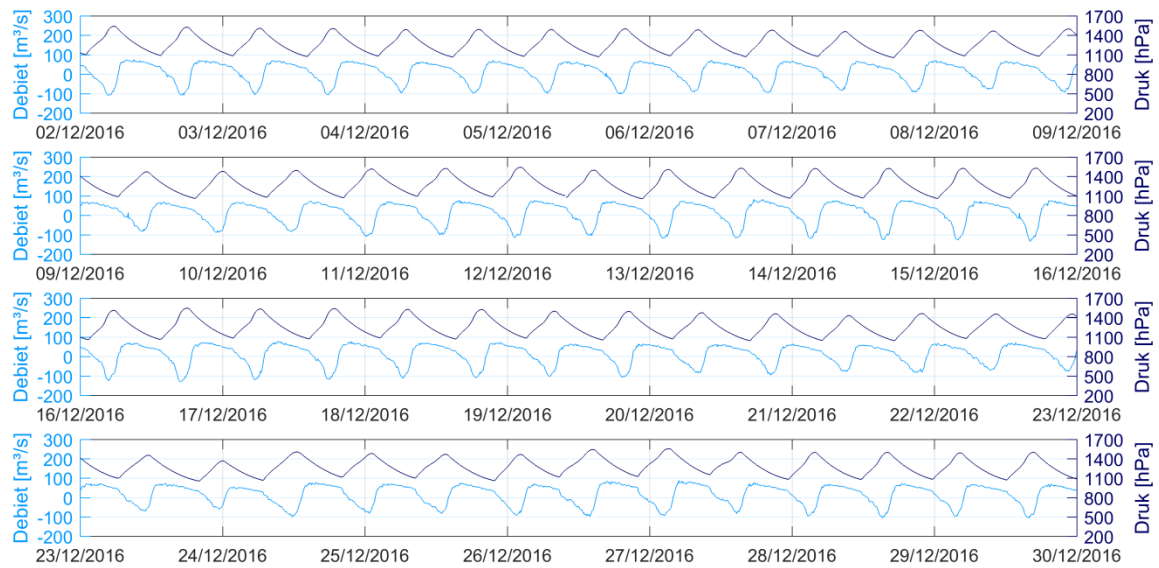
Figuur 30 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 11



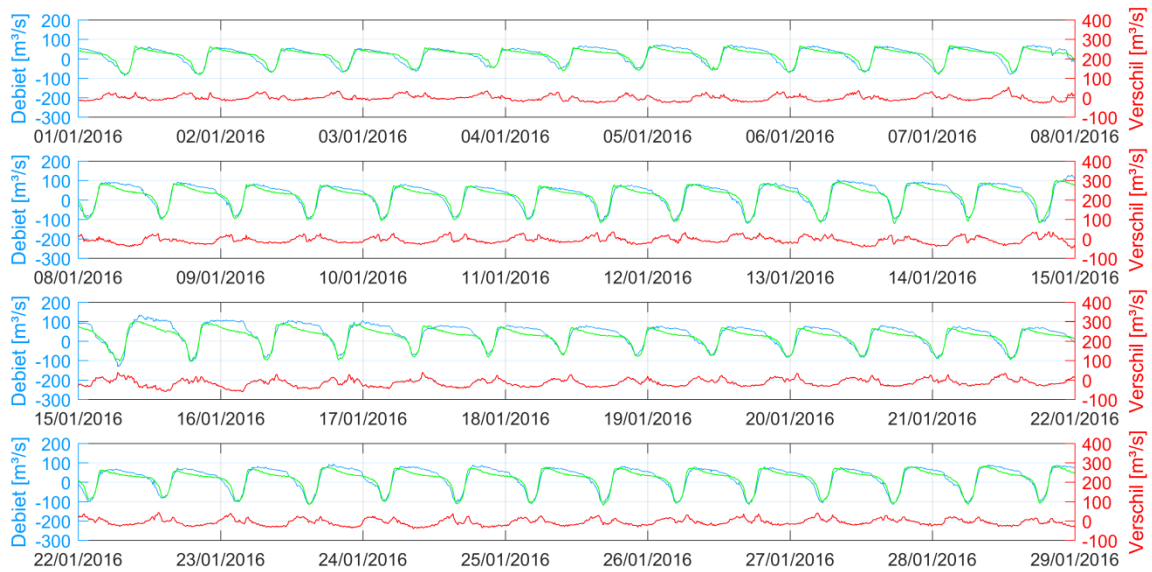
Figuur 31 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 12



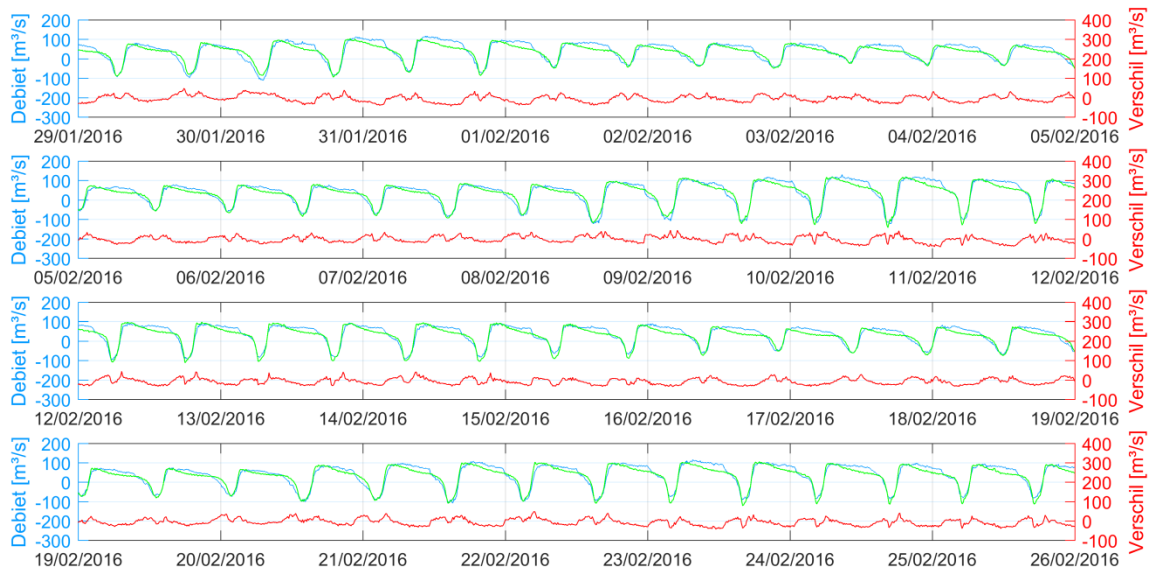
Figuur 32 –Tijdsreeks gemeten debiet (SonTek-SL500) en druk (YSI) te Duffel-sluis voor periode 13



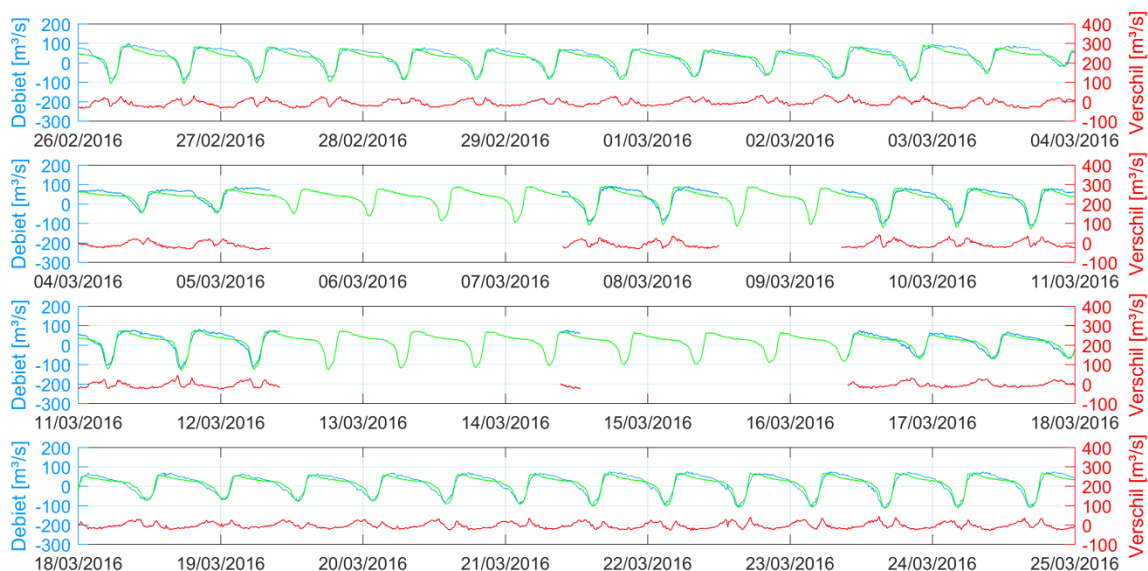
Figuur 33 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 1



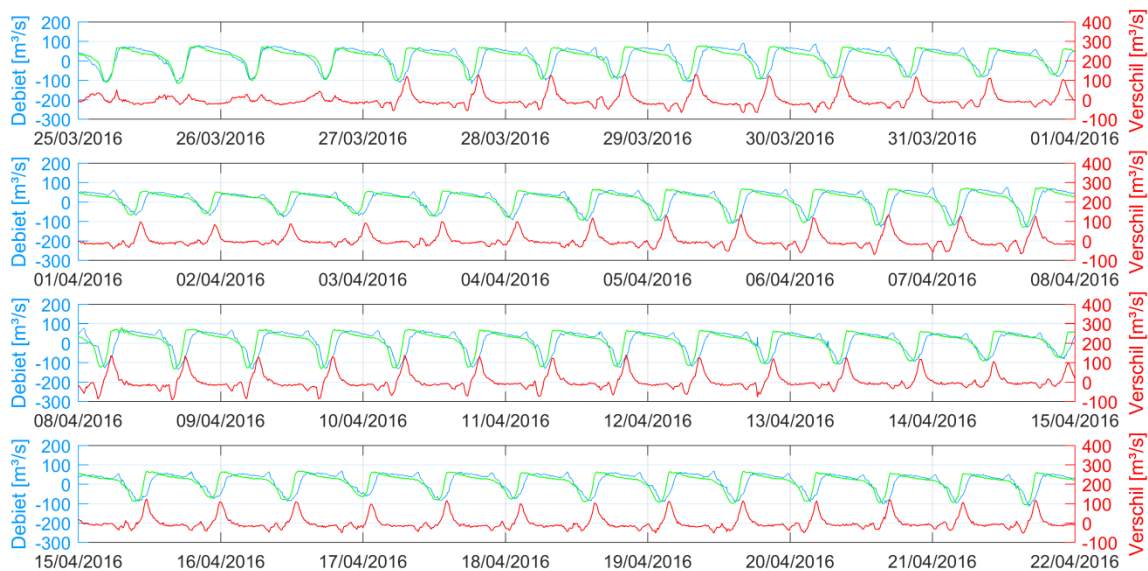
Figuur 34 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 2



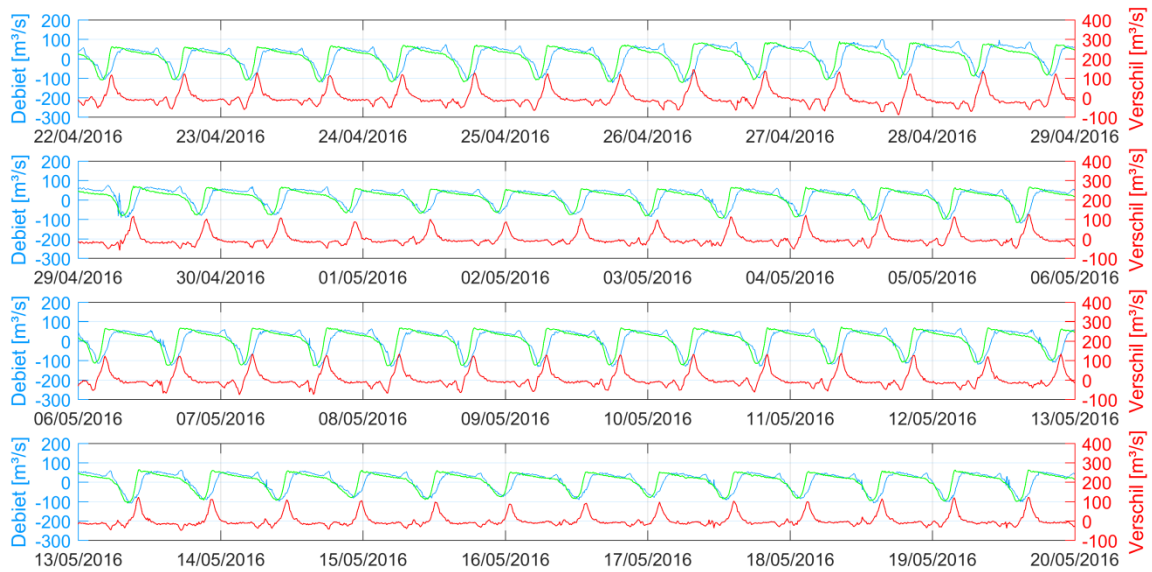
Figuur 35 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 3



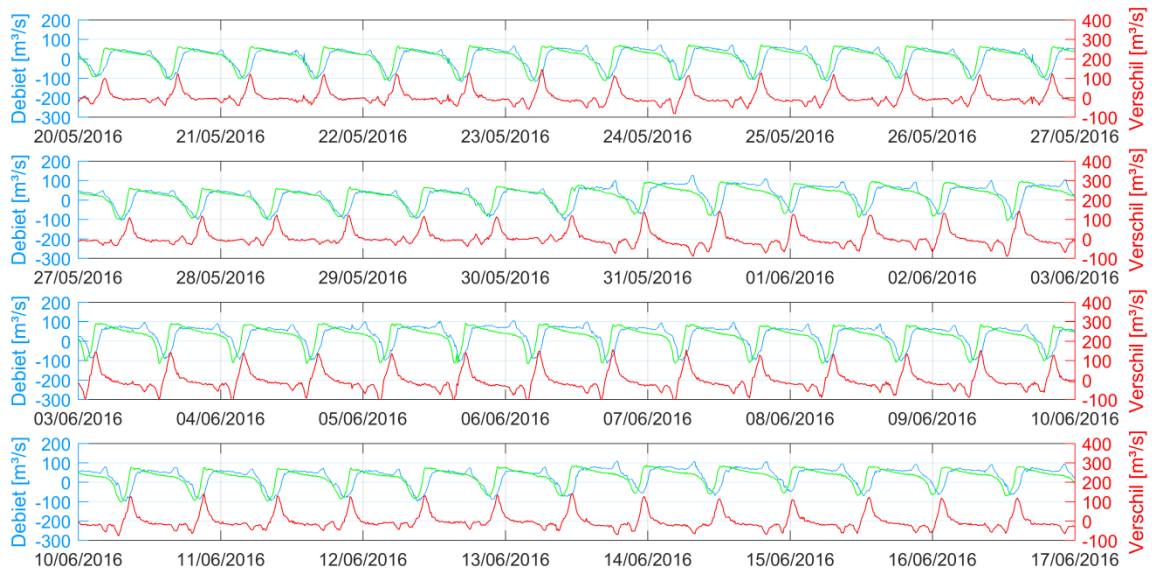
Figuur 36 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 4



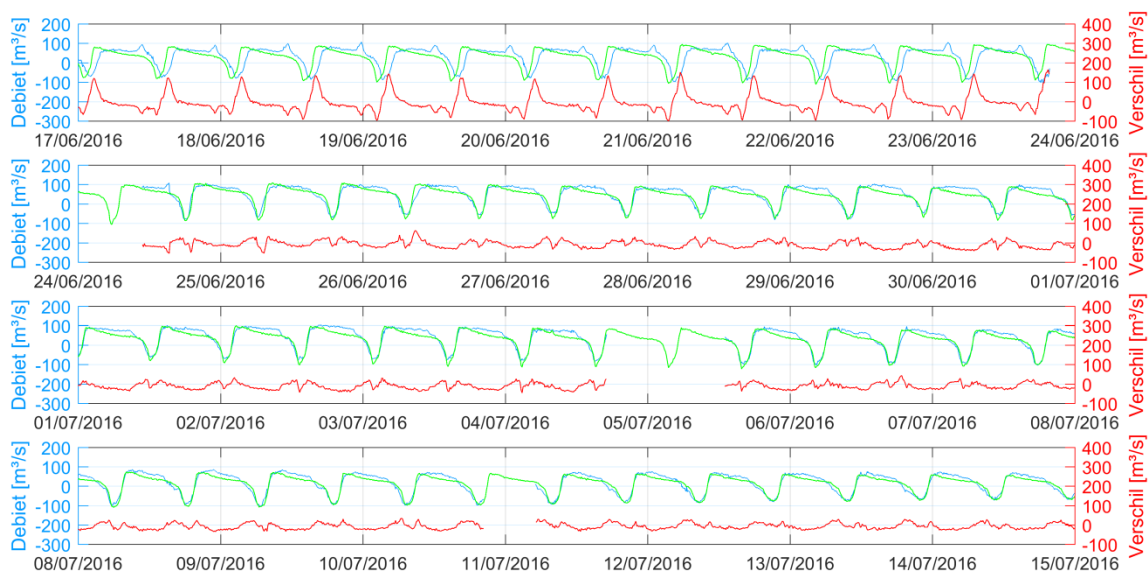
Figuur 37 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 5



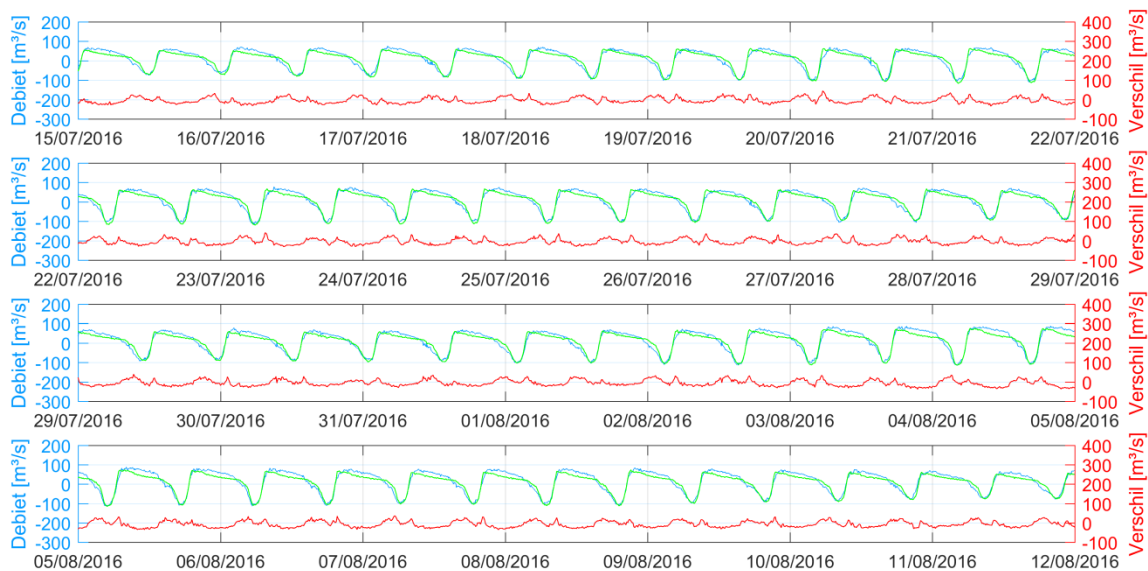
Figuur 38 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 6



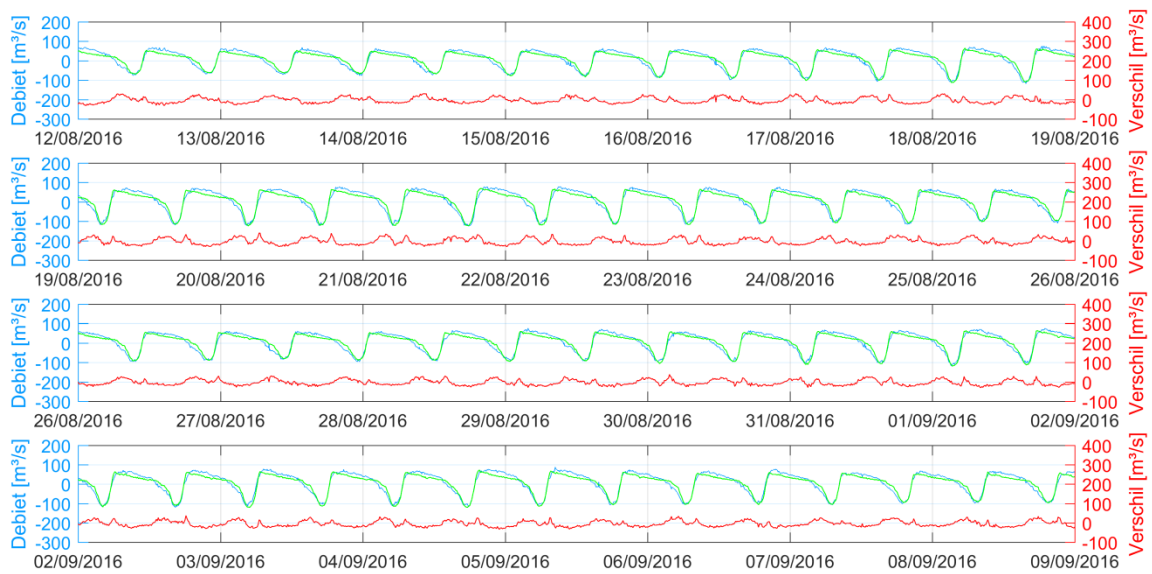
Figuur 39 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 7



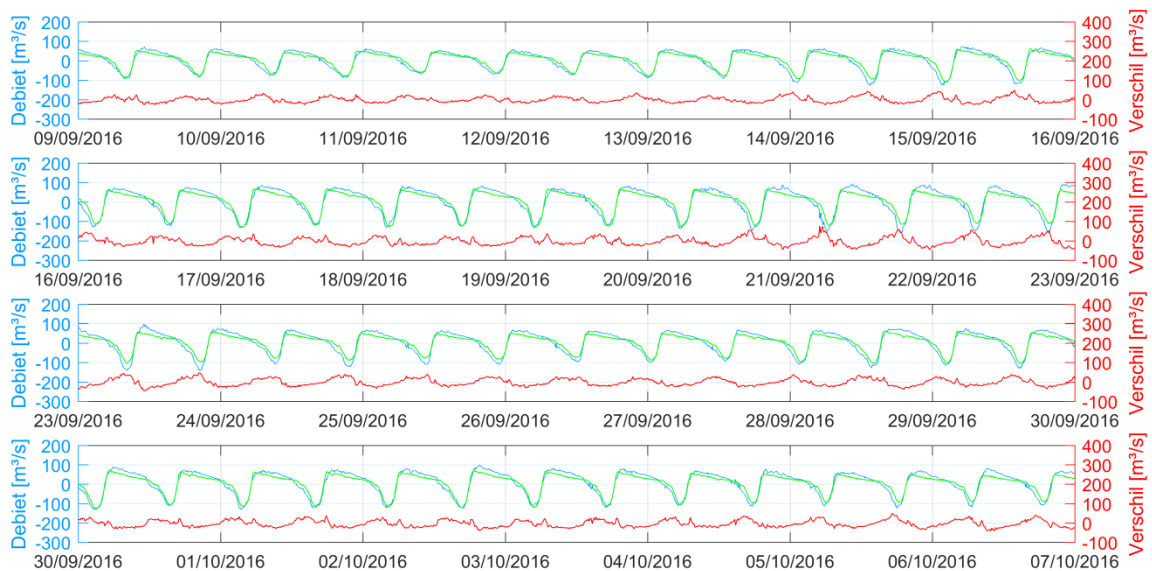
Figuur 40 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 8



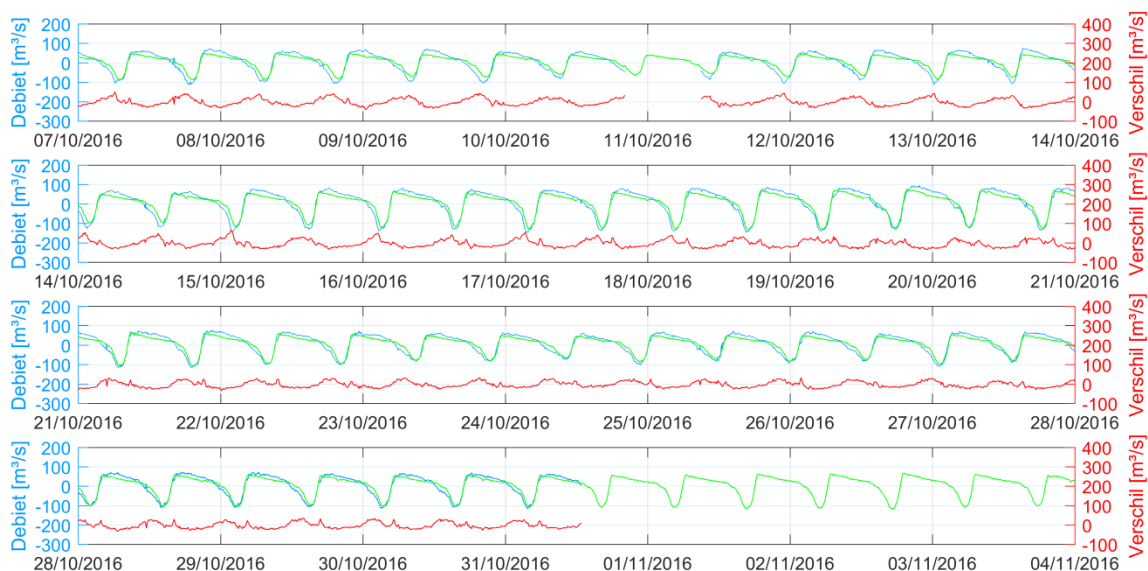
Figuur 41 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 9



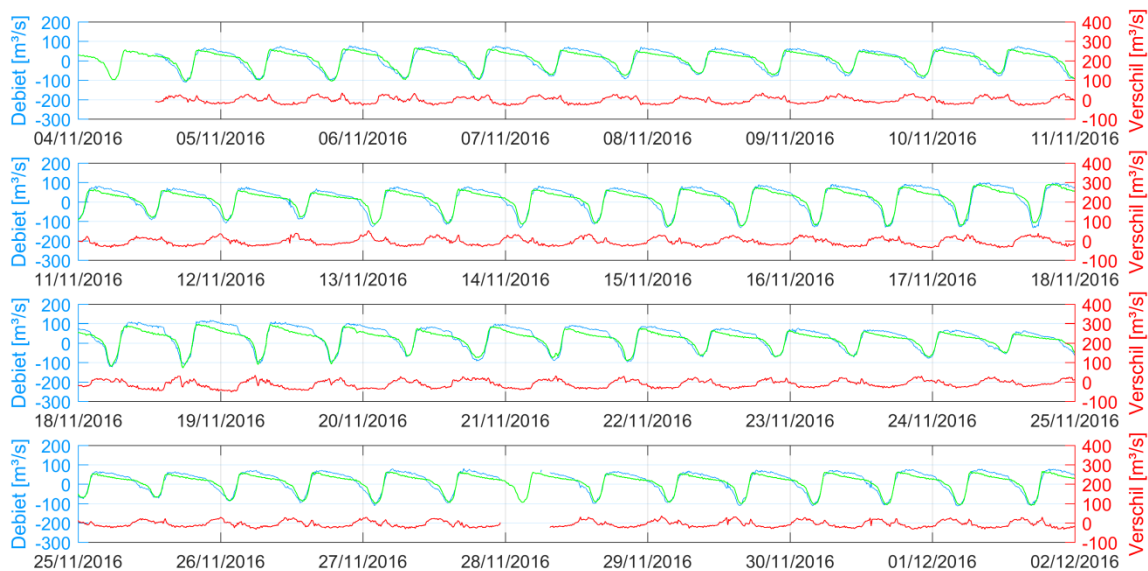
Figuur 42 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 10



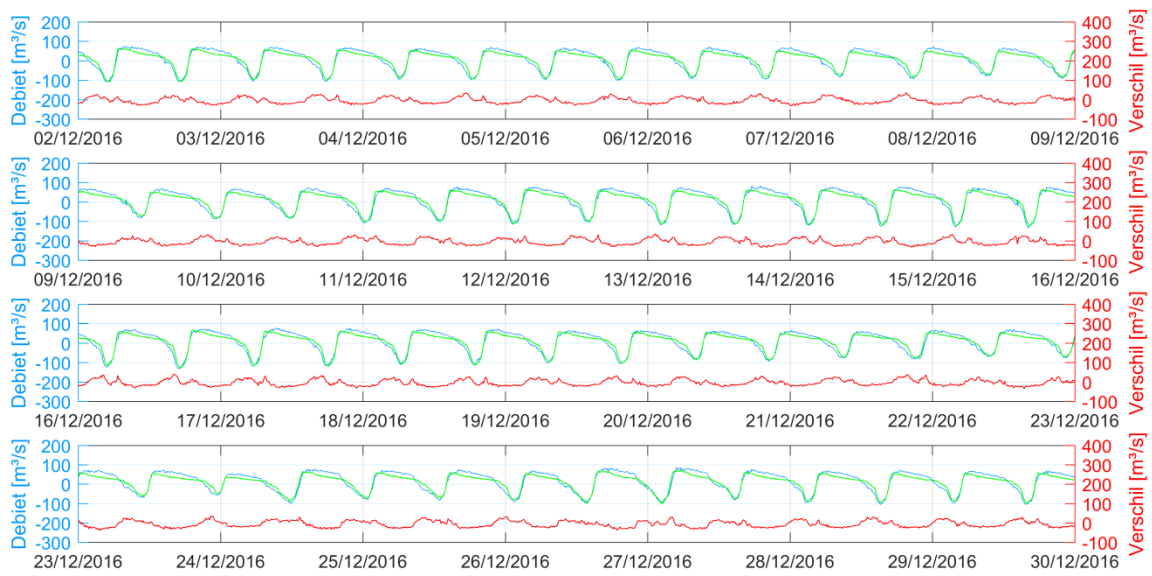
Figuur 43 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 11



Figuur 44 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 12

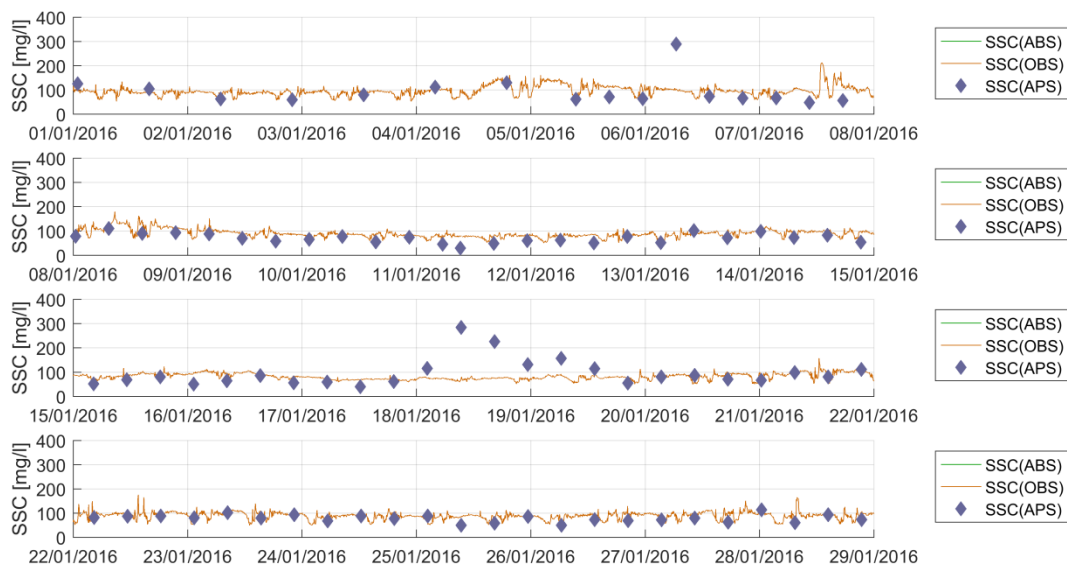


Figuur 45 –Tijdsreeks gemeten (SonTek-SL500) en berekend (kubatuur) debiet te Duffel-sluis voor periode 13

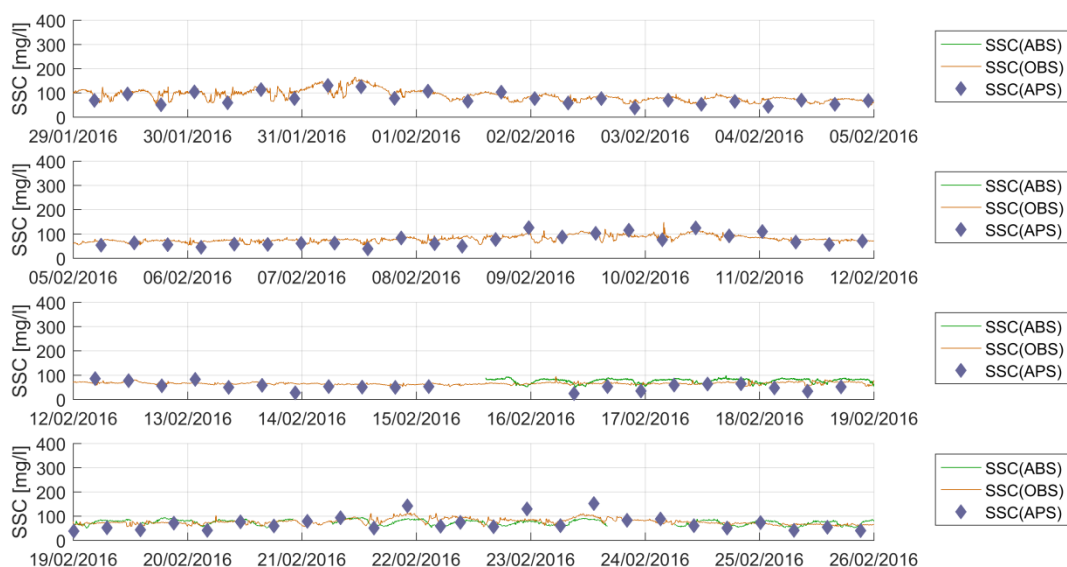


Bijlage C –Tijdreeksen - SSC

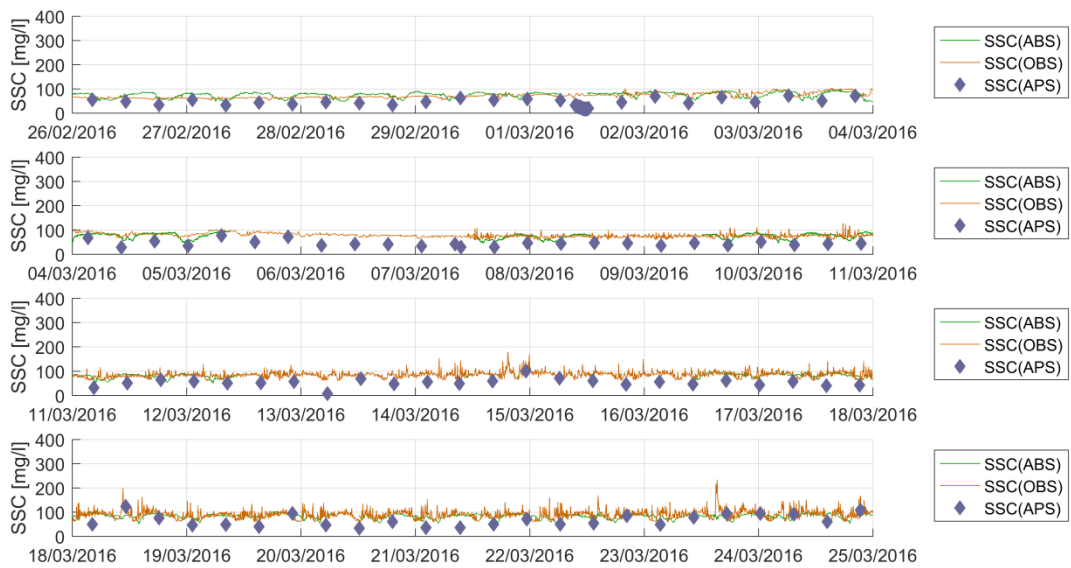
Figuur 46 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 1



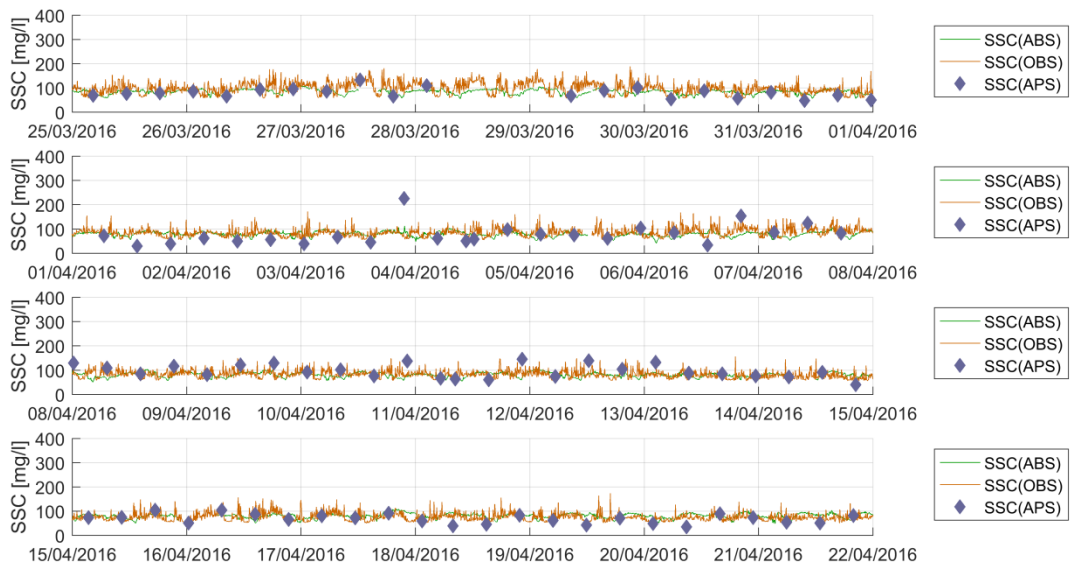
Figuur 47 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 2



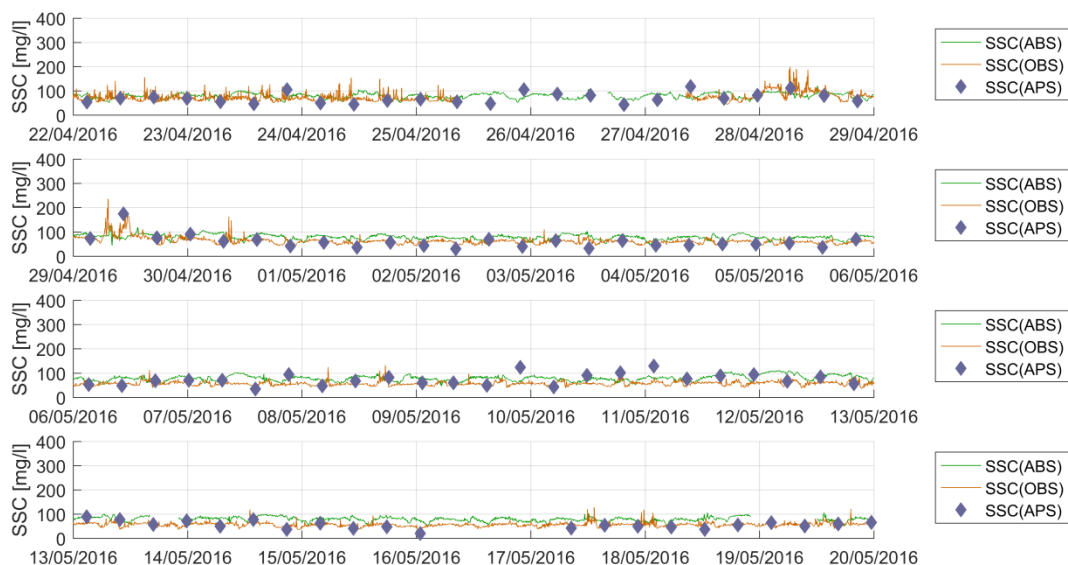
Figuur 48 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 3



Figuur 49 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 4



Figuur 50 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 5



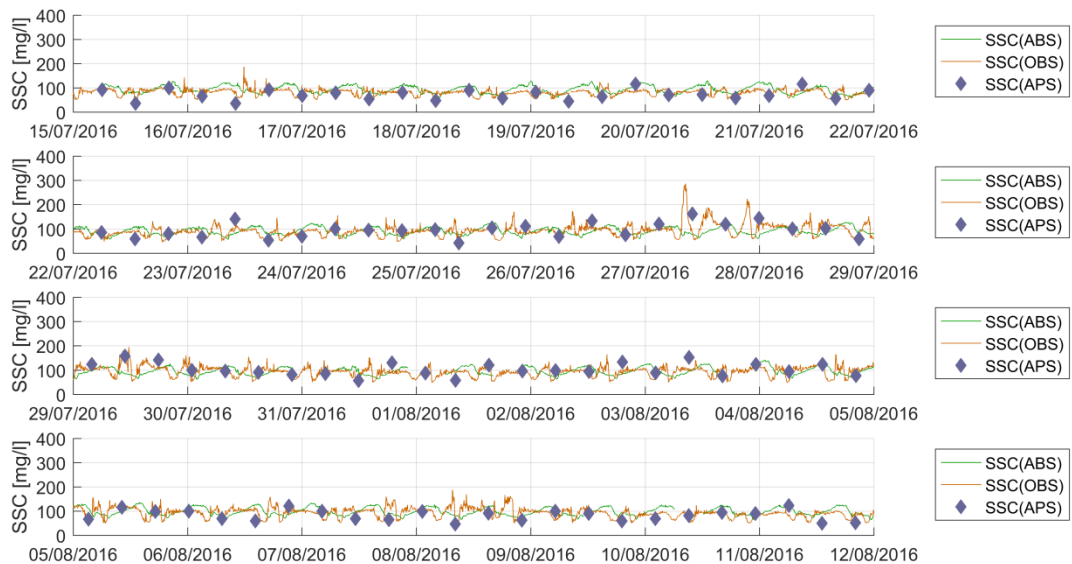
Figuur 51 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 6



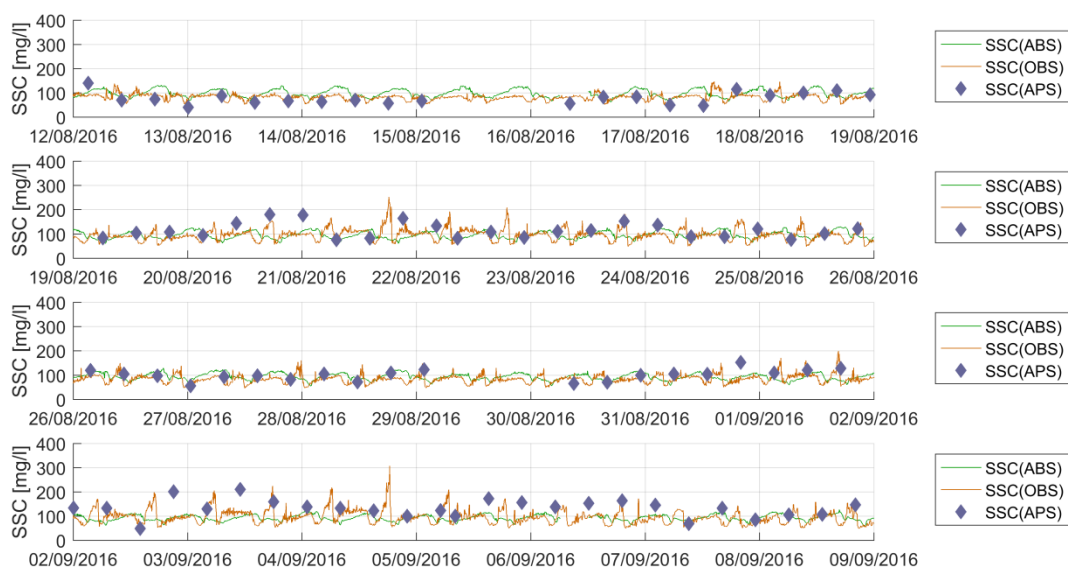
Figuur 52 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 7



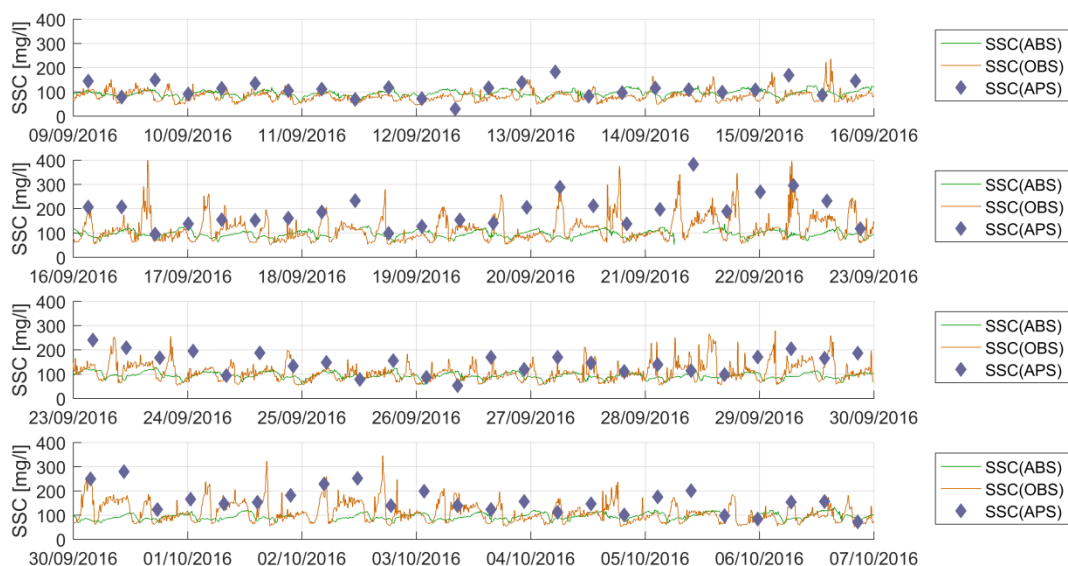
Figuur 53 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 8



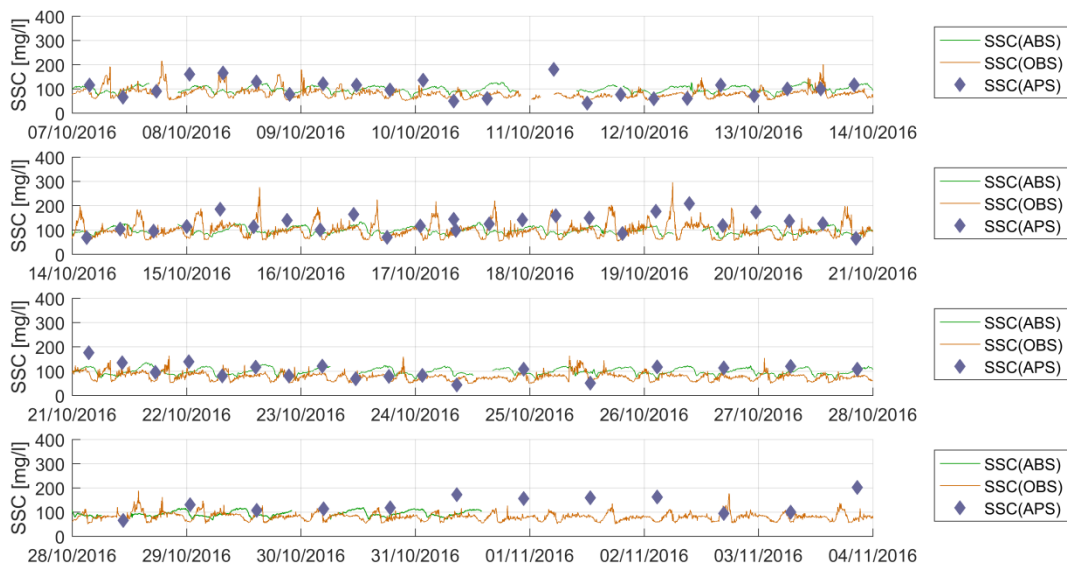
Figuur 54 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 9



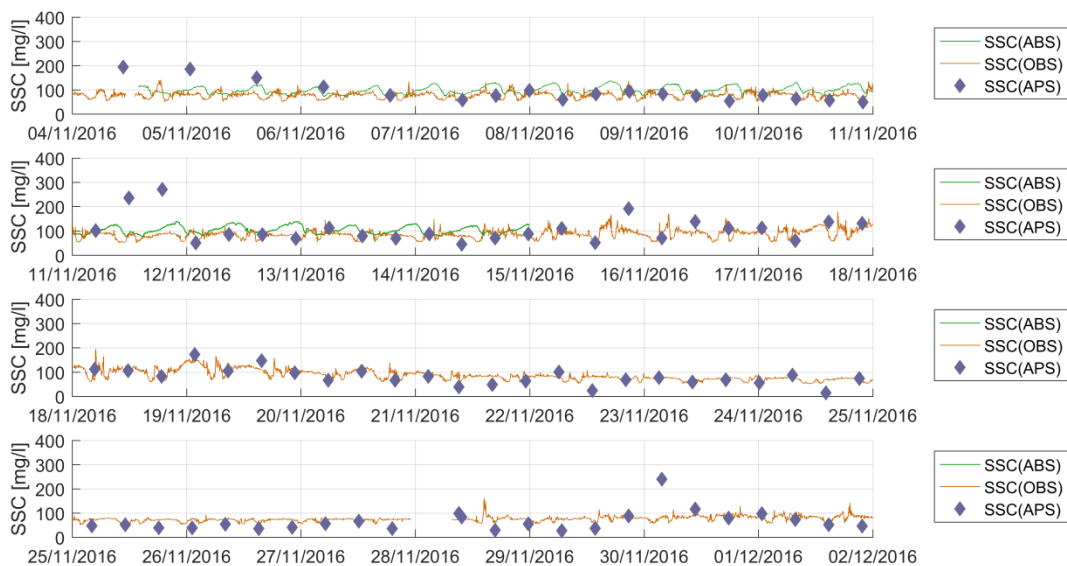
Figuur 55 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 10



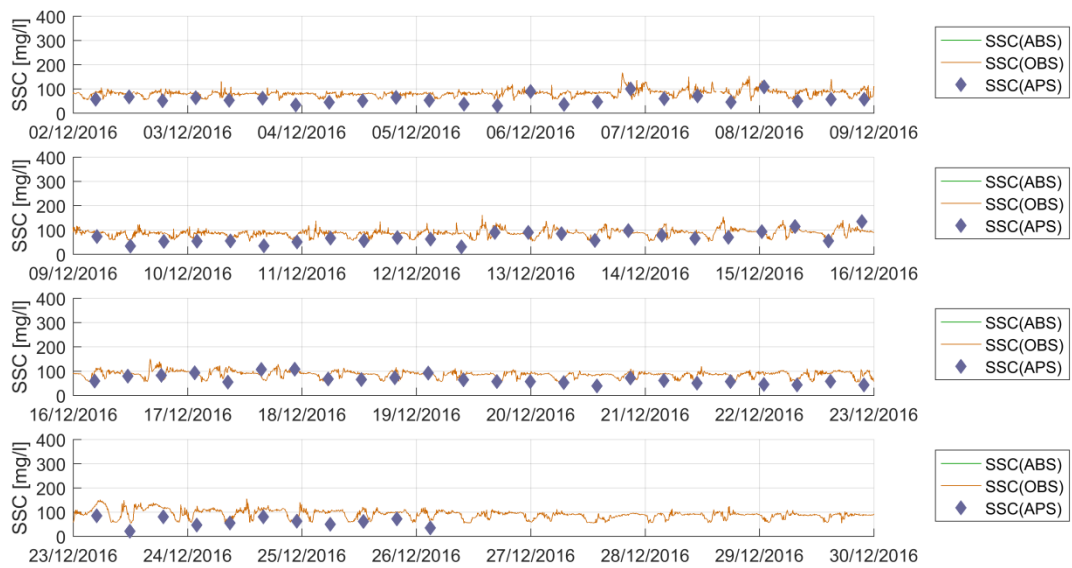
Figuur 56 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 11



Figuur 57 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 12

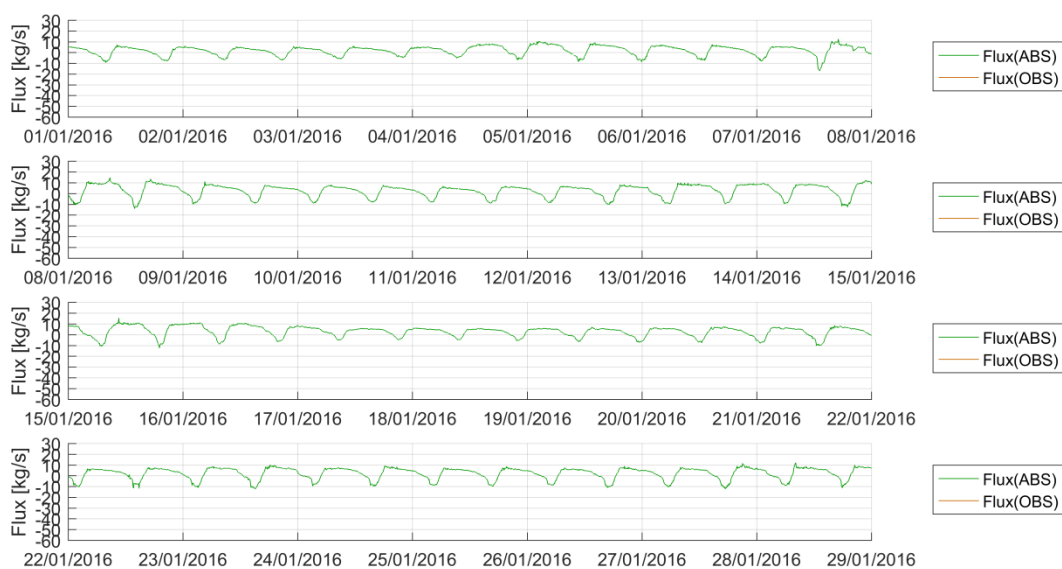


Figuur 58 –Tijdsreeks gemeten SSC (APS) en berekende SSC (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 13

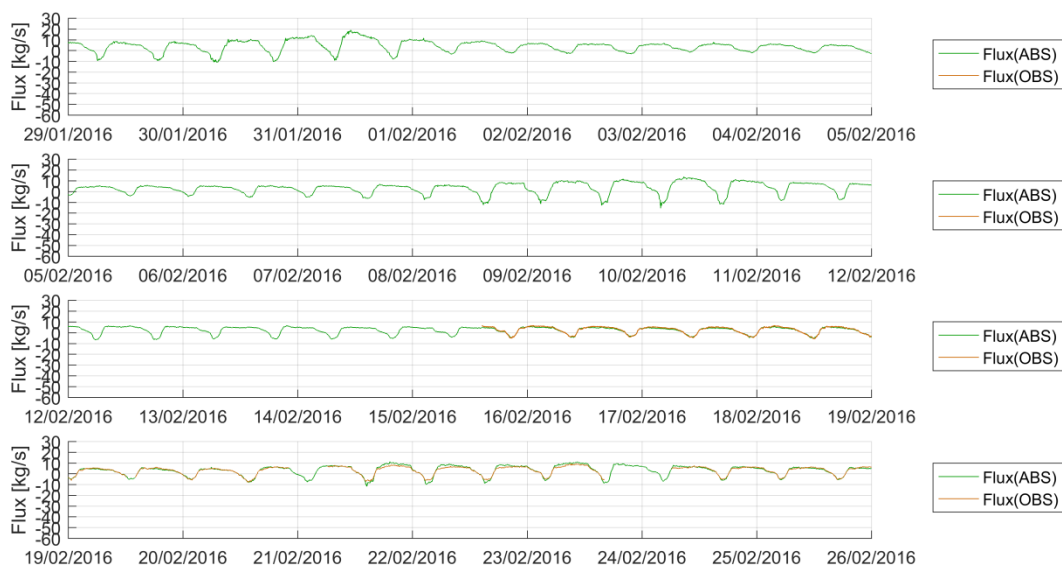


Bijlage D – Tijdsreeksen - sedimentflux

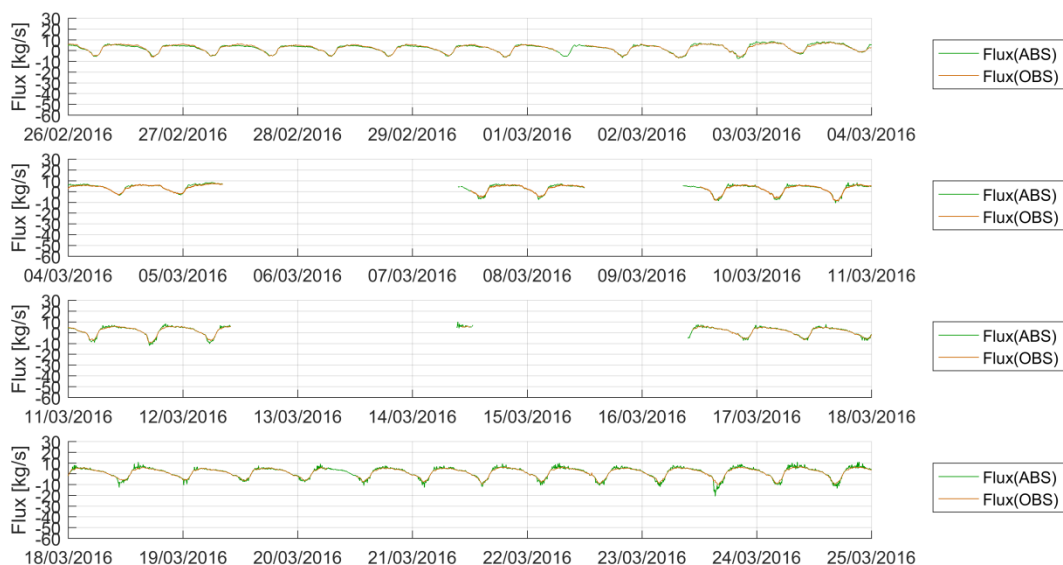
Figuur 59 – Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 1



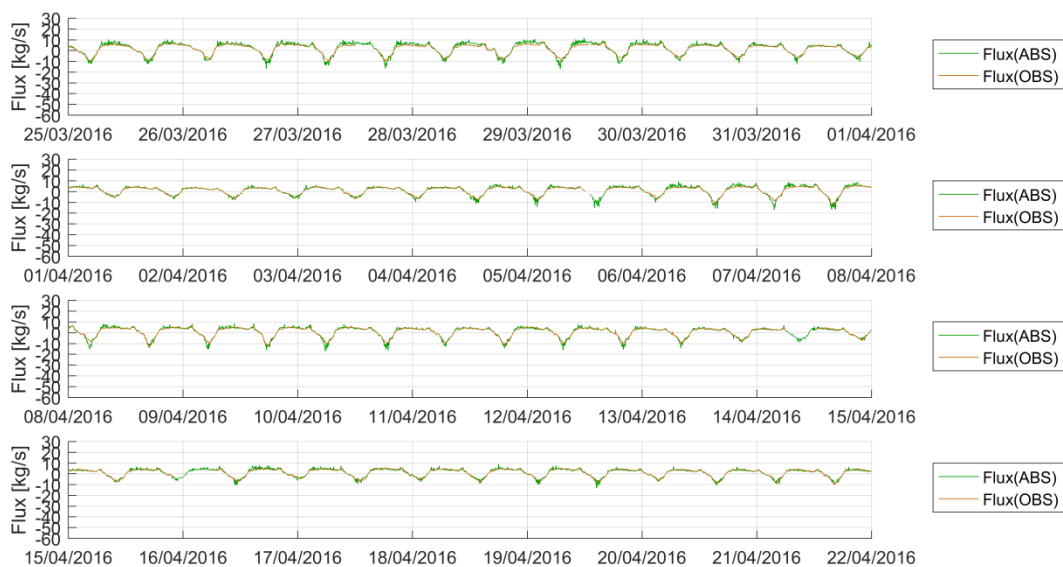
Figuur 60 – Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 2



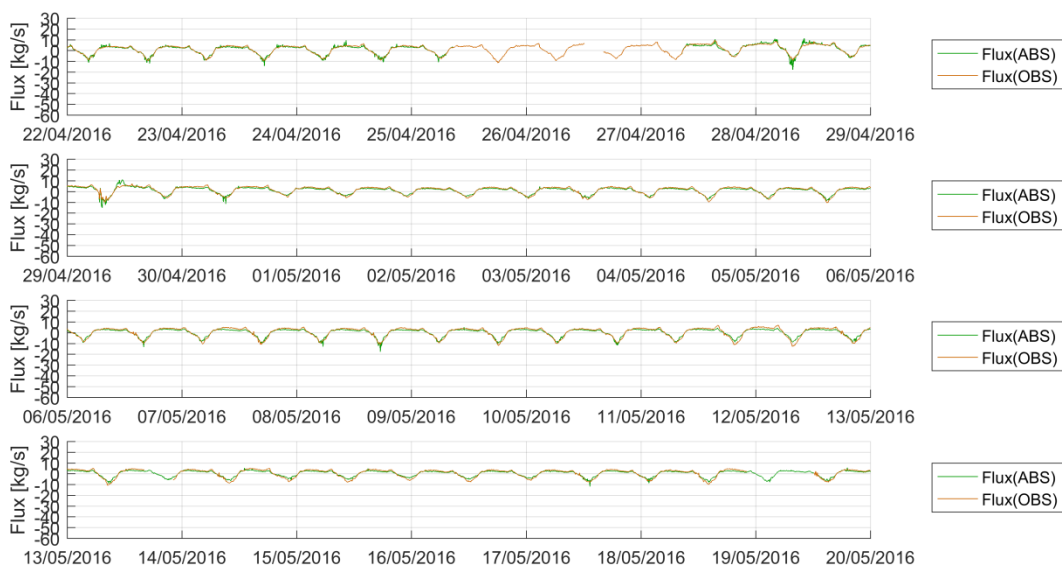
Figuur 61 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 3



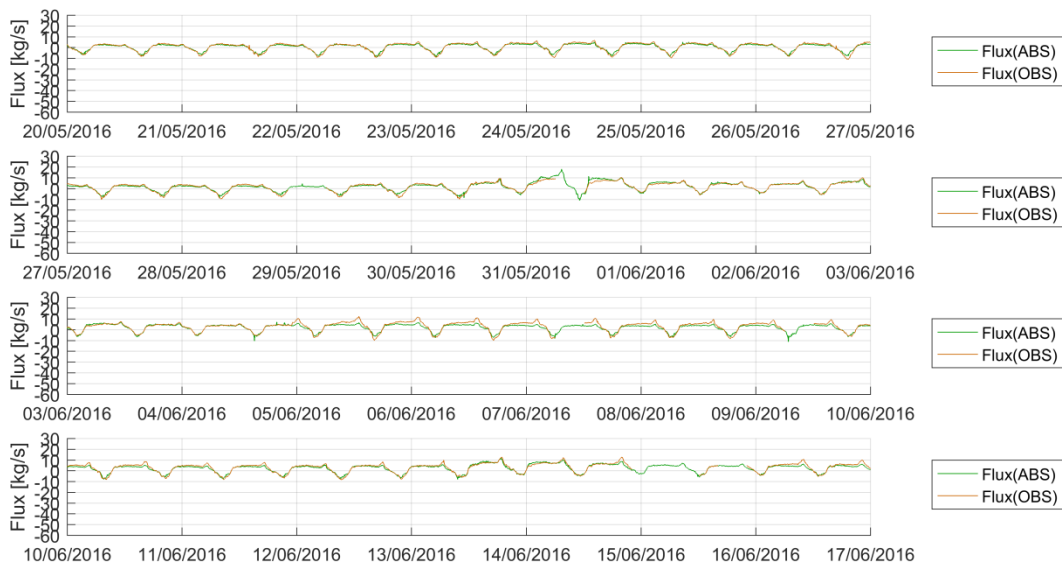
Figuur 62 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 4



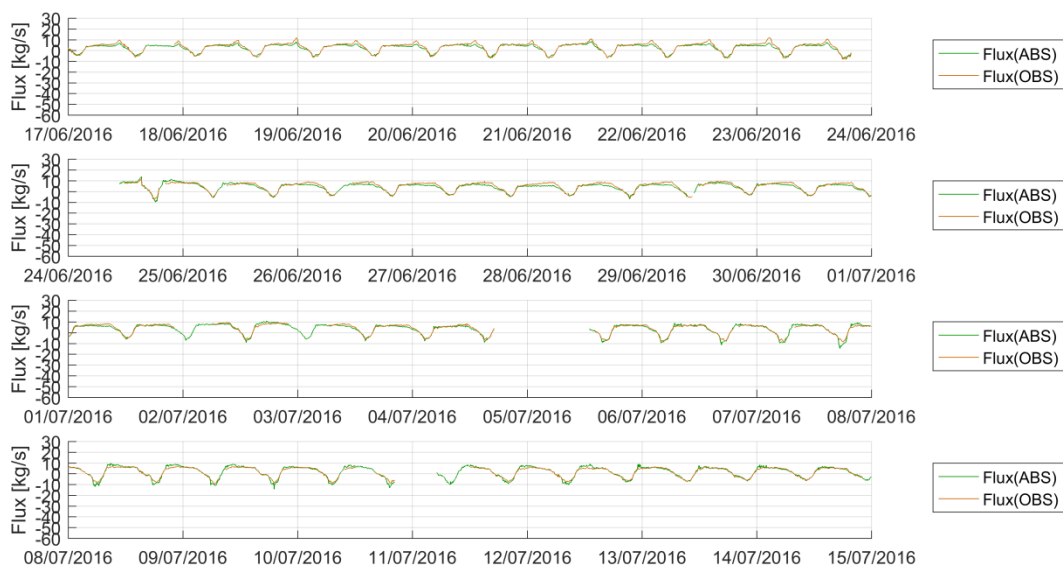
Figuur 63 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 5



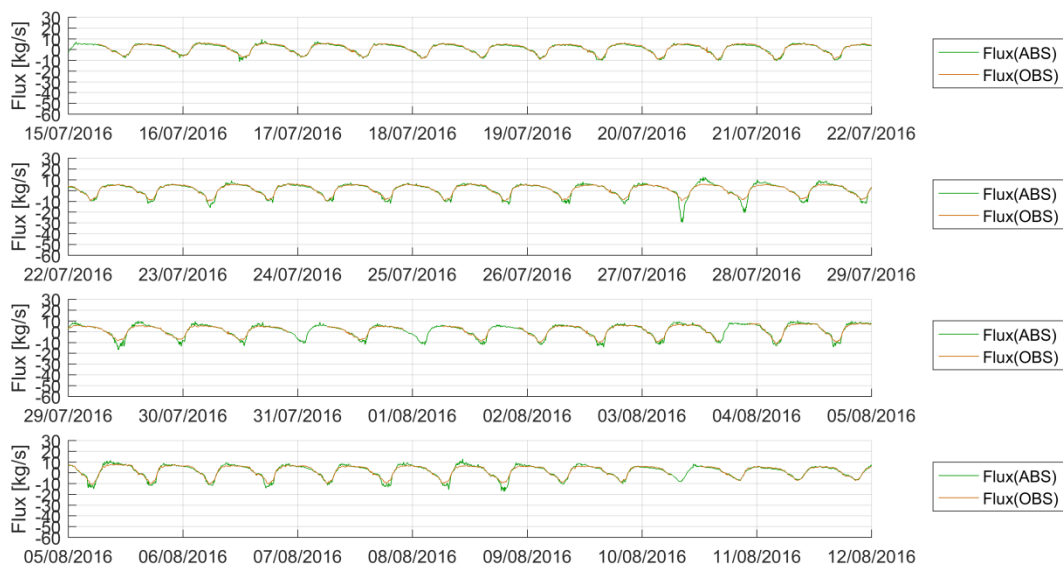
Figuur 64 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 6



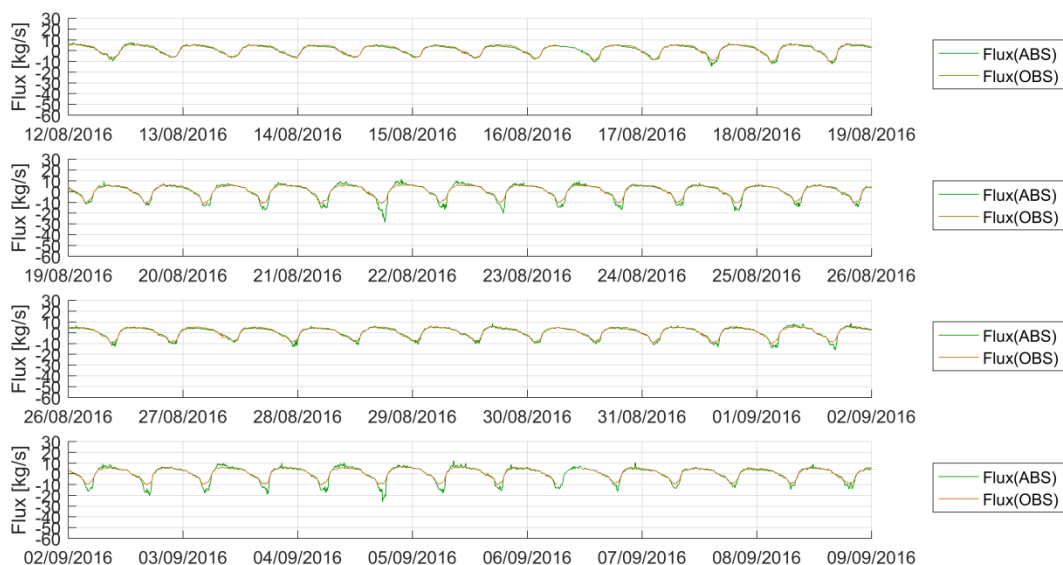
Figuur 65 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 7



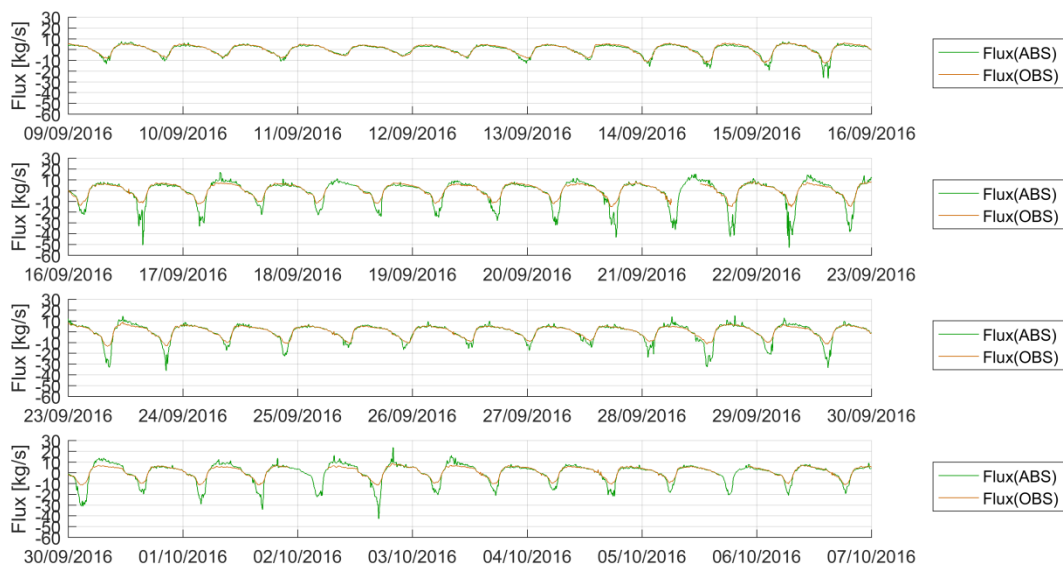
Figuur 66 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 8



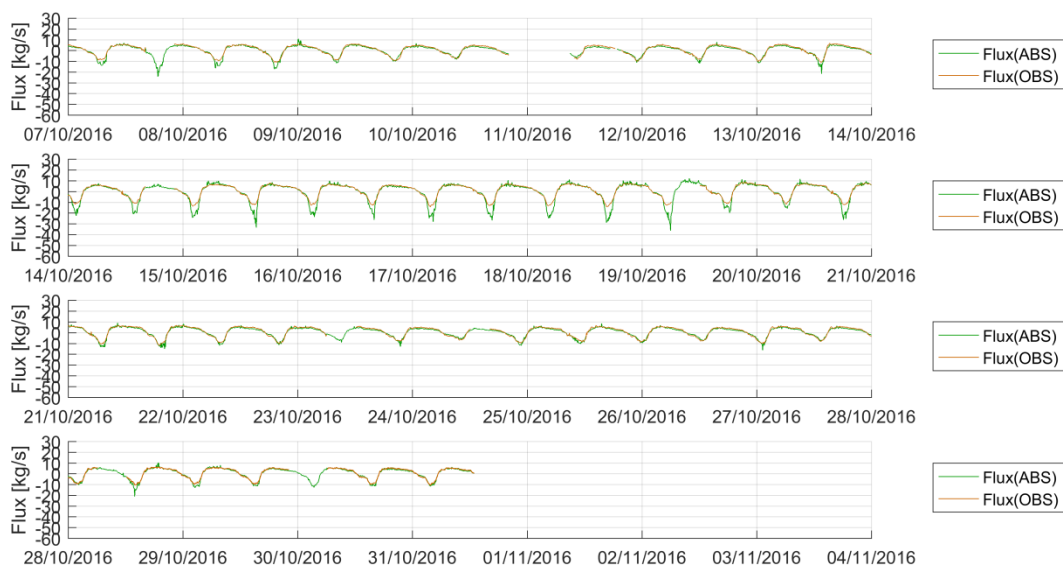
Figuur 67 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 9



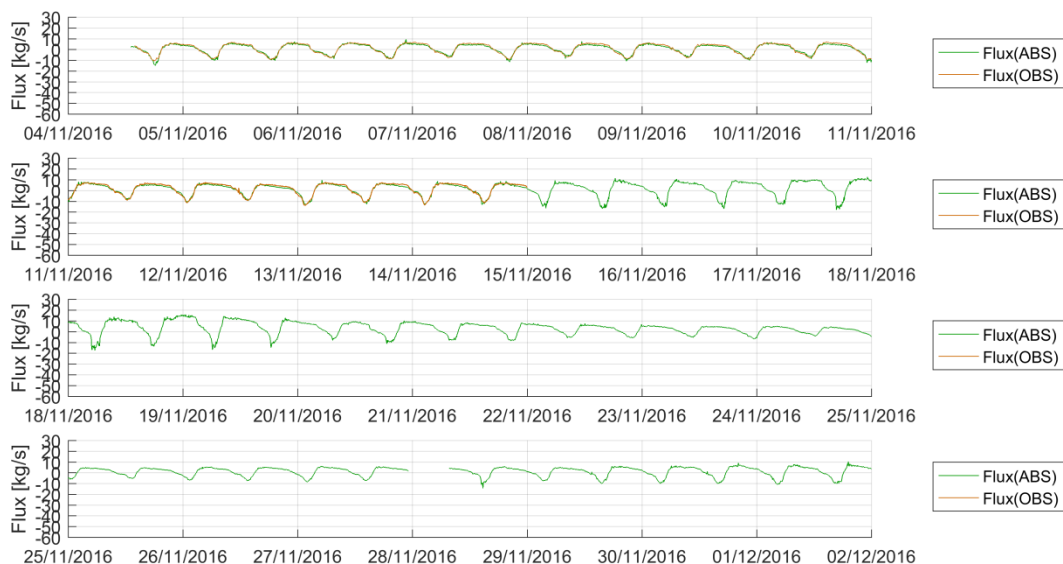
Figuur 68 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 10



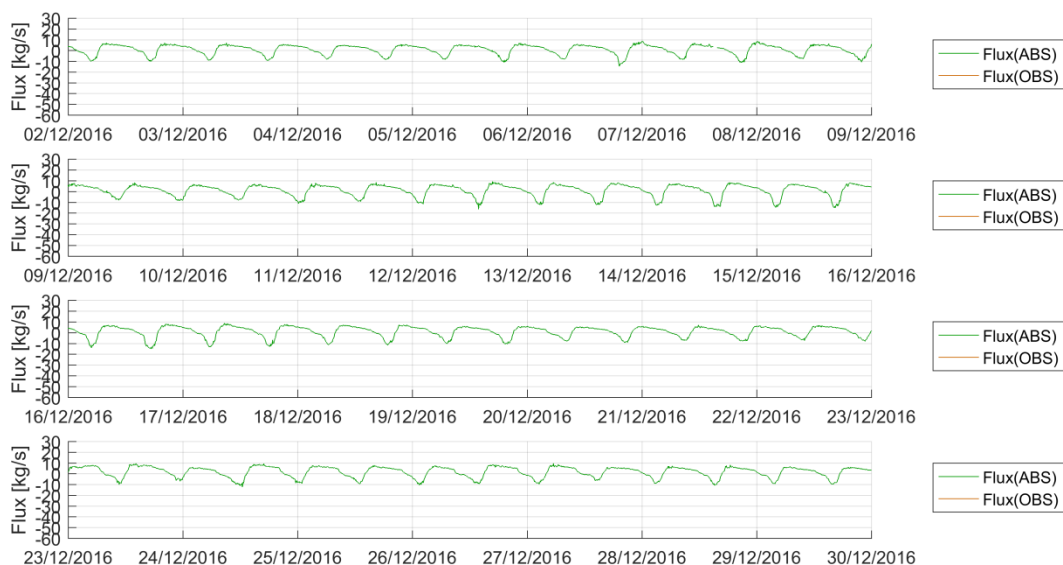
Figuur 69 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 11



Figuur 70 –Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 12



Figuur 71 – Tijdsreeks berekende instantane sedimentflux (o.b.v. ABS en OBS) te Duffel-sluis voor periode 13



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