

**Aanpassing, herkalibratie en
verificatie SOBEK 3 model van
de Rijn-Maasmonding**

Waterstand, afvoer en saliniteit



Aanpassing, herkalibratie en verificatie SOBEK 3 model van de Rijn-Maasmonding

Waterstand, afvoer en saliniteit

Frans Buschman

Titel

Aanpassing, herkalibratie en verificatie SOBEK 3 model van de Rijn-Maasmonding

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD	11202220-006	11202220-006-ZWS-0012	94

Trefwoorden

Hydrodynamica, 1D-modellering, RMM-gebied.

Samenvatting

Het ééndimensionale hydrodynamisch model voor de Rijn-Maasmonding (RMM) is aangepast, opnieuw gekalibreerd en geverifieerd. Daarbij is gebruik gemaakt van een nieuwe parametrisatie van zouttransport. De voornaamste aanpassing aan de schematisatie is dat het volume in de Voordelta bij de Haringvlietssluzen is verkleind. Op de waterstand is gekalibreerd voor verschillende perioden met verschillende condities door aanpassing van de zomerbedruwheid. Daarbij bleek dat verschillende waarden voor eb en vloed nodig waren. Voor eb is de (Manning) ruwheid in de meeste takken lager ($0,010-0,033 \text{ s/m}^{1/3}$) dan voor vloed ($0,016-0,065 \text{ s/m}^{1/3}$). Met deze ruwheden ligt de berekende waterstand in vergelijking met metingen binnen de vooraf opgestelde grenzen voor alle perioden en meetlocaties, behalve voor enkele stations in de Lek, Waal en de Maas dichtbij de modelrand. Daarnaast wordt de getijvariatie op locaties in het middengebied en langs de zuidrand met ongeveer 0,1 m overschat. Hoewel hierdoor geen nauwkeurigheidsgrenzen worden overschreden, is de verwachting dat hierdoor ook de getijvariatie in afvoer te groot is en zout te ver het model binnen dringt.

Voor de saliniteit is met behulp van de dispersieparameters gekalibreerd. In enkele takken was het nodig om de parameter voor stratificatiedispersie (f_4) lager in te stellen dan de waarde volgens de theorie. Hiervoor zijn een aantal mogelijke verklaringen gegeven. Het op zout gekalibreerde model is in staat zoutindringingsgebeurtenissen te modelleren, maar toont aanzienlijke verschillen in exacte saliniteits. De overschrijdingsduur van kritische waarden voor de saliniteit op basis van berekeningen wijkt geregeld meer dan 50% af dan deze duur op basis van metingen. In vergelijking met het voorgaande SOBEK-RE NDB model geven de statistieken voor de kalibratie- en verificatieperioden en de overschrijdingsduren aan dat het SOBEK 3 RMM model over het algemeen vergelijkbaar of iets beter presteert. Echter, er zijn ook perioden en meetlocaties waar het SOBEK 3 RMM model minder goed lijkt te presteren, zoals bij Zuidland (Bernisse). Voor nu worden de resultaten acceptabel geacht.

Het opnieuw gekalibreerde model is geschikt voor toepassing om operationeel waterstanden te berekenen. Op basis van een vergelijking met gemeten afvoeren bij splitsingen, is de reproductie van de afvoer geverifieerd. Gezien de beperkte hoeveelheid van deze metingen en de korte duur van een halve dag, kon niet aangegeven worden binnen welke marges het model de afvoerverdeling weergeeft. Voor een algemeen beeld van de afvoerverdeling en de verandering hierin ten gevolge van maatregelen kan het model gebruikt worden. Voor saliniteit kan het SOBEK 3 RMM model momenteel worden gebruikt om een globaal beeld van zoutverspreiding tijdens een zoutindringingsgebeurtenis te berekenen, maar het model is niet of beperkt geschikt voor uitspraken op basis van berekende exacte saliniteits en overschrijdingsduren.

Titel

Aanpassing, herkalibratie en verificatie SOBEK 3
model van de Rijn-Maasmonding

Opdrachtgever Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, LELYSTAD	Project 11202220-006	Kenmerk 11202220-006-ZWS-0012	Pagina's 94
--	--------------------------------	---	-----------------------

Referenties

KPP modelschematisaties-zoet 2017 (11200569) en 2018 (11202220-006)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
2.0	Dec. 2018	Asako Fujisaki	AF	Wouter Kranenburg	WKR	Gerard Blom	GB
1.1	Okt. 2018	Asako Fujisaki	AF	Wouter Kranenburg	WKR	Gerard Blom	GB
		Ymkje Huismans					
		Frans Buschman					
		Koen Berends					
		Remi van der Wijk					
1.0	Mei 2018	Asako Fujisaki		Theo van der Kaaij		Johan Boon	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond en aanleiding	1
1.2	Beoogd gebruik	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Leeswijzer	2
1.5	Korte systeemschets	2
1.5.1	Karakterisering takken	2
1.5.2	Forcering	3
1.5.3	Stuurknoppen	4
1.5.4	Veranderingen in het gebied en van buitenaf	4
1.6	Samenvatting verbetering zoutmodellering met SOBEK 3	5
1.7	Schematisaties	6
1.8	Software	7
1.9	Terminologie	7
1.10	Projectteam	8
2	Aanpak	9
2.1	Algemeen	9
2.2	Prioritering herkalibratie en nauwkeurigheidseisen	9
2.3	Kalibratieparameters en fysische grenzen	9
2.3.1	Waterstand	9
2.3.2	Saliniteit	10
2.4	Perioden	10
2.5	Vooraf opgestelde stappen	11
2.5.1	Ruwe gevoeligheidsanalyse voor dispersieparameters	12
2.5.2	Ruwe verificatie waterstand	12
2.5.3	Verificatie afvoer	12
2.5.4	Ruwe kalibratie op dispersieparameters voor zout	12
2.5.5	Kalibratie op ruwheid voor waterstand	13
2.5.6	Precieze kalibratie op dispersieparameters voor zout	13
2.5.7	Verificatie van waterstand en saliniteit	13
2.6	Gebruikte randvoorwaarden, model en metingen	13
2.6.1	Aangeleverde metingen	13
2.6.2	Vertaling naar dieptegemiddelde saliniteit	16
2.6.3	Zoutrandvoorwaarde bij de Maasmond	16
3	Aanpassing dwarsprofielen Voordelta Haringvliet	17
3.1	Inleiding	17
3.2	Werkwijze	18
3.3	WAQUA “WAQ2PROF berekening”	18
3.3.1	Berekening zonder Voordelta	18
3.3.2	Berekening met Voordelta	18
3.3.3	Randvoorwaarden	20
3.4	Sobekvakken	20
3.4.1	Nieuwe SOBEK-vakken voor de Voordelta	20
3.4.2	Vaklengtes en plaatsing van dwarsprofielen	21
3.4.3	Haringvlietsluizen	22
3.5	Vergelijking met eerdere SOBEK modellen	23

3.5.1	Verschil tussen de schematisaties	23
3.5.2	Verschil tussen de volumes	24
3.6	Puntsgewijze samenvatting	26
4	Overige modelaanpassingen	27
4.1	Introductie	27
4.2	Aanpassingen schematisatie	28
4.3	Weergave 2005 en 2011	30
4.4	Naamgeving schematisatie	30
5	Herkalibratie	31
5.1	Introductie	31
5.2	Saliniteit	31
5.2.1	Evaluatiecriteria	31
5.2.2	Kalibratieparameters f_4 en f_3	31
5.2.3	Resultaten noordrand	33
5.2.4	Resultaten middegebied en zuidrand	38
5.2.5	Resultaten Hollandsche IJssel en Lek	42
5.2.6	Statistieken	45
5.2.7	Overschrijdingsduren	49
5.2.8	Puntsgewijze samenvatting	52
5.3	Waterstand	52
5.3.1	Kalibratieparameters	52
5.3.2	Resultaten noordrand	58
5.3.3	Resultaten middegebied	59
5.3.4	Resultaten zuidrand	61
5.3.5	Resultaten Hollandsche IJssel en Lek	62
5.3.6	Waal en Maas	64
5.3.7	Statistieken	66
5.3.8	Puntsgewijze samenvatting	72
5.4	Discussie	72
5.4.1	Evaluatie berekende waterstand	72
5.4.2	Mogelijke verklaringen voor verschillen met gemeten saliniteit	73
5.4.3	Onderbouwing voor afwijkingen van theoretische waarden voor f_4 en f_3	74
5.4.4	Evaluatie overschrijdingsduren	75
5.4.5	Vergelijking met SOBEK-RE	76
6	Verificatie	77
6.1	Afvoer	77
6.2	Waterstand	79
6.3	Saliniteit	85
6.4	Puntsgewijze samenvatting	86
7	Conclusies, toepasbaarheid en aanbevelingen	87
7.1	Conclusies	87
7.2	Toepasbaarheid	88
7.3	Aanbevelingen	90
8	Literatuuroverzicht	93

Bijlagen

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding

De waterbeweging in de Rijn-Maasmonding wordt bepaald door de waterstand op zee, de afvoer uit de rivieren, het dichtheidsverschil tussen het zoute zeewater en zoete rivierwater, wind en keringen. Voor het beheer van het gebied heeft Rijkswaterstaat behoefte om de invloed van deze factoren op waterstand, afvoer en saliniteit te berekenen. Voor operationele toepassingen is het nauwkeurig berekenen van de waterstand van groot belang. De waterstand is afhankelijk van de diepte en de dichtheid, welke vooral door de saliniteit wordt bepaald. Hoewel de dichtheid op een locatie in de Rijn-Maasmonding normaal niet meer dan 1 tot 2% varieert en daarmee een beperkt effect heeft op de waterstand, heeft het voorspellen van de waterstand baat bij een goede reproductie van de saliniteit. Berekening van saliniteit zelf is voor verschillende toepassingen gewenst. Hoewel 3D-modellen in principe processen die belangrijk zijn voor zoutverspreiding beter weergeven dan 1D-modellen, kunnen processen die belangrijk zijn in estuaria worden geparametriseerd in 1D-modellen. Het voordeel van 1D-modellen is de korte rekentijd, waardoor ze geschikt zijn om lange perioden door te rekenen en studies uit te voeren naar het effect van ingrepen of klimaatverandering.

Verschillende van dergelijke studies zijn uitgevoerd met het SOBEK-RE model van de Rijn-Maasmonding, ook wel Noordelijk Delta Bekken (NDB) model genoemd. Inmiddels is de software SOBEK-RE vervangen door SOBEK 3. Bij het eerste model van de Rijn-Maasmonding in SOBEK 3 (Berends, 2014) waren de processen voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding nog niet goed geparametriseerd in SOBEK 3. In 2016 en 2017 is gewerkt aan verbetering van de software, zodat de parametrisering van zoutverspreiding is gebaseerd op fysische theorie (Daniels, 2016; Huismans et al., 2016, 2017). Daarnaast is de software aangepast zodat de parametrisatie voor zout per tak wordt berekend (eigen monding aanpak) en niet langer voor de zeemonding (Buschman, 2017).

De verbeterde software wat betreft zoutverspreiding en daarmee saliniteits in de Rijn-Maasmonding leidt tot veranderingen in afvoeren en waterstanden. Daardoor is de kalibratie op zomerbedruwheden (Berends, 2014; Fujisaki, 2016) niet meer actueel. Voor de huidige SOBEK 3 versie dient de kalibratie dus herzien te worden. Deze rapportage beschrijft deze herkalibratie en een verificatie op waterstand, afvoer en saliniteit.

1.2 Beoogd gebruik

Rijkswaterstaat beoogt het SOBEK 3 RMM model voor verschillende doelen te gebruiken. RWS-WNZ gebruikt hydrodynamische modellen ter ondersteuning van het beheer van haar gebied. Twee hoofdsystemen hiervoor zijn BOS-Stormvloedkering en RWsOS-RMM. Deze context stelt harde eisen aan de nauwkeurigheid van het model op het gebied van berekende waterstand. Daarnaast is beoogd dat het SOBEK 3 RMM model wordt opgenomen binnen het Landelijk Sobek Model (LSM). Met het LSM worden onder andere scenariostudies uitgevoerd om de effecten op zoutverspreiding door klimaatverandering te berekenen binnen het Nationaal Water Model (NWM). Ook is beoogd het SOBEK 3 RMM model op te nemen in de Maatgevende Hoog Water Processor (MHW-processor).

1.3 Doelstelling

Het doel van de herkalibratie is het opleveren van een SOBEK 3 model voor de Rijn-Maasmonding dat in staat is binnen de gestelde acceptatiecriteria waterstand, saliniteit en de afvoerverdeling te reproduceren. Deze criteria staan beschreven in sectie 2.2. Wanneer aan de criteria wordt voldaan, kan het SOBEK 3 RMM model gebruikt worden zoals beoogd en kan het SOBEK-RE NDB model worden vervangen door het SOBEK 3 RMM model.

1.4 Leeswijzer

Dit hoofdstuk gaat verder met een korte systeemschets van het gebied en een samenvatting van de verbeteringen in de zoutmodellering om dit rapport afzonderlijk leesbaar te maken. Vervolgens worden de schematisaties, software en het projectteam opgesomd. Ook wordt in dit hoofdstuk een definitie gegeven van enkele technische termen.

De aanpak staat beschreven in hoofdstuk 2, waarin de kalibratiestrategie staat beschreven om de door Rijkswaterstaat gestelde nauwkeurigheidseisen te halen. De perioden die zijn gehanteerd voor de kalibratie en voor de verificatie staan beschreven.

In hoofdstuk 3 is de grootste aanpassing aan de schematisatie beschreven. In de voordelta bij de Haringvlietsluizen zijn de profielen (de vorm van de dwarsdoorsnede per tak) over het algemeen nauwer gemaakt. Hoofdstuk 4 somt enkele andere kleinere aanpassingen op.

In hoofdstuk 5 staan resultaten van de herkalibratie voor waterstand en saliniteit beschreven. Deze resultaten zijn per deelgebied beschreven. In een discussie worden verklaringen gegeven voor keuzen afwijkend ten opzichte van het beschreven plan in hoofdstuk 2 en worden resultaten voor het gehele gebied geëvalueerd.

Hoofdstuk 6 beschrijft de verificatie voor waterstand, afvoerverdeling en saliniteit. Hierna volgen in het slothoofdstuk de algemene conclusies, de toepasbaarheid van het SOBEK 3 RMM model en aanbevelingen.

1.5 Korte systeemschets

1.5.1 Karakterisering takken

De Rijn-Maasmonding is een netwerk van takken onder invloed van getij, afvoer en wind. Enkele kenmerken van het gebied die relevant zijn voor een 1D-model van het gebied zijn aangegeven in Figuur 1.1 (Huisman et al., 2018). De afvoergedomineerde gebieden bestaan uit de rivieren de Waal en Maas en in mindere mate de Lek. Dit zijn typische riviergebieden, met een duidelijk onderscheid tussen zomerbed en winterbed. Daarnaast zijn er enkele rivieren die uitstromen op het Rijn-Maasmondinggebied maar die kunnen worden gezien als 'dode armen' door de geringe afvoer die ze meebrengen. De voornaamste van deze rivieren is de Hollandsche IJssel, waarvan de modelgrens bij Gouda ligt.



Figuur 1.1 Overzichtsk kaart Rijn-Maasmonding. De belangrijkste stuurknoppen van het hoofdwatersysteem zijn aangegeven met een kraantje. Met rode stippen zijn een drietal locaties aangegeven die belangrijk voor zoutverspreiding. In blauwschakeringen de saliniteit (hoe donkerder hoe zouter) uit een 3D modelberekening van het najaar 2011, waarbij zout via de noordrand de zuidrand kon bereiken (achterwaartse verzilting).

Het gedrag van de noordrand (Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek) wordt vooral bepaald door getij en rivierafvoer. Het gedrag van de zuidrand (Haringvliet en Hollandsch Diep) is minder dynamisch. Getij dringt hier met een vertraging ten opzichte van de noordrand binnen via het middengebied (Oude Maas, Spui, Dordtsche Kil en Noord). Door de vertraging en het relatief grote bergend oppervlak van het Haringvliet kunnen stroomsnelheden in het middengebied groot zijn. Daarnaast zijn voor het middengebied de verschillen in getijgemiddelde waterstand tussen de noordrand en de zuidrand belangrijk. Een dergelijk verschil kan bijvoorbeeld optreden bij een windopzet op zee, waardoor de waterstand in de Nieuwe Waterweg eerder hoog wordt dan de waterstand in het Haringvliet.

1.5.2 Forcering

De waterstanden in het gebied worden bepaald door getij, afvoer en windopzet. De afvoer komt voornamelijk binnen vanuit de Lek, Maas en Waal. De andere zijtakken – Amertak, Donge en Hollandsche IJssel – spelen voornamelijk een rol in berging. Het getij is dubbeldaags, met M2 als grootste component. Bij Hoek van Holland heeft de dubbeldaagse variatie van een getij een amplitude van gemiddeld 0,8 m. Bij springtij is deze amplitude ongeveer 0,2 m groter en bij doortijd 0,2 m kleiner. Onder extreme omstandigheden kunnen de waterstanden gedomineerd worden door zowel rivierafvoeren (bovenstreams) als windopzet (benedenstreams).

Zoutindringing heeft een effect op waterstanden doordat het leidt tot dichtheidsverschillen. Onder normale omstandigheden dringt zout op de noordrand door tot aan Rotterdam. De saliniteit bij de Maasmonding is ongeveer 31 psu, maar kan enkele psu's variëren, afhankelijk van de grootte van de rivierafvoer. Deze concentratie loopt relatief snel terug dieper het systeem in. Doorgaans is de zuidelijke rand in de huidige situatie met gesloten Haringvlietsluizen tijdens vloed zoet, maar bij stormopzet op zee kan zogenaamde achterwaartse verzilting plaatsvinden, waarbij via het Spui of de Dordtsche Kil zout de zuidrand bereikt. In het middengebied neemt de saliniteit ook snel af vanaf de monding van de Oude Maas. Bij de Beerenplaat worden pieken in saliniteit tot enkele psu gemeten.

Ook temperatuur heeft een effect op de dichtheid en dus waterstanden in het systeem. De invloed van temperatuur op de dichtheid is duidelijk kleiner dan de invloed van zout op de dichtheid van water. Om deze reden wordt in het SOBEK 3 RMM model geen rekening gehouden met temperatuurverschillen.

1.5.3 Stuurknoppen

In het hoofdwatersysteem van de Rijn-Maasmonding bevinden zich een aantal stuurknoppen waarmee de afvoer – en daarmee de saliniteit – beïnvloed kan worden. De drie grootste stuurknoppen zijn weergegeven in Figuur 1.1. De grootste stuurknop in het gebied zijn de Haringvlietsluizen. Hiermee wordt bepaald hoeveel water via het Haringvliet naar zee wordt afgevoerd en hoeveel via de Nieuwe Waterweg. Tijdens lage rivierafvoer ($Q_{Lobith} < 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) staan de sluisen dicht, om zoveel mogelijk water via de Nieuwe Waterweg af te voeren en de zoutindringing te beperken. Daarnaast kan met de sluisen het peil op het Haringvliet-Hollandsch Diep worden gestuurd ten behoeve van de scheepvaart.

Via stuurknop de Volkeraksluizen wordt water uit het Hollandsch Diep ingenomen om het Volkerak-Zoommeer door te spoelen ten behoeve van de waterkwaliteit. De derde stuurknop is de stuw bij Hagestein, waar de afvoerverdeling tussen de Lek en de Waal wordt gereguleerd. Wanneer de stuw meer water doorlaat dan bovenstrooms wordt aangevoerd via de stuw bij Amerongen, zal dit water worden aangevuld met water uit de Waal, welke via het Betuwepand en de Bernhardsluizen in verbinding staat met de Lek.

1.5.4 Veranderingen in het gebied en van buitenaf

De grootste stuurknop gaat veranderen vanaf najaar 2018. Vanaf het najaar zullen de Haringvlietsluizen stapsgewijs op een Kier gezet worden. Dit betekent dat zout water in beperkte mate kan binnendringen via de zuidrand, terwijl dit voorheen alleen via de noordrand (Maasmond) binnen drong.

Een grote verandering door menselijk ingrijpen is het aanleggen van verschillende Ruimte voor de Rivier maatregelen, welke recent zijn voltooid. Het gaat onder andere om de Ruimte voor de Rivier maatregel de Noordwaard. Een verandering die momenteel plaats vindt is dat de Nieuwe Waterweg en Botlek 1,5 m worden verdiept over een lengte van 25 km. Baggerwerkzaamheden hiervoor zijn in maart 2018 gestart. Deze laatste verandering is nog niet opgenomen in de schematisatie.

Daarnaast verandert de forcering door klimaatverandering. De verwachting is dat vooral de zeespiegelstijging een duidelijk effect zal hebben op de waterstand in het gebied.

1.6 Samenvatting verbetering zoutmodellering met SOBEK 3

Zouttransport in een estuarium wordt bepaald door verschillende processen. In 1D-modellen wordt dit bepaald door advectief transport (met de stroming mee) en door een dispersief transport, waarmee de verschillende processen van menging zo goed mogelijk gevangen worden. Bepalend bij het dispersieve transport is de dispersiecoëfficiënt (D). Recentelijk is de SOBEK 3 software aangepast om het dispersieve transport beter weer te geven (Daniels, 2016; Huismans et al., 2016, 2017 en Buschman, 2017). In SOBEK 3 is een generieke vergelijking ingebouwd, die het mogelijk maakt om diverse dispersieformuleringen toe te passen, zoals een aangepaste vorm van de formulering van Thatcher Harleman (1972) die in SOBEK-RE wordt gebruikt en de formuleringen van Kuijper en van Rijn (2011).

Deze generieke vergelijking voor de dispersiecoëfficiënt bestaat uit drie termen, waarvan de eerste een constante is (f_1). In estuaria is in veel gevallen de f_4 -term het belangrijkste. Omdat deze dispersie vooral een parametrisatie is voor stratificatie, wordt de f_4 -term in dit rapport stratificatiedispersie genoemd. Eerder werd hiervoor ook wel getijd dispersie gebruikt. De basis van deze term wordt gevormd door het estuariene Richardson getal, welke de mate van stratificatie voorspelt. Daarnaast is er ook een bijdrage aan dispersie door snelheidsverschillen in de dwarsdoorsnede (Taylor dispersie), welke niet afhankelijk is van dichtheidsverschillen langs de tak. Deze Taylor dispersie wordt in SOBEK 3 de f_3 -term genoemd en is in gelaagde systemen of systemen met een sterke zoutgradiënt langs de tak klein ten opzichte van de f_4 -term. Tot slot is er ook een f_1 term opgenomen, welke het mogelijk maakt om met een statische achtergrond dispersie te werken. De volledige vergelijking voor de dispersiecoëfficiënt luidt:

$$D = f_1 + f_3 |u| d \frac{\sqrt{g}}{C} + f_4 u_0^{c_3} E_0^{c_4} N_r^{c_5} \left(\frac{C}{\sqrt{g}} \right)^{c_6} \left(\frac{d_0}{a} \right)^{c_7} \left(\frac{d_0}{E_0} \right)^{c_8} \left(1 + c_9 \left(\frac{B_0}{E_0} \right)^2 \right) \left(\frac{\langle s \rangle}{\langle s_0 \rangle} \right)^{c_{10}} \left| \left\langle \frac{\partial s}{\partial x} \right\rangle \right|^{c_{11}} \quad (1.1)$$

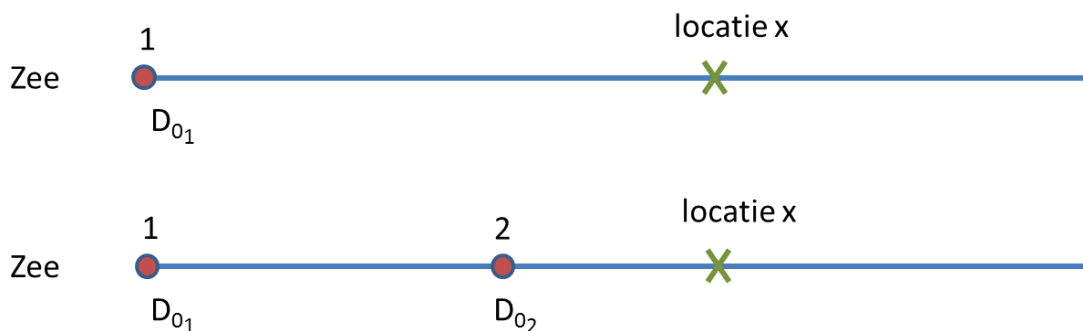
Met daarin

f_1	- Achtergrond dispersie [m^2/s]
f_3	- parameter voor Taylor dispersie [-]
f_4	- parameter voor stratificatiedispersie o.a. door stratificatie [-]
u	- stroomsnelheid [m/s]
d	- diepte [m]
C	- Chézy coefficient [$m^{1/2}/s$]
u_0	- maximale absolute stroomsnelheid tijdens vloed [$\frac{m}{s}$]
B_0	- breedte in de monding [m]
E_0	- getijweglengte in de monding [m]
s	- saliniteit op locatie x [kg/m^3]
s_0	- saliniteit in de monding [kg/m^3]
$\langle \rangle$	- middeling over twee getijperioden
$ $	- absolute waarde
c_x	- parameters die het mogelijk maken bepaalde termen aan en uit te zetten en daarmee diverse formuleringen te verkrijgen.

In Daniels (2016) en Huismans et al. (2016) zijn de verschillende dispersieformuleringen gevalideerd en is geconcludeerd dat de formulering van Kuijper en van Rijn (2011) het beste de gemeten zoutindringingslengte beschrijft bij systematische gootproeven met constante breedte (prismatisch). Invullen van $f_1 = 0$, $f_3 = 0$, $c_3 = 1$, $c_4 = 1$, $c_5 = 0,5$, $c_6 = 1$, $c_7 = 0$, $c_8 = 1$, $c_9 = 0$, $c_{10} = 0,5$ en $c_{11} = 0$ levert de geïmplementeerde Kuijper en van Rijn formulering (alleen de f_4 -term) voor prismatische kanalen:

$$D = f_4 u_0 N_r^{1/2} d_0 \left(\frac{C}{g^{1/2}} \right) \left(\frac{\langle s \rangle}{\langle s_0 \rangle} \right)^{1/2} = f_4 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_w} \right)^{1/2} d_0^{3/2} \left(\frac{Q_f T_p}{P_e} \right)^{1/2} C \left(\frac{\langle s \rangle}{\langle s_0 \rangle} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

Analytisch is in Kuijper en van Rijn (2011) aangetoond dat het niet uitmaakt waar de monding wordt gekozen. In Huismans et al. (2016) is voor een numeriek model het effect van de locatie van de monding voor de waarde van de dispersiecoëfficiënt op punt X geanalyseerd (Figuur 1.2). Voor een recht estuarium zonder variaties in de ruwheid, breedte en diepte, zijn de demping van het getij en van het vloedvolume vrijwel hetzelfde voor ieder van de twee modellen. Bij verificatietesten is nagegaan dat de verschillen door het hanteren van de locatie inderdaad klein zijn (Buschman, 2017). Deze testen zijn alleen uitgevoerd voor eenvoudige cases en niet voor een gebied met vertakkingen als de Rijn-Maasmonding. De reden hiervoor was dat tijd wordt bespaard door de testen niet te doen, als de herkalibratie goed uitpakt.



Figuur 1.2 Illustratie onafhankelijkheid keuze van de locatie van de monding op een tak met constante geometrie (diepte en breedte).

Hoewel de formulering een fysische basis heeft, blijft het een parametrisatie voor zoutverspreiding dat een 3D proces is. Een goed opgezet 3D model zal beter in staat zijn de mengende en stratificerende processen te weer te geven en daardoor zoutverspreiding beter beschrijven.

1.7 Schematisaties

De eerste SOBEK 3 schematisatie voor het Rijn-Maasmonding gebied is sobek-rmm-j98_5-v1, welke uitvoerig is beschreven in Berends (2015). Dit model is gebaseerd op de Baseline schematisatie van 1998. Fujisaki (2015) heeft dit model geactualiseerd op basis van een Baseline schematisatie van 2015 en op basis van een geactualiseerd WAQUA model. Op basis van het WAQUA model zijn ruwheid en profielen geactualiseerd. Ook is toen het modeldomein uitgebreid met onder andere de Noordwaard (Ruimte voor de Rivier). De resulterende modelschematisatie heeft de naam sobek-rmm-j15_5-v1.

Deze schematisatie is uitgebreid met het Volkerak-Zoommeer (sobek-vo-zo-j12_5-v1) tot de schematisatie sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 (Fujisaki, 2016). Het Volkerak Zoommeer functioneert in het model voornamelijk als wateropslag, omdat de Volkerak-spuisluizen als default gesloten zijn. Bij sluisen zoals de Bathse spuisluis is geen uitwisseling van (zout) water verondersteld in dit model. De schematisatie die het resultaat is van de herkalibratie beschreven in dit rapport is sobek-rmm-vozo-j15_5-v2.

Een overzicht van verschillende SOBEK 3 en SOBEK-RE schematisaties is gegeven in Tabel 1.1. Voor de schematisatie na aanpassing en na herkalibratie, zoals beschreven in dit rapport, wordt de korte naam "SOBEK 3 RMM model" gebruikt. De andere twee SOBEK 3 schematisaties worden volledig uitgeschreven in dit rapport om verwarring van de SOBEK 3 schematisaties te voorkomen. Het enige SOBEK-RE model dat is gebruikt is sobekre-ndb-1_1_0, welke in het vervolg wordt aangeduid als "SOBEK-RE NDB model".

Tabel 1.1 Overzicht SOBEK schematisaties

Naam schematisatie	Korte naam	Toelichting
sobek-rmm-vozo-j15_5-v2	SOBEK 3 RMM model	SOBEK 3 schematisatie na de herkalibratie, behorend bij voorliggende rapportage
sobek-rmm-vozo-j15_5-v1	-	SOBEK 3 schematisatie beschreven in Fujisaki (2016)
sobek-rmm-j98_5	-	De eerste schematisatie in SOBEK 3 voor de situatie van 1998 (Berends, 2015)
sobekre-ndb-1_1_0	SOBEK-RE NDB model	SOBEK-RE schematisatie van het Noordelijk Delta Bekken ook gekalibreerd op zoutbeweging (Kraaijeveld, 2003); Alleen dit SOBEK-RE model is gebruikt om mee te vergelijken.

1.8 Software

De volgende softwareversies zijn gebruikt:

- SOBEK 3.7.13
- Baseline 5.3.1.
- SIMONA 2015
- WAQ2PROF 4.42

Gedurende de looptijd van het project zijn verschillende versies van SOBEK 3 gebruikt, waarin de ontwikkelde en gevalideerde functionaliteit voor zout zijn opgenomen. De uiteindelijke berekeningen, waarvan resultaten worden getoond, zijn uitgevoerd met de release van augustus 2018: SOBEK 3.7.13.

1.9 Terminologie

In dit rapport worden enkele termen gebruikt die mogelijk niet voor iedereen dezelfde betekenis hebben. Dit komt mede door de verschillende disciplines die elkaar vinden in onderzoeken rondom de Rijn-Maasmonding. Daarom wordt in deze paragraaf een overzicht gegeven van de in dit rapport gebruikte termen. Gebruikte termen die een definitie behoeven zijn:

Dispersiecoëfficiënt met eenheid (m^2/s) die gebruikt wordt om het dispersieve zouttransport te bepalen in de advectie-diffusie vergelijking in SOBEK. Vergelijking 1.1 beschrijft de drie termen die kunnen bijdragen.

Gemiddeld verschil, ook wel **bias**. Het gemiddeld verschil is het verschil per tijdstap gemiddeld over de duur van de analyse. Een gemiddeld verschil van 0 kan dus ook betekenen dat de resultaten van de simulatie en observatie precies uit worden gemiddeld over de duur van de analyse.

Standaarddeviatie, een parameter die de variabiliteit van het verschil tussen de observatie en simulatie kwantificeert. Een hoge standaarddeviatie betekent dat de gegevens meer verspreid zijn ten opzichte van de metingen.

Percentage BIAS (Pct_{Bias}), een parameter die het gemiddelde verschil uitdrukt in een percentage ten opzichte van de maximum en minimum afvoer. Dit is om de afwijking in afvoer kwalitatief te beoordelen onafhankelijk van de grootte van de afvoer.

Root mean square error (RMSE), een parameter die de standaardafwijking van het absolute verschil tussen berekende en gemeten waarden geeft. Een hoge RMSE duidt op meer verschil met de metingen gemiddeld over de duur van de analyse.

Dmax, het verschil in maxima tussen de observatie en simulatie gedurende 1 getijdslag. In zowel de observatie als simulatie komt het maximum in afvoer overeen met het eb maximum.

Dmin, het verschil in minima tussen de observatie en simulatie. In zowel de observatie als simulatie komt het minimum in afvoer overeen met het vloed maximum.

Afvoer of debiet, de hoeveelheid water in kubieke meters per seconde die over de gehele breedte van de rivier wordt getransporteerd. Een positieve afvoer betekent dat er netto water naar de zee gaat en een negatieve afvoer dat er landinwaarts water wordt getransporteerd.

Schematisatie, een gebiedsbeschrijving die onderdeel kan zijn van een model.

Model, een versimpelde weergave van de werkelijkheid.

Software, programma voor op de computer

SOBEK 3, software bestaande uit verschillende modules (o.a. 1D hydrodynamisch model)

1.10 Projectteam

De leden van het projectteam en hun belangrijkste staan beschreven in Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Projectleden en rol

Naam	rol
Remi van der Wijk	Deelprojectleider Hydraulica Schematisaties Rijn-Maasmonding
Asako Fujisaki	Modelleur gehele gebied
Ymkje Huisman	Adviseur vanuit zout
Frans Buschman	Schrijver van rapportage
Koen Berends	Modelleur- aanpassen Voordelta
Theo van der Kaaij	Reviewer
Wouter Kranenburg	Reviewer
Jurjen de Jong	Vraagbaak voor technieken en methoden
Aukje Spruyt	Projectleider KPP Hydraulica Schematisaties Zoet

2 Aanpak

2.1 Algemeen

Het opzetten van een numeriek (hydraulisch) model bestaat in principe uit drie verschillende stappen:

- 1 Opzetten van het model
- 2 Kalibreren van het model
- 3 Verifiëren van het model

Kalibratie bestaat uit het afregelen van onzekere parameters zodat modelresultaten overeenkomen met metingen. Kalibratie vindt doorgaans plaats onder representatieve omstandigheden. De mate van overeenkomst tussen model en observatie wordt gegeven door kentallen, zoals de bias, RMSE, de standaardafwijking (std) of het gemiddelde absolute verschil (Berends, 2014). Door kalibratie van hydraulische ruwheid wordt waterstand zo goed mogelijk weergegeven voor de gehanteerde periode. Door kalibratie van zoutparameters wordt de saliniteit voor een periode zo goed mogelijk weer gegeven. Omdat de saliniteit de dichtheid beïnvloedt, heeft de kalibratie van zoutparameters ook effect op de waterstand. Keuzes moeten worden gemaakt in de volgorde van de kalibratie.

Tijdens verificatie worden de gekalibreerde parameters gebruikt voor het doorrekenen van een andere periode. Een succesvolle verificatie geeft vertrouwen in de mate waarin de gekalibreerde parameters ook goede resultaten geven voor andere periodes.

2.2 Prioritering herkalibratie en nauwkeurigheidseisen

Op verzoek van Deltares hebben Rijkswaterstaat West-Nederland Zuid (RWS-WNZ) en Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL) een prioritering gegeven voor de herkalibratie (de Goederen, 2017). Op basis van deze memo met als uitgangspunt de schematisatie sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 volgt de volgende prioritering inclusief argumentatie:

- 1 Waterstandsreproductie;
De bias van de waterstand moet zo dicht mogelijk bij 0 centimeter zijn maar ten minste kleiner dan 5 centimeter. De RMSE voor alle LMW-peilmeetstations dient kleiner te zijn dan 7 centimeter. Hierbij moeten de stations Rotterdam, Dordrecht en Moerdijk zeker aan deze waarden voldoen.
- 2 Zoutverdeling/Zoutindringing;
De zoutverdeling moet in hoofdlijnen overeen komen met de observaties van de LMW-zoutmeetstations. Met name de ruimtelijke patronen van verzilting in combinatie met duur en fasering moeten goed worden gerepresenteerd.
- 3 Afvoerverdeling;
Het is wenselijk dat de afvoerverdeling overeenkomt met de beschikbare ADCP-metingen. Met het oog op de nauwkeurigheid van de beschikbare afvoeren op basis van ADCP-metingen is de geaccepteerde marge in getijvolume ongeveer 20% en 10-20% in het gemiddeld verschil.

2.3 Kalibratieparameters en fysische grenzen

2.3.1 Waterstand

Voor de kalibratie op waterstand en afvoer wordt de hydraulische ruwheid gebruikt. In het SOBEK 3 RMM model wordt voor de zomerbedruwheid de Manning formulering gebruikt. Per tak kan de hoogte van de Manning waarde worden ingesteld.

Alleen in de bovenstroomse takken is de ruwheid afvoerafhankelijk. Benedenstrooms waar mogelijk variatie in stroomsnelheid optreedt door getij, wordt eb-vloed ruwheid toegepast.

2.3.2 Saliniteit

Voor kalibratie op de saliniteit zijn drie parameters beschikbaar die de dispersiecoëfficiënt bepalen:

- 1 f1 (statische achtergronddispersie),
- 2 f3 (Taylor dispersie) en
- 3 f4 (stratificatiedispersie).

Voor f3 en f4 zijn theoretische waarden bepaald van respectievelijk 25 en 6 (Kuijper en van Rijn (2011)). Deze waarden zijn het startpunt geweest. Specifiek is de dispersiecoëfficiënt in de Hollandsche IJssel en Lek vergeleken met waarden bepaald uit metingen. Een goede voorspelling in deze takken is van belang voor verschillende verziltingsvragen. Bovendien is voor deze takken op basis van metingen de dispersiecoëfficiënt bepaald, waarmee vergeleken kan worden.

2.4 Perioden

Om te weten of het model goed presteert ten aanzien van waterstand en saliniteit, is het van belang dat uiteenlopende condities worden getest. Hoekpunten hierbij zijn hoge en lage rivierafvoer en weinig en veel windopzet. Voor de waterstandsreproductie ligt daarbij de nadruk op het reproduceren van de hoge waterstanden (hoge rivierafvoer en windopzet) en voor de saliniteit bij het reproduceren van verziltingsgebeurtenissen (lage rivierafvoer en windopzet). Voor de kalibratie zijn daarom in samenspraak met Rijkswaterstaat diverse periodes uit 2005 en 2011 gebruikt.

Voor 2005 en 2011 zijn er extra afvoer- en zoutmetingen beschikbaar die gebruikt kunnen worden. Omdat zout alleen diep het gebied binnendringt bij lage afvoer of een hoge windopzet op zee, is voor zout op andere perioden in 2005 en 2011 gekalibreerd dan voor waterstand en afvoer. De vijf perioden voor zout inclusief de zoutconditie zijn aangegeven in de laatste kolom van Tabel 2.1. Voor waterstand is aanvullend op de perioden voor zout ook de periode 25 nov 2011 – 7 dec 2011 gebruikt voor de herkalibratie, maar niet de perioden in 2005 (Tabel 2.1).

Voor de verificatie is gebruik gemaakt van de perioden in 2008, 2011, 2012 en 2013 die groen zijn aangegeven in Tabel 2.1. Daarnaast is voor zout ook de periode 25 nov 2011 – 23 jun 2011 gebruikt voor verificatie (terwijl deze periode voor waterstanden wordt gebruikt voor kalibratie). Tijdens de periode van 19 apr 11 – 23 jun 11 waren ook afvoeren op basis van ADCP metingen beschikbaar, waardoor voor deze periode de afvoer geverifieerd kon worden.

Tabel 2.1 Overzicht kalibratie en verificatie periodes, met kalibratie in blauw en verificatie in groen.

Naam	Periode	Afvoer	Wind	Afvoer	Water-standen	Zout
Okt 2005	10 okt 2005 – 24 nov 2005	Laag	Geen opzet			Verziltning noordrand + kalibratie Lek
Dec 2005	24 nov 2005 – 31 dec 2005	Laag	Windopzet			Verziltning noord- en zuidrand + nalevering + kalibratie Lek
Maa 2008	1 maart 2008 – 24 maart 2008	Stijgend naar hoog	3 meter storm			Beperkte verziltning en ontziltning noord- en zuidrand
Jan 2011	7 jan 2011 – 20 jan 2011	Hoog				Ontziltning noordrand
Voorjaar 2011	19 april 2011 – 23 juni 2011	Laag	Geen opzet			Verziltning noord- en zuidrand
Nov 2011	1 nov 2011 – 23 nov 2011	Laag	Geen opzet			Verziltning noordrand
Nov_Dec 2011	25 nov 2011 – 7 dec 2011	Laag	Windopzet			Verziltning noord- en zuidrand + nalevering
Dec 2011	7 dec 2011 – 25 dec 2011	Stijgend naar hoog	Windopzet			Ontziltning noord en zuidrand
Jan 2013	18 dec 2012 – 14 jan 2013	Hoog	Geen opzet			Geen verziltning
Dec 2013	4 dec 2013 – 31 dec 2013	Gemiddeld	3 meter storm			Verziltning zuidrand + nalevering

2.5 Vooraf opgestelde stappen

Omdat de waterstand, de afvoerverdeling en de saliniteit elkaar beïnvloeden, is de volgorde waarin gekalibreerd wordt niet evident. Op basis van de prioritering zoals beschreven in paragraaf 2.2 zijn de volgende stappen voor de herkalibratie onderscheiden:

- 1 Ruwe gevoeligheidsanalyse voor dispersieparameters
- 2 Ruwe verificatie waterstand
- 3 Verificatie afvoer
- 4 Ruwe kalibratie op dispersieparameters voor zout
- 5 Kalibratie op ruwheid voor waterstand
- 6 Precieze kalibratie op dispersieparameters voor zout
- 7 Verificatie van waterstand en saliniteit

De resultaten op basis van stappen voldeden niet altijd aan de verwachting. Een voorbeeld is dat voor de ruwe kalibratie op dispersieparameters voor zout (stap 4) een grotere aanpassing van de parameters nodig was dan verwacht. Dit was reden om de ruwe kalibratie te herhalen na kalibratie van de (eb-vloed)ruwheid voor waterstand (stap 5). De stappen zijn dus niet altijd sequentieel doorlopen. Omdat de genoemde stappen in elk geval zijn uitgevoerd, worden ze kort toegelicht.

2.5.1 Ruwe gevoeligheidsanalyse voor dispersieparameters

Een hogere saliniteit levert een hogere dichtheid. Een hogere dichtheid op een plaats, geeft in principe een lagere waterstand. Met andere woorden, de saliniteit beïnvloedt de waterstand. Omgekeerd zal een verandering in verhang ook tot een andere saliniteit kunnen leiden. Bovendien wordt de hydraulische ruwheid van de bodem, de kalibratieparameter voor waterstand, ook gebruikt als variabele in de bepaling van de dispersiecoëfficiënt voor zout (vergelijking 1.1 en 1.2). Om deze redenen is als eerste stap een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het effect van de dispersieparameters, welke leidend zijn voor de dispersiecoëfficiënt. Hierbij zijn de dispersieparameters systematisch gevarieerd binnen de grenzen van fysisch realistische waarden om het effect op saliniteit en waterstand te bepalen.

2.5.2 Ruwe verificatie waterstand

De berekende waterstand voor de simulaties uitgevoerd voor de gevoeligheidsanalyse voor zout worden vergeleken met gemeten waterstanden. Op basis van deze vergelijking is vroeg in het proces duidelijk geworden wat het effect is van de zoutparameters op de waterstand.

2.5.3 Verificatie afvoer

De afvoerverdeling is bepalend voor de zoutverdeling en zoutindringing. Om deze reden is eerst de afvoer geverifieerd, voordat voor zout en voor waterstand is gekalibreerd. De aanname daarbij is dat er geen kalibratie nodig is om de afvoerverdeling te verbeteren. Als observaties zijn metingen tussen 13-05-2011 en 31-05-2011 beschikbaar (lage afvoer) met ieder een duur van ongeveer 13 uur. Deze duur is te kort om de getijgemiddelde afvoer te bepalen.

De metingen zijn ADCP profielen op verschillende splitsingspunten in de Rijn-Maasmonding. Op basis van deze stroomsnelheden is afvoer bepaald. Eerder heeft er al een afvoer verificatie plaatsgevonden met behulp van deze observaties (van der Wijk & Fujisaki, 2016). In dat onderzoek is gesteld dat de afvoerverdeling redelijk overeen komt met de metingen. Na de herkalibratie mogen de resultaten van het model in ieder geval niet slechter zijn dan de resultaten van de oudere versie van het model.

2.5.4 Ruwe kalibratie op dispersieparameters voor zout

Voor de kalibratie voor zout zijn twee aspecten van belang: de zeerand en de dispersiecoëfficiënt. De gekozen waarden op de zeerand bepalen hoeveel zout het systeem in kan stromen en is dus bepalend voor de saliniteits in de hele Rijn-Maasmonding. De randvoorwaarde op de zeerand bestaat daarbij uit een saliniteit en een 'Thatcher Harleman Timelag' die de variatie van de saliniteit tijdens vloed modelleert.

Voor de dispersieformulering is de formulering van Kuijper-van Rijn voor prismatische kanalen gebruikt (vergelijkingen 1.1 en 1.2). Er zijn drie parameters waarop binnen fysische grenzen gekalibreerd kan worden, zie paragraaf **Error! Reference source not found.** De modelresultaten zijn vergeleken met metingen op basis van de RMSE (psu) en visueel voor de vijf kalibratieperioden voor zout (blauw in Tabel 2.1). De RMSE dient in ieder geval lager te zijn dan 10 psu per station per periode, want anders presteert het model slechter dan voor de herkalibratie. De kalibratie is iteratief uitgevoerd. De dispersieparameters hadden eerst de waarden op basis van de theorie. Wanneer de saliniteit voor de kalibratieperioden niet goed werd berekend is de waarde voor een dispersieparameter per tak aangepast voor een volgende simulatie. Bij een aanpassing van een dispersieparameter in een tak is rekening gehouden met het effect hiervan op de saliniteit bovenstrooms van die tak.

Voor de vergelijking met metingen, is rekening gehouden met de verticale positie van de zoutmetingen in de waterkolom. Als voorbeeld leidt voor de Maasmond een ondiepe meting tot een onderschatting van de dieptegemiddelde saliniteit en een overschatting van de variatie met het getij. Ten opzichte van deze meting zou SOBEK dus de saliniteit moeten overschatten en de variatie moeten onderschatten. De uiteindelijke acceptatie op basis van de criteria (sectie 2.2) voor representatie van de zoutresultaten is gebeurd in samenspraak met Rijkswaterstaat.

2.5.5 Kalibratie op ruwheid voor waterstand

De waterstand moet zo goed mogelijk worden gerepresenteerd door het SOBEK 3 RMM model. Zoals gesteld in sectie 2.2 moet de RMSE gemiddeld over de kalibratieperioden per LMW-peilmeetstation lager zijn dan 7 centimeter. De bias moet lager zijn dan 5 centimeter voor dezelfde stations voor de vier gedefinieerde perioden met hoge en lage rivierafvoer, en met en zonder windopzet (blauw in Tabel 2.1). Voor de acceptatie moet in elk geval de waterstand bij Rotterdam, Dordrecht en Moerdijk goed worden gereproduceerd.

In het geval dat de waterstanden niet voldeden aan het acceptatiecriterium, is de zomerbedruwheid per tak aangepast. Net als voor de dispersieparameter, is de zomerbedruwheid iteratief aangepast om een zo goed mogelijke reproductie van waterstand te krijgen. Daarnaast is het nodig gebleken afvoerafhankelijke ruwheid en eb- en vloedruwheden te introduceren.

2.5.6 Precieze kalibratie op dispersieparameters voor zout

Tijdens de fijne kalibratie van zout zijn de waarden voor f4 iteratief nader bijgesteld per tak in het model. Ook is nagegaan of f3 overal op de defaultwaarde moet blijven staan. Ieder van de vijf kalibratieperioden voor zout wordt gebruikt (blauw in Tabel 2.1).

2.5.7 Verificatie van waterstand en saliniteit

Na de herkalibratie zijn de oude en nieuwe resultaten van SOBEK 3 getoond om de verbetering in de modelresultaten weer te geven voor de verificatieperioden (groen in Tabel 2.1). Aanvullend zijn ook de resultaten van de jaarsom van het SOBEK-RE NDB model getoond, waar beschikbaar. De nieuwe resultaten zijn ook hiermee vergeleken. Deze vergelijking met het SOBEK-RE NDB model en v1 van het SOBEK 3 RMM model zijn een uitwerking van de gestelde nauwkeurigheidseisen in sectie 2.2. Als statistische kentallen wordt gebruik gemaakt van de bias en RMSE over iedere gehele verificatieperiode.

2.6 Gebruikte randvoorwaarden, model en metingen

2.6.1 Aangeleverde metingen

Voor de gekozen periodes zijn de volgende randvoorwaarden aangeleverd:

- Afvoergegevens bij:
 - Lith beneden;
 - Tiel;
 - Hagestein beneden.
- Waterstanden voor de volgende locaties:
 - HARVT10 (Haringvliet);
 - Maasmond.

- Afvoergegevens van de volgende laterale instromingen:
 - Drongelens Kanaal;
 - (Gekanaliseerde) Dieze;
 - Hollandsche IJssel (Gouda);
 - Volkeraksluizen;
- Windgegevens van Hoek van Holland;
- Saliniteits voor alle lateralen, afvoerranden en waterstandsranden;
- Schuifstanden van:
 - Maeslantkering;
 - Hollandse IJsselkering;
 - Hartelkering;
 - Haringvlietsluizen (idealiter in combinatie met afvoer door zoutriolen en sluizen).

Daarnaast zijn divermetingen aangeleverd voor Lekkerkerk (divermetingen voor Kier 2004-2010) en voor diverse locaties langs de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas voor 2011. Deze metingen zijn buiten beschouwing gelaten in verband met de beschikbare tijd.

Voor de kalibratie of verificatie voor de verschillende periodes zijn de volgende meetgegevens aangeleverd:

- Waterstand van de LMW-peilmeetstations (Tabel 2.2) zijn gebruikt.
- Saliniteits van de LMW-zoutmeetstations (Tabel 2.3) zijn gebruikt. Deze gegevens zijn uit Donar gehaald en hebben een tijdsinterval van 10 minuten.
- Afvoer is gelijktijdig in takken rondom een splitsing bepaald. Beschikbare ADCP-metingen kunnen gebruikt worden om in detail te kijken naar de afvoerreproductie binnen cruciale splitsingspunten. De eerder gevonden daggemiddelde afvoeren worden niet gebruikt omdat het modelresultaten zijn en omdat daggemiddelde afvoeren niet gelijk zijn aan getijgemiddelde afvoeren.

Tabel 2.2 Overzicht gebruikte LMW-peilmeetstations met in de rechterkolom het gebied waarin de stations zijn ingedeeld ten behoeve van de analyse

Naam	Riviertak	Gebied met vergelijkbare karakteristieken
Hoek van Holland	Nieuwe Waterweg	Noordrand
Maassluis	Nieuwe Maas	"
Vlaardingen	Nieuwe Maas	"
Rotterdam	Nieuwe Maas	"
Krimpen a/d IJssel	Hollandse IJssel	Lek en Hollandse IJssel
Brug bij Gouda	Hollandse IJssel	"
Hagestein Beneden	Lek	"
Schoonhoven	Lek	"
Krimpen a/d Lek	Lek	"
Dordrecht	Oude Maas	Middengebied
Spijkensisse	Oude Maas	"
Goidschalxoord	Oude Maas	"
Moerdijk	Hollands Diep	Zuidrand
Rak Noord	Hollands Diep	"
Hellevoetsluis	Haringvliet	"
LithDorp	Maas	Maas en Waal
Heesbeen	Maas	"
Keizersveer	Maas	"
Zaltbommel	Waal	"
Vuren	Waal	"
Tiel	Waal	"
Werkendam Buiten	Boven-Merwede	"

Tabel 2.3 Overzicht te gebruiken LMW-zoutmeetstations met in de rechterkolom het gebied waarin de stations zijn ingedeeld ten behoeve van de analyse

Naam	Riviertak	Gebied met vergelijkbare karakteristieken
Hoek van Holland	Nieuwe Waterweg	Noordrand
Lekhaven	Nieuwe Maas	"
Brienoordbrug	Nieuwe Maas	"
Krimpen a/d IJssel	Hollandse IJssel	Lek en Hollandse IJssel
Kinderdijk	Lek	"
Beerenplaat	Spui	Middengebied
Zuidland	Spui	"
Spijkensisse	Oude Maas	"
Haringvliet west	Haringvliet	Zuidrand
Stellendam binnen	Haringvliet	"
Inloop Spui	Haringvliet	"
Middelharnis	Haringvliet	"
Volkeraksluizen	Hollands Diep	"

2.6.2 Vertaling naar dieptegemiddelde saliniteit

In de gebieden waar gelaagdheid optreedt, worden continue zoutmetingen uitgevoerd op verschillende vaste dieptes (onder andere bij de Brienoordbrug, Lekhaven en Hoek van Holland uit Tabel 2.3). Bij gebrek aan profielmetingen kunnen enkel de beschikbare continue metingen gebruikt worden als beste schatting voor de dwarsprofielgemiddelde saliniteit. Er is geen aanvullende correctie uitgevoerd voor de hoogte ten opzichte van NAP waarop de meting heeft plaatsgevonden, behalve voor Hoek van Holland.

Voor Hoek van Holland is binnen deze herkalibratie op basis van metingen een eerste aanzet gegeven voor een nieuwe conversie. Deze methode staat beschreven in bijlage A en wordt de aangepaste methode genoemd. Details over deze aangepaste methode voor vertaling naar dieptegemiddelde waarden voor Hoek van Holland en de standaard methode die is gebruikt voor andere stations zijn te vinden in bijlage A. Aangenomen is dat deze dieptegemiddelde waarde representatief is voor de waarde gemiddeld over de hele dwarsdoorsnede.

2.6.3 Zoutrandvoorwaarde bij de Maasmond

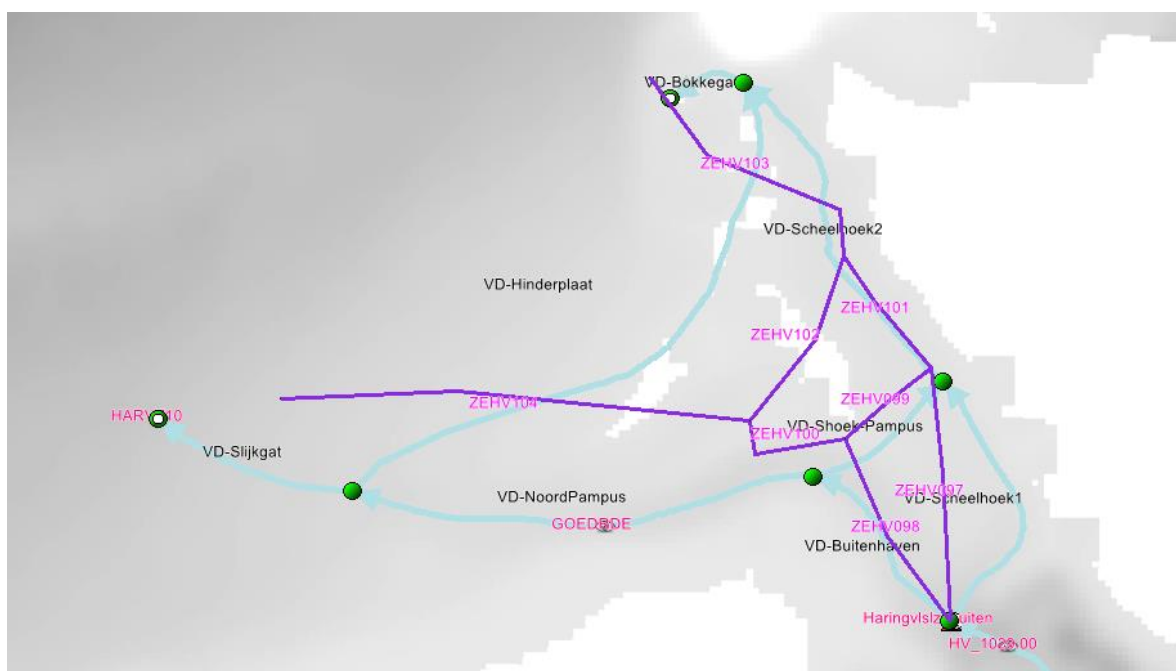
Bij de Maasmond komt het zout het model binnen. Aangezien er geen zoutmetingen zijn bij de Maasmond, is in overleg met Rijkswaterstaat 31 psu is gebruikt in combinatie met een Thatcher-Harleman 'time lag' van 5400 s (1,5 uur). In een eerder stadium is een saliniteit tijdserie aangeleverd voor de Maasmond, welke was gebaseerd op metingen bij Hoek van Holland. Omdat Hoek van Holland oostelijker ligt dan de Maasmond geeft deze tijdserie een onderschatting. Bovendien was de standaardmethode toegepast om de saliniteit te bepalen. Om deze redenen is de aangeleverde tijdserie van saliniteit niet gebruikt.

De randconditie met een saliniteit van 31 psu in combinatie met een Thatcher-Harleman 'time lag' van 5400 s leverde te weinig variatie in saliniteit in vergelijking met metingen bij Hoek van Holland. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor de 'time lag'. Daaruit is geconcludeerd dat zowel de gemiddelde saliniteit als de fluctuatie slechts beperkt verandert bij verandering van de 'time lag'. Aanpassing van de 'time lag' gaf nauwelijks verbetering, dus is 31 psu met een Thatcher-Harleman 'time lag' van 1,5 uur aangehouden als zoutrandvoorwaarde bij de Maasmond, waarmee de variatie van saliniteit wordt onderschat ten opzichte van metingen in het estuarium.

3 Aanpassing dwarsprofielen Voordelta Haringvliet

3.1 Inleiding

Tijdens dit project is bij de kalibratie van het nieuwe SOBEK 3 RMM model vastgesteld dat een hoge hydraulische ruwheid nodig was in de Voordelta westelijk van de Haringvlietsluizen. Zonder deze hoge ruwheid was het niet mogelijk om modelresultaten in overeenkomst met gemeten waterstanden te brengen. Deze ruwheid was dusdanig hoog (Manning ruwheid van rond $0,06 \text{ s/m}^{1/3}$) dat werd vermoed dat de schematisatie van dit gebied niet goed overeen kwam met de werkelijkheid. Een onderzoek naar mogelijke oorzaken wees uit dat in dit gebied de schematisatie sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 aanzienlijk verschilt in vergelijking met het SOBEK-RE NDB-model. De dwarsprofielen in de Voordelta hebben aanzienlijk meer volume, de zeeranden worden anders opgelegd¹, en de takkenstructuur verschilt aanzienlijk in vergelijking met het SOBEK-RE NDB-model (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 De takken en profielen in SOBEK-RE NDB model (paars) en de SOBEK 3 RMM model (blauw)

Van deze verschillen, is het aannemelijk dat het grotere volume in de SOBEK 3 profielen kan leiden tot hogere ruweden. De dwarsprofielen in de Voordelta zijn in zowel het SOBEK-RE NDB model als het sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 model niet volgens de standaardmethode ('WAQ2PROF') afgeleid, maar handmatig. Blijkbaar zijn voor het SOBEK-RE NDB model andere keuzes gemaakt dan voor het sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 model. Daarom is er in samenspraak met Rijkswaterstaat voor gekozen om voor het SOBEK 3 RMM model de profielen in de Voordelta af te leiden volgens de standaardmethode met WAQ2PROF.

¹ In het SOBEK-RE NDB model werd een fictieve 'HA20' voorwaarde opgelegd aan de noordkant van de Voordelta, die in fase verschoven was. Deze faseverschuiving was niet fysisch onderbouwd (het was een verschuiving de verkeerde kant op, zodat het getij eerder in HA20 aankwam dan in HA10). Deze fictieve randvoorwaarde is niet gebruikt voor de SOBEK 3 RMM modellen.

3.2 Werkwijze

Om te komen tot nieuwe profielen die het volume van de geulen in de Voordelta beter weergeven, zijn de volgende stappen gezet:

1. Het opzetten van een nieuwe 'waq2prof' berekening met een WAQUA model;
2. Het maken van nieuwe 'SOBEK-vakken', op basis waarvan de profielen worden bepaald;
3. Het genereren van dwarsprofielen met het programma 'WAQ2PROF';
4. Vergelijking tussen de SOBEK-NDB profielen en de nieuw afgeleide profielen voor SOBEK 3.

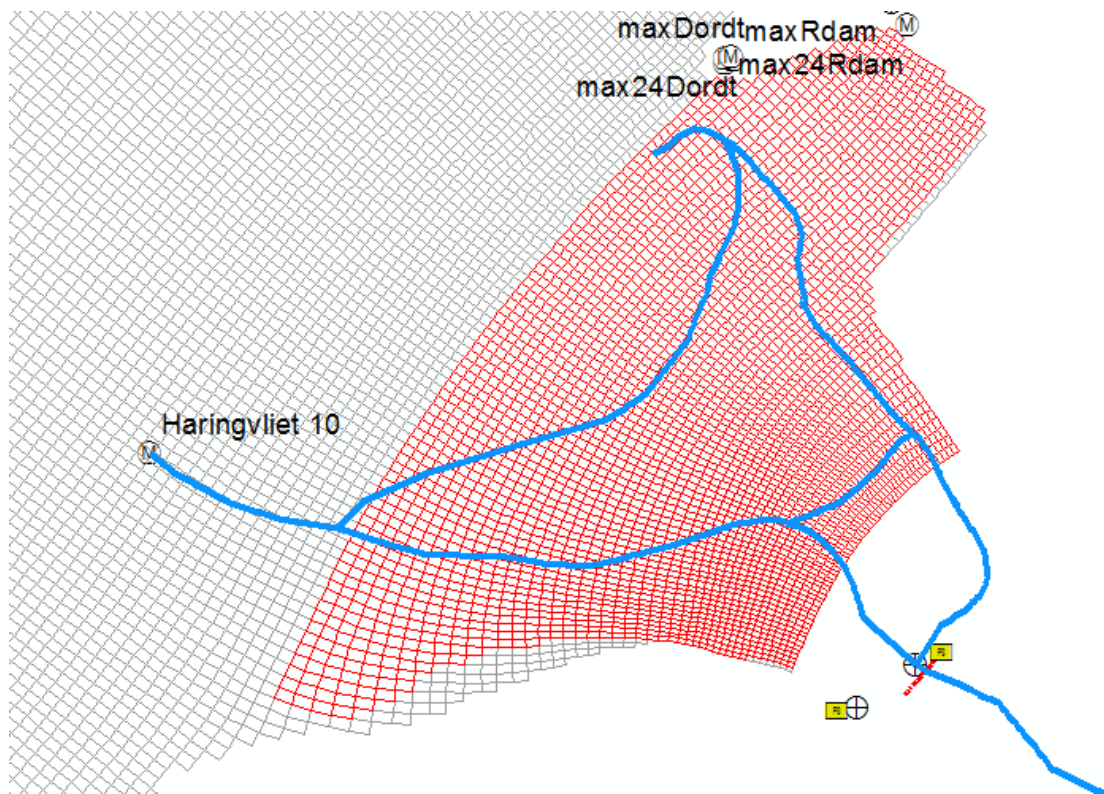
3.3 WAQUA "WAQ2PROF berekening"

3.3.1 Berekening zonder Voordelta

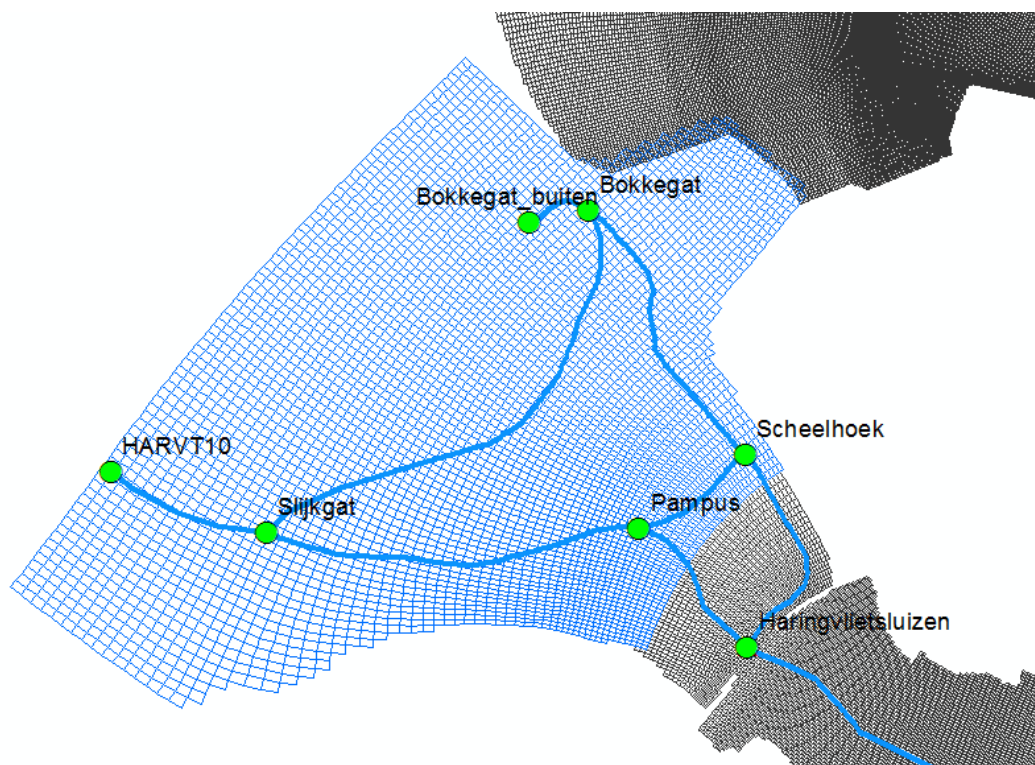
Om WAQ2PROF te kunnen gebruiken moet een WAQUA berekening worden uitgevoerd. Het WAQUA RMM model bestaat uit twee domeinen: het zeedomein en het rivierdomein. Voorheen kon enkel het rivierdomein gebruikt worden. In de WAQUA berekening moet de waterstand monotoon oplopen (d.w.z. waterstanden in een vorig uitvoermoment zijn altijd lager dan in het opvolgende uitvoermoment). Voor het rivierdomein is dit bereikt voor zowel het sobek-rmm-j98_5 model als voor het sobek-rmm-vozo-j15_5_v1 model door een monotoon stijgende afvoerrandvoorwaarde bij de bovenstroomse Lek, Waal en Maas domeinranden en een monotoon stijgende waterstandsrandvoorwaarde bij de benedenstroomse Haringvliet- en Maasmond randen op te leggen. Dit is opnieuw uitgevoerd voor het rivierdomein.

3.3.2 Berekening met Voordelta

Het SOBEK model heeft twee zeeranden. De zuidelijke rand ligt op meetpunt 'Haringvliet 10' (HA10). De noordelijke rand ligt niet op een meetpunt. Het WAQUA rooster heeft een bestaand verkleind domein, het zogenaamde 'kleine zee-' of WTI-domein, zie Figuur 3.2. Dit domein is te klein om gebruikt te worden voor WAQ2PROF, omdat het niet de SOBEK-takken omvat. Daarom is een nieuwe WAQUA rand gedefinieerd, wat leidt tot een vergroot domein (Figuur 3.3). Deze zijn vastgelegd in twee bestanden, nl. het randen bestand *rrb.zee-haringvliet-waq2prof* en het punten bestand *point-rvw-zee-waq2prof*. De rand is gelegd langs n-lijn 62. Berekeningen met WAQUA zijn gedraaid op het Deltares h6 cluster.



Figuur 3.2 De takkenstructuur van het SOBEK 3 RMM model (blauw) over het rekenrooster van waqua-rmm-j15_5-v1 (grijs). Het rode rooster is het 'kleine zeedomein' of WTI-rooster.



Figuur 3.3 De takkenstructuur van het SOBEK 3 RMM model (blauw) over het rekenrooster van waqua-rmm-j15_5-v1 (grijs). Het blauwe rooster is het vergrote waq2prof zeedomein.

3.3.3 Randvoorwaarden

Er zijn twee sets randvoorwaarden: (1) 'waq2prof_ini' voor het maken van een goede initiële conditie en (2) 'waq2prof_prof' voor het maken van profielen (Tabel 3.1). De keuze is gemaakt om de waterstand niet trapsgewijs te laten oplopen, waarmee naast de profielen ook de ruwheid (van uiterwaarden) bepaald kan worden, maar in plaats daarvan de waterstand monotoon te laten stijgen. Voor de Voordelta waar geen uiterwaarden aanwezig zijn, was het niet nodig om ruwheid van het zomerbed te bepalen, omdat de ruwheid van het zomerbed wordt bepaald bij de herkalibratie.

Tabel 3.1 Samenvatting van de randvoorwaarden

Naam van de rand	waq2prof_ini <i>Stationair</i>	waq2prof_prof <i>Start en eindwaarden</i>
Maas	50 m ³ s ⁻¹	50 m ³ s ⁻¹ – 4600 m ³ s ⁻¹
Lek	150 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹ – 4100 m ³ s ⁻¹
Waal	350 m ³ s ⁻¹	350 m ³ s ⁻¹ – 11.300 m ³ s ⁻¹
Voordelta	-3,65 m +NAP	-3,65 m – 10 m +NAP
Maasmond_zee	-3,70 m +NAP	-3,70 m – 10 m +NAP

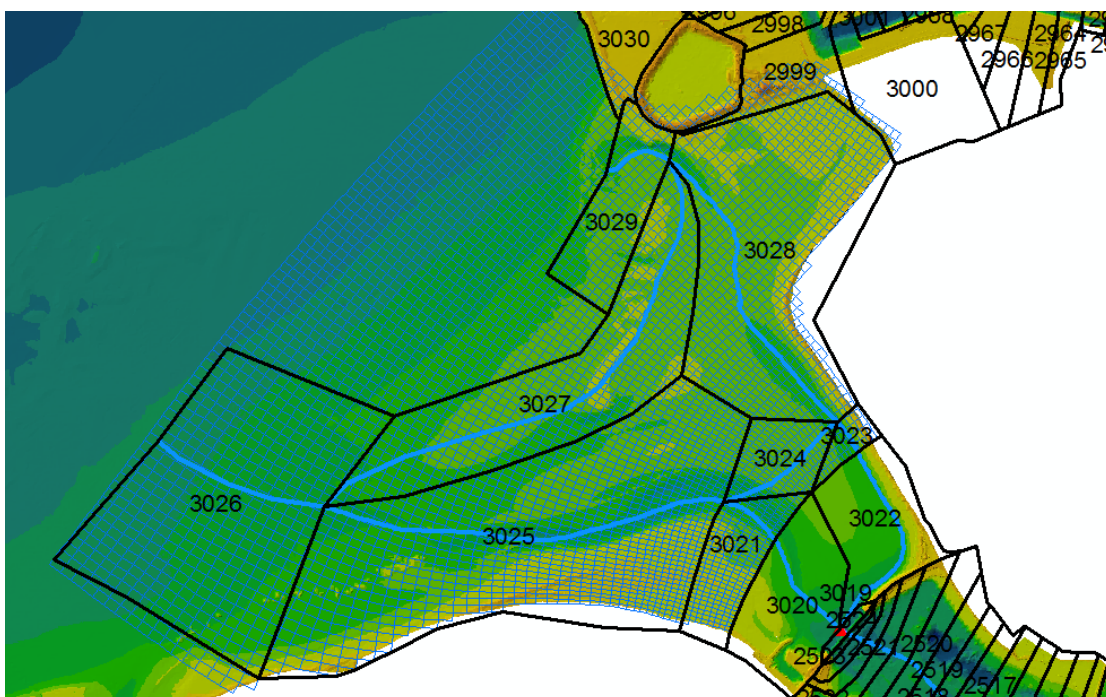
3.4 Sobekvakken

3.4.1 Nieuwe SOBEEK-vakken voor de Voordelta

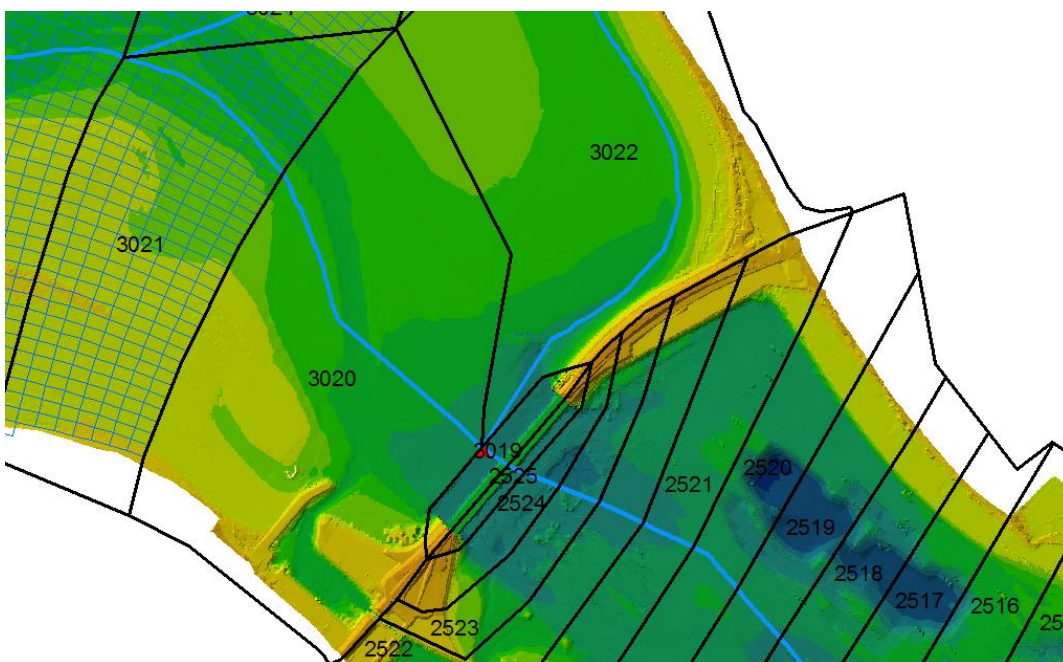
In de methodologie van WAQ2PROF wordt het tweedimensionale modelresultaat uit WAQUA opgedeeld in polygonen, of SOBEEK-vakken. Op basis van modelresultaten binnen deze polygonen wordt een dwarsprofiel berekend.

De takken in de Voordelta zijn gebaseerd op bestaande geulen. Tussen de noordelijke geul ("Bokkegat") en de zuidelijke geul ("Slijkgat") zijn eerder op twee plaatsen dwarsverbindingen aangebracht om stroming over de banken te simuleren (Figuur 3.1). De takkenstructuur is in het SOBEEK 3 RMM model hetzelfde gebleven als voor sobek-rmm-vozo-j15_5-v1.

Voor deze takkenstructuur is een nieuwe vakindeling gemaakt om de profielen zo goed mogelijk te kunnen afleiden (Figuur 3.4). Hierbij is waar mogelijk 1 vak per tak aangehouden. De enige uitzondering is gemaakt waar de rivier overgaat in zee. Op de takken *VD-Buitenhaven* en *VD-Scheelhoek1* liggen om deze reden twee profielen in plaats van één. De SOBEEK-vakken 3019, 3020 en 3022 worden afgeleid van het rivierendomein. De SOBEEK-vakken 3021 en 3023 t/m 3029 van het zeedomein. De opdeling in vakken is handmatig gedaan, waarbij de natuurlijke hoogtes in de bathymetrie is gevolgd.



Figuur 3.4 De nieuwe SOBEK- vakken, met in donkerblauw het waq2prof-zeedomein en in lichtblauw de SOBEK 3-takkenstructuur



Figuur 3.5 Detail van de nieuwe SOBEK-vakken rondom de Haringvlietssluzen. Vak 3019 is het laatste profiel op de tak Haringvliet7

3.4.2 Vaklengtes en plaatsing van dwarsprofielen

Om ervoor te zorgen dat de volumes van de SOBEK-vakken ook goed in SOBEK worden gebruikt moeten de *vaklengtes* overeenkomen met de locaties van de dwarsprofielen. Dit is eenvoudig voor takken waarvoor één profiel wordt opgegeven: de vaklengte is hier gelijk aan de taklengte.

De takken *VD-Buitenhaven* en *VD-Scheelhoek1* hebben twee profielen. Bovendien valt de scheiding zee- en rivierdomein niet precies op de helft.

VD-Buitenhaven heeft een lengte van 3348 m. Hiervan ligt 1230 m in het zeedomein en 2118 m in het rivierdomein. Indien profiel 3021 op chainage 3348 m wordt gelegd (einde van de tak) moet profiel 3020 op chainage 888 m komen te liggen. Hierdoor kan voor 3021 een vaklengte van 1230 m worden aangehouden en voor 3020 een vaklengte van 2118 m.

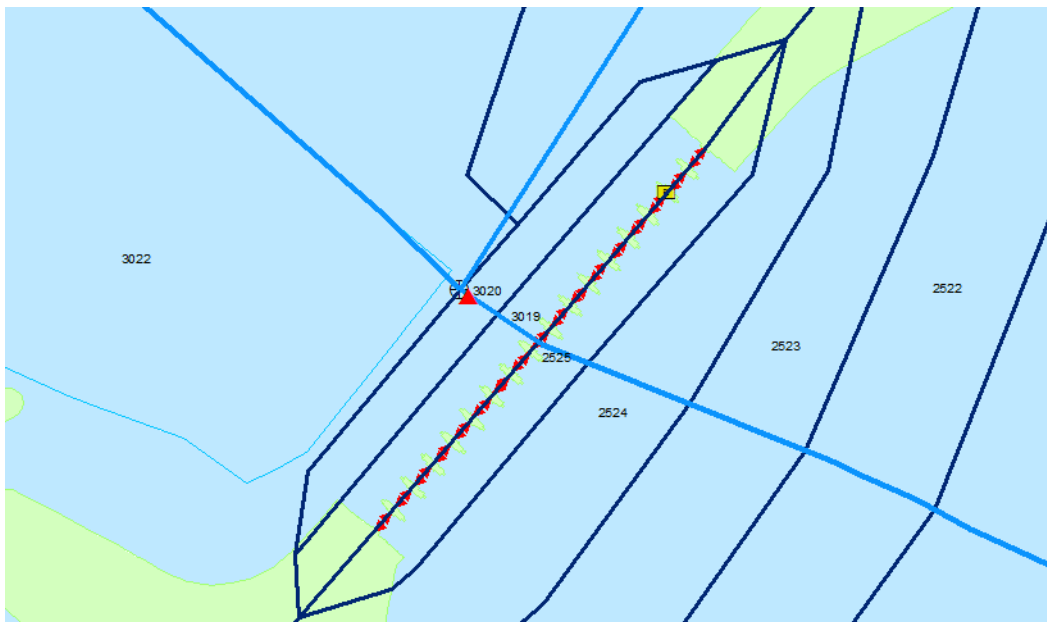
VD-Scheelhoek1 heeft een lengte van 4509 m. Hiervan ligt 700 m in het zeedomein en 3809 m in het rivierdomein. Indien profiel 3023 op chainage 4509 m wordt gelegd (einde van de tak), moet profiel 3022 op chainage 3109 m worden gelegd. Hierdoor kan voor profiel 3023 een vaklengte van 700 m worden aangehouden, en voor profiel 3022 een vaklengte van 3809 m. Een overzicht van alle takken staat gegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Overzicht van vakken in de voordelta, vaklengte, naam, tak en locatie op de tak van de geassocieerde dwarsprofielen.

Vak	Vaklengte (m)	Naam profiel	Gelegen op tak	Locatie op tak (m)
3019	192	Haringvliet7_6045	Haringvliet7	6045
3020	2118	VD-Buitenhaven_888	VD-Buitenhaven	888
3021	1230	VD-Buitenhaven_3348	VD-Buitenhaven	3348
3022	3809	VD-Scheelhoek_3109	VD-Scheelhoek	3109
3023	700	VD-Scheelhoek_4509	VD-Scheelhoek	4509
3024	1838	VD-Shoek-Pampus_919	VD-Shoek-Pampus	919
3025	7693	VD-NoordPampus_3846	VD-NoordPampus	3846
3026	3412	VD-Slijkgat_1706	VD-Slijkgat	1706
3027	3379	VD-Hinderplaat_1690	VD-Hinderplaat	1690
3028	6127	VD-Scheelhoek2_3063	VD-Scheelhoek2	3063
3029	1357	VD-Bokkegat_678	VD-Bokkegat	678

3.4.3 Haringvlietsluizen

Figuur 3.6 toont een detail van sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 rond de Haringvlietsluizen. Te zien is dat de Haringvlietsluizen in dit model (rode driehoek) ongeveer 170 meter te ver zeewaarts liggen. Bovendien wordt voor de SOBEK-vakken 3020 en 3019 geen profiel gegenereerd. Daardoor wordt dwarsprofiel 2525 ook 'gebruikt' voor profielen 3020 en 3019. Dit kan leiden tot een (kleine) volumefout. De Haringvlietsluizen zijn in het SOBEK 3 RMM model verplaatst van 'chainage' 6098 m naar 'chainage' 5981 m op tak Haringvliet7.



Figuur 3.6 Detail figuur van de takkenstructuur rondom de haringvlietsluizen. De oude locatie van de Haringvlietsluizen in het model (rode driehoek) wijkt ongeveer 170 meter af van de daadwerkelijke locatie.

3.5 Vergelijking met eerdere SOBEK modellen

3.5.1 Verschil tussen de schematisaties

We vergelijken de profielen van sobek-rmm-j15_5-v1 met die van sobek-re-rmm-js11 en de profielen voor het SOBEK 3 RMM model. Dit doen we op basis van volume. Omdat de profielen niet op dezelfde plek liggen, is directe vergelijking niet eenduidig. Grofweg is de takkenstructuur vergelijkbaar (Figuur 3.1). Het meest opvallende verschil is dat in de SOBEK 3 modellen de rand HA10 op de geografische locatie ligt van HA10. Daarnaast is de eerste dwarstak (vanuit de zee gekeken) gemodelleerd naar de 'Hinderplaat'.

Een verschilanalyse tussen de schematisaties is weergegeven in Tabel 3.3. Hieruit zien we dat de takkenstructuur van de voordelta in het SOBEK-RE NDB model ongeveer 33,6 km lang is, tegenover 31,7 km voor het SOBEK 3 RMM model. Het verschil hiertussen is bijna 2 km, of 5,7%. Figuur 3.1 toont de takken in de beide modellen. Omdat de takken in het SOBEK 3 RMM model langer lijken te zijn (geometrisch), zou verwacht worden dat juist het SOBEK 3 RMM model langere takken heeft. Dit is niet het geval, omdat de geometrische (visuele) lengte in het SOBEK-RE NDB model niet hetzelfde is als de rekenlengte. De rekenlengtes van Sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 en het SOBEK-RE NDB model zijn weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Verschilanalyse tussen de lengtes van de takken

SOBEK-RE NDB MODEL		Sobek-rmm-vozo-j15_5-v1		
Tak	Lengte (m)	Tak	Lengte (m)	Vershil (m)
ZEHV097	4801	VD-Scheelhoek	4509	-292
ZEHV098	3427	VD-Buitenhaven	3348	-79
ZEHV099	2026	VD-Shoek-Pampus	1838	-188
ZEHV100	2956	VD-NoordPampus	7693	4737
ZEHV101	2889	VD-Scheelhoek2	6127	3238
ZEHV102	3363	VD-Hinderplaat	3379	16
ZEHV103	4638	VD-Bokkegat	1357	-3281
ZEHV104	9551	VD-Slijkgat	3412	-6139
Totaal	33651		31663	-1988

3.5.2 Verschil tussen de volumes

Om de volumes te vergelijken is voor elk profiel een relatie bepaald tussen de waterstand en het doorstroomoppervlak op basis van de totale breedte (stroomvoering + berging). Dit doorstroomoppervlak is vervolgens vermenigvuldigd met de *vaklengte*. Zo is er per tak een volume-waterstandsgrafiek te maken. Voor sobek-rmm-j15_5-v1 en het SOBEK-RE NDB model zijn de vaklengtes niet bekend. Daarom zijn deze afgeleid, op dezelfde wijze als beschreven in paragraaf 3.4.2.

In de volgende tabellen worden de totaalvolumes bij een waterstand van 10 m +NAP vergeleken. Ter vergelijking wordt eerst de verschillen tussen SOBEK-RE NDB model en de oorspronkelijke sobek-rmm-j15_5-v1 getoond. Tabel 3.4 laat zien dat het volume in de Voordelta aanzienlijk groter is in sobek-rmm-j15_5-v1. Dit is in overeenstemming met de eerdere, kwalitatieve, vaststelling. Bij een waterstand van 10 m +NAP, is er in totaal 0.44 km³ meer volume in vergelijking met het SOBEK-RE NDB model.

Tabel 3.4 Verschilanalyse tussen de volumes van de profielen in de voordelta tussen SOBEK-RE NDB model en sobek-rmm-j15_5-v1

Taknamen		Totaal volume (km ³)		Vershil (km ³)
SOBEK-RE NDB model	sobek-rmm-vozo-j15_5-v1	SOBEK-RE NDB model	sobek-rmm-vozo-j15_5-v1	
ZEHV097	VD-Scheelhoek	0.06	0.08	0.02
ZEHV098	VD-Buitenhaven	0.06	0.13	0.07
ZEHV099	VD-Shoek-Pampus	0.02	0.03	0.00
ZEHV100	VD-NoordPampus	0.12	0.08	-0.04
ZEHV101	VD-Scheelhoek2	0.07	0.58	0.51
ZEHV102	VD-Hinderplaat	0.07	0.09	0.01
ZEHV103	VD-Bokkegat	0.16	0.28	0.12
ZEHV104	VD-Slijkgat	0.31	0.05	-0.26
	Totaal	0.88	1.32	0.44

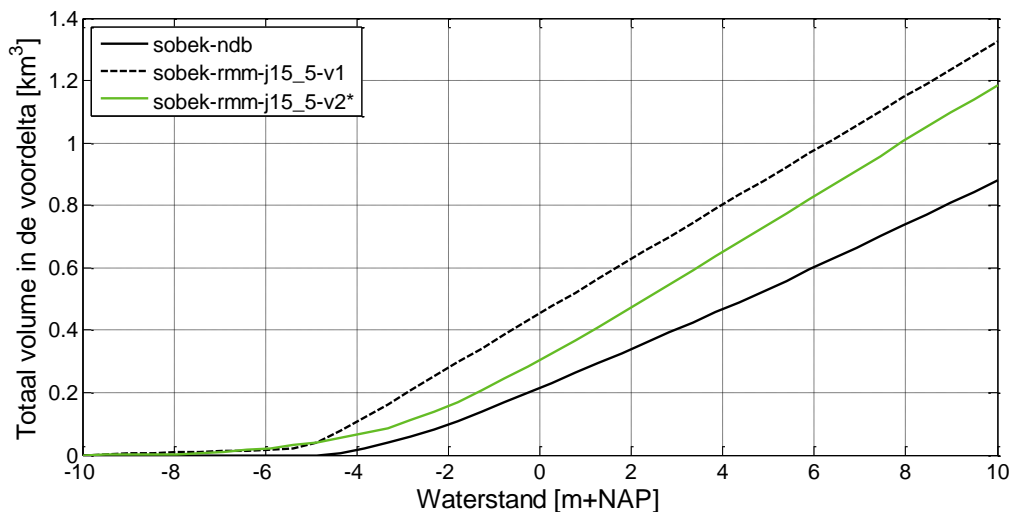
Tabel 3.5 laat de verschilanalyse zien voor de profielen opgenomen in het SOBEK 3 RMM model. Het volume is gedaald ten opzichte van sobek-rmm-j15_5-v1, maar nog steeds hoger dan in het SOBEK-RE NDB model. Dit verschil uit zich voornamelijk in de profielen VD-Scheelhoek2 en VD-NoordPampus. Dit is niet verrassend, omdat beide takken in sobek-rmm aanzienlijk langer zijn (Tabel 3.3).

Tabel 3.5 Verschilanalyse tussen de volumes van de profielen in de voordelta tussen SOBEK-RE NDB model en het SOBEK 3 RMM model

Taknamen		Totaal volume (km ³)		Verskil (km ³)	Verskil (km ³)
SOBEK-RE NDB model	SOBEK RMM model	SOBEK-RE NDB model	SOBEK 3 RMM model	met SOBEK-RE NDB model	met sobek-rmm-vozo-j15_5-v1
ZEHV097	VD-Scheelhoek	0.06	0.06	-0.01	-0.02
ZEHV098	VD-Buitenhaven	0.06	0.09	0.03	-0.04
ZEHV099	VD-Shoek-Pampus	0.02	0.03	0.01	0.00
ZEHV100	VD-NoordPampus	0.12	0.31	0.19	0.23
ZEHV101	VD-Scheelhoek2	0.07	0.17	0.10	-0.41
ZEHV102	VD-Hinderplaat	0.07	0.16	0.09	0.07
ZEHV103	VD-Bokkegat	0.16	0.05	-0.11	-0.23
ZEHV104	VD-Slijkgat	0.31	0.31	0.01	0.26
	Totaal	0.88	1.18	0.30	-0.14

Figuur 3.7 toont een nadere analyse naar de volumes bij oplopende waterstanden. Hieruit blijken twee duidelijke redenen waarom de gegenereerde profielen voor het SOBEK 3 RMM model een groter volume hebben dan het SOBEK-RE NDB model. In de eerste plaats, beginnen de SOBEK-RE NDB model profielen bij een hoger niveau. Met andere woorden, de diepere geulen zijn wel opgenomen in de profielen in het SOBEK 3 RMM model, maar niet in de SOBEK-RE NDB model profielen. Dit verklaart voor ongeveer 0.1 km³ het verschil in volume. De overige 0.2 km³ is te verklaren uit relatief bredere profielen. Hierdoor neemt het verschil toe bij toenemende waterstand.

Dit extra volume kan deels verklaard worden uit de twee buitenste profielen: 3026 en 3029. Er is geen voor de hand liggende bepaling voor de oppervlakte van deze SOBEK-vakken. Het is bijvoorbeeld opvallend dat de volumes in de takken ZEHV104 en VD-Slijkgat vrijwel identiek zijn, terwijl de tak in het SOBEK 3 RMM model aanzienlijk kleiner is. Hier zit een vrijheidsgraad, waarvoor nu een keuze is gemaakt. Deze vrijheidsgraad in het bepalen van de buitenste profielen zal effect hebben op de variatie van de afvoer in de Voordelta door getij en mogelijk ook op de variatie van de waterstand door getij. Wanneer deze vakken bijvoorbeeld breder zouden zijn gekozen, zou ook het eerste profiel vanaf zee gezien breder zijn geworden.



Figuur 3.7 Vergelijking tussen de volumes in de voordelta bij verschillende waterstanden.

3.6 Puntsgewijze samenvatting

- Het volume van de Voordelta in het oorspronkelijke SOBEK 3 model bleek erg groot te zijn, waardoor onrealistische ruwheden nodig waren om de waterstand goed te reproduceren.
- Om deze reden zijn nieuwe profielen afgeleid voor het SOBEK 3 RMM model met de standaardmethode waq2prof, waar deze eerder handmatig waren bepaald.
- De methode voor het kiezen van de vakgrootte van de twee profielen grenzend aan zee (3026 en 3029) is niet eenduidig. Hier zijn nu willekeurig enkele keuzes gemaakt.
- Resultaten laten zien dat het totaalvolume in de Voordelta hierdoor kleiner wordt dan in sobek-rmm-vozo-j15_5-v1, maar dat het totaalvolume nog altijd groter is dan in het SOBEK-RE NDB model.
- Met deze nieuwe profielen wordt in sectie 5.3 beschreven dat de kalibratie voor waterstand waarden voor de hydraulische ruwheid oplevert die binnen een fysisch realistisch bereik liggen.
- Inspectie van de takkenstructuur van sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 rondom de Haringvlietsluizen laat zien dat de Haringvlietsluizen in dat model ongeveer 170 meter te ver in zee liggen. Dit is hersteld in het SOBEK 3 RMM model.

4 Overige modelaanpassingen

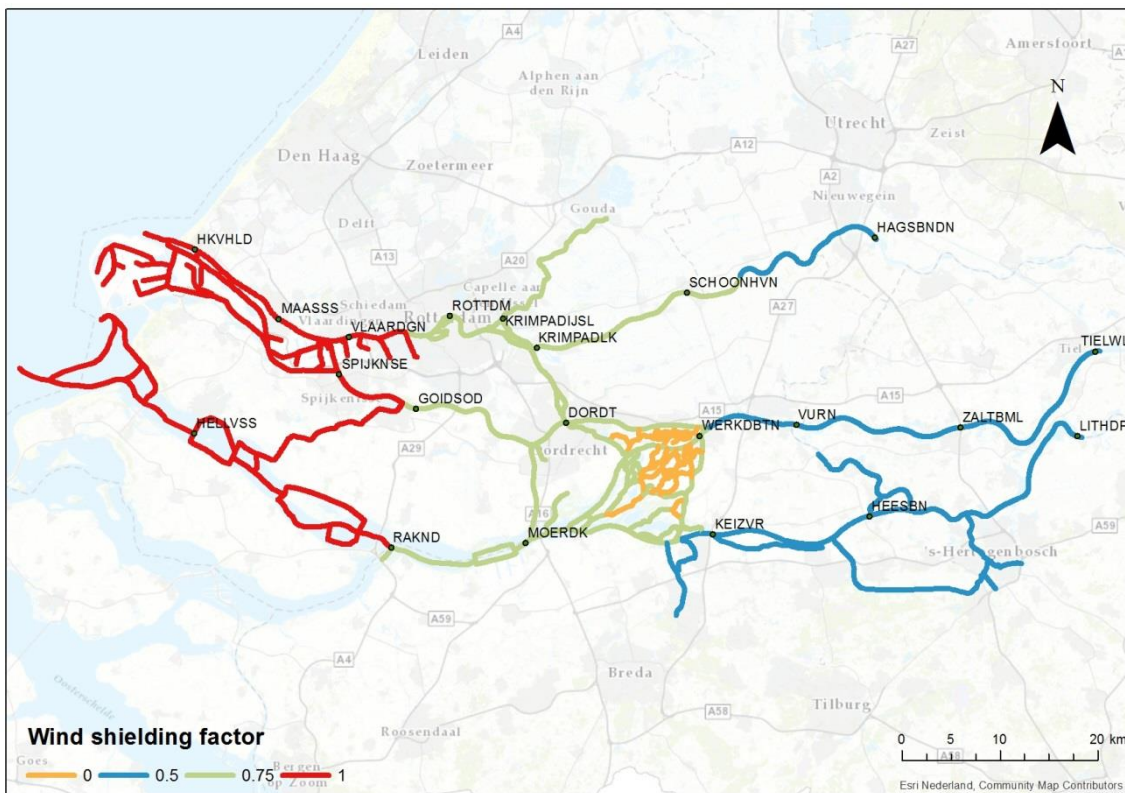
4.1 Introductie

In het vorige hoofdstuk zijn de aanpassingen aan de profielen in de Voordelta beschreven. Afgezien van de aanpassing van profielen, waren de activiteiten in 2017 en 2018 niet gericht op het aanpassen van de schematisatie. Toch zijn – vertrekkende vanuit de schematisatie sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 - enkele aanpassingen doorgevoerd, die nodig waren vanwege het gebruik van de software met aangepaste zoutformulering. Dit hoofdstuk geeft daarvan een overzicht.

Allereerst wordt voor de volledigheid de takkenstructuur getoond (Figuur 4.1), zoals beschreven in Fujisaki (2016). Ook voor de volledigheid toont Figuur 4.2 de windreductiefactor die is gehanteerd bij de herkalibratie. De windreductiefactor neemt af met afstand van de kust en is 0 gesteld in de Noordwaard, ter voorkomen van droog vallen van enkele ondiepe takken. In het westelijke gebied (met factor 1) wordt de windsnelheid zoals gemeten bij Hoek van Holland gebruikt.



Figuur 4.1 Overzicht van de takkenstructuur van het SOBEK 3 RMM model met aanduiding van kunstwerken, waterstandsmeetstations en zoutmeetstations



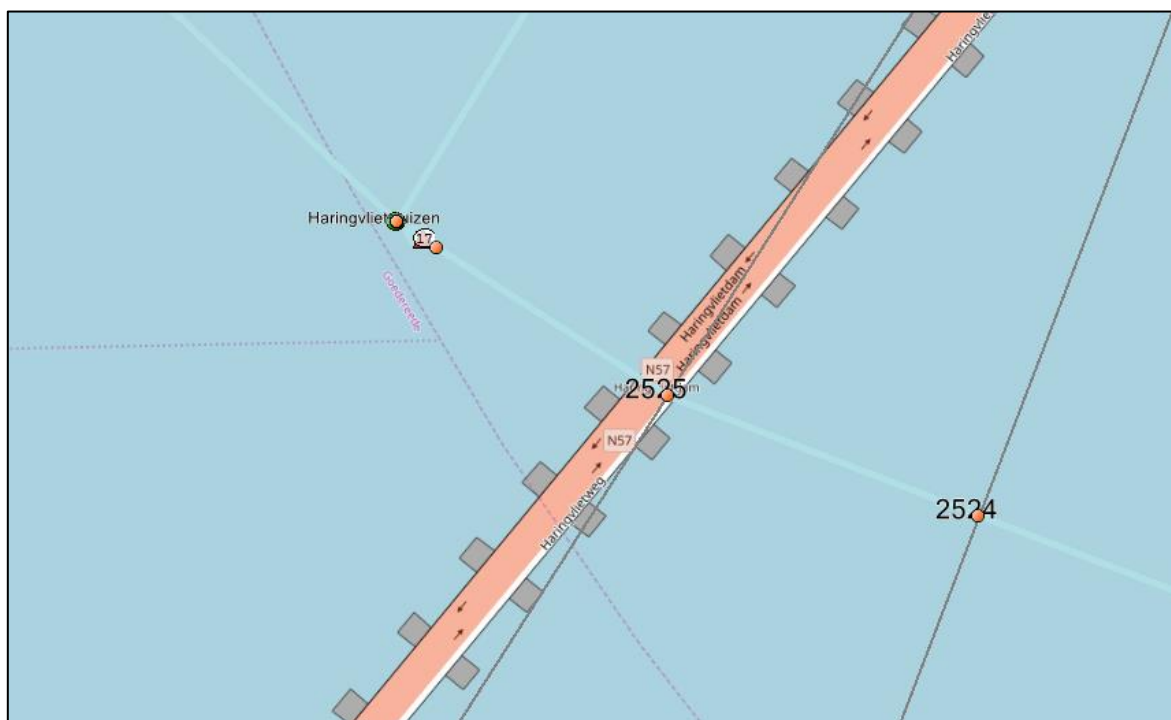
Figuur 4.2 De windreductiefactor die is gebruikt voor het SOBEK 3 RMM model en de herkalibratie

4.2 Aanpassingen schematisatie

De volgende aanpassingen zijn doorgevoerd in het SOBEK 3 RMM model:

- De parameters f_3 en f_4 voor de dispersiecoëfficiënt zijn gebruikt voor de herkalibratie van het SOBEK 3 RMM model (vergelijkingen 1.1 en 1.2). Voor f_1 is altijd 0 gebruikt. Hierdoor kan de dispersiecoëfficiënt in het SOBEK 3 RMM model terugzakken naar 0, terwijl in het SOBEK-RE NDB model in sommige takken een default waarde werd gebruikt als minimum.
- Om zeker te zijn dat Volkerak_over (3,5 m) en Volkerak_schuiven_gate (-4,25) gesloten zijn, is een constante tijdserie toegevoegd met RTC.
- Bij nadere inspectie is gebleken dat details van profielen die overgenomen uit eerdere SOBEK modellen niet altijd goed waren overgenomen. Deze profielen zijn vooral gelegen rondom de Maas. Bijlage B geeft de veranderingen weer aan profielen die niet met waq2prof zijn afgeleid.
- Dwarsprofiel 2769a in Merwelanden is verwijderd, omdat deze niet goed was gedefinieerd.
- Overvloedige rekenpunten zijn verwijderd bij "NOPNoordwaard-Z2_235.000" en bij "Bandijk1_1209.000".
- Bij de Kromme Nolkering zijn rekenpunten toegevoegd aan beide zijden op 10 m van de kering.
- Overlaat "Weir1" is hernoemd naar "ovl_NHP_o"
- De lengte van takken is aangepast van 936.73 naar 937 (NieuweMerwede06), van 506.44 naar 506 (NieuweMerwede07) en van 442.33 naar 442 (NieuweMerwede08).
- De *longname* van observation point ZALRBML is veranderd van "Zaltbommel" naar "LMW Zaltbommel".

- De Bathse Spuisluis is toegevoegd op basis van de informatie uit het Landelijk SOBEK Model (Wesselius et al., 2017). Deze spuisluis is van belang voor de operationele modellen. De spuisluis is opgenomen in de schematisatie ("zwd_BathseSpuisl") met een real-time control, waarvoor relevante 'observation points' zijn toegevoegd. Er is een functionele test uitgevoerd om te controleren of de spuisluis correct functioneert. Verondersteld is in dit rapport dat geen aanvoer of afvoer van water plaatsvond via de Bathse spuisluis.
- De locatie van de Haringvlietsluizen is aangepast naar Haringvliet7 'chainage' 5981 m (zie ook paragraaf 3.4.3) en rekenpunten zijn toegevoegd op 10 m aan weerszijden van de sluisen (Figuur 4.3).





Figuur 4.3 Detailfiguur van de takkenstructuur, de locatie van de Haringvlietssluis (cirkel met 17) en de rekenpunten (geel) in de oorspronkelijke situatie (boven) en in de aangepaste situatie voor het SOBEK 3 RMM model (onder).

4.3 Weergave 2005 en 2011

De volgende aanpassingen aan de schematisatie voor de situatie van 2015 zijn uitgevoerd om de situatie van 2005 en 2011 zo nauwkeurig mogelijk te beschrijven en zijn specifiek voor de herkalibratie:

- De tweede Maasvlakte is afgesloten van de Rotterdamse haven door middel van een blokkade in de Yangtzehaven;
- Alle inlaten van de Noordwaard zijn afgesloten van de Nieuwe Merwede en Biesbosch;
- Natuurontwikkelproject Noordwaard is bovendien afgesloten van de Nieuwe Merwede;
- De noodberging Volkerak-Zoommeer is uitgeschakeld. De afvoer door de Volkeraksluis wordt gerepresenteerd door middel van een laterale stroming (RakNoord 110).

Andere Ruimte voor de Rivier ingrepen zijn minder eenvoudig aan te passen. Hierdoor kunnen grotere afwijkingen ontstaan bij hogere rivierafvoeren bij de stations Hagestein, Schoonhoven, Vuren, Zaltbommel, Heesbeen en Lith.

4.4 Naamgeving schematisatie

De resulterende schematisatie na herkalibratie exclusief de aanpassingen om 2005 en 2011 zo goed mogelijk weer te geven en inclusief de Bathse spuisluis heeft de naam sobek-rmm-vozo-j15_5-v2 (in deze rapportage "SOBEK 3 RMM model" genoemd).

Daarnaast zijn voor de kalibratie- en verificatieperioden in 2005, 2008, 2011 en 2013 de volgende modellen inclusief randvoorwaarden beschikbaar:

- sobek-rmm-vozo-j15_5-v1_adjusted_salt_2005_mod_379_2
- sobek-rmm-vozo-j15_5-v1_adjusted_salt_2008_379
- sobek-rmm-vozo-j15_5-v1_adjusted_salt_2011_379_4
- sobek-rmm-vozo-j15_5-v1_adjusted_salt_2013_379_Dec
- sobek-rmm-vozo-j15_5-v1_adjusted_salt_2013_379_Jan

5 Herkalibratie

5.1 Introductie

De aanpak voor de herkalibratie is beschreven in hoofdstuk 2. Om de waterstand, saliniteit en afvoerverdeling zo goed mogelijk te berekenen zijn zeven stappen gevolgd. De eerste kalibratiestap is het ruw kalibreren van de dispersieparameters. Om deze reden worden de resultaten van de kalibratie van saliniteit als eerste beschreven. In deze beschrijving wordt ook het resultaat van de fijne kalibratie beschreven. Daarna volgen de resultaten van de kalibratie van de waterstand. Dit hoofdstuk sluit af met een discussie van de gevonden parameterinstellingen en de resultaten voor waterstand en saliniteit.

5.2 Saliniteit

5.2.1 Evaluatiecriteria

In paragraaf 2.2 zijn ook voor saliniteit nauwkeurigheidseisen beschreven. Omdat er weinig ervaring was met de kalibratie op zout, zijn deze eisen vooraf niet kwantitatief gesteld. Acceptatie van de zoutkalibratie heeft plaats gevonden in overleg met Rijkswaterstaat. Om te bepalen of de parameters voor de kalibratie geaccepteerd kunnen worden zijn de volgende evaluatiecriteria in kaart gebracht:

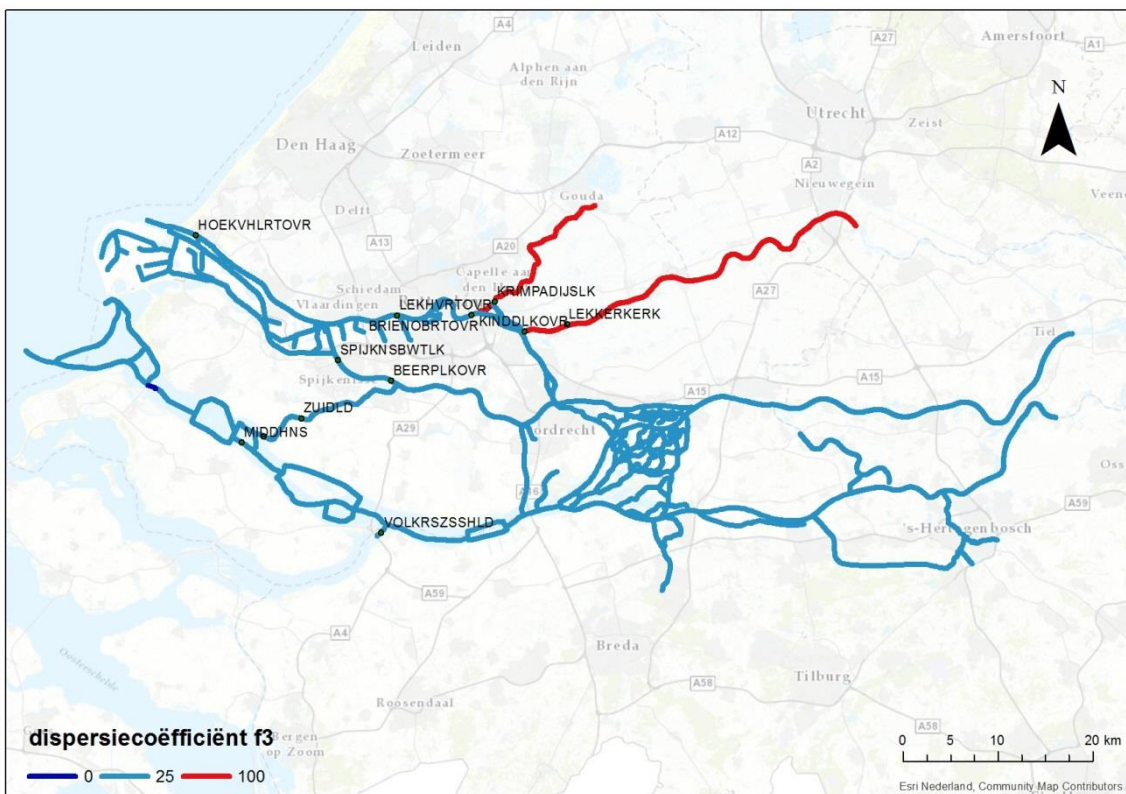
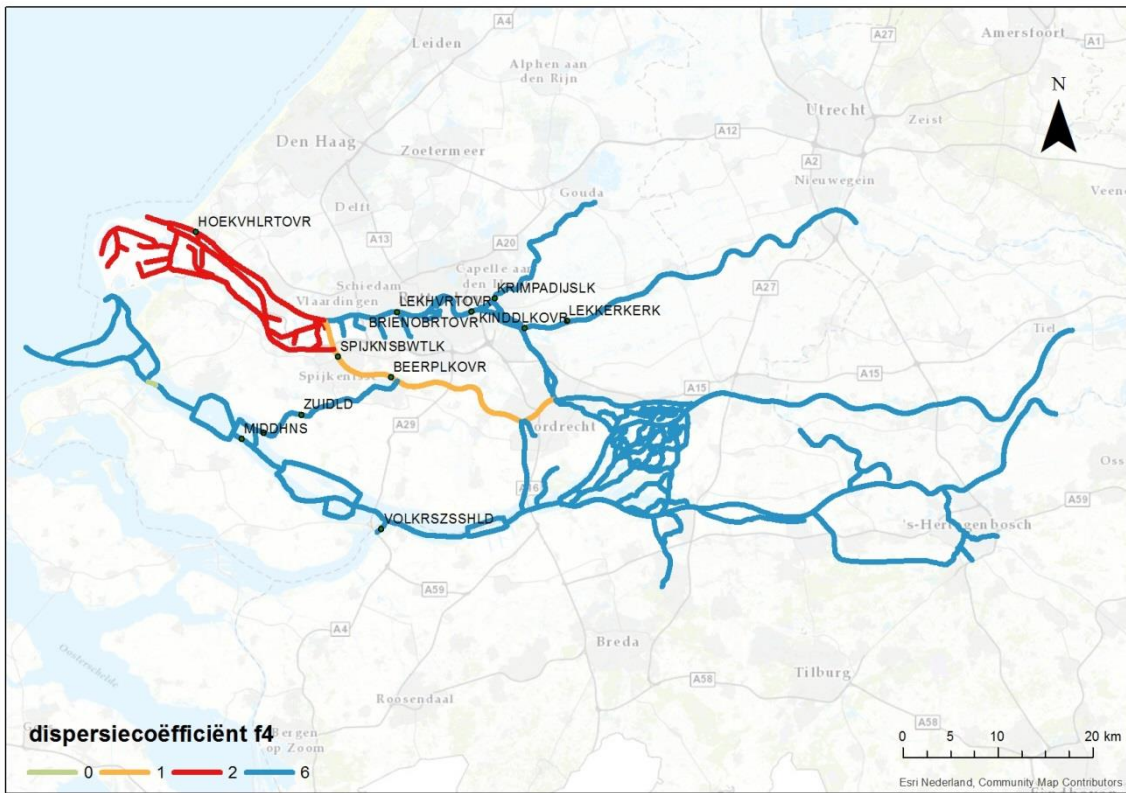
- Voor de tijdseries van saliniteit is visueel geanalyseerd welk gedrag goed gerepresenteerd wordt en wat minder.
- De objectieve criteria RMSE en BIAS zijn bepaald per periode.
- In de praktijk wordt het model vaak ingezet om te kijken hoe vaak en hoe lang de chlorideconcentratie boven een bepaalde waarde komt. Daarom zijn ook de overschrijdingsduren van 150 mg Cl/l en 300 mg Cl/l geëvalueerd.

5.2.2 Kalibratieparameters f_4 en f_3

Iteratief zijn de kalibratieparameters f_4 en f_3 per tak aangepast op basis van een toetsing van berekende saliniteits met een tussenversie van het model aan de evaluatiecriteria voor zout. Na de ruwe en precieze kalibratie op zout, en herhaling hiervan na aanpassing van de ruwheden, is gekomen tot de ruimtelijke verdeling van f_4 en f_3 zoals weergegeven in Figuur 5.1.

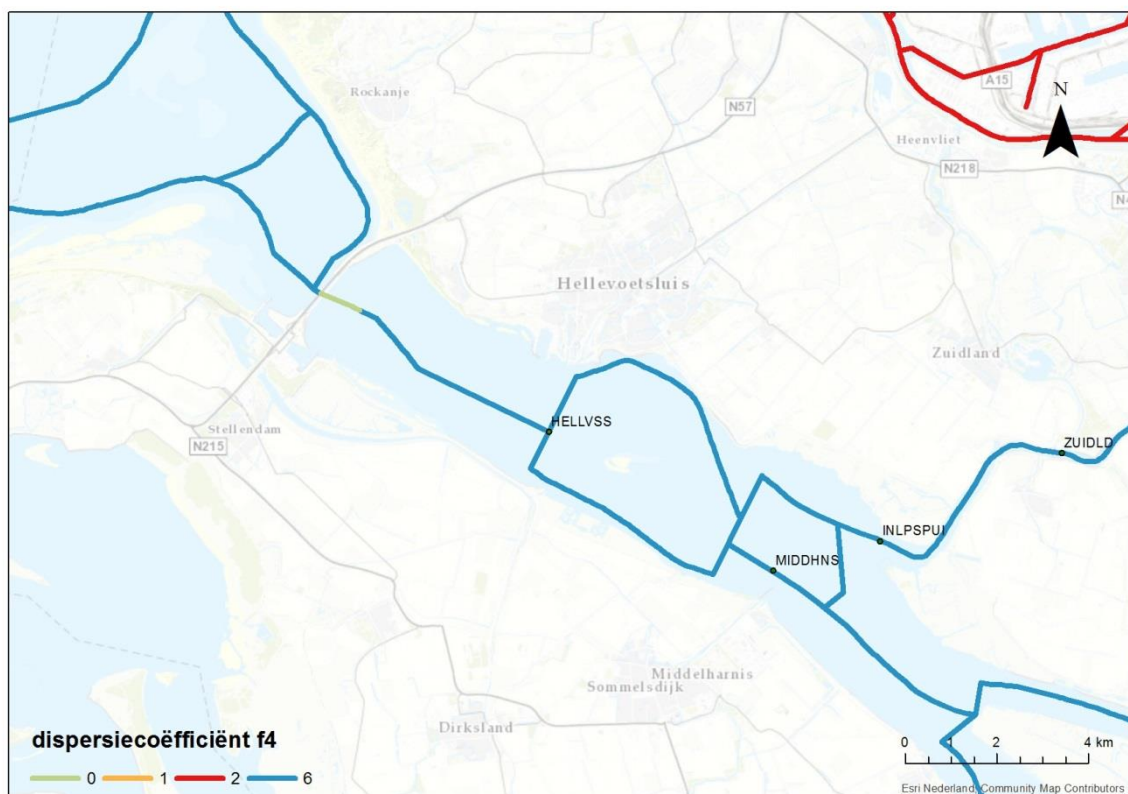
De belangrijkste parameter voor zout is f_4 voor de stratificatiedispersie. Wanneer de standaardwaarde volgens de theorie van $f_4=6$ werd gekozen, kwam te veel het zout het model in. Om dit te voorkomen is f_4 in de Nieuwe Waterweg en het Hartelkanaal gelijkgesteld aan 2 (bovenste plot Figuur 5.1). De laagste waarde voor f_4 is 1, welke is gehanteerd in de Oude Maas en het Spui. Deze lage waarde was nodig om de saliniteit in het middengebied voldoende dichtbij gemeten saliniteits te krijgen. De rest van het modeldomein heeft een waarde van f_4 van 6. In een discussie worden deze keuzen voor afwijkende waarden ten opzichte van de theorie toegelicht, zie paragraaf 5.4.1.

De parameter voor Taylor dispersie heeft in het grootste deel van het model de waarde die wordt aanbevolen in de theorie ($f_3=25$, onderste plot Figuur 5.1). In de Hollandsche IJssel en Lek is gekozen voor een waarde van 100, welke beter overeen kwam met studies naar de dispersiecoëfficiënt in deze laag-dynamische riviertakken (Kuijper 2016; 2017). Ook deze keuze wordt nader onderbouwd in paragraaf 5.4.1.



Figuur 5.1 Resultaat voor de kalibratieparameters voor zout: f4 (boven) en f3 (onder)

Met deze kalibratieparameters werd opgemerkt dat een zoutlek door de sluisen voorkwam, ook als de Haringvlietsluizen gesloten waren. Dit zoutlek resulteerde in een onrealistisch hoog zouttransport door de sluisen. De reden dat dit optreedt is binnen dit project niet geheel duidelijk geworden. Wel is duidelijk geworden dat het met de dispersie van zout te maken heeft. Om dit onrealistische zouttransport te voorkomen zijn de kalibratieparameters f_4 en f_3 op 0 gezet voor 1 km aan de oostzijde van de Haringvlietsluizen (Figuur 5.2 voor f_4). Het gaat om het deel van de tak "Haringvliet7" van 'chainage' 4981 m tot 5981 m. De keuze van 1 km is willekeurig, maar is voldoende om het onrealistische zouttransport door de Haringvlietsluizen te voorkomen.



Figuur 5.2 Detail van kalibratieparameter f_4 bij de Haringvlietsluizen

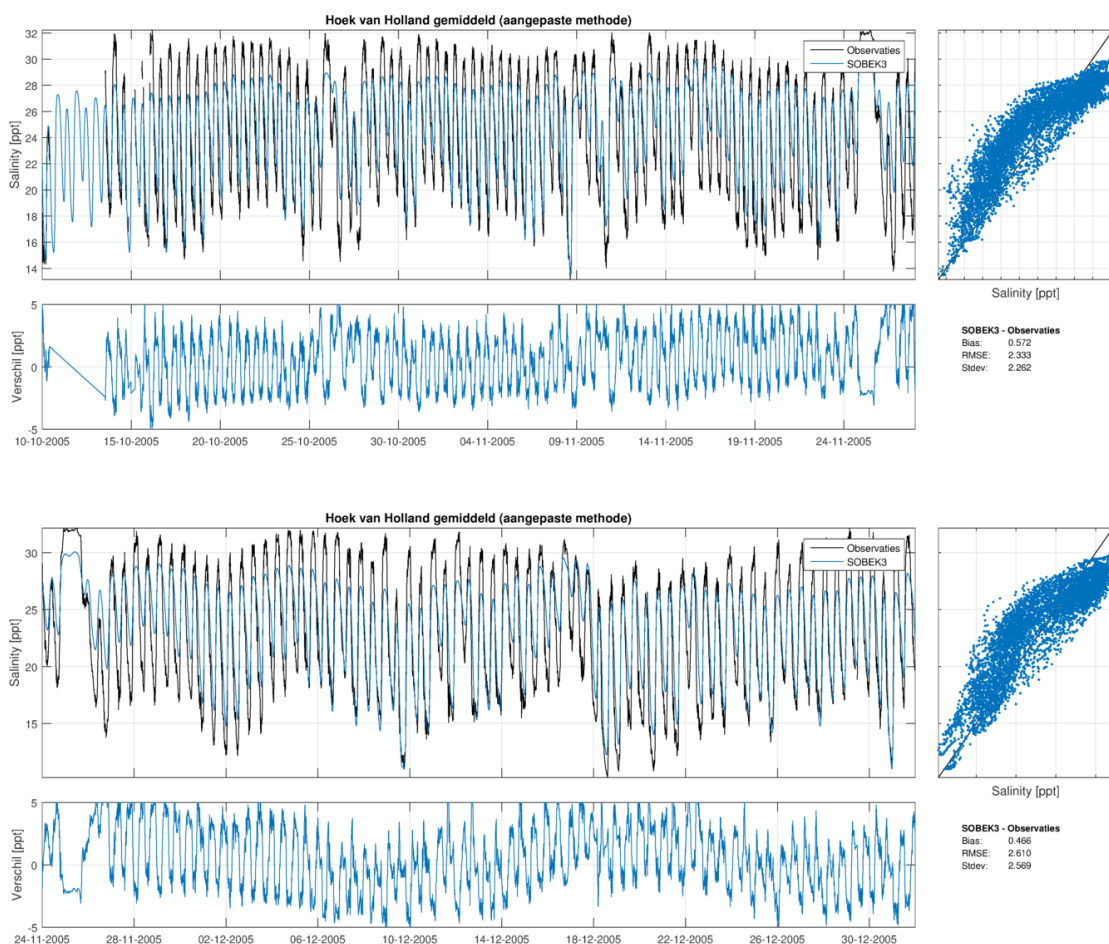
5.2.3 Resultaten noordrand

Zout komt het model vooral binnen via de Nieuwe Waterweg. Om deze reden is Hoek van Holland de eerste locatie op de noordrand waar resultaten worden getoond. Vervolgens worden voor de noordrand enkele resultaten voor de Brienoordbrug getoond. In volgende secties wordt een selectie van de resultaten voor de zuidrand, het middengebied en de Hollandsche IJssel en Lek getoond. Alle resultaten voor de vijf kalibratieperioden zijn beschikbaar in bijlage C.1. Waar beschikbaar worden ter vergelijking ook SOBEK-RE NDB model resultaten getoond.

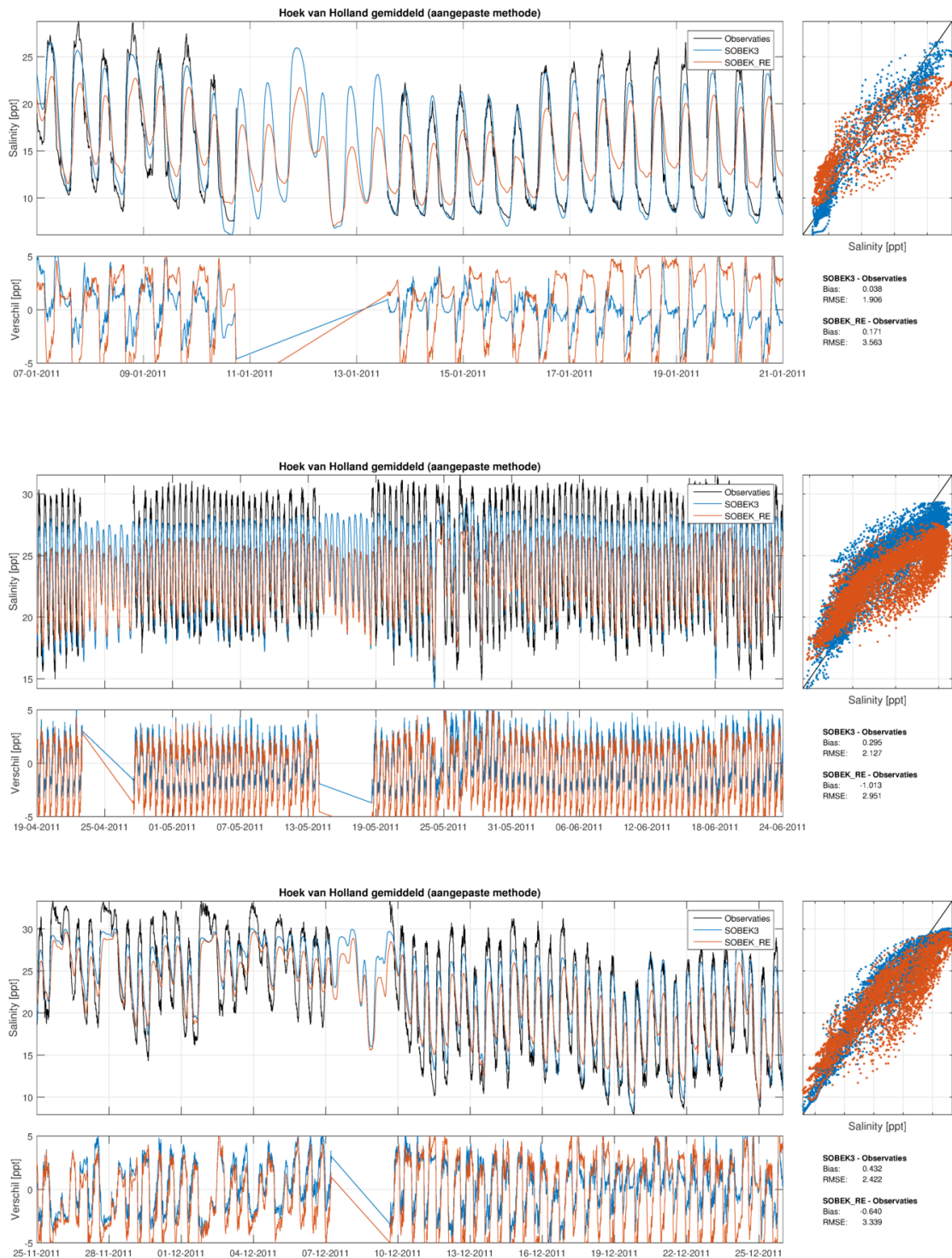
Omdat Hoek van Holland een belangrijk meetstation is voor de herkalibratie, worden voor alle vijf de kalibratieperioden de resultaten bij Hoek van Holland getoond (Figuur 5.3 en Figuur 5.4). Deze figuren laten zien dat gemiddeld over getijperioden de berekende saliniteit niet veel afwijkt van de saliniteit op basis van metingen. Het SOBEK 3 RMM model onderschat de piekconcentraties en overschat juist de laagste concentraties, ofwel de variatie gedurende het getij is kleiner in het model dan volgens de metingen. Zoals aangegeven in paragraaf 0 is

Hoek van Holland de enige locatie, waarvoor de dieptegemiddelde concentratie is bepaald met de aangepaste methode. Aangezien de saliniteit onderin het profiel vaak weinig variatie lijkt te vertonen dichtbij Hoek van Holland, levert de aangepaste methode minder variatie op dan de standaardmethode. Met de standaardmethode zou de variatie in saliniteit op basis van metingen groter zijn.

Tijdens perioden met lage afvoeren (bijvoorbeeld 24-11 tot 5-12 2005, bovenste plot in Figuur 5.3) ligt de piekconcentratie dichtbij 31 psu, welke op de rand Maasmond is opgelegd. Voor tijdseries van de afvoer wordt verwezen naar de onderste plots van de figuren in bijlage D. Bij hogere afvoeren (bijvoorbeeld 13-1 tot 18-1 2011, bovenste plot in Figuur 5.4) zakt de piekconcentratie, net als in de metingen, naar waarden rond 25 psu. Voor 2011 zijn ook SOBEK-RE resultaten beschikbaar. Over het algemeen geeft het SOBEK-RE NDB model minder variatie in saliniteit dan het SOBEK 3 RMM model. Het SOBEK 3 RMM model geeft de variatie ten opzichte van het SOBEK-RE NDB model beter weer, terwijl ook het SOBEK 3 RMM model de variatie onderschat.

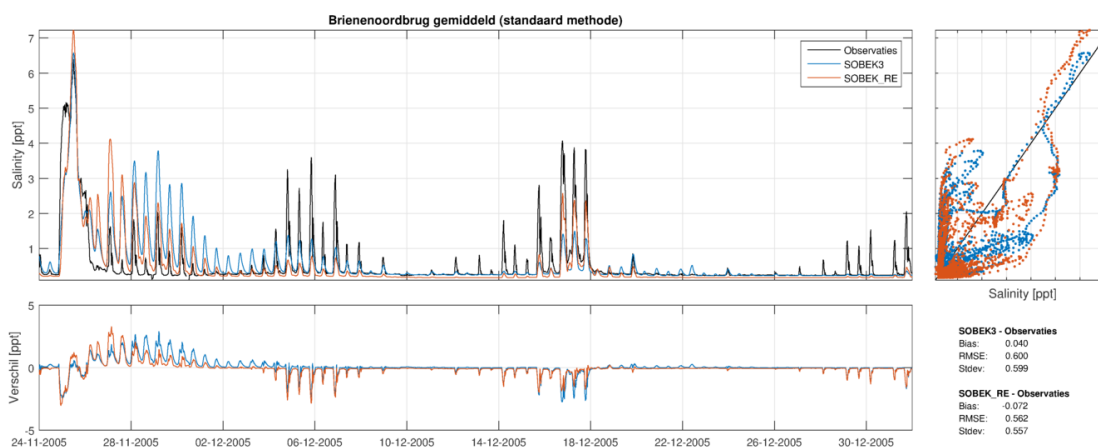


Figuur 5.3 Berekende en gemeten saliniteit bij Hoek van Holland voor de twee kalibratieperioden in 2005

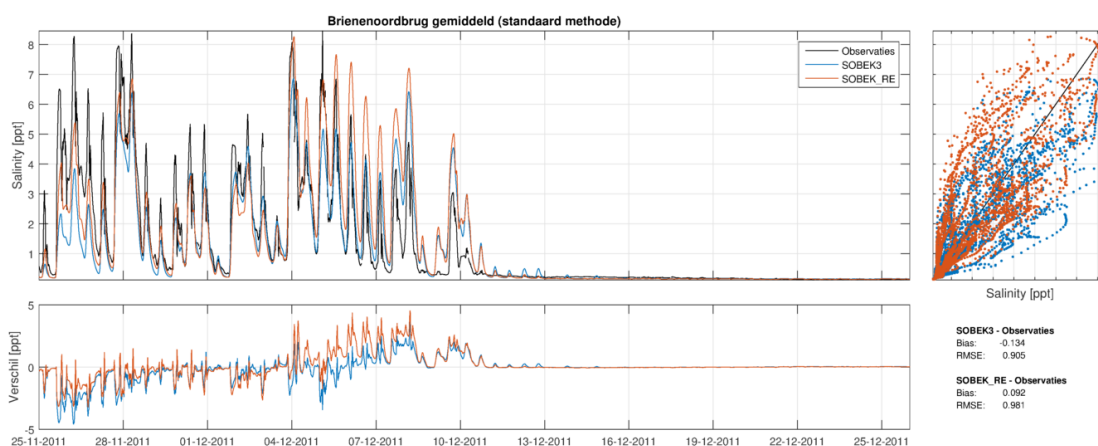


Figuur 5.4 Saliniteit berekend op basis van het SOBEK 3 RMM model en ter vergelijking het SOBEK-RE NDB model, en gemeten saliniteit bij Hoek van Holland voor de drie kalibratieperioden in 2011

In de Nieuwe Maas bij de Brienoordbrug worden pieken in saliniteit op 24-11-2005 (Figuur 5.5) en de hoge saliniteits eind november- begin december 2011 (Figuur 5.6) op hetzelfde moment en met een maximaal verschil van 2 psu berekend. Na het optreden van relatief hoge saliniteits zakken vaak de berekende saliniteits niet snel genoeg in de periode met verzilting in een groot deel van de Rijn-Maasmonding (december 2005; Figuur 5.5), waardoor het SOBEK 3 RMM model vaak de saliniteit enkele dagen daarna overschat. Vanaf 5 december 2005 is zichtbaar dat het SOBEK 3 RMM model de pieken van saliniteit (fors) onderschat. Ook voor station Lekhaven onderschat het SOBEK 3 RMM model voor grote delen van deze kalibratieperiode de saliniteit (bijlage C.1). Een vergelijkbare onderschatting treedt op in de aanloop naar de verziltingsgebeurtenis in de periode van november 2005 bij Lekhaven en bij de Brienoordbrug (bijlage C.1).

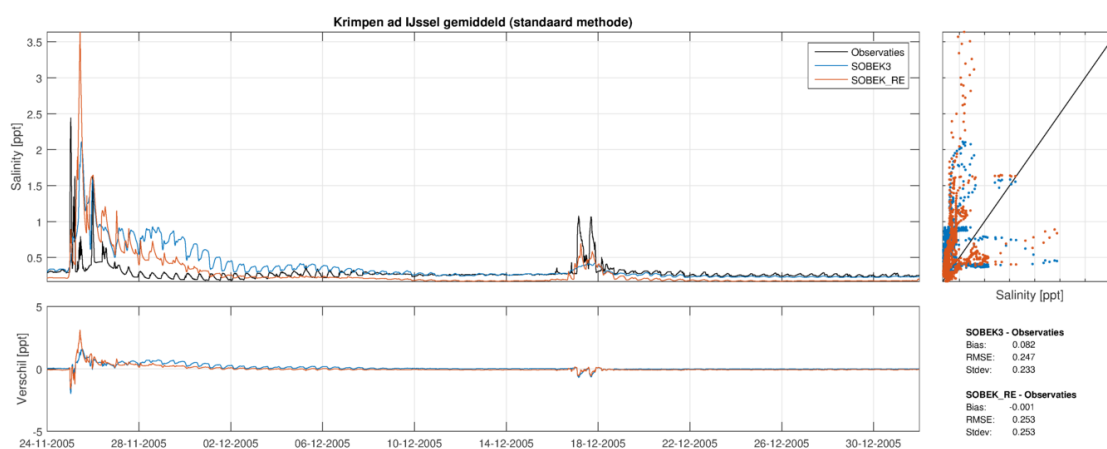


Figuur 5.5 Berekende en gemeten saliniteit bij de Brienoordbrug voor december 2005

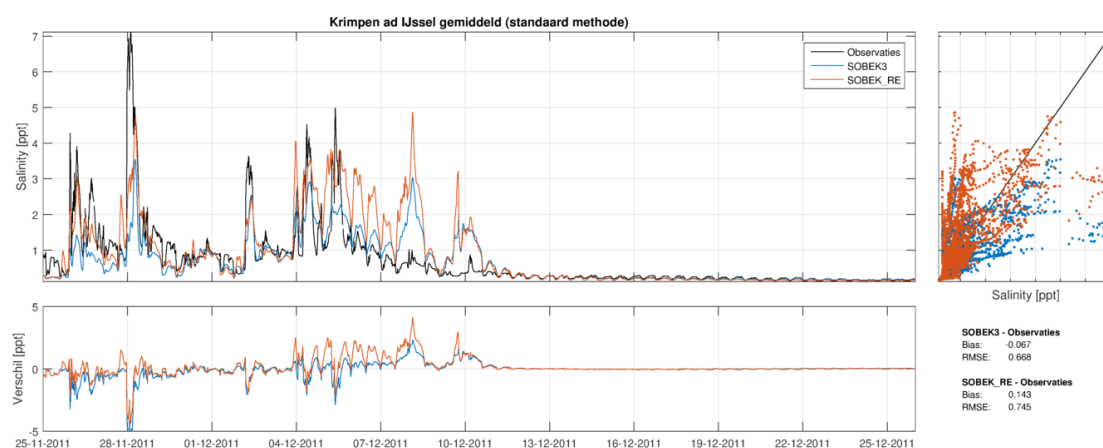


Figuur 5.6 Berekende en gemeten saliniteit bij de Brienoordbrug voor december 2011

Ook bij Krimpen aan de IJssel blijft de saliniteit enkele dagen te lang hoog na een piek in saliniteit (Figuur 5.7 en Figuur 5.8). Ook voor de kalibratieperiode van november 2005 treedt dit op. Voor de andere drie kalibratieperioden is de saliniteit zowel in het model als volgens metingen relatief laag (bijlage C.1).



Figuur 5.7 Berekende en gemeten saliniteit bij Krimpen aan de IJssel voor december 2005

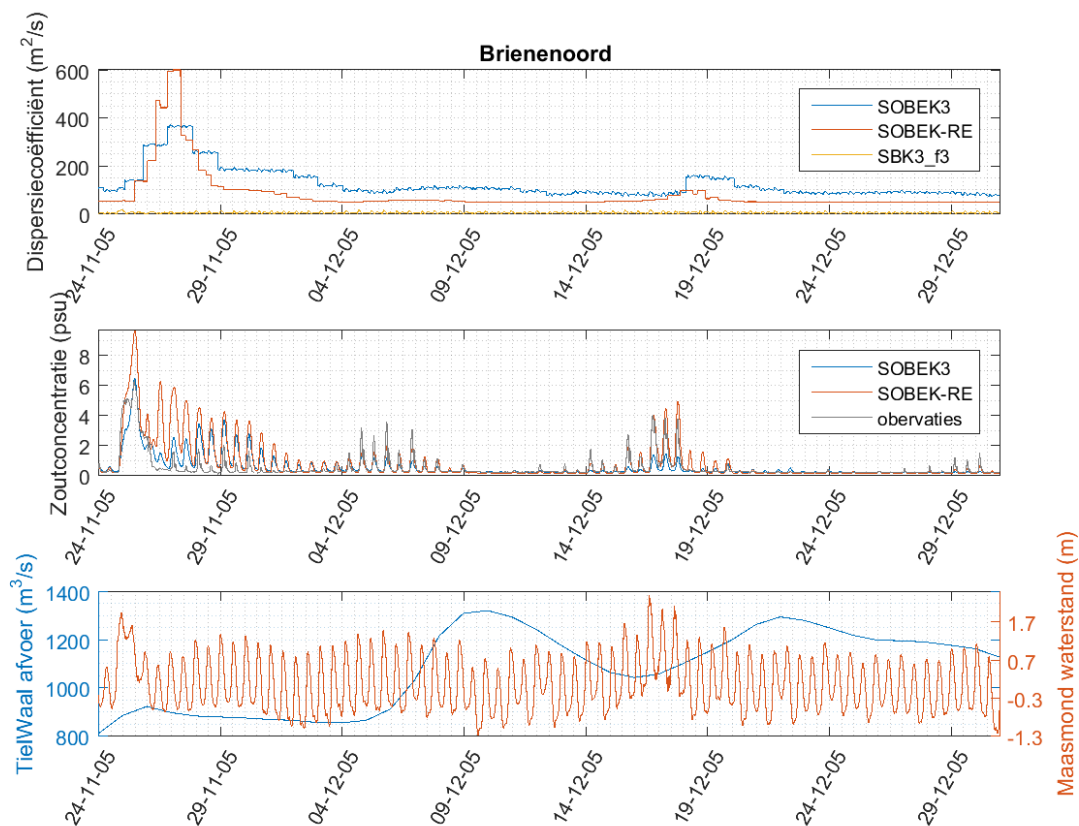


Figuur 5.8 Berekende en gemeten saliniteit bij Krimpen aan de IJssel voor december 2011

De saliniteit wordt voor een groot deel bepaald door de dispersiecoëfficiënt. Om deze reden is geëvalueerd of het verloop van de dispersiecoëfficiënt overeen komt met de verwachting op basis van vergelijkingen 1.1 en 1.2. Het verloop in de tijd van de dispersiecoëfficiënt is getoond samen met de tijdseries van saliniteit, Waalafvoer en waterstandsvariatie voor locaties waar deze informatie beschikbaar was, zie ook bijlage D².

Bij de Brienoordbrug is de dispersiecoëfficiënt verhoogd, wanneer de getijgemiddelde saliniteit is verhoogd voor december 2005 (Figuur 5.9). Dit is volgens verwachting. Wanneer de rivierafvoer toeneemt en zout nog aanwezig is, zou de dispersiecoëfficiënt licht toe moeten nemen volgens vergelijking 1.2. Dit komt niet duidelijk naar voren uit de figuren voor de kalibratieperiode voor zowel het SOBEK 3 RMM model als het SOBEK-RE NDB model. De piek in de dispersiecoëfficiënt wordt door de twee modellen op een vergelijkbaar moment berekend, terwijl de variatie gedurende de kalibratieperiode voor het SOBEK-RE NDB model groter is. Conclusies over welk model de dispersiecoëfficiënt beter berekent, kunnen op basis van deze beperkte analyse niet gegeven worden.

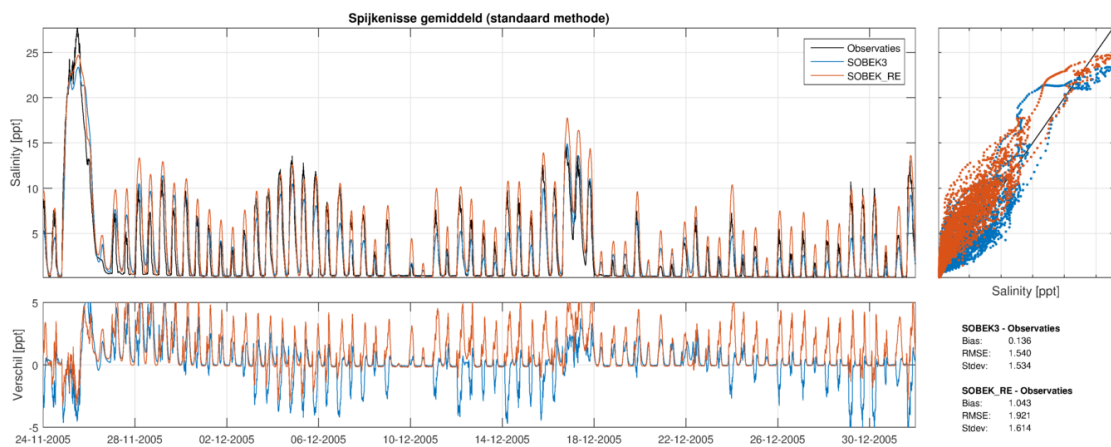
² Deze analyse geeft een eerste inzicht in hoe de theorie vertaald wordt naar een werkelijke situatie. Dit geeft onder andere een beeld van het voorspellende vermogen van het model.



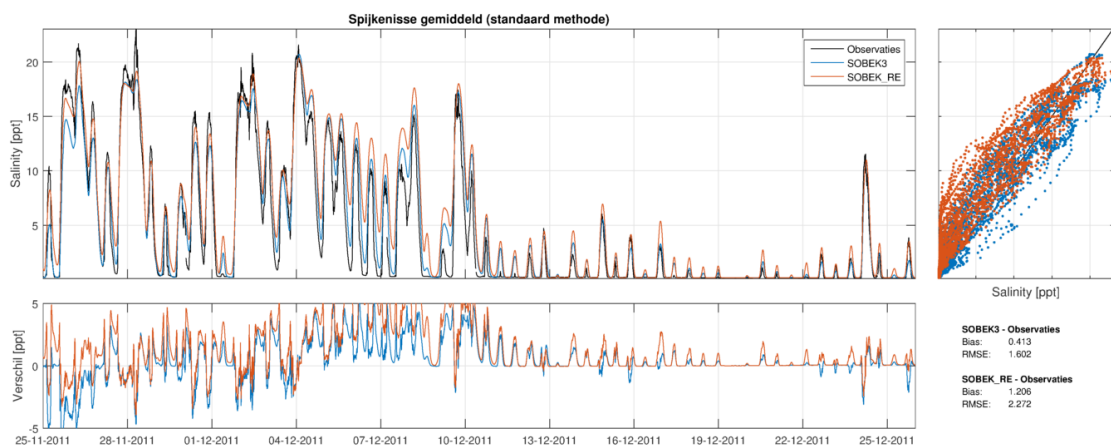
Figuur 5.9 De dispersiecoëfficiënt (m²/s), saliniteit (psu), afvoer bij Tiel (m³/s) en waterstand in de Maasmond (m NAP) bij de Brienenoordbrug voor december 2005.

5.2.4 Resultaten middengebied en zuidrand

Net als bij Hoek van Holland, wijkt de berekende saliniteit bij Spijkenisse (middengebied) gemiddeld over getijperioden niet veel af de saliniteit bepaald op basis van metingen (Figuur 5.10 en Figuur 5.11 voor dezelfde twee kalibratieperioden als eerder getoond). Het SOBEK 3 RMM model onderschat geregeld de piekconcentraties. Voor Spijkenisse is de waarde van f_4 op de Nieuwe Waterweg bepalend. Met de waarde van $f_4=2$ wijkt de saliniteit hier gemiddeld niet veel af van metingen. In de discussie op het eind van dit hoofdstuk worden redenen gegeven voor de keuze van de deze lage waarde voor f_4 .

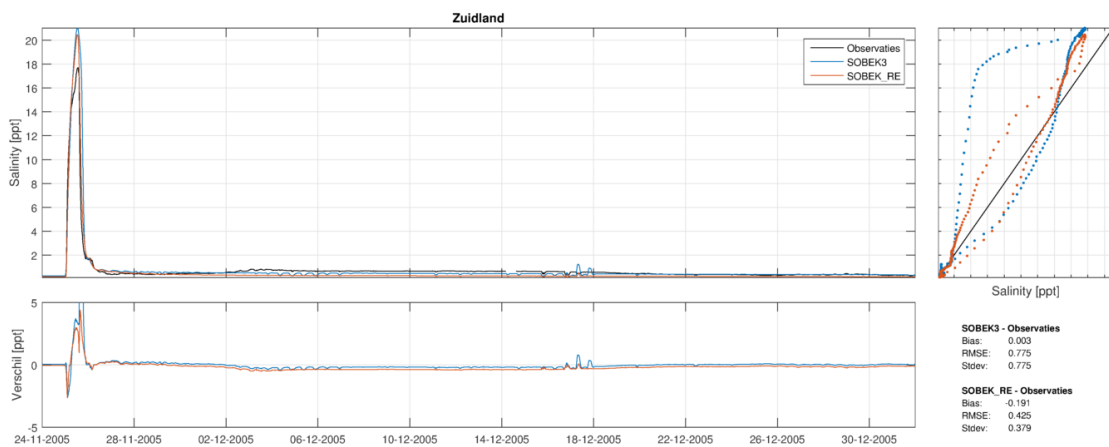


Figuur 5.10 Berekende en gemeten saliniteit bij Spijkensisse voor december 2005

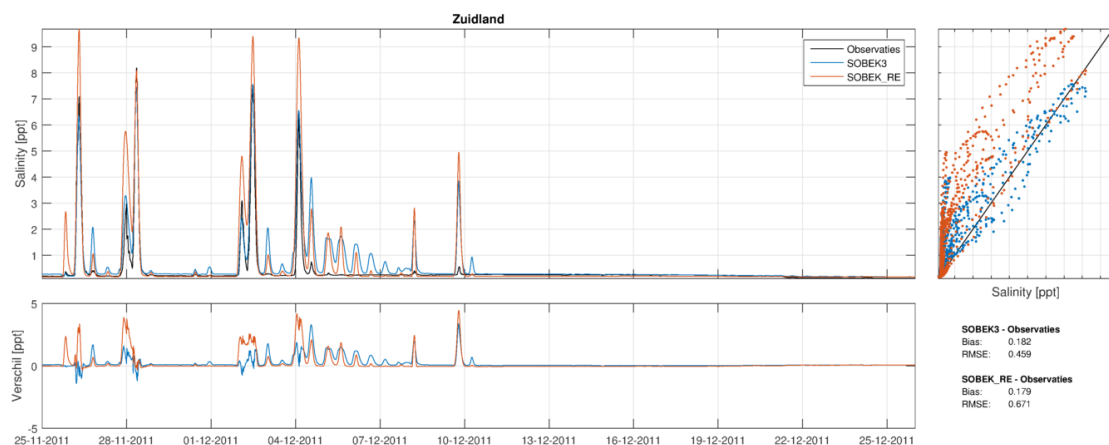


Figuur 5.11 Berekende en gemeten saliniteit bij Spijkensisse voor december 2011

Voor Zuidland (Bernisse; middengebied) zijn de resultaten voor wederom dezelfde kalibratieperiodes weergegeven in Figuur 5.12 en Figuur 5.13. De hoge piek in november 2005 wordt qua timing goed berekend door het SOBEK 3 RMM model. De maximale berekende waarde is maximaal 5 psu hoger dan de gemeten saliniteit en wordt vooral veroorzaakt door een klein verschil in de tijd dat de piek optreedt (Figuur 5.12). In de periode van december 2011 blijft zout een aantal keer te lang hangen, waardoor de saliniteit wordt overschat na een zoutindringingsgebeurtenis (bijvoorbeeld na 2-12 en 10-12 2011 in Figuur 5.13).



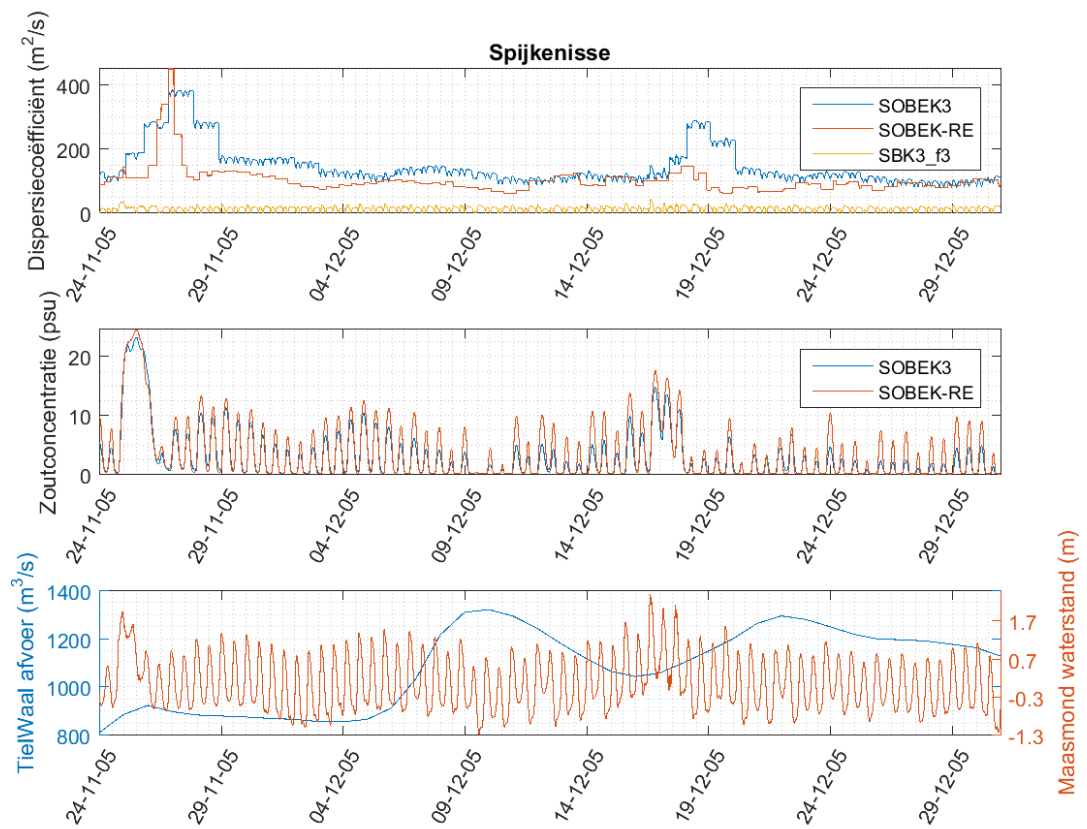
Figuur 5.12 Berekende en gemeten saliniteit bij Zuidland voor december 2005



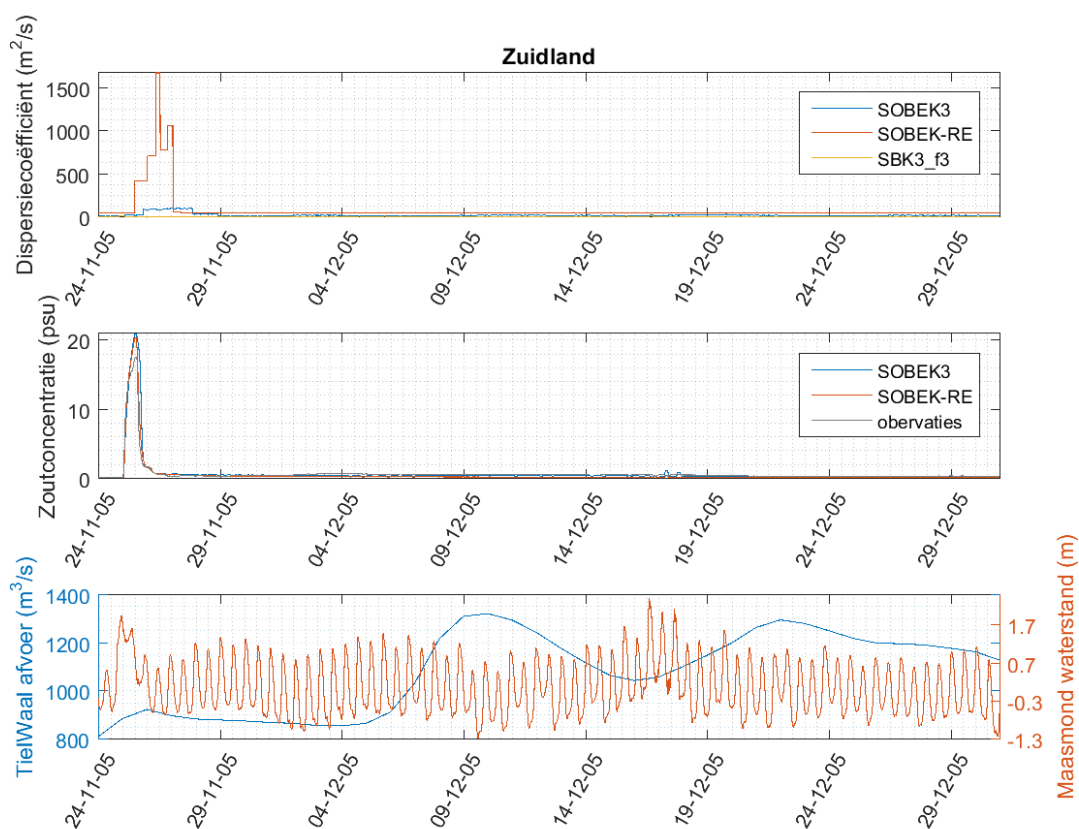
Figuur 5.13 Berekende en gemeten saliniteit bij Zuidland voor december 2011

Het verloop van de dispersiecoëfficiënt voor Spijkenisse is getoond in Figuur 5.14 voor december 2005 en voor de andere kalibratieperioden in bijlage D. De dispersiecoëfficiënt is verhoogd tijdens hogere saliniteits, zoals verwacht. Deze dispersiecoëfficiënt is vooral bepalend voor hoeveel zout via dispersie naar de zuidrand doordringt.

De dispersiecoëfficiënt bij Spijkenisse tijdens de zoutpiek eind november 2005 is ongeveer vier keer groter dan bij Zuidland (Figuur 5.15) volgens het SOBEK 3 RMM model. Wanneer de resultaten van het SOBEK-RE en SOBEK 3 RMM model worden vergeleken valt op dat de dispersiecoëfficiënt in Zuidland op dat moment ongeveer 1600 m²/s is, terwijl die volgens het SOBEK 3 RMM model 100 m²/s is. Dit zou verklaard kunnen worden door de eigen monding aanpak in SOBEK 3 of door de lage waarde voor f4 die voor het SOBEK 3 RMM model gekozen moest worden. Een andere verklaring is dat de getijvariatie in afvoer te groot is. Voor waterstand wordt de getijvariatie voor sommige stations in dit deelgebied overschat met ongeveer 0,1 m (paragraaf 5.3.3). Dit kan leiden tot een overschatting van het advectieve transport van zout naar de zuidrand in het model, waardoor het dispersieve transport ter compensatie verlaagd moest worden. Welke van de twee modellen de werkelijkheid beter beschrijft is niet goed op te maken uit de beschikbare metingen.



Figuur 5.14 De dispersiecoëfficiënt (m²/s), saliniteit (psu), afvoer bij Tiel (m³/s) en waterstand in de Maasmond (m NAP) bij Spijkenisse voor december 2005

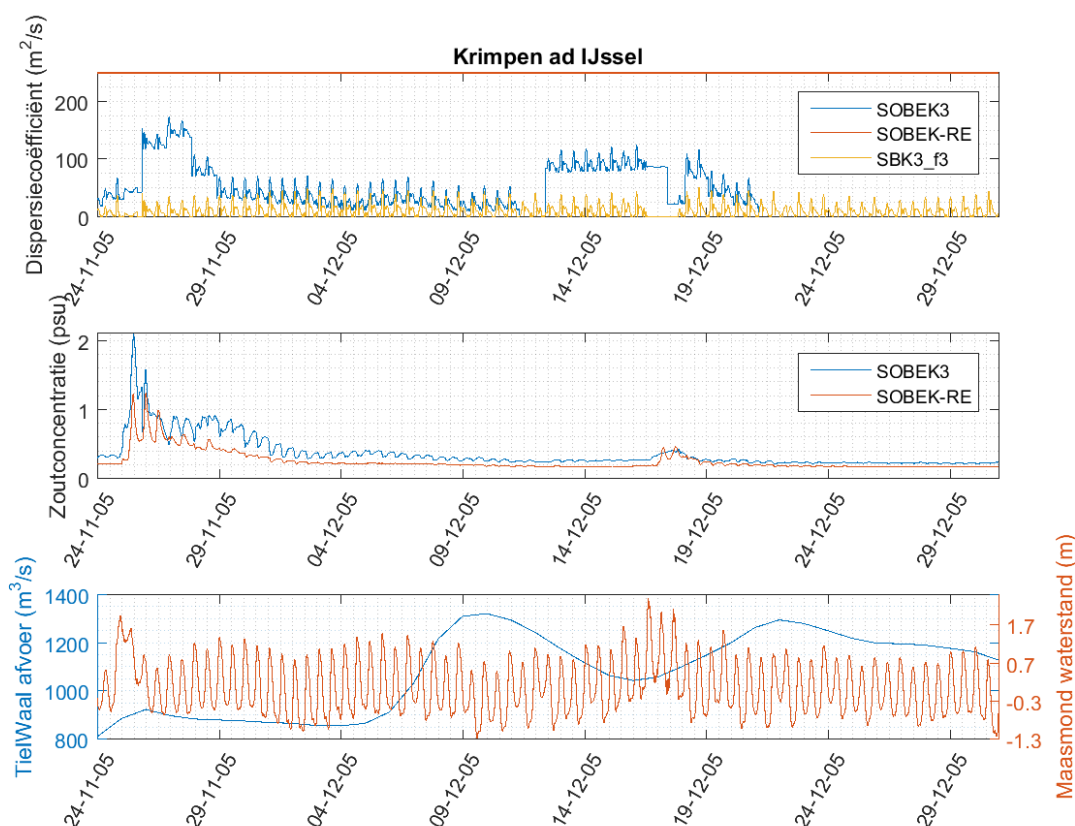


Figuur 5.15 De dispersiecoëfficiënt (m^2/s), saliniteit (psu), afvoer bij Tiel (m^3/s) en waterstand in de Maasmond (m NAP) bij Zuidland voor december 2005

5.2.5 Resultaten Hollandsche IJssel en Lek

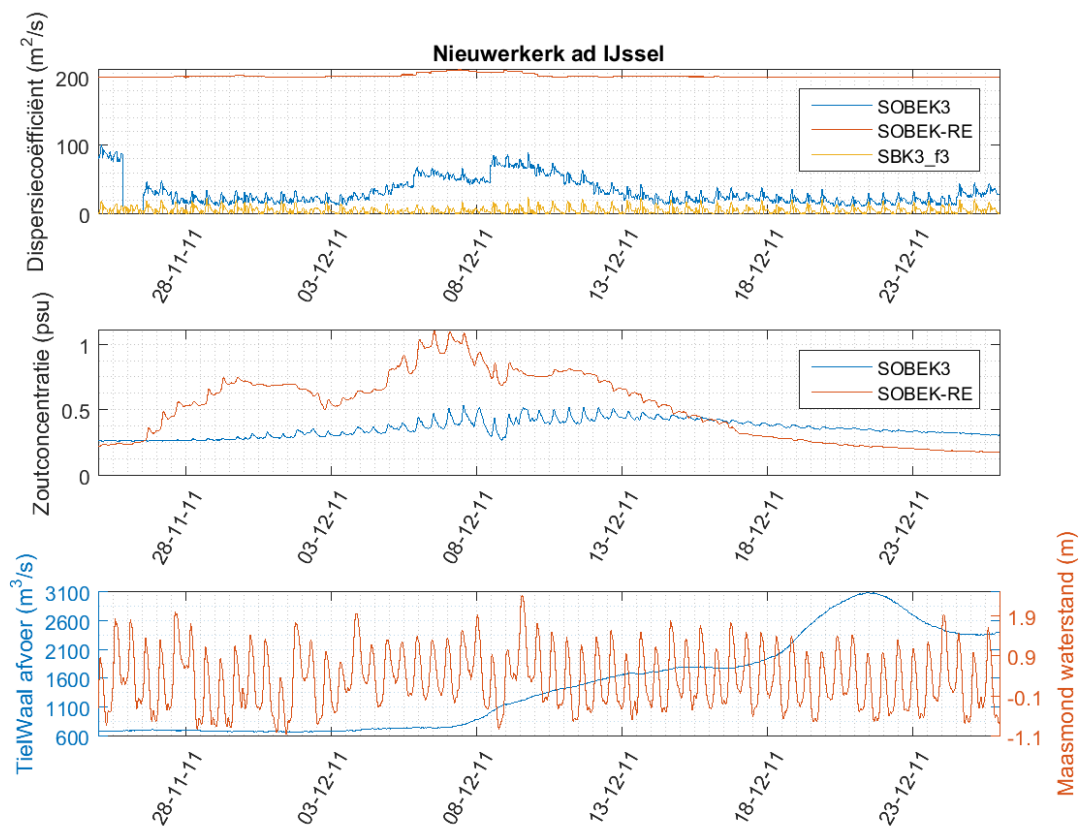
Voor de Hollandsche IJssel en de Lek is de Taylor dispersie parameter (f_3) gekalibreerd en is voor de stratificatiedispersie (f_4) de standaardwaarde van 6 aangehouden. Als uitgangspunt zijn de studies van Kuijper (2016; 2017) gehanteerd, waarin voor de Hollandsche IJssel en de Lek analytisch waarden voor de dispersiecoëfficiënt zijn afgeleid op basis van metingen. Halverwege deze takken is de saliniteit en de berekende dispersiecoëfficiënt bepaald bij Nieuwerkerk aan de IJssel en Bergambacht. Voor deze locaties zijn de gemeten saliniteits niet beschikbaar binnen dit project. Om deze reden worden alleen de figuren met het verloop van de dispersiecoëfficiënt getoond en kan berekende saliniteit alleen worden vergeleken met de concentratie berekend met het SOBEK-RE NDB model. Om de onderschatting van saliniteit berekend met het SOBEK 3 RMM model ten opzichte van het SOBEK-RE NDB model te beperken is gekozen voor een waarde van $f_3=100$. Hierdoor hebben de Hollandsche IJssel en Lek een hogere waarde dan de andere takken waar $f_3=25$ (Figuur 5.1).

Voor Krimpen aan den IJssel is een tijdserie van de dispersiecoëfficiënt getoond in Figuur 5.16. De dispersiecoëfficiënt lijkt hier te variëren met perioden van lozing of onttrekking op de Hollandsche IJssel, gezien het plotseling dalen en stijgen van de dispersiecoëfficiënt. De f_3 -term heeft, zoals verwacht, een groter aandeel in de dispersiecoëfficiënt dan bij stations meer zeewaarts (zie bijvoorbeeld Figuur 5.9). Toch wordt ook bij Krimpen aan den IJssel de dispersiecoëfficiënt meestal bepaald door de f_4 -term (de blauwe lijn ligt meestal duidelijk boven de gele lijn in Figuur 5.16).



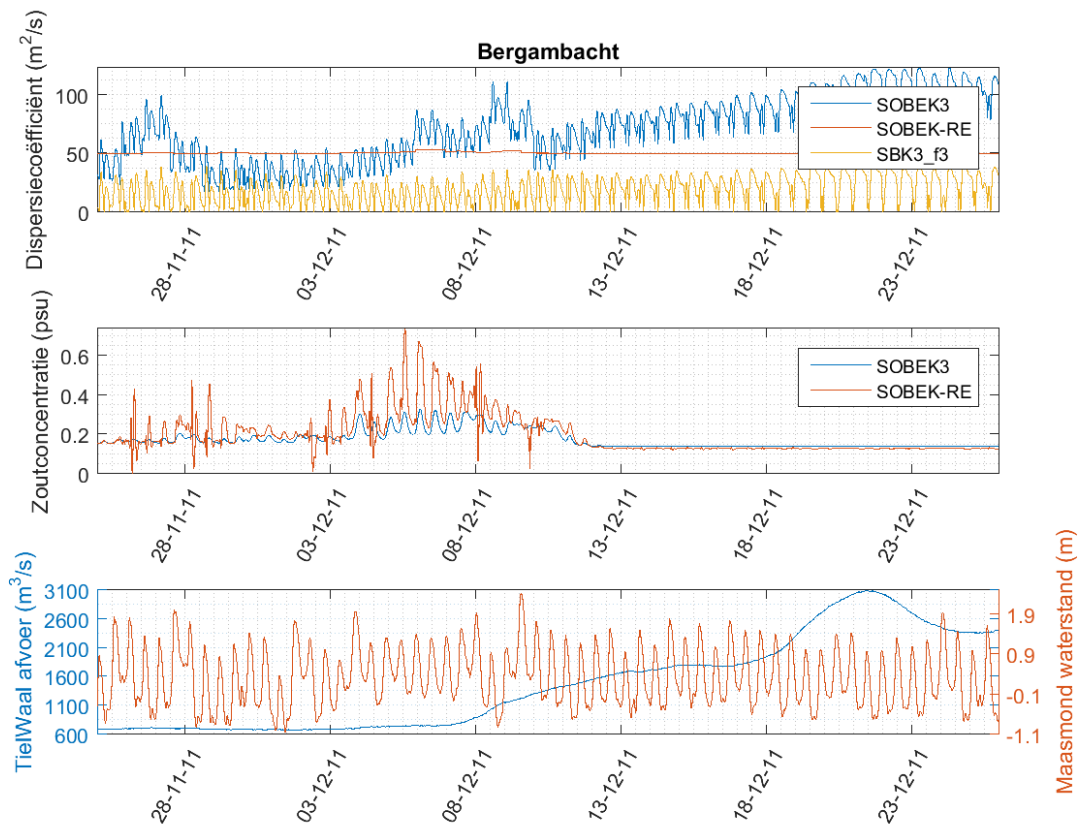
Figuur 5.16 De dispersiecoëfficiënt (m^2/s), saliniteit (psu), afvoer bij Tiel (m^3/s) en waterstand in de Maasmond (m NAP) bij Krimpen aan den IJssel voor december 2005.

In de Hollandse IJssel bij Nieuwerkerk aan de IJssel was de berekende saliniteit met het SOBEK-RE NDB model maximaal 1 psu in de periode van november-december 2011 (middelste plot Figuur 5.17). In vergelijking met het SOBEK-RE model valt op dat de dispersiecoëfficiënt in het SOBEK 3 RMM model meer varieert en dat de dispersiecoëfficiënt bij Nieuwerkerk aan de IJssel ruim 3 maal zo klein is. De bijdrage van Taylor dispersie is klein ten opzichte van de stratificatiedispersie. Dit komt overeen met Kuijper (2016), waarin getoond wordt dat de bijdrage van Taylor dispersie klein is in de door hem beschouwde periode met metingen. In Kuijper (2016) wordt een range bepaald van de dispersiecoëfficiënt halverwege de Hollandse IJssel tussen 10 tot 65 m^2/s . De berekende dispersiecoëfficiënt met het SOBEK 3 RMM model ligt ongeveer in deze range, terwijl het SOBEK-RE NDB model duidelijk hogere waarden berekent.



Figuur 5.17 De dispersiecoëfficiënt (m^2/s), saliniteit (psu), afvoer bij Tiel (m^3/s) en waterstand in de Maasmond (m NAP) bij Nieuwerkerk aan de IJssel voor december 2011

Bij Bergambacht in de Lek is de saliniteit berekend met het SOBEK-RE NDB model aan het eind van vloed wat verhoogd tussen 4-12 en 11-12 2011 (Figuur 5.18). Dan is de dispersiecoëfficiënt vooral verhoogd in de uitkomsten van het SOBEK 3 RMM model. Met de stijgende afvoer bij Tiel in de Waal in deze kalibratieperiode zou ook de dispersiecoëfficiënt moeten stijgen volgens vergelijking 1.2. De bijdrage van de stratificatiedispersie neemt dan toe. Dit is zichtbaar in het SOBEK 3 RMM modelresultaat voor de hele kalibratieperiode. Hoewel de Taylor dispersie relatief een grotere rol speelt dan bij Nieuwerkerk aan de IJssel, is over het geheel van de kalibratieperiode is de stratificatiedispersie belangrijker dan de Taylor dispersie. De waarden van de dispersiecoëfficiënt (beide bijdragen) komen in beide modellen redelijk overeen met de range van 25-80 m^2/s die in Kuijper (2017) is afgeleid bij Bergambacht.



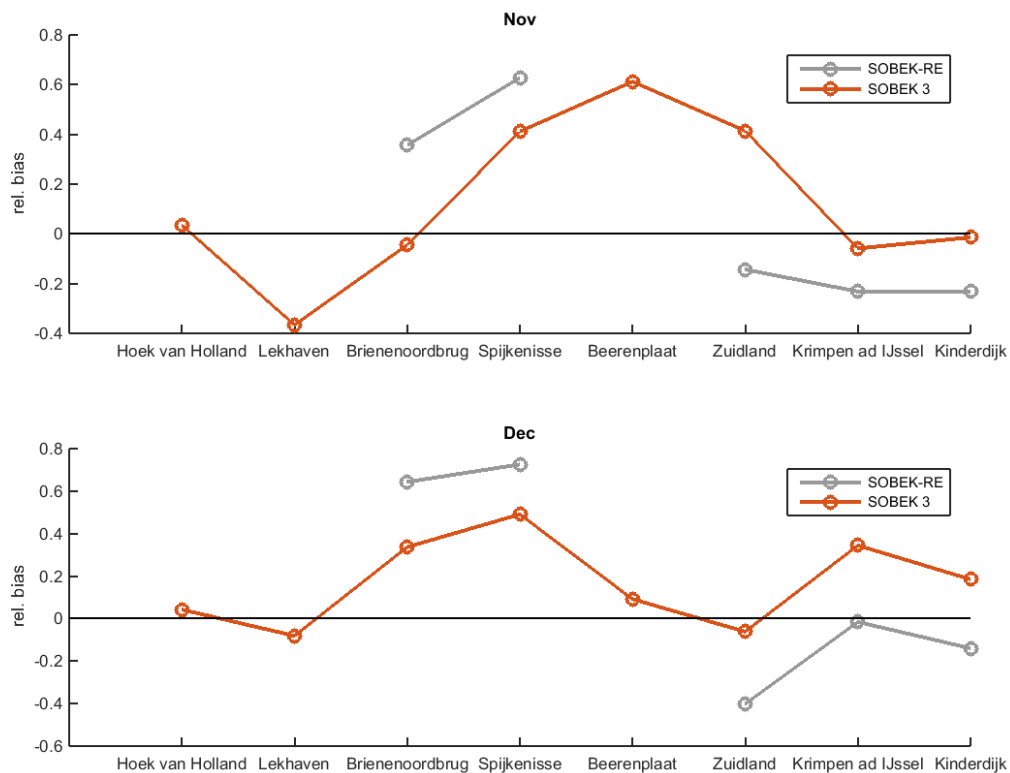
Figuur 5.18 De dispersiecoëfficiënt (m^2/s), saliniteit (psu), afvoer bij Tiel (m^3/s) en waterstand in de Maasmond (m NAP) bij Bergambacht voor december 2011

Binnen dit project was niet het kalibreren van de f4 en f3 voor de Hollandsche IJssel en Lek opgenomen. De eerste poging die toch is uitgevoerd geeft waarden voor de dispersiecoëfficiënt die meestal vrijwel binnen de range liggen zoals berekend op basis van metingen (Kuijper (2016;2017), terwijl dit voor het SOBEK-RE NDB model vaak niet het geval is. Er is nog niet geanalyseerd of de saliniteit per conditie de juiste respons geeft, maar globaal lijkt de gereproduceerde saliniteit in overeenstemming met de rivierafvoer en het getij. Een nadere kalibratieslag voor f3 en f4 is nodig. Een aanbevolen aanpak is om een vergelijking te maken met gemeten saliniteit bij de zoutmeetstations in deze takken voor verschillende condities en de waarden voor de dispersiecoëfficiënt te vergelijken met Kuijper (2016; 2017).

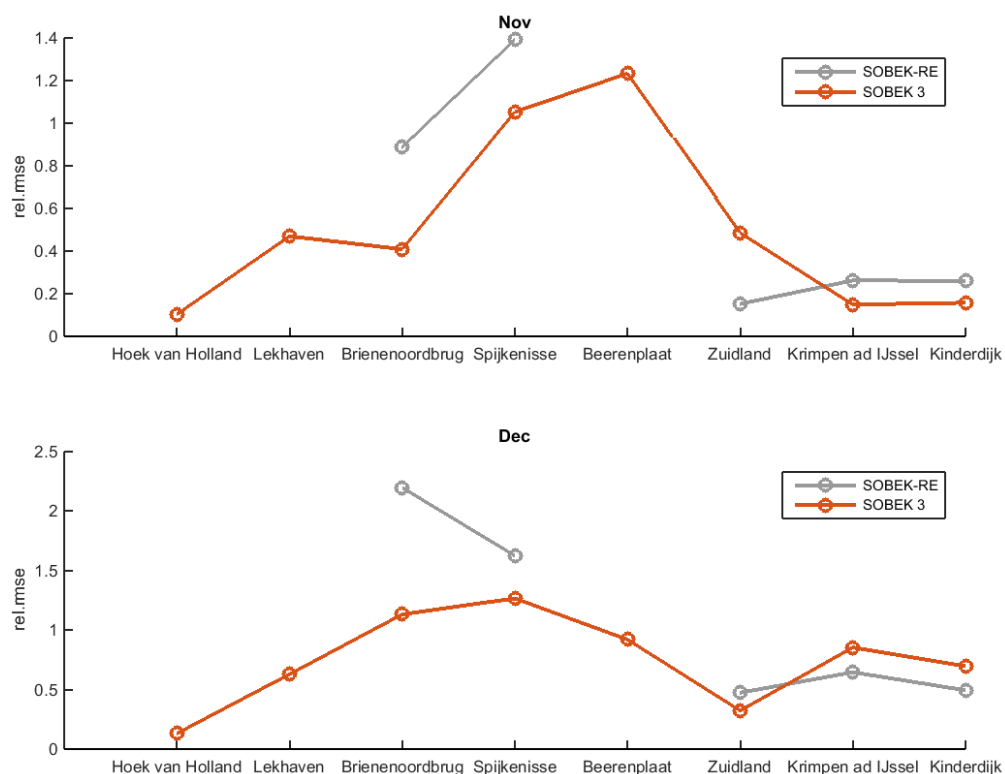
5.2.6 Statistieken

Om de prestatie van het SOBEK 3 RMM model in vergelijking met het SOBEK-RE NDB model te bepalen gemiddeld over de kalibratieperioden zijn de relatieve bias (Figuur 5.19) en de RMSE (Figuur 5.20) weergegeven voor stations waar metingen over de hele kalibratieperiode beschikbaar zijn voor 2005. Stations dichtbij zee hebben doorgaans een hogere bias en RMSE, omdat de variatie in saliniteit daar groter is dan verder landinwaarts. Om de stations vergelijkbaar te maken zijn de relatieve bias en RMSE weergegeven, wat betekent dat de bias en RMSE zijn gedeeld door de gemiddelde saliniteit.

Voor het SOBEK 3 RMM model ligt de relatieve bias bij Hoek van Holland rond 0 en is maximaal 0,5 bij de Beerenplaat in november 2005. Dit betekent dat de bias maximaal de helft van de gemiddelde saliniteit is. De relatieve RMSE is voor de Beerenplaat maximaal met een waarde rond 1. Dit wijst erop dat de variatie berekend door het model niet goed overeenkomt met de gemeten variatie in saliniteit.

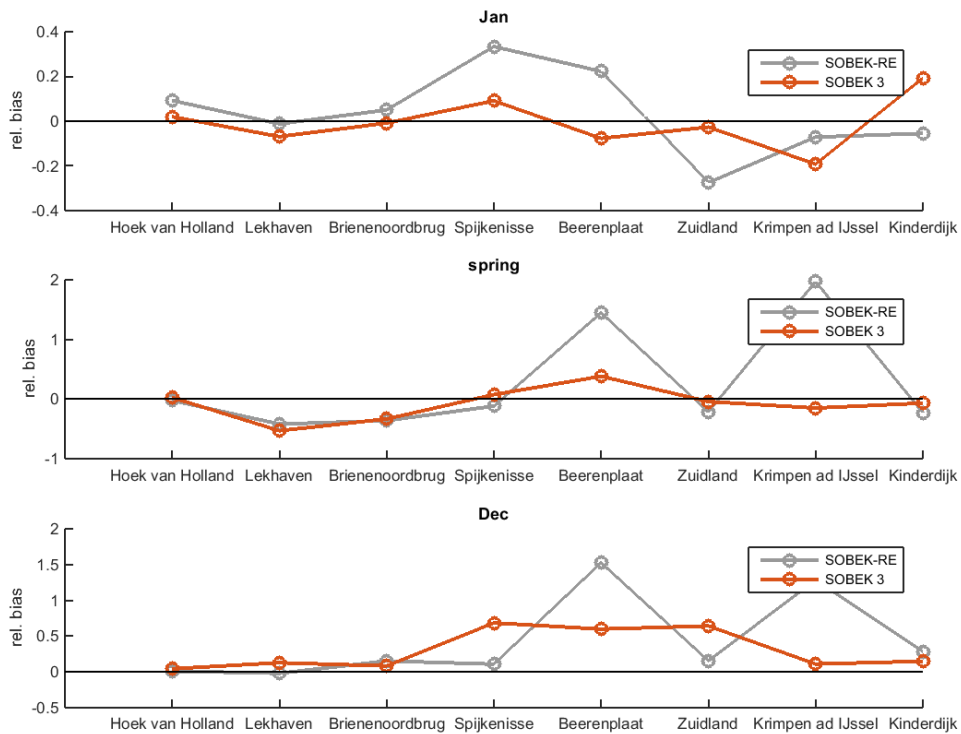


Figuur 5.19 De relatieve bias van saliniteit voor verschillende stations voor de twee kalibratieperioden in 2005

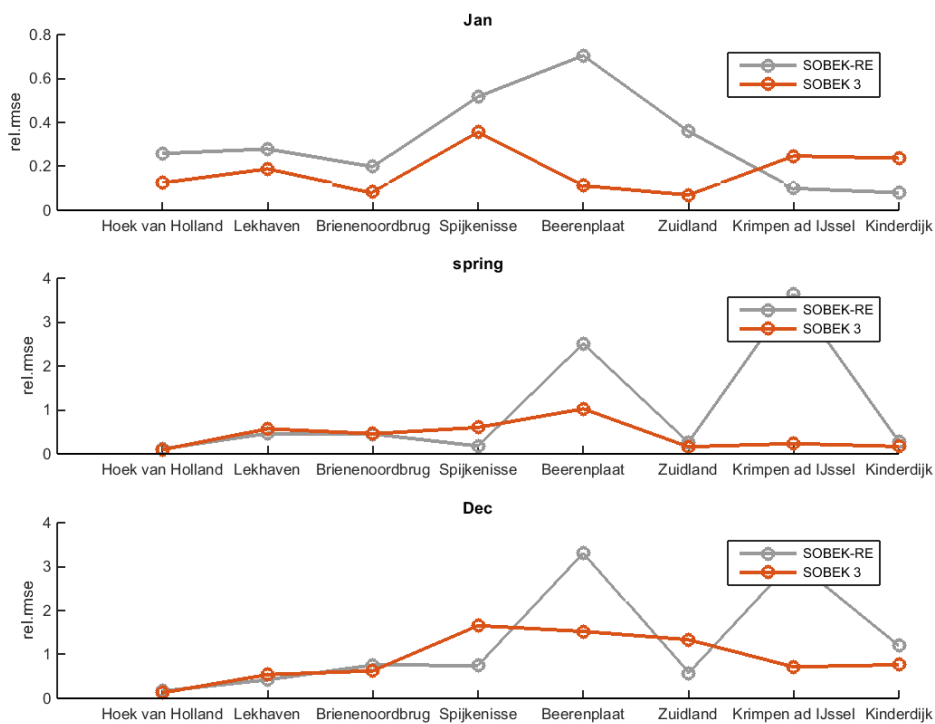


Figuur 5.20 De relatieve RMSE voor verschillende stations voor de twee kalibratieperioden in 2005

Voor 2011 zijn ook de relatieve bias (Figuur 5.21) en relatieve RMSE (Figuur 5.22) bij verschillende stations samengebracht. Het beeld is vergelijkbaar met 2005 met een relatieve bias rond 0 bij Hoek van Holland, grotere afwijkingen voor tussenliggende stations en bij Krimpen aan den IJssel meestal rond 0 (behalve januari 2011). De relatieve RMSE is in december 2011 wat groter dan 1 voor Spijkensisse en Beerenplaat, wat in overeenstemming is met de observatie van de minder goede weergave van de variatie van saliniteit in de Oude Maas.



Figuur 5.21 De relatieve bias voor verschillende stations voor de drie kalibratieperioden in 2011

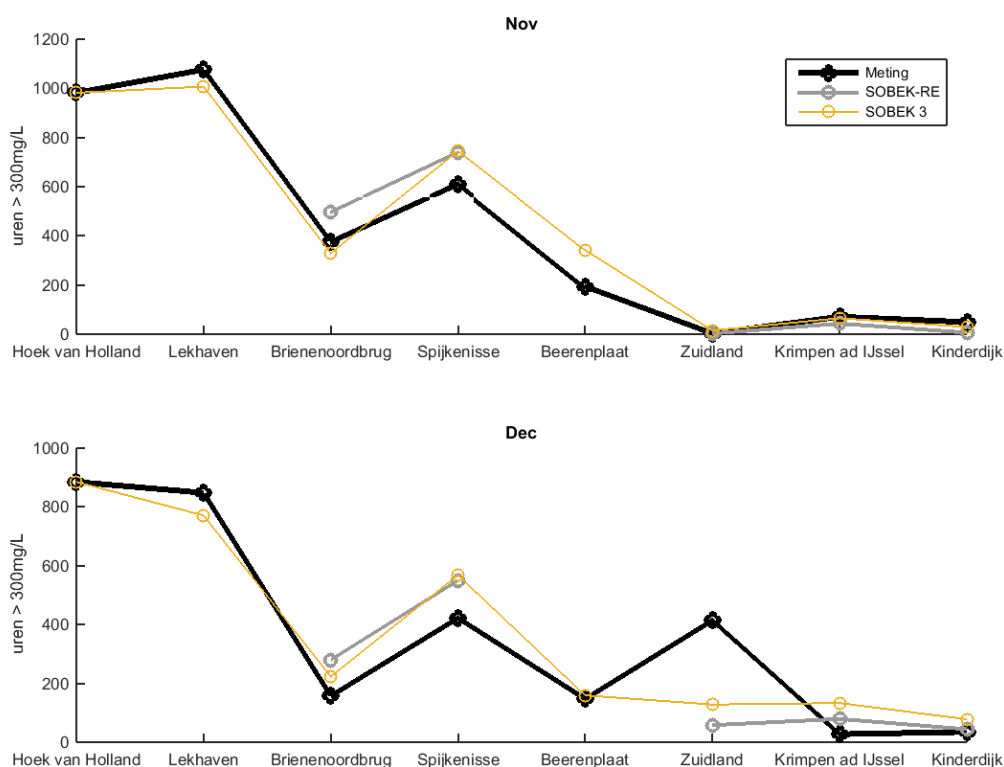


Figuur 5.22 De relatieve RMSE voor verschillende stations voor de drie kalibratieperioden in 2011

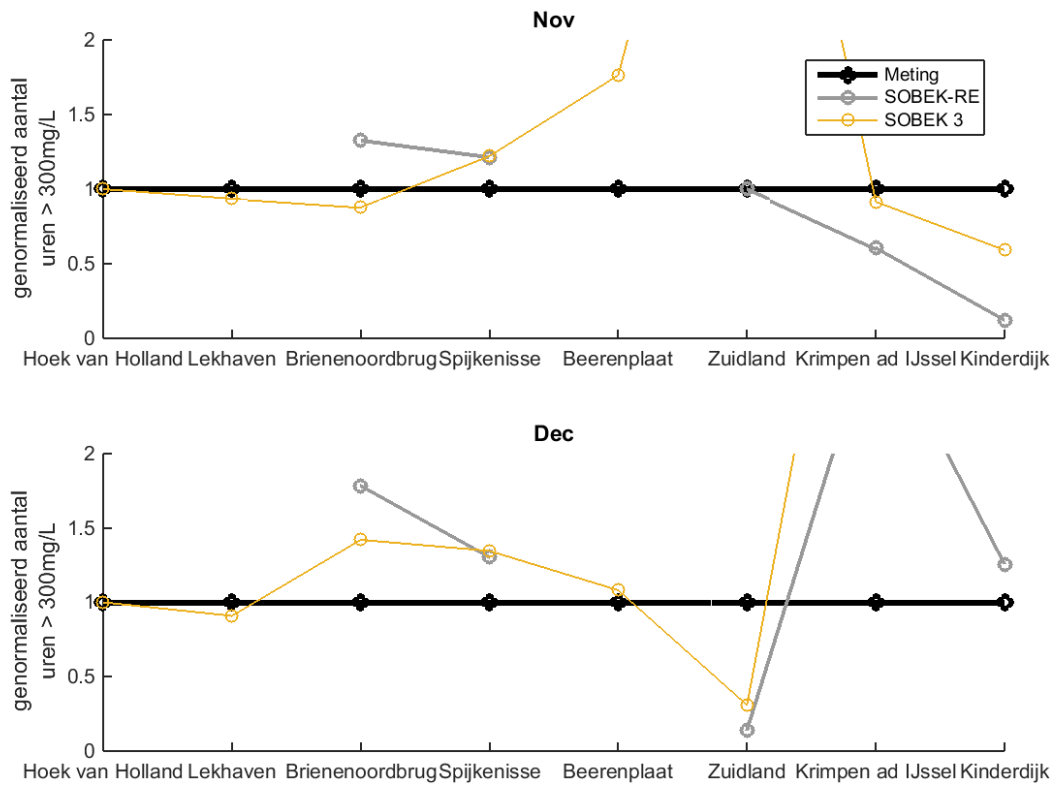
Over het geheel gezien geven deze statistieken aan dat er voor sommige perioden nog flinke afwijkingen te zien zijn tussen het modelresultaat en de gemeten saliniteit. Dichtbij de zeerland (Hoek van Holland) en meest oostelijk aan de noordrand (Krimpen aan den IJssel) en bij de monding van de Lek (Kinderdijk) vallen de verschillen tussen meting en berekende saliniteit mee. In vergelijking met het SOBEK-RE NDB model ligt gemiddeld over de perioden en gemiddeld over de stations de bias dichterbij 0 en is de RMSE kleiner voor het SOBEK 3 RMM model. Het SOBEK 3 RMM model presteert op basis van deze statistieken over het algemeen beter.

5.2.7 Overschrijdingsduren

In de praktijk worden vaak overschrijdingsduren bepaald met het SOBEK-RE model. Om deze reden zijn de overschrijdingsduren bij een aantal locaties bepaald voor de limieten 150 mg/l en voor 300 mg/l. De resultaten voor 150 mg/l zijn opgenomen in bijlage E. De overschrijdingsduur van 300 mg/l chlorideconcentratie is getoond in Figuur 5.23. Zoals te verwachten, is de overschrijdingsduur het grootste voor stations dichtbij zee. Omdat voor locaties met relatief een laag aantal uren overschrijding de lijnen van meting, SOBEK 3 RMM modelresultaat en SOBEK-RE NDB model resultaat samenvallen, is ook de genormaliseerde overschrijdingsduur bepaald (Figuur 5.24). Hierin is genormaliseerd met het aantal overschrijdingsdagen volgens de metingen. Bij Krimpen aan den IJssel en Zuidland zijn de (genormaliseerde) afwijkingen fors.

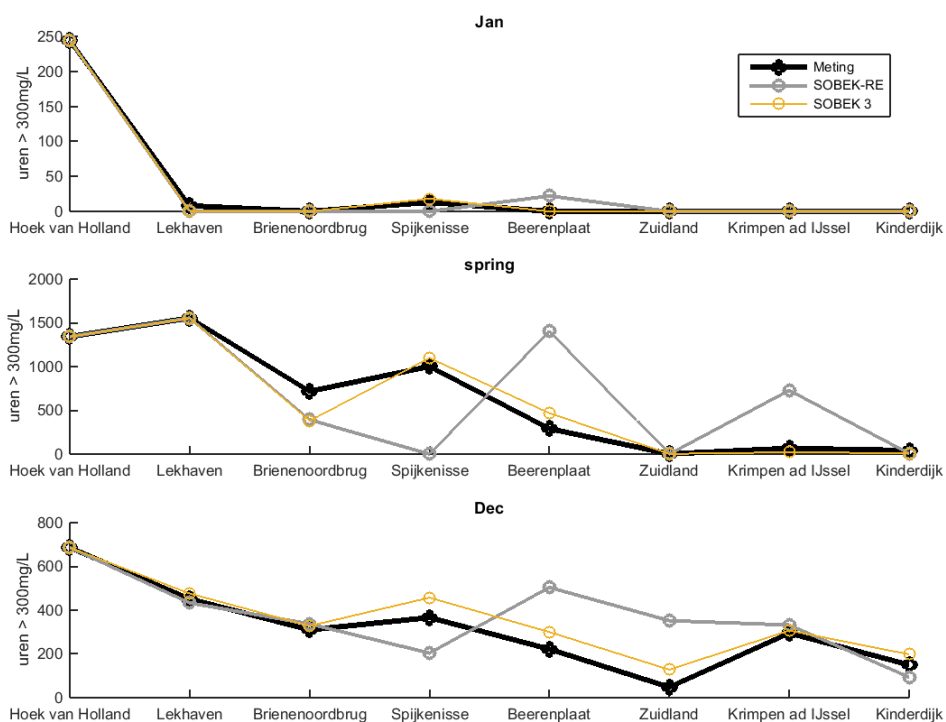


Figuur 5.23 De overschrijdingsduur (uren > 300 mg/l Chlorideconcentratie) voor de twee kalibratieperioden in 2005

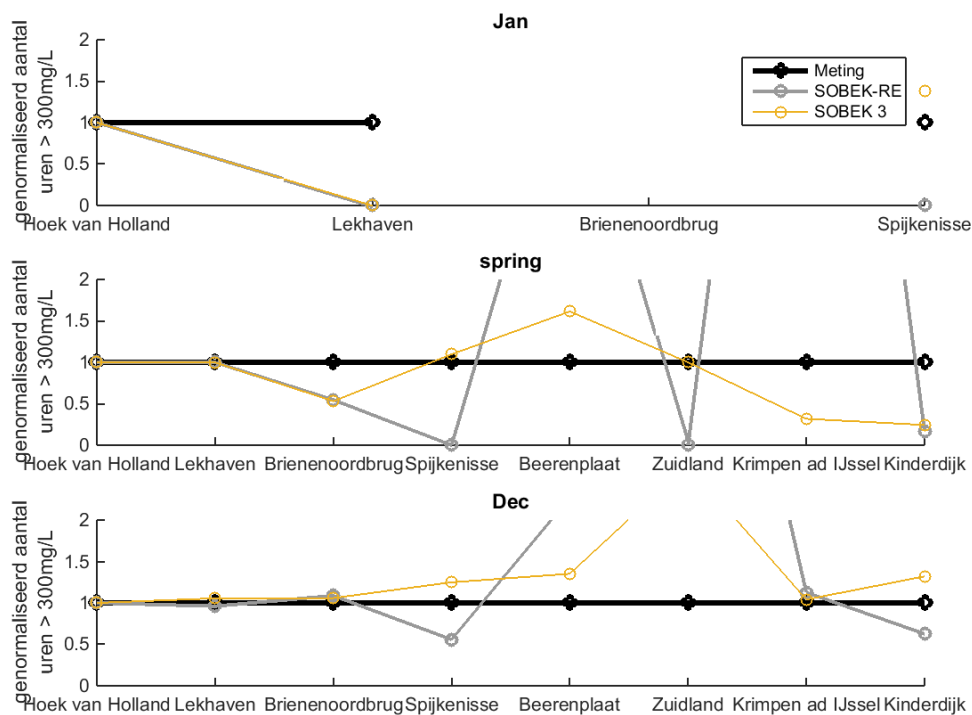


Figuur 5.24 De genormaliseerde overschrijdingsduur (uren > 300 mg/l Chlorideconcentratie) voor de twee kalibratieperioden in 2005

Net als voor 2005, tonen Figuur 5.25 en Figuur 5.26 de overschrijdingsduur voor de drie perioden in 2011. De Beerenplaat en Spijkenisse hebben voor alle vijf de kalibratieperioden een te hoge overschrijdingsduur berekend met het SOBEK 3 RMM model. Vooral Zuidland en Kinderdijk hebben forse afwijkingen, welke soms te hoog zijn en soms te laag.



Figuur 5.25 De overschrijdingsduur (uren > 300 mg/l Chlorideconcentratie) voor de drie kalibratieperioden in 2011



Figuur 5.26 De genormaliseerde overschrijdingsduur (uren > 300 mg/l Chlorideconcentratie) voor de drie kalibratieperioden in 2011

5.2.8 Puntsgewijze samenvatting

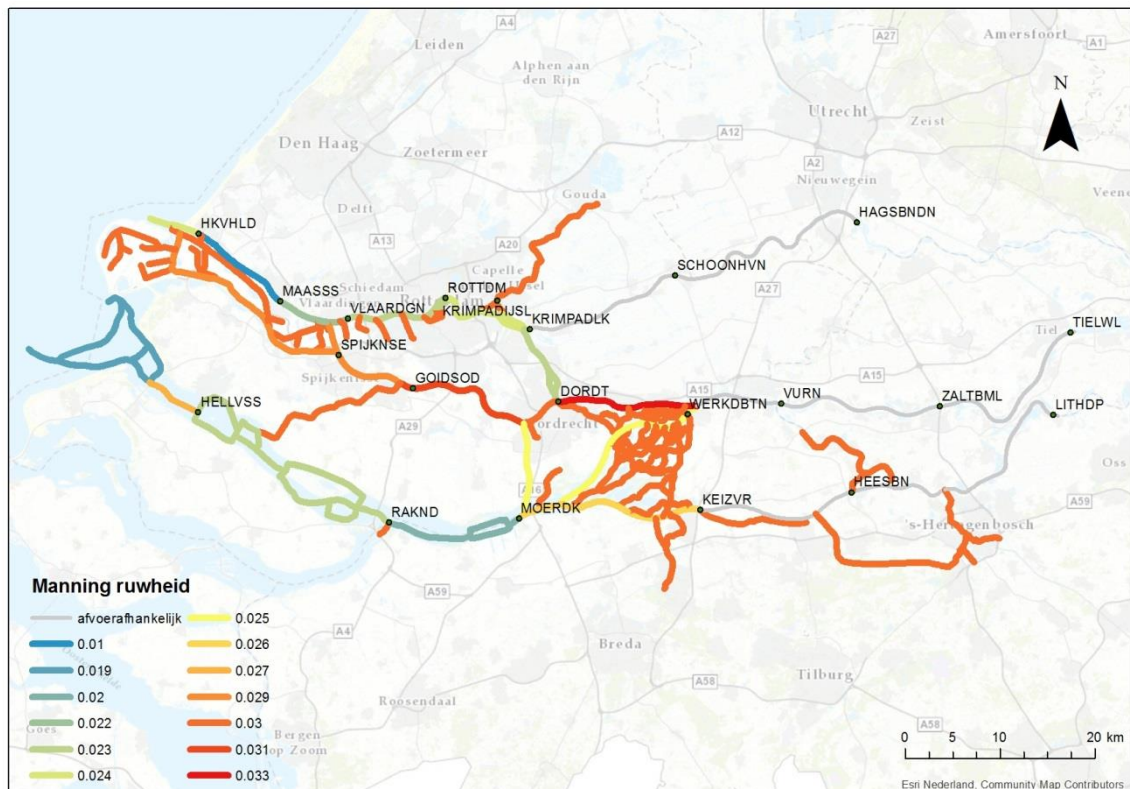
- Waarden voor f3 en f4 zijn afgeleid door deze te variëren en resultaten te vergelijken met metingen tijdens de kalibratieperioden. Hieruit volgde dat in de meeste takken standaardwaarden gebruikt kunnen worden, maar in de Nieuwe Waterweg en de Oude Maas moest de f4 parameter duidelijk lager worden gekozen om te voorkomen dat de saliniteit in het zuiden en oosten van het gebied worden overschat.
- Bij Hoek van Holland komt het meeste zout het gebied binnen. Op deze zouttrand wijkt de berekende saliniteit met het SOBEK 3 RMM model gemiddeld niet veel af van de dwarsdoorsnedegemiddelde saliniteit op basis van metingen. De berekende variatie is kleiner dan volgens metingen.
- Verder landinwaarts bij de Brienoordbrug en Krimpen aan den IJssel worden pieken in saliniteit goed berekend, terwijl bij Spijkenisse pieken worden onderschat. De onderschatting bij Spijkenisse was nodig om geen overschatting te krijgen bij Zuidland en de Beerenplaat.
- De saliniteit reageert te traag. Na het optreden van relatief hoge saliniteits zakken vaak de berekende saliniteits niet snel genoeg. In de aanloop naar relatief hoge saliniteits wordt de saliniteit vaak onderschat.
- De eerste stap van kalibratie van f3 en f4 voor de Hollandsche IJssel en de Lek heeft geleid tot waarden voor dispersiecoëfficiënt die dichtbij de range zitten die gevonden werd op basis van analyse met metingen (Kuijper 2017; 2017). Hiermee komt de saliniteit lager uit dan die berekend met het SOBEK-RE NDB model. Overschrijdingsduren op basis van het SOBEK 3 RMM model liggen voor sommige locaties vaak binnen een range van +/- 50% van het gemeten aantal dagen overschrijding, maar uitschieters komen voor. Vooral bij de stations Kinderdijk, Krimpen aan den IJssel en Zuidland is de afwijking vaak groter dan +/- 50%.
- De statistieken over de kalibratieperioden geven geen eenduidig beeld. De bias en RMSE en overschrijdingsduren verschillen per station en per periode. Grofweg zijn de statistieken voor het SOBEK 3 RMM model gunstiger dan voor het SOBEK-RE NDB model.

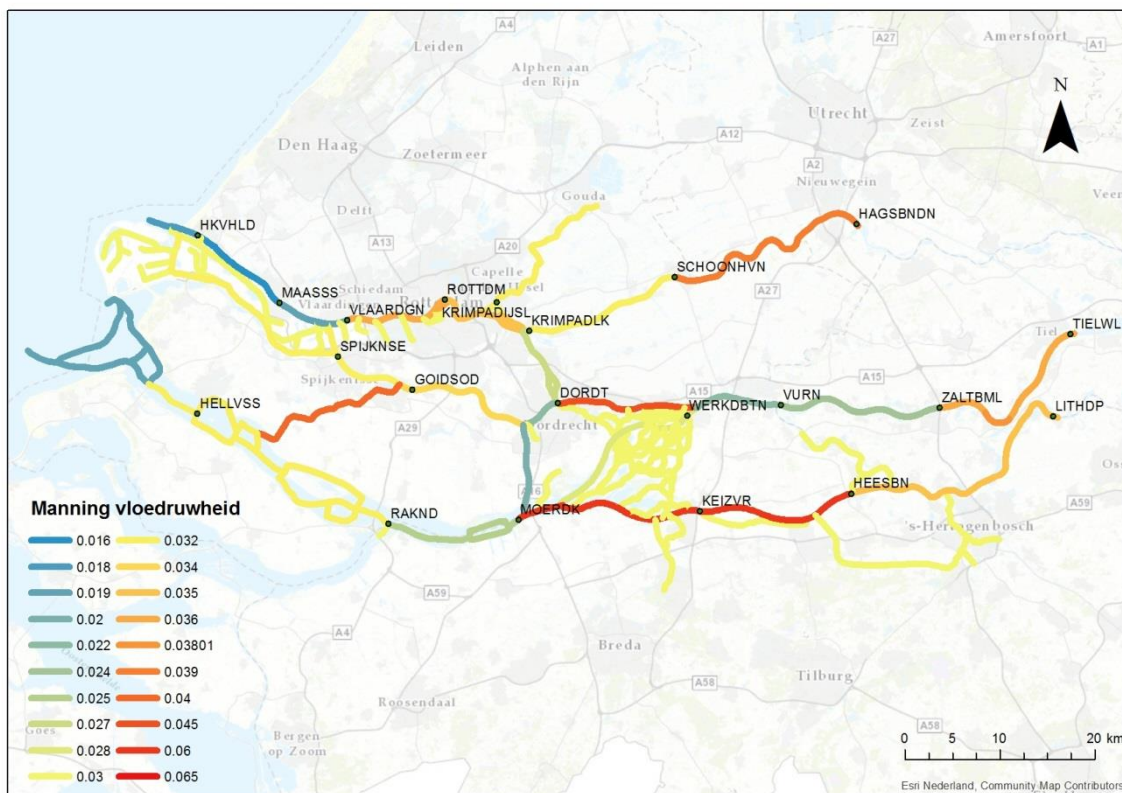
5.3 Waterstand

5.3.1 Kalibratieparameters

Op basis van de kalibratieperioden voor waterstand (Tabel 2.1) is de zomerbedruwheid gekalibreerd. De ruwheid in de Voordelta is aanzienlijk veranderd door de aanpassing aan de profielen. Om aan de gestelde criteria te voldoen, was het nodig om eb-vloed ruwheden te gebruiken in het gehele modeldomein. Het resultaat van de eb-vloedruwheden is weergegeven in Figuur 5.27. Te zien is dat de vloed-ruwheid in de meeste takken wat groter is dan de eb-ruwheid. De laagste ruwheid is gevonden voor de Nieuwe Waterweg bij Maassluis (eb 0,010 en vloed 0,016 s/m^{1/3}). De hoogste ruwheid is gevonden voor het Spui en in het oosten van de Oude Maas tijdens eb (0,033 s/m^{1/3}) en bij vloed in de Maas (0,065 s/m^{1/3}). De overige takken hebben een ruwheid tussen de genoemde waarden. De ruwheid van de vaste laag bij St. Andries is op dezelfde manier bepaald als voor het SOBEK 3 Rijntakken model (Spruyt en Fujisaki, 2016).

Een hogere zomerbedruwheid tijdens vloed dan tijdens eb kan worden verklaard doordat tijdens vloed de stroomsnelheid dichtbij de bodem relatief hoog is. Het stromingsprofiel is ontwikkeld van de bodem tot aan het wateroppervlakte. Bij eb stroomt zoeter water bovenin de waterkolom af naar zee over een zoutere onderlaag. De wrijving wordt tijdens eb meer beïnvloed door de stratificatie dan tijdens vloed, waardoor de schering groter is tijdens eb. In een 1D-model is dit te parametriseren door een lagere ruwheid tijdens eb dan tijdens vloed. Ook in Zijl et al. (2011) werd voor de ruwheid van het WAQUA model gevonden dat in de Nieuwe Waterweg tijdens vloed een hogere ruwheid nodig was dan voor eb. Het resultaat van de kalibratie met over het algemeen hogere ruwheid tijdens vloed dan tijdens eb is in overeenstemming met deze fysische verklaring.

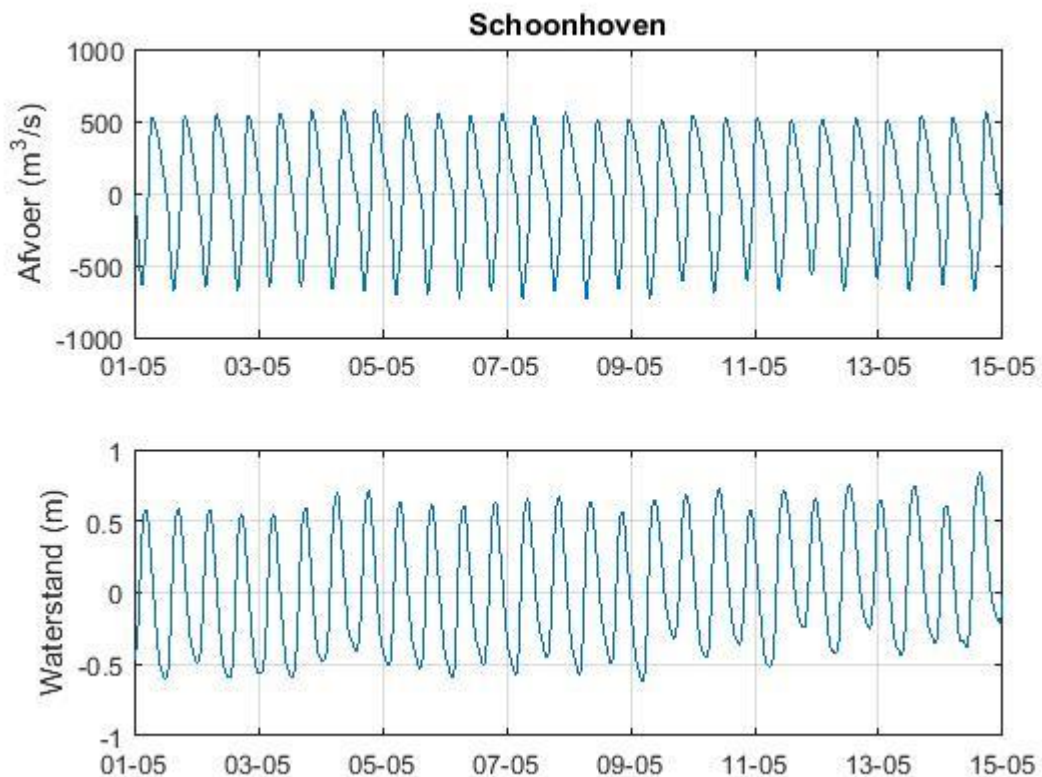




Figuur 5.27 Manning ruwheid ($s/m^{1/3}$) als resultaat van de kalibratie voor eb (boven) en voor vloed (onder); Een grijze dunne lijn geeft aan dat een afvoerafhankelijke ruwheid is gehanteerd.

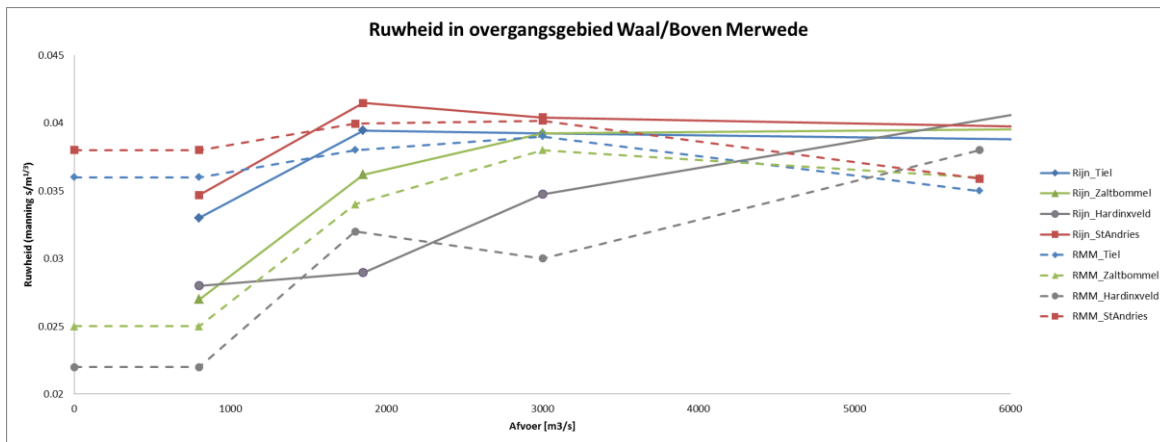
In eerste instantie werd op de Lek niet voldaan aan de gestelde criteria (sectie 2.2). Om deze reden is, net als op de Maas bovenstrooms van Heesbeen en op de Rijn bovenstrooms van Vuren (Figuur 5.31 en Figuur 5.32), een afvoerafhankelijke ruwheid toegepast op de Lek bovenstrooms van Krimpen aan de Lek (Figuur 5.33). Net als voor de andere takken, is een waarde bepaald voor vloed, voor de situatie dat de rivier getijgedomineerd is, voor de situatie dat het zomerbed gevuld is en voor de situatie dat het winterbed is gevuld. De Manning ruwheid varieert met de afvoer tussen $0,02$ en $0,04 s/m^{1/3}$ in de Lek. Ook in de Waal varieert de zomerbedruwheid binnen deze range. In de Maas bij Heesbeen is de ruwheid alleen tijdens vloed met $0,06 s/m^{1/3}$ hoger dan $0,04 s/m^{1/3}$.

Het gevolg van deze afvoerafhankelijkheid is dat de ruwheid verandert op de overgang van eb naar vloed, vooral op de Maas en op de Lek. Omdat uit een eerdere studie is gebleken (van der Wijk, 2016) dat een plotselinge overgang in ruwheid kan leiden tot oscillaties in modelberekeningen is er gekeken of er instabiliteiten zichtbaar zijn in de berekende waterstanden. We hebben geverifieerd bij Schoonhoven of enige onnatuurlijke fluctuaties optreden bij richtingverandering van de stroming. Figuur 5.28 toont dat het voor een periode waarin vloedstroming voorkomt niet het geval is. Er zijn geen aanwijzingen dat oscillaties optreden voor andere perioden of bij andere locaties.

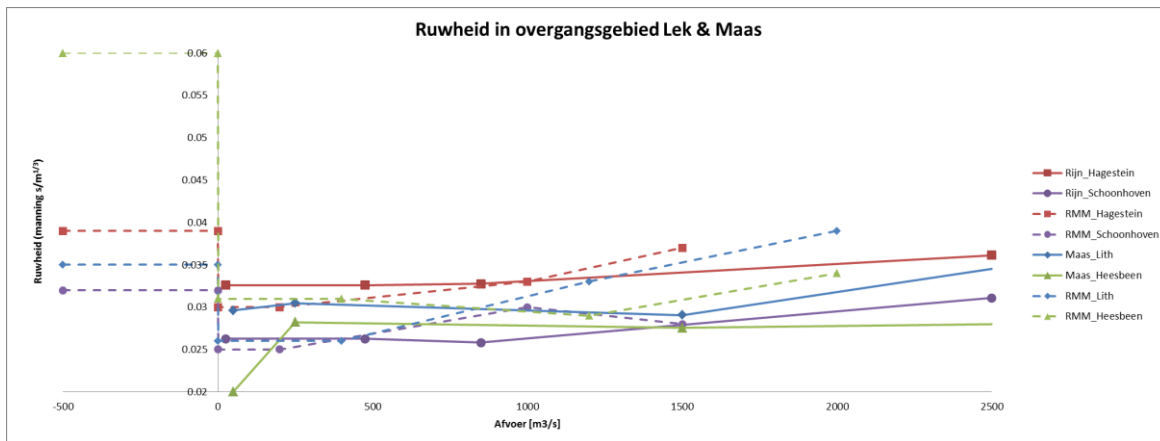


Figuur 5.28 Afvoer en waterstand zoals berekend bij Schoonhoven voor 2011

In het overgangsgedebied zijn andere ruwheden gekozen dan in de riviermodellen (Rijntakken en Maas). Door de verschillende methodiek is gebruik gemaakt van andere afvoerniveaus. In Figuur 5.29 en Figuur 5.30 worden de ruwheden van de drie modellen weergegeven. Omdat er verschillen in schematisatie en randvoorwaarden zijn tussen de modellen is er niet te zeggen welk model het beste is en welke aanpak de voorkeur heeft. Het is aan te raden om bij het samenvoegen van de modellen beide ruwheden te testen in een vergelijkbare simulatie. Daarnaast wordt er binnen de werkzaamheden voor de 6^e generatie gekeken naar de beste aanpak voor kalibratie en gekozen ruwheden. Er is met Rijkswaterstaat afgesproken om in een later stadium te kijken hoe de ruwheden het beste kunnen worden verwerkt in de SOBEK modellen.

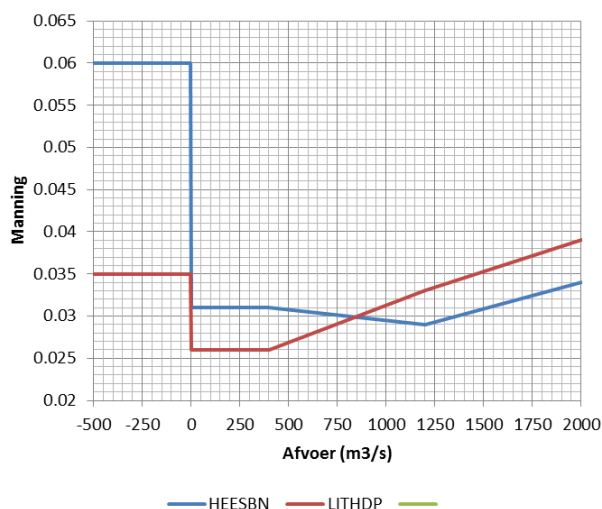


Figuur 5.29 Ruwheid van rij-j17_5-v2 en van het SOBEK 3 RMM model in het overlapgebied van de Waal en Boven Merwede

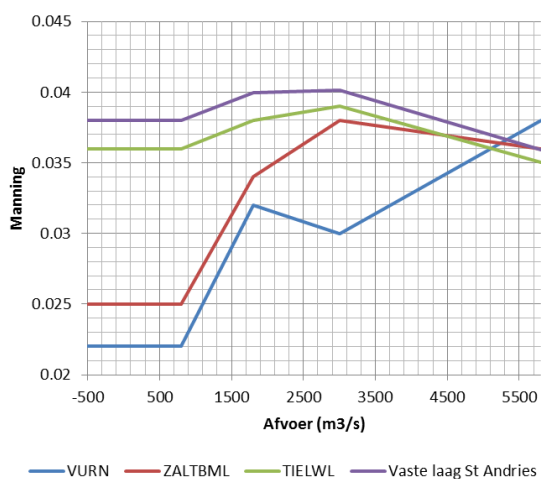


Figuur 5.30 Ruwheid van maas-j17_5-v1 en van het SOBEK 3 RMM model in het overlapgebied van de Lek en Maas

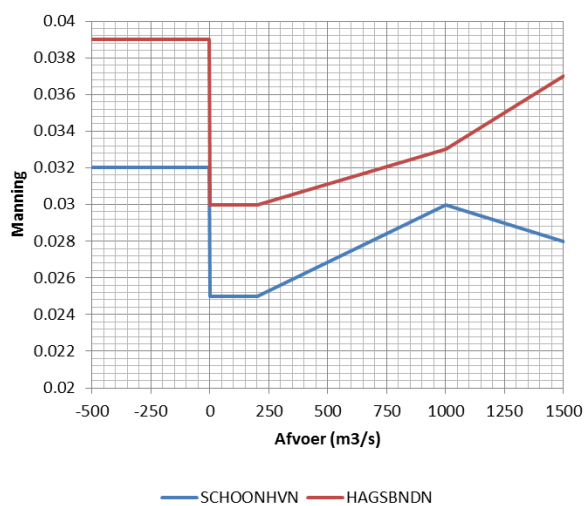
Voor vloedstroming is in iedere riviertak één waarde bepaald, ook omdat vloedstroming in deze riviertakken slechts zelden voorkomt. Deze waarde is zowel weergegeven in de onderste plot van Figuur 5.27 als in Figuur 5.31 tot en met Figuur 5.33.



Figuur 5.31 Afvoerafhankelijkheid van de Manning ruwheid (s/m^{1/3}) op de Maas



Figuur 5.32 Afvoerafhankelijkheid van de Manning ruwheid (s/m^{1/3}) op de Waal

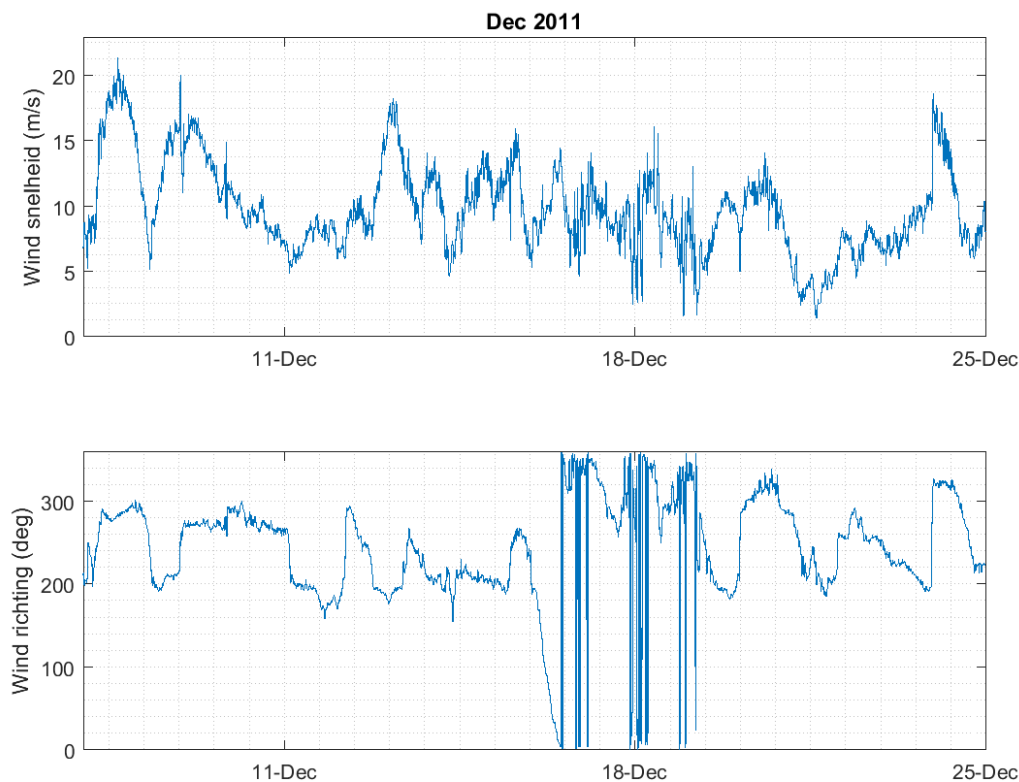


Figuur 5.33 Afvoerafhankelijkheid van de Manning ruwheid (s/m^{1/3}) op de Lek

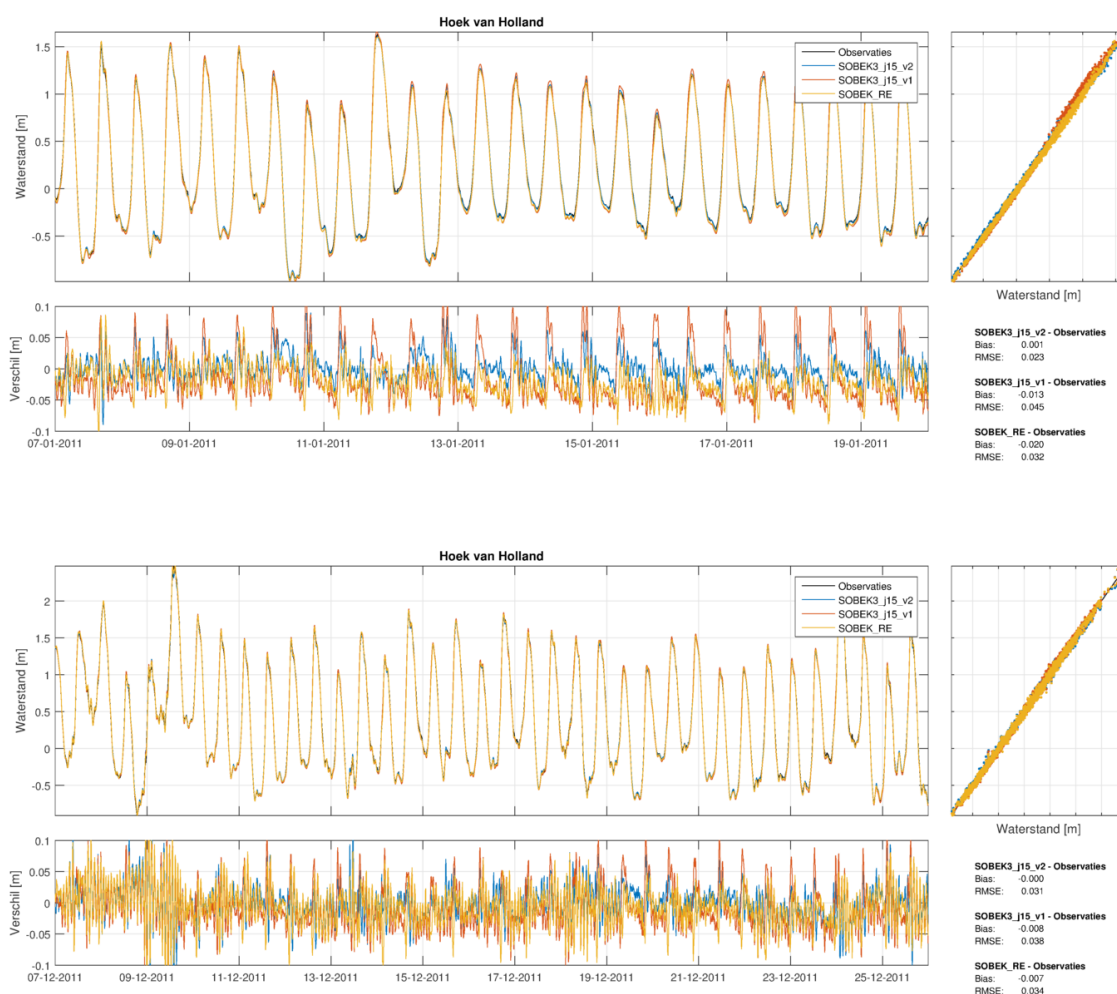
5.3.2 Resultaten noordrand

Het getij dringt het model vooral binnen via de Nieuwe Waterweg. Voor Hoek van Holland op de noordrand worden resultaten getoond. In volgende paragrafen wordt een selectie van de resultaten voor het middengebied, de zuidrand, de Hollandsche IJssel en Lek, en de Waal en Maas getoond. Alle resultaten voor de vier kalibratieperioden voor waterstand zijn beschikbaar in bijlage F.1.

In januari 2011 was de afvoer relatief hoog en in december 2011 begon de afvoer relatief laag en werd de waterstand bij Hoek van Holland verhoogd door een windopzet op 9-12-2011 (Figuur 5.34). Deze twee perioden geven daarmee een beeld van de verschillende condities die kunnen optreden en zijn getoond in deze paragraaf voor Hoek van Holland (Figuur 5.35) en voor Krimpen aan den IJssel (Figuur 5.40). De pieken bij hoog water en de dalen bij laag water en het verloop hiertussen worden goed weergegeven door de modellen voor deze twee locaties op de noordrand. Voor Rotterdam (bijlage F.1) is het beeld vergelijkbaar als met Krimpen aan den IJssel. Aan de verschilplots is te zien dat berekeningen met het SOBEK 3 RMM model meestal dichterbij 0 m verschil liggen in vergelijking met de andere SOBEK modellen.



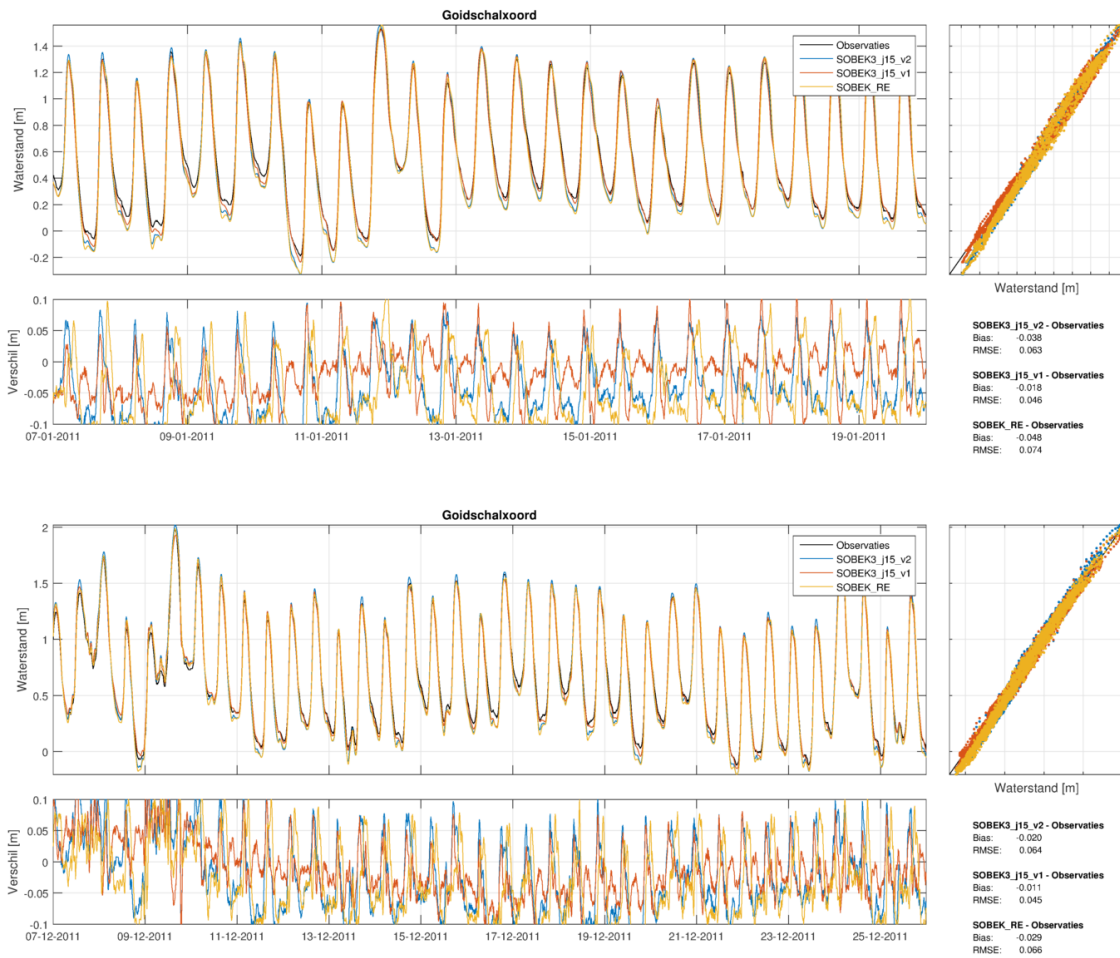
Figuur 5.34 Windsnelheid en windrichting bij Hoek van Holland voor december 2011



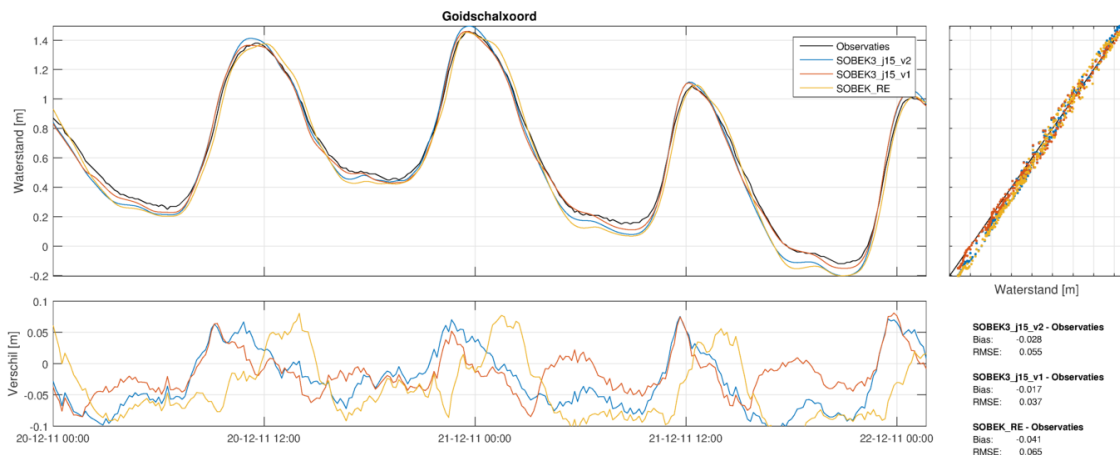
Figuur 5.35 Berekende en gemeten waterstand bij Hoek van Holland voor januari (boven) en december 2011 (onder)

5.3.3 Resultaten middengebied

Bij de splitsing van de Oude Maas met het Spui wordt de timing van hoog en laag water goed berekend (Figuur 5.36). De waterstand bij hoog water wordt licht overschat en bij laag water de waterstand onderschat (zie verschilplots Figuur 5.36). De getijvariatie wordt overschat met ongeveer 0,1 m. Om het verloop gedurende een getijperiode goed te kunnen zien is de waterstand ook voor 2 dagen van deze kalibratieperiode getoond (Figuur 5.37). Ook bij Spijkenisse wordt de getijvariatie overschat, vooral bij de hogere rivierafvoer in januari 2011 (bijlage F.1). Aannemende dat de profielen de actuele situatie goed weergeven, betekent de overschatting van de getijvariatie van de waterstand dat ook de amplitude van de afvoer te groot is in de Oude Maas.

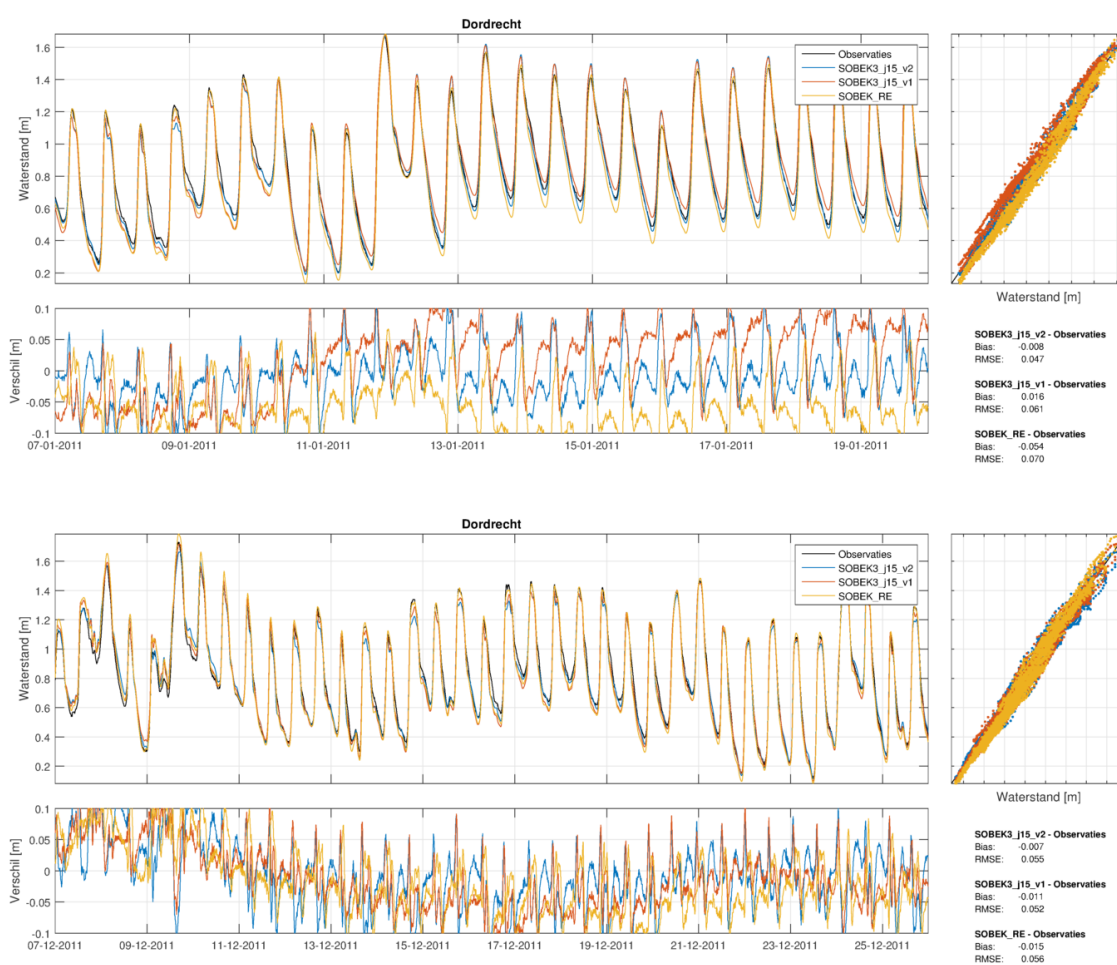


Figuur 5.36 Berekende en gemeten waterstand bij Goidschalcoord voor januari (boven) en december 2011 (onder)



Figuur 5.37 Hetzelfde resultaat als in Figuur 5.36, maar hier ingezoomd op 20 tot 22 december 2011

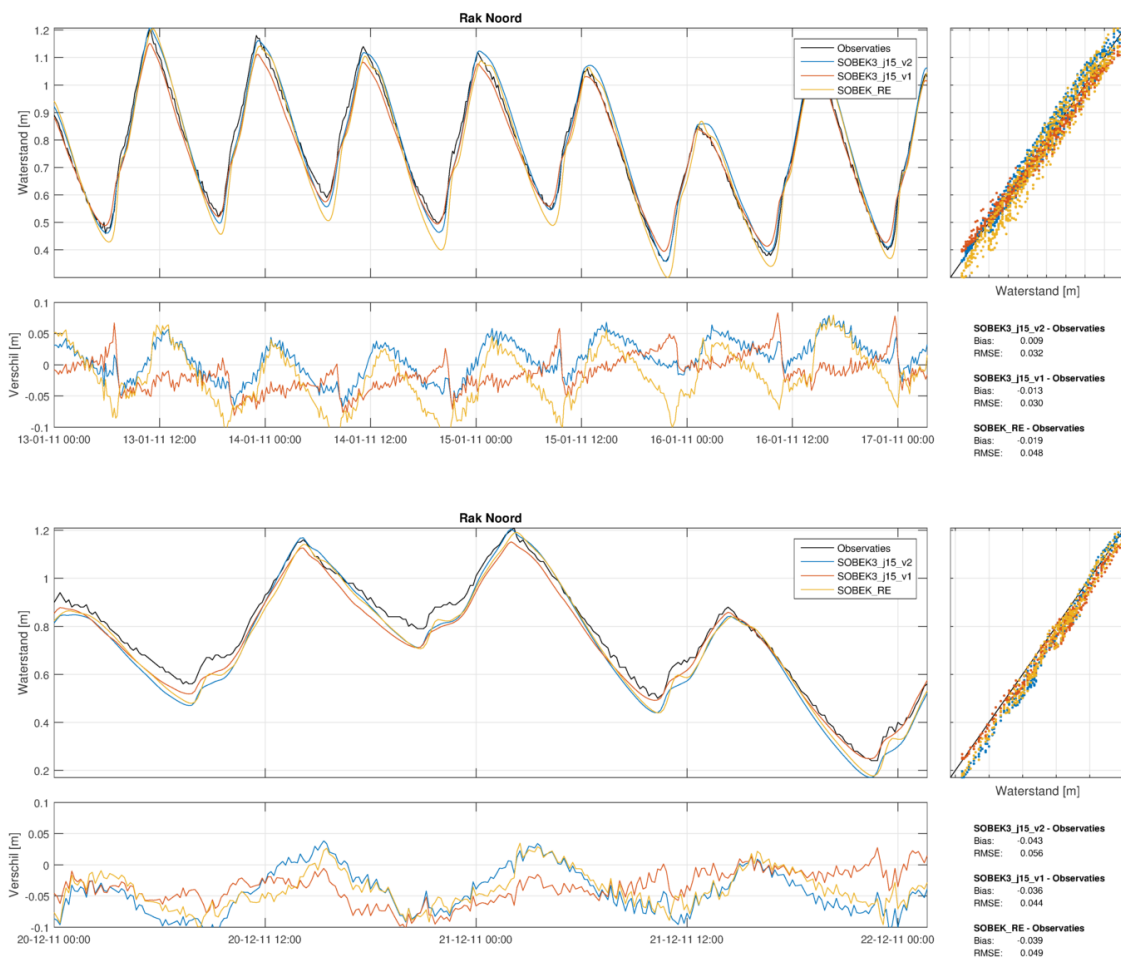
Verder van de Maasmond bij Dordrecht is deze te hoge variatie van de waterstand niet duidelijk zichtbaar tijdens lagere afvoer in december 2011, maar wel tijdens de hogere afvoer in januari 2011 (Figuur 5.38). Zeker voor de periode januari 2011 komt de berekende waterstand met het SOBEK 3 RMM model over het algemeen het best overeen met metingen (bovenste plot Figuur 5.38). De overschatting van de getijvariatie treedt bij hogere rivierafvoer op bij alle drie de stations in het middengebied, terwijl deze overschatting beperkt is tot het westelijk deel van het middengebied bij lagere rivierafvoer.



Figuur 5.38 Berekende en gemeten waterstand bij Dordrecht voor januari (boven) en december 2011 (onder)

5.3.4 Resultaten zuidrand

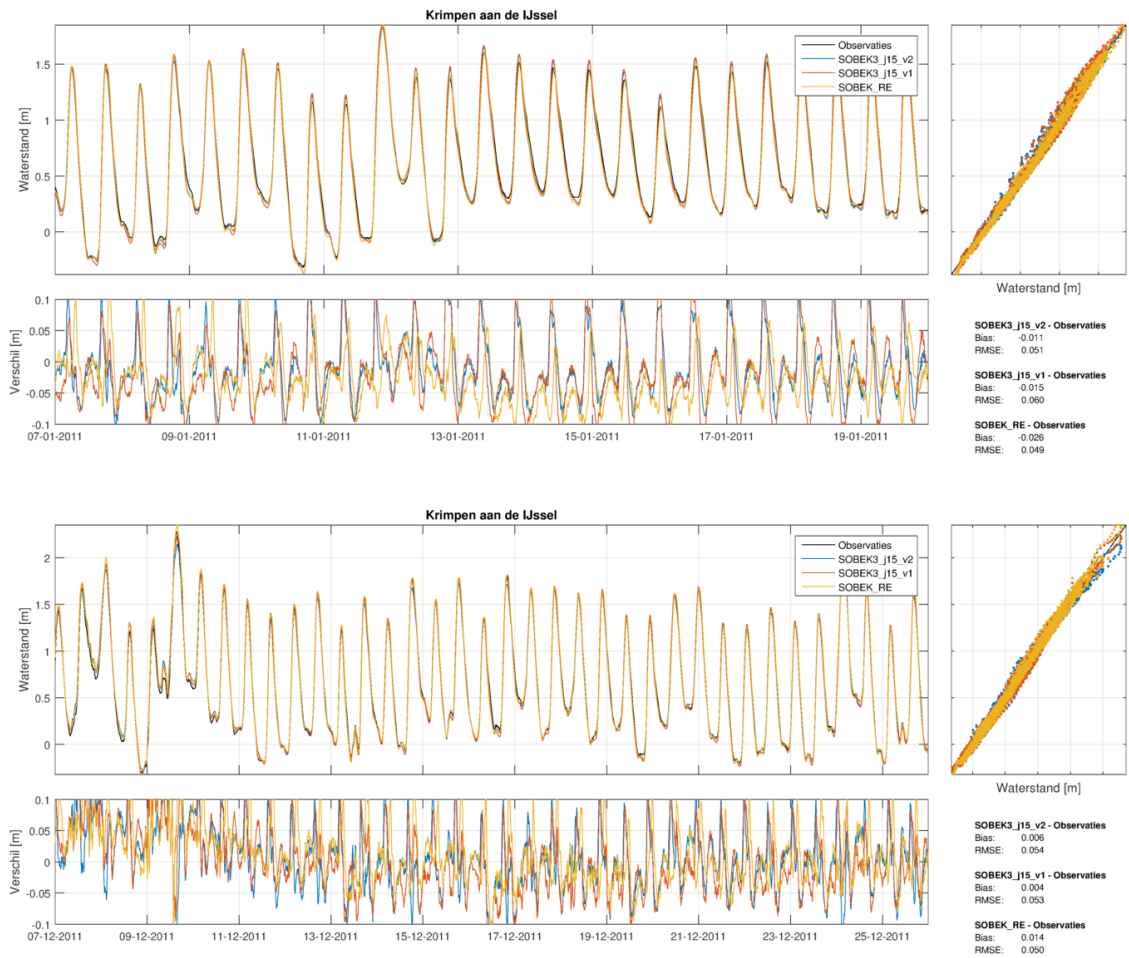
Op de zuidrand wordt het verloop van de waterstand volgens een zaagtandpatroon goed berekend met de SOBEK modellen. De getijvariatie wordt vaak overschat met ongeveer 0,1 m, net als in het middengebied (Figuur 5.39). In deze figuur zijn delen uit twee kalibratieperioden getoond, zodat de onderschatting van laag water en de overschatting van hoog water goed zichtbaar is. Bij de overige stations langs de zuidrand (Moerdijk en Hellevoetsluis) is een vergelijkbare overschatting van ongeveer 0,1 m waar te nemen. De getijvariatie wordt langs de zuidrand overschat met ongeveer 0,1 m bij zowel lagere als hogere rivierafvoer.



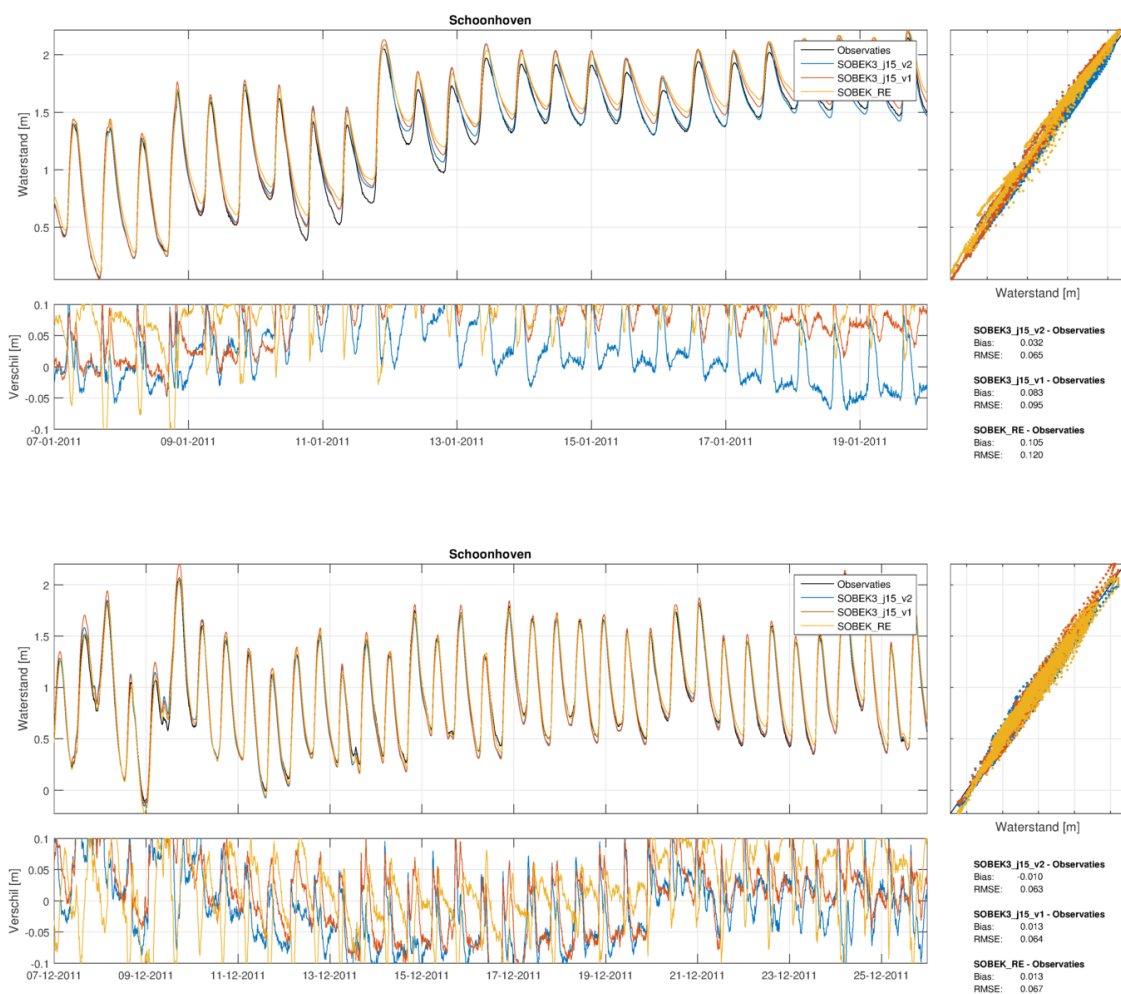
Figuur 5.39 Berekende en gemeten waterstand bij Rak Noord voor een deel van de periode van januari (boven) en december 2011 (onder)

5.3.5 Resultaten Hollandsche IJssel en Lek

Voor de riviertakken met relatief lage afvoer, Hollandsche IJssel en Lek, zijn voor dezelfde twee kalibratieperioden de waterstanden getoond voor Krimpen aan den IJssel (Figuur 5.40) en voor Schoonhoven op de Lek (Figuur 5.41). De berekende waterstand met het SOBEK 3 RMM model ligt over het algemeen dichterbij de metingen in vergelijking met de andere twee SOBEK modellen. Bij Schoonhoven overschat het SOBEK 3 RMM model de waterstand bij laag water geregeld meer dan 0,1 m (bij hogere gemiddelde waterstand tussen 13 en 20 januari 2011, Figuur 5.41).



Figuur 5.40 Berekende en gemeten waterstand bij Krimpen aan de IJssel voor januari (boven) en december 2011 (onder)

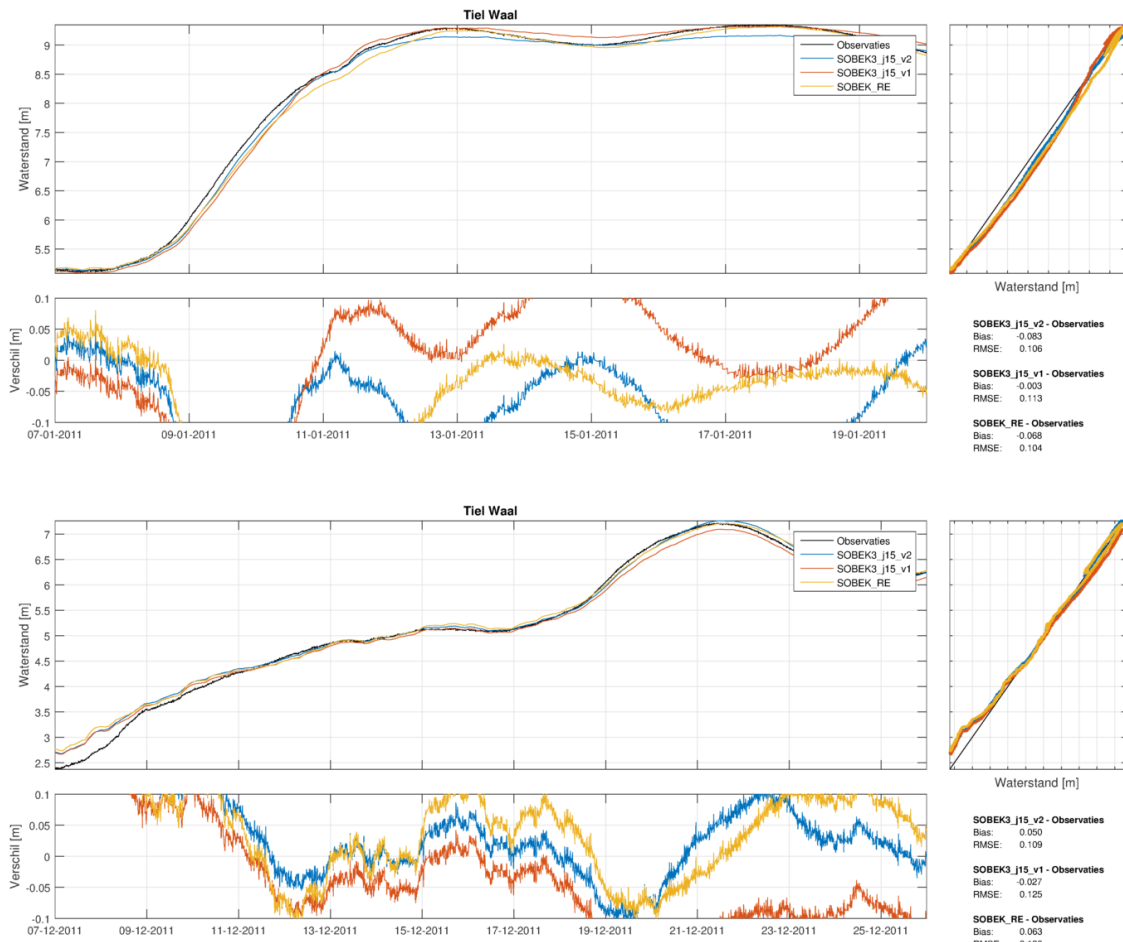


Figuur 5.41 Berekende en gemeten waterstand bij Schoonhoven voor januari (boven) en december 2011 (onder)

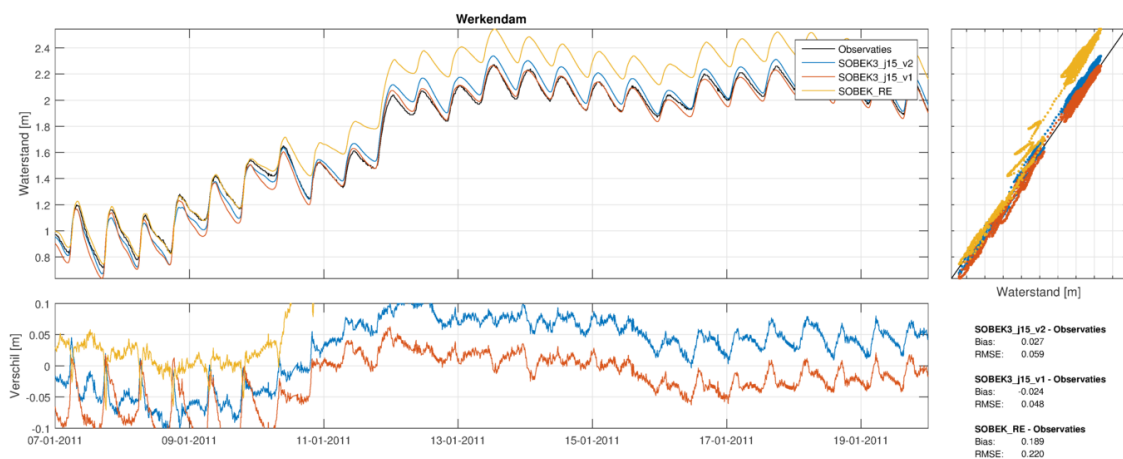
5.3.6 Waal en Maas

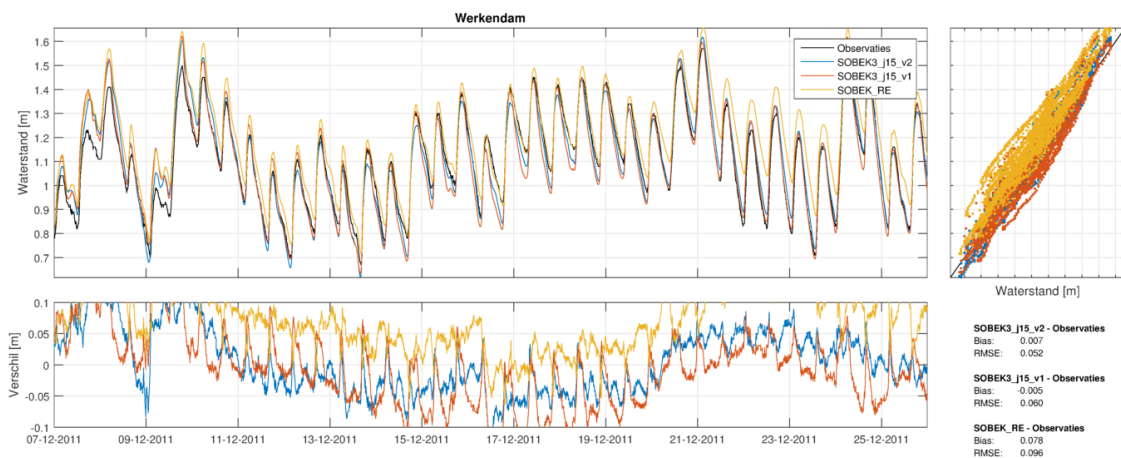
Als voorbeeld voor het gedrag van de waterstand bij de rand van het model is het resultaat voor dezelfde twee kalibratieperioden als voor het gebied Hollandsche IJssel en Lek getoond voor Tiel in Figuur 5.42. Het verloop van berekende waterstand is grofweg vergelijkbaar met dat van de gemeten waterstand. Echter, soms zijn de verschillen groter dan 0,1 m, zoals bij de onderschatting in de aanloop naar de piekwaterstand op 9 en 10 januari 2011. In dat geval lopen de modellen achter op de metingen. Relatief zijn de afwijkingen aanzienlijk, wat ook zichtbaar is in de statistieken.

Op het andere uiteinde van het gebied van de Waal en Maas (Merwede in dit geval) bij Werkendam wordt de getijvariatie zichtbaar (Figuur 5.43). Deze getijvariatie wordt goed gereproduceerd door het SOBEK 3 RMM model. Alleen rond de windopzetperiode (10 december 2011) komen afwijkingen (overschatting meestal) van meer dan 0,1 m voor. Zeker in vergelijking met het SOBEK-RE NDB model presteert het SOBEK 3 RMM model beter.



Figuur 5.42 Berekende en gemeten waterstand bij Tiel voor januari (boven) en december (onder)





Figuur 5.43 Berekende en gemeten waterstand bij Werkendam voor januari (boven) en december 2011 (onder)

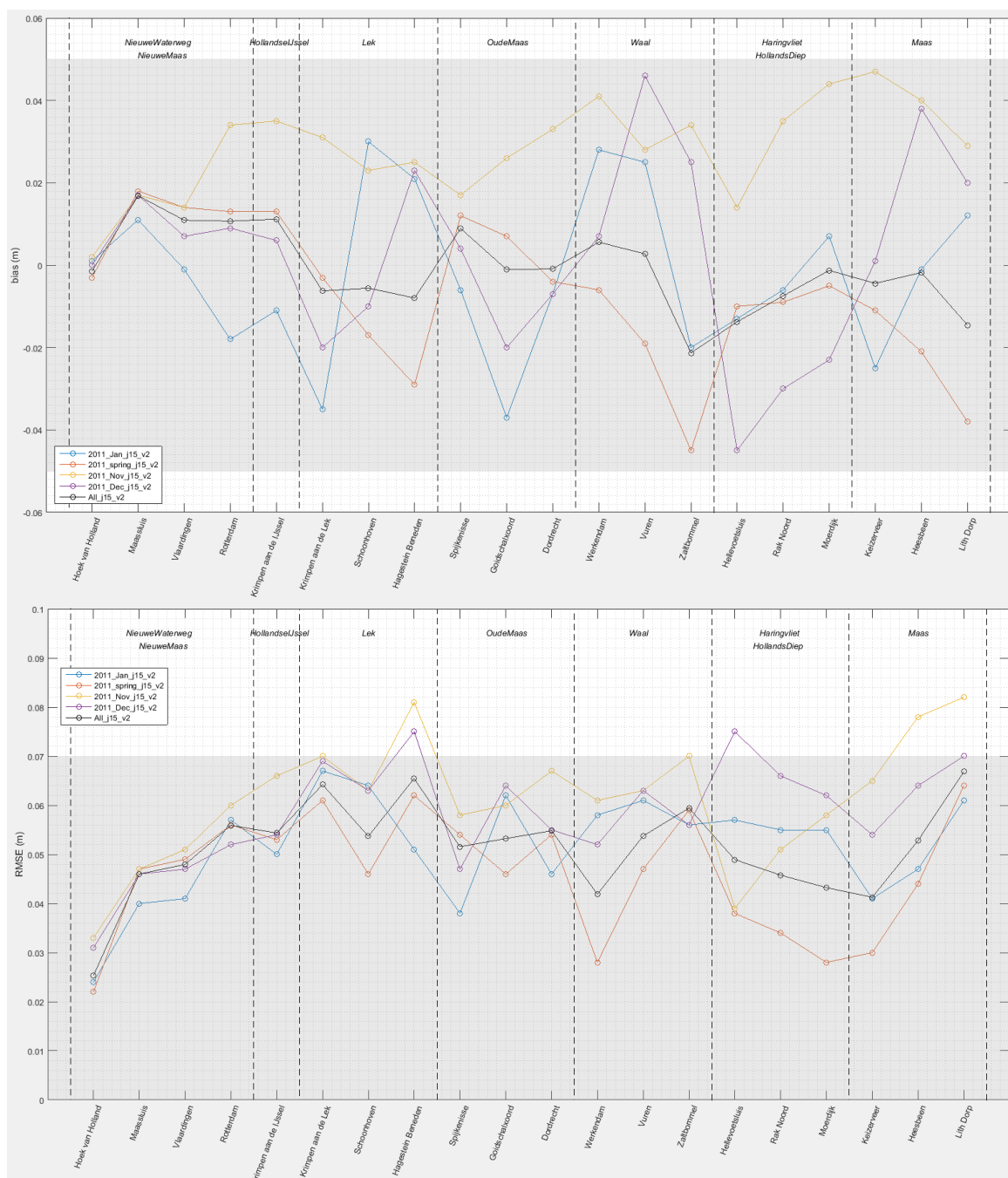
5.3.7 Statistieken

Voor de waterstanden geven de bias en RMSE van alle stations en over alle kalibratieperioden een goed beeld van de prestatie (Figuur 5.44). De bias gemiddeld over de vier perioden ligt tussen -0,02 en 0,02 m (zwarte lijn in bovenste plot van Figuur 5.44). Voor alle stations ligt voor alle kalibratieperioden de bias tussen -0,05 en 0,05 m, dus voldoen alle perioden aan het gestelde criterium. Ook de RMSE valt voor vrijwel alle locaties en perioden binnen de gestelde grens van 0,07 m (onderste plot van Figuur 5.44). De grootste afwijkingen zijn zichtbaar op uiteinden van de Maas (Lith) en Lek (Hagestein beneden). Ook bij Tiel in de Waal zijn afwijkingen te zien (Tabel 5.1 en Tabel 5.2). Van tevoren is gesteld dat op deze locaties niet kon worden voldaan aan de gestelde criteria, omdat zij dichtbij de rand van het model liggen.

Fouten in de afvoer die bij de rand worden opgelegd resulteren direct in een fout in de waterstand. De afvoer die wordt opgelegd bij Tiel in de Waal wordt bepaald met een relatie op basis van waterstanden. De werkelijke afvoer kan hiervan afwijken als de afvoerverdeling niet goed wordt bepaald door de relatie, of wanneer op de Waal laterale onttrekkingen of lozingen niet goed worden meegenomen. Een fout bij Hagestein kan optreden doordat de afvoer bovenstrooms van de stuw wordt gemeten. De aanname is dat deze afvoer ook benedenstrooms van de stuw optreedt, maar vooral bij lage afvoeren kunnen afwijkingen ontstaan. In de Maas wordt de afvoer gemeten bij Megen gebruikt. Hoewel de afstand naar Lith niet groot is, kunnen faseverschillen ontstaan. Vanwege deze redenen en vanwege meet- en extrapolatie-fouten kunnen afwijkingen in de opgelegde afvoer ontstaan. Voor de afvoer bij Tiel in de Waal kunnen hierdoor mogelijk de aanzienlijke afwijkingen tot maximaal 0,3 m gemiddeld per kalibratieperiode ontstaan.

Naast de mogelijkheid van afwijkingen in de opgelegde afvoer, kan het onterecht opnemen van enkele Ruimte voor de Rivier maatregelen een reden zijn afwijkingen in de waterstand. In het SOBEK 3 RMM model zijn enkele Ruimte voor de Rivier ingrepen opgenomen in de schematisatie, terwijl deze tijdens de kalibratieperioden in werkelijkheid nog niet waren uitgevoerd. Door de onterechte ruimere dwarsprofielen zou voornamelijk bij hogere afvoeren het model de waterstand kunnen onderschatten. Het valt op dat tijdens lage afvoer (Nov 2011) de waterstand juist overschat wordt door het model. Een sluitende verklaring voor de afwijkingen bij de uiteinden van de Maas en de Lek is binnen dit project niet gevonden. In vergelijking met de eerdere SOBEK modellen is de prestatie van het SOBEK 3 RMM model over het algemeen beter in de Lek en de Maas (Tabel 5.1 en Tabel 5.2).

Gezien over alle stations, zowel in de kalibratieperiode met hoge afvoer (januari 2011) als in de periode met lage afvoer en windopzet (december 2011), presteert het SOBEK 3 RMM model over het algemeen beter dan de andere twee modellen (Tabel 5.1 en Tabel 5.2). De bias en RMSE vallen voor het SOBEK 3 model voor deze perioden binnen de gestelde criteria, hoewel dat niet altijd het geval is voor de andere twee modellen. Bovendien heeft het SOBEK 3 model meer groen gemarkeerde waarden. Deze groene markering betekent dat de absolute bias tussen -0,01 en 0,01 m ligt of de RMSE kleiner is dan 0,03 m, ofwel perioden en locaties waar het criterium ruimschoots gehaald wordt. Voor de andere twee kalibratieperioden met lage afvoer is presteert het SOBEK 3 RMM model ook voor november 2011 over het algemeen beter terwijl voor het voorjaar van 2011 het verschil in prestatie tussen de modellen minder duidelijk is.



Figuur 5.44 De bias (boven) en RMSE (onder) voor de waterstanden per kalibratieperiode en voor alle perioden samen voor de meetstations langs de verschillende takken; Tiel ontbreekt in deze plot, omdat hierop niet is gekalibreerd.

Tabel 5.1 en Tabel 5.2 geven naast de statistieken per station ook de gemiddelde van de statistieken per gebied (Tabel 2.2). De statistieken van stations in ieder gebied zijn gemiddeld om deze statistieken per gebied te verkrijgen. Ook voor deze statistieken per gebied presteert het SOBEK 3 RMM model beter dan haar voorgangers.

Tabel 5.1 De bias (m) voor alle waterstandsstations per kalibratieperiode voor het SOBEK-RE NDB model, de voorganger SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 en voor het SOBEK 3 RMM model. Rode markering: voldoet niet aan het criterium; Groene markering: ruim binnen criterium ($-0,01 < \text{bias} < 0,01$ m).

		Jan 2011			Voorjaar 2011			Nov 2011			Dec 2011		
		SOBEK-RE	SOBEK3 j15-v1	SOBEK3 j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3 j15-v1	SOBEK3 j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3 j15-v1	SOBEK3 j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3 j15-v1	SOBEK3 j15-v2
Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas	Hoek van Holland	-0.020	-0.013	0.001	-0.002	-0.009	-0.003	0.005	-0.001	0.002	-0.007	-0.008	0.000
	Maassluis	-0.011	0.011	0.012	0.004	0.003	0.018	0.011	0.014	0.017	0.004	0.015	0.017
	Vlaardingen	-0.046	-0.014	-0.001	-0.008	-0.020	0.014	-0.003	-0.009	0.014	-0.020	-0.013	0.007
	Rotterdam	-0.027	-0.017	-0.018	0.032	0.001	0.013	0.051	0.024	0.034	0.016	0.003	0.009
Hollandse IJssel	Krimpen aan de IJssel	-0.026	-0.015	-0.011	0.031	0.019	0.013	0.052	0.042	0.035	0.014	0.004	0.006
	Gouda brug												
Lek	Krimpen aan de Lek	-0.058	-0.058	-0.035	0.017	0.011	-0.003	0.052	0.047	0.031	-0.012	-0.027	-0.020
	Schoonhoven	0.108	0.083	0.032	-0.014	0.015	-0.017	0.014	0.055	0.023	0.013	0.013	-0.010
	Hagestein Beneden	-0.030	-0.145	0.020	-0.006	0.027	-0.029	0.026	0.080	0.025	0.058	0.062	0.023
OudeMaas	Spijkenisse	-0.044	0.004	-0.006	-0.009	0.004	0.012	-0.004	0.014	0.017	-0.022	0.008	0.004
	Goidschalxoord	-0.047	-0.017	-0.038	-0.004	0.012	0.007	0.009	0.025	0.026	-0.029	-0.011	-0.020
	Dordrecht	-0.054	0.018	-0.008	0.004	0.007	-0.004	0.044	0.042	0.033	-0.015	-0.011	-0.007
Waal	Werkendam	0.191	-0.024	0.027	0.038	0.012	-0.006	0.079	0.057	0.041	0.078	-0.005	0.007
	Vuren	0.196	-0.258	0.024	0.041	0.020	-0.019	0.088	0.061	0.028	0.089	0.004	0.046
	Zaltbommel	0.013	0.050	-0.024	0.080	0.045	-0.045	0.154	0.112	0.034	0.123	0.069	0.025
	Tiel Waal	-0.083	-0.003	-0.068	0.121	0.094	0.165	0.279	0.269	0.338	0.050	-0.027	0.063
Haringvliet/ Hollands Diep	Hellevoetsluis	-0.005	-0.092	-0.017	0.007	0.004	-0.010	0.035	0.020	0.014	-0.015	-0.053	-0.045
	Rak Noord	-0.013	-0.019	-0.011	0.008	0.007	-0.009	0.049	0.042	0.035	-0.008	-0.027	-0.030
	Moerdijk	-0.011	0.035	0.002	0.012	0.015	-0.005	0.055	0.055	0.044	-0.006	-0.011	-0.023
Maas	Keizerveer	0.059	0.047	-0.026	0.018	0.024	-0.011	0.073	0.075	0.047	0.032	0.026	0.001
	Heesbeen	0.158	-0.011	0.000	0.017	0.031	-0.021	0.077	0.086	0.040	0.123	0.094	0.038
	Lith Dorp	0.217	-0.206	0.011	0.006	0.020	-0.038	0.081	0.080	0.029	0.265	0.082	0.020
Gemiddelde	alle stations	0.022	-0.031	-0.006	0.019	0.016	0.001	0.058	0.057	0.043	0.035	0.009	0.005
Gemiddelde	Noordrand	-0.026	-0.008	-0.002	0.007	-0.006	0.011	0.016	0.007	0.017	-0.002	-0.001	0.008
	Lek en Hollandse IJssel	-0.002	-0.034	0.002	0.007	0.018	-0.009	0.036	0.056	0.029	0.018	0.013	0.000
	Middengebied	-0.048	0.002	-0.017	-0.003	0.008	0.005	0.016	0.027	0.025	-0.022	-0.005	-0.008
	Zuidrand	-0.010	-0.025	-0.009	0.009	0.009	-0.008	0.046	0.039	0.031	-0.010	-0.030	-0.033
	Maas en Waal	0.107	-0.058	-0.008	0.046	0.035	0.004	0.119	0.106	0.080	0.109	0.035	0.029

Tabel 5.2 De RMSE (m) voor alle waterstandsstations per kalibratieperiode voor het SOBEK-RE NDB model, de voorganger SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 en voor het SOBEK 3 RMM model. Rode markering: voldoet niet aan het criterium; Groene markering: ruim binnen criterium (RMSE<0.03 m).

		Jan 2011			Voorjaar 2011			Nov 2011			Dec 2011		
		SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2
Nieuwe Waterweg / Nieuwe Maas	Hoek van Holland	0.032	0.045	0.023	0.023	0.024	0.022	0.036	0.033	0.033	0.034	0.038	0.031
	Maassluis	0.031	0.054	0.039	0.027	0.040	0.047	0.037	0.047	0.047	0.032	0.051	0.046
	Vlaardingen	0.058	0.053	0.040	0.029	0.042	0.049	0.037	0.039	0.051	0.042	0.048	0.047
	Rotterdam	0.049	0.060	0.057	0.055	0.049	0.056	0.067	0.053	0.060	0.047	0.050	0.052
Hollandse IJssel	Krimpen aan de IJssel	0.048	0.060	0.051	0.043	0.041	0.053	0.063	0.058	0.066	0.050	0.053	0.054
	Gouda brug												
Lek	Krimpen aan de Lek	0.080	0.095	0.068	0.047	0.056	0.061	0.068	0.073	0.070	0.065	0.084	0.069
	Schoonhoven	0.123	0.095	0.065	0.071	0.030	0.046	0.072	0.072	0.063	0.067	0.064	0.063
	Hagestein Beneden	0.087	0.194	0.052	0.049	0.048	0.062	0.075	0.103	0.081	0.115	0.093	0.075
OudeMaas	Spijkenisse	0.058	0.053	0.038	0.041	0.050	0.054	0.041	0.048	0.058	0.046	0.049	0.047
	Goidschalxoord	0.073	0.046	0.063	0.029	0.037	0.046	0.043	0.048	0.060	0.066	0.045	0.064
	Dordrecht	0.069	0.061	0.047	0.024	0.032	0.054	0.055	0.056	0.067	0.056	0.052	0.055
Waal	Werkendam	0.220	0.047	0.059	0.044	0.033	0.028	0.086	0.071	0.061	0.096	0.060	0.052
	Vuren	0.248	0.281	0.062	0.053	0.033	0.047	0.099	0.072	0.063	0.105	0.052	0.063
	Zaltbommel	0.056	0.093	0.057	0.088	0.055	0.059	0.166	0.120	0.070	0.146	0.111	0.056
	Tiel Waal	0.080	0.095	0.068	0.047	0.056	0.061	0.068	0.073	0.070	0.065	0.084	0.069
Haringvliet / Hollands Diep	Hellevoetsluis	0.055	0.109	0.058	0.029	0.027	0.038	0.045	0.039	0.039	0.055	0.074	0.075
	Rak Noord	0.049	0.052	0.055	0.024	0.026	0.034	0.055	0.052	0.051	0.050	0.057	0.066
	Moerdijk	0.048	0.077	0.054	0.022	0.033	0.028	0.060	0.064	0.058	0.049	0.055	0.062
Maas	Keizerveer	0.099	0.078	0.043	0.029	0.046	0.030	0.080	0.089	0.065	0.057	0.063	0.054
	Heesbeen	0.191	0.078	0.048	0.031	0.048	0.044	0.090	0.099	0.078	0.155	0.117	0.064
	Lith Dorp	0.246	0.238	0.062	0.043	0.059	0.064	0.104	0.103	0.082	0.330	0.101	0.070
Gemiddelde	alle stations	0.095	0.094	0.053	0.040	0.041	0.047	0.069	0.067	0.062	0.082	0.067	0.059
Gemiddelde	Noordrand	0.043	0.053	0.040	0.034	0.039	0.044	0.044	0.043	0.048	0.039	0.047	0.044
	Lek en Hollandse IJssel	0.085	0.111	0.059	0.053	0.044	0.056	0.070	0.077	0.070	0.074	0.074	0.065
	Middengebied	0.067	0.053	0.049	0.031	0.040	0.051	0.046	0.051	0.062	0.056	0.049	0.055
	Zuidrand	0.051	0.079	0.056	0.025	0.029	0.033	0.053	0.052	0.049	0.051	0.062	0.068
	Maas en Waal	0.163	0.130	0.057	0.048	0.047	0.048	0.099	0.090	0.070	0.136	0.084	0.061

De RMSE en bias geven weer hoe de waterstand gemiddeld over een kalibratieperiode wordt gereproduceerd. De hoogte van de piekwaterstand telt daarin mee, maar een onderschatting of overschatting van de piekwaarde kan uitgemiddeld worden. Daarbij kan de piekwaarde volgens het model net op een ander moment optreden dan volgens metingen. Om deze redenen is ook de maximale waterstand bepaald voor de 3 berekeningen en in de metingen voor iedere kalibratieperiode. Het verschil van het berekende maximum is vergeleken met de meting voor ieder station en voor de vijf gebieden in Tabel 5.3. De grootste verschillen in maximale waterstand treden op voor de voorgangers van het SOBEK 3 RMM model. Het SOBEK 3 RMM model wijkt voor sommige perioden maximaal 0,15 m af, afgezien van station Tiel. Over de gebieden en het geheel gezien presteert het SOBEK 3 RMM model minstens zo goed in het berekenen van de maximale waterstand.

Tabel 5.3 De verschillen voor de maximale waterstand (m) voor alle waterstandsstations per kalibratieperiode voor het SOBEK-RE NDB model, de voorganger SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 en voor het SOBEK 3 RMM model. De gemeten maximale waarde per periode is weergegeven in Tabel 5.4.

		Jan 2011			Voorjaar 2011			Nov/Dec 2011			Dec 2011		
		SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2
Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas	Hoek van Holland	-0.029	0.026	-0.021	0.026	0.042	0.000	0.056	0.083	0.036	0.006	-0.001	-0.004
	Maassluis	-0.050	0.011	0.030	-0.011	-0.037	0.019	0.020	-0.021	0.039	0.015	-0.029	0.005
	Vlaardingen	-0.056	-0.053	0.027	-0.053	-0.096	0.052	-0.027	-0.115	0.000	-0.077	-0.161	-0.065
	Rotterdam	0.007	-0.003	0.022	0.050	-0.084	-0.012	0.050	-0.088	-0.051	0.029	-0.151	-0.118
Hollandse IJssel	Gouda brug												
	Krimpen ad IJssel	0.032	0.024	0.001	0.023	-0.010	-0.087	0.076	-0.002	-0.107	0.073	-0.031	-0.137
Oude Maas	Dordrecht	0.013	0.008	-0.004	0.030	-0.028	-0.077	0.077	-0.005	0.111	0.057	-0.013	-0.066
	Spijkenisse	0.005	0.004	0.081	0.012	0.016	0.135	0.062	-0.002	0.113	0.056	-0.029	0.078
	Goidschalxoord	0.030	-0.006	0.022	0.013	0.011	0.106	-0.036	-0.054	0.037	0.007	-0.055	0.040
Haringvliet/ Hollands Diep	Moerdijk	0.017	0.008	0.022	0.050	0.064	0.081	0.082	0.079	0.093	0.109	0.078	0.141
	Rak Noord	0.030	-0.034	0.029	0.062	0.033	0.066	0.090	0.022	0.081	0.119	0.064	0.148
	Hellevoetsluis	-0.004	-0.081	-0.027	0.085	0.037	0.076	0.096	0.002	0.086	0.117	0.024	0.115
Maas	Lith Dorp	0.126	-0.352	0.055	0.033	0.038	-0.084	0.159	0.108	0.071	0.641	0.090	0.079
	Heesbeen	0.062	-0.125	-0.032	0.061	0.071	-0.020	0.138	0.130	0.122	0.242	0.164	0.064
	Keizersveer	0.075	-0.012	-0.071	0.061	0.075	0.051	0.114	0.108	0.111	0.109	0.076	0.108
Lek	Hagestein Beneden	-0.054	-0.288	-0.020	-0.021	0.158	-0.021	0.012	0.164	-0.041	-0.019	0.026	-0.082
	Schoonhoven	0.056	0.067	0.047	0.002	0.124	-0.003	0.012	0.137	-0.041	-0.043	0.094	-0.066
	Krimpen aan de Lek	0.017	0.030	-0.004	0.046	0.068	-0.068	0.078	0.084	-0.084	0.102	0.078	-0.099
Waal	Tiel Waal	-0.034	-0.022	-0.181	0.012	-0.006	0.046	0.448	0.359	0.368	-0.004	-0.116	0.052
	Zaltbommel	0.049	-0.016	-0.103	0.125	0.062	-0.045	0.216	0.139	0.085	0.092	-0.050	0.043
	Vuren	0.318	-0.339	0.019	0.077	0.053	-0.027	0.138	0.092	0.066	0.101	-0.006	0.053
	Werkendam	0.276	-0.006	0.068	0.084	0.090	0.033	0.120	0.100	0.080	0.086	0.051	0.048
Gemiddelde	alle stations	0.042	-0.055	-0.002	0.037	0.032	0.010	0.094	0.063	0.051	0.087	0.005	0.016
Gemiddelde	Noordrand	-0.032	-0.005	0.015	0.003	-0.044	0.015	0.025	-0.035	0.006	-0.007	-0.085	-0.045
	Lek en Hollandse IJssel	0.013	-0.042	0.006	0.012	0.085	-0.045	0.045	0.096	-0.068	0.028	0.042	-0.096
	Middengebied	0.016	0.002	0.033	0.018	0.000	0.055	0.034	-0.020	0.054	0.040	-0.032	0.017
	Zuidrand	0.014	-0.036	0.008	0.066	0.045	0.074	0.089	0.034	0.087	0.115	0.055	0.135
	Maas en Waal	0.125	-0.125	-0.035	0.065	0.054	-0.007	0.190	0.148	0.129	0.181	0.030	0.064

Tabel 5.4 De gemeten maximale waarde per kalibratieperiode per station en per gebied.

		Jan 2011	voorjaar 2011	Nov/Dec 2011	Dec 2011
Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas	Hoek van Holland	1.630	1.710	2.030	2.470
	Maassluis	1.650	1.590	1.930	2.350
	Vlaardingen	1.770	1.720	2.000	2.480
	Rotterdam	1.780	1.760	1.990	2.480
Hollandse IJssel	Gouda brug				
	Krimpen ad IJssel	1.820	1.590	1.830	2.280
Oude Maas	Dordrecht	1.670	1.100	1.320	1.730
	Spijkenisse	1.640	1.540	1.810	2.250
	Goidschalxoord	1.530	1.310	1.590	1.980
Haringvliet/ Hollands Diep	Moerdijk	1.280	0.750	1.000	1.320
	Rak Noord	1.200	0.770	1.040	1.340
	Hellevoetsluis	1.160	0.770	1.050	1.340
Maas	Lith Dorp	5.530	1.030	1.320	3.470
	Heesbeen	3.210	0.850	1.110	1.840
	Keizersveer	1.790	0.810	1.040	1.410
Lek	Hagestein Beneden	4.220	1.470	1.820	2.590
	Schoonhoven	2.150	1.270	1.680	2.110
	Krimpen aan de Lek	1.840	1.380	1.650	2.070
Waal	Tiel Waal	9.350	3.470	2.390	7.210
	Zaltbommel	6.450	1.410	1.400	4.250
	Vuren	3.750	1.050	1.210	2.070
	Werkendam	2.270	0.920	1.130	1.570
Gemiddelde	alle stations	2.747	1.346	1.540	2.410
Gemiddelde	Noordrand	1.708	1.695	1.988	2.445
	Lek en Hollandse IJssel	2.508	1.428	1.745	2.263
	Middengebied	1.613	1.317	1.573	1.987
	Zuidrand	1.213	0.763	1.030	1.333
	Maas en Waal	4.621	1.363	1.371	3.117

5.3.8 Puntsgewijze samenvatting

- De ruwheid is per tak aangepast om zo goed mogelijk de waterstand in vier kalibratieperioden weer te geven.
- Om de waterstand binnen het gestelde bereik te laten vallen was het nodig om eb-vloed ruwheden te gebruiken. Voor eb is de (Manning) ruwheid in de meeste takken lager ($0,010-0,033 \text{ s/m}^{1/3}$) dan voor vloed ($0,016-0,065 \text{ s/m}^{1/3}$).
- Ook voor de Lek, is net als eerder al voor de Maas en de Waal, een afvoerafhankelijke ruwheid bepaald.
- Met deze ruwheden liggen de bias en RMSE van de waterstand binnen de gestelde criteria voor iedere kalibratieperiode en voor vrijwel alle waterstandsstations.
- De berekende maximale waterstand wijkt niet meer dan 0,15 m af voor het SOBEK 3 RMM model, behalve voor Tiel.
- In het middengebied en op de zuidrand is de dubbeldaagse waterstandsvariatie echter op diverse locaties groter dan de metingen en de resultaten uit SOBEK-RE. Dit is door middeling niet zichtbaar in de bias en de RMSE. Deze overschatting van de getijvariatie is getoond voor tijdseries voor Goidschalxoord in de Oude Maas (Figuur 5.36 en Figuur 5.37; middengebied) en voor Rak Noord (Figuur 5.39; zuidrand).
- In vergelijking met het SOBEK-RE NDB model en het sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 model presteert het SOBEK 3 RMM model over het algemeen beter, in elk geval tijdens de kalibratieperiode met een hoge afvoer en tijdens de periode met een lage afvoer en windopzet.

5.4 Discussie

5.4.1 Evaluatie berekende waterstand

Voor de condities tijdens de kalibratieperioden liggen de bias en RMSE van de berekende waterstand binnen de gestelde criteria voor vrijwel alle waterstand-meetstations. Alleen dichtbij de rivierrand is de RMSE voor sommige stations en perioden te hoog. Hiervoor kon geen eenduidige verklaring gegeven worden. Mogelijk kan dit worden verklaard door onzekerheid in de randvoorwaarden. Ondanks de nauwkeurige reproductie van waterstand, wordt de getijvariatie op verschillende locaties langs de zuidrand en in het middengebied overschat met ongeveer 0,1 m.

De methode die is gehanteerd voor de kalibratie van de waterstand is dat de zomerbedruwheid iteratief is aangepast. Deze methode is verkozen boven een automatische methode, aangezien het opzetten van een automatische kalibratie niet eenvoudig is voor een gebied met veel splitsingen. Doel is geweest om de waterstand aan de nauwkeurigheidscriteria te laten voldoen. Na vele iteraties is dit doel gehaald. Wanneer bij de kalibratie ook de reproductie van de getijvariatie als criterium was meegenomen, was de optimale waarde voor de zomerbedruwheid voor sommige takken verschillend geweest. Omdat vooraf een maximale bias en RMSE zijn afgesproken voor de waterstandsreproductie, zijn deze statistieken aangehouden bij de kalibratie. Een aanbeveling is om in het vervolg aanvullend een statistiek als criterium te hanteren die de waterstandsvariatie goed weergeeft, zoals het verschil tussen de dubbeldaagse amplitude van de waterstand volgens de berekening en volgens de metingen.

Het effect van de overschatting van de getijvariatie op diverse locaties op de zuidrand en in het middengebied is dat ook de amplitude van het getijdebiet wordt overschat. Onder andere in de Oude Maas, is de verwachting dat hierdoor zout te ver het model binnen dringt aan het eind van vloed.

5.4.2 Mogelijke verklaringen voor verschillen met gemeten saliniteit

De saliniteit in het SOBEK 3 RMM model werd in eerste instantie niet voor iedere kalibratieperiode en voor iedere meetlocatie even goed weergegeven. De saliniteit wordt bepaald door de randvoorwaarden van waterstand, afvoer en saliniteit op het model, door advectioneel transport en door dispersief transport. Het dispersieve transport wordt geparametriseerd in de Taylor dispersie en een stratificatiedispersie. De oorzaken die kunnen leiden tot afwijkingen van gemeten dwarsdoorsnedegemiddelde saliniteits zijn hierdoor talrijk. Bovendien is dit de eerste keer dat berekende saliniteit dynamische wordt vergeleken met metingen. In eerdere vergelijkingen werd alleen de evenwichtssituatie vergeleken. In de Rijn-Maasmonding variëren de condities voortdurend en wordt evenwicht meestal niet bereikt, zodat noodgedwongen de dynamiek van de saliniteit wordt vergeleken met metingen. Hoewel deze dynamiek zal afhangen van hoe goed het model de evenwichtssituatie beschrijft, wordt bij het reproduceren van de dynamiek in saliniteit meer gevraagd van het model. Niet alleen de evenwichtssituatie, maar ook de snelheid van het bereiken van het evenwicht moet goed worden gereproduceerd. Voor het ontrafelen van de oorzaken en verbetering van het model op basis van de gevonden oorzaak was beperkt gelegenheid binnen dit project. Enkele mogelijke oorzaken voor overschatting van de zoutindringing of in een uitzondering voor onderschatting van de zoutindringing worden beschreven.

Een eerste oorzaak voor te veel zoutindringing kan zijn dat de amplitude van de afvoer te groot is, zoals beschreven in paragraaf 5.4.1. Een te grote amplitude van de afvoer kan worden veroorzaakt door een fout in randvoorwaarden of in de schematisatie, bijvoorbeeld door een te lage ruwheid of te grote profielen. Door een te grote afvoeramplitude komt zout ieder getij te ver landinwaarts aan het eind van vloed. In combinatie met dispersie dringt op deze manier te veel zout het model binnen. Waarschijnlijk is dit met name in het middengebied en langs de zuidrand het geval, zie hiernavolgende verificatie op afvoer (sectie 6.1). Langduriger afvoermetingen zouden uitsluitsel kunnen bieden.

Een tweede oorzaak voor afwijkingen kan de zeerandvoorwaarde bij de Maasmond zijn, waar een vaste concentratie wordt opgelegd in combinatie met de Thatcher Harleman Timelag om de fluctuatie in concentratie met het getij weer te geven. Nabij de zeerand (Hoek van Holland) is te weinig fluctuatie van de saliniteit. Onderzocht is of dit kon worden verbeterd door de 'time lag' van de Thatcher-Harleman rand aan te passen, dit had niet of nauwelijks effect op de fluctuatie van de saliniteit. Daarnaast wordt door de vaste concentratie op de Maasmond onvoldoende rekening gehouden met de invloed van de rivierafvoer. Variaties in de rivierafvoer kunnen resulteren in een verschil in saliniteit van enkele psu bij de Maasmond. Dit wordt momenteel niet meegenomen in het model. Tot slot was het door de onzekerheid in de metingen van saliniteit bij Hoek van Holland (onderin wordt niet standaard gemeten) lastig te verifiëren of het zouttransport de Rijn-Maasmonding in juist wordt weergegeven.

Een derde oorzaak voor afwijkingen kan zijn dat de eigen monding aanpak voor de f4-term gecombineerd wordt met vele takken in het model. Daarbij is de eigen monding aanpak alleen gevalideerd voor de evenwichtssituatie in takken van tientallen kilometers lang (Buschman, 2017). De takken, welke worden gesplitst bij ieder haven of zijtak, in het SOBEK 3 RMM model zijn een stuk korter. Daarmee lijkt de aanpak meer op de lokale aanpak dan op de gevalideerde eigen monding aanpak. Het effect hiervan is niet precies op voorhand te duiden.

Een vierde mogelijke oorzaak is dat de zomerbedruwheid wordt gebruikt om de waterstand te kalibreren. Aangenomen wordt dat dezelfde ruwheid een maat is voor hoe makkelijk een estuariene circulatie op gang komt. Wanneer de ruwheid voor een tak te glad wordt verondersteld, wordt de f_4 -term overschat. Hiervoor wordt in SOBEK 3 de Manning ruwheid vertaald naar een Chézy coëfficiënt. Deze Chézy waarden worden gebruikt voor de f_4 -term (vergelijking 1.2). In de Nieuwe Waterweg bijvoorbeeld heeft de zomerbedruwheid een waarde die aan de ondergrens zit van wat fysisch realistisch is. Dit geeft mogelijk een overschatting van het dispersief zouttransport, waarmee het een verklaring kan zijn voor de lage waarde voor f_4 die gekozen moest worden om te hoge saliniteits te voorkomen. Daarbij worden voor het bepalen van de getijgemiddelde bijdrage van de f_4 -term aan de dispersiecoëfficiënt de vloedwaarden gebruikt, ongeacht of vloedstroming optreedt in een tak. Hierdoor wordt dus voor de meeste takken de hogere (vloed) Manning waarde gebruikt, waarmee de Chézy waarde gemiddeld over het getij wordt onderschat. Het effect van het gebruiken van de vloedruwheid in SOBEK 3 levert een onderschatting van zoutindringing voor de meeste takken.

Een vijfde oorzaak voor afwijkingen kan zijn dat het effect van rivierafvoer in de f_4 -term niet goed wordt bepaald. Uit een eerste snelle scan van de dispersiecoëfficiënt (bijlage D voor alle figuren) valt op dat de dispersiecoëfficiënt weinig varieert met de rivierafvoer. Deze variatie is kleiner dan berekend met het SOBEK-RE NDB model. Dit roept vragen op of het effect van de rivierafvoer op de f_4 -term (evenredig met de wortel van de rivierafvoer) goed uitpakt voor het RMM gebied. Dit zou nader onderzocht kunnen worden.

Een zesde mogelijke verklaring voor een overschatting van zoutindringing is dat de keuze voor de waterdiepte in de f_4 -term in SOBEK 3 af kan wijken van de diepte die in de theorie (Kuijper en van Rijn, 2011) wordt bedoeld. In de theorie is niet expliciet vermeld welke diepte gebruikt dient te worden, omdat meestal proeven met een rechthoekig profiel werden beschreven. Mogelijk zou volgens de theorie de breedtegemiddelde diepte gebruikt moeten worden voor realistische estuaria, terwijl in SOBEK 3 mogelijk de maximale diepte wordt gebruikt. Bij deze mogelijkheid wordt de diepte overschat. Nagegaan kan worden welke diepte uit het profiel precies gebruikt wordt in SOBEK 3 en welke diepte in de theorie moet zijn bedoeld. Omdat de diepte met de macht $3/2$ in de f_4 -term voorkomt, kan een overschatting (of onderschatting) een groot effect hebben. Deze en andere oorzaken voor een overschatting kunnen bij de kalibratie alleen gecompenseerd worden door een verlaging van de f_4 parameter.

Een zevende mogelijke verklaring is dat f_3 en f_4 een beperkt aantal dispersieprocessenparametriseren. Menging door faseverschillen in afvoer op splitsingspunten en door vullen en legen van havens worden niet geparametriseerd, terwijl deze mengingsprocessen in werkelijkheid van belang zijn voor de dispersie van zout. Deze verklaring wordt in de volgende paragraaf nader toegelicht.

5.4.3 Onderbouwing voor afwijkingen van theoretische waarden voor f_4 en f_3

De waarden voor f_4 waarmee de beste resultaten voor de saliniteit zijn verkregen wijken af van de theoretische waarde, zie bovenste plot van Figuur 5.1. Volgens de theorie is deze waarde 6, waarbij waarden die 30% hoger of lager zijn ook fysisch mogelijk zijn (Kuijper en van Rijn, 2011). Waarden van 2 voor de Nieuwe Waterweg en zelfs 1 voor de Oude Maas en het Spui waren nodig om aan de evaluatiecriteria te voldoen, welke lager zijn de ondergrens van 4,2 volgens de theorie. De f_4 parameter voor de stratificatiedispersie heeft een effect op de waterstand. Ondanks dat het effect op de waterstand beperkt is, was het verlagen van f_4 ook nodig om de reproductie van de waterstand te verbeteren.

De waarden voor f_4 per tak zijn iteratief bepaald. Daarbij werd van de ene naar de andere simulatie vaak de saliniteit beter weergegeven voor de ene kalibratieperiode of locatie, terwijl die elders of voor een andere kalibratieperiode verslechterde. Fouten die gemaakt worden in de randvoorwaarden, afvoerverdeling of waterstandsverhang hebben een effect op de saliniteit. Met de selectie van f_4 wordt dus niet alleen de stratificatiedispersie zo goed mogelijk geparametriseerd, ook is de parameter f_4 de enige manier om te compenseren voor overige fouten in het model.

Per tak zijn de uiteindelijke waarden om pragmatische redenen geselecteerd. In de Nieuwe Waterweg en het Hartelkanaal is f_4 gelijk aan 2. Hierdoor komt minder zout bij het splitsingspunt Nieuwe Waterweg- Nieuwe Maas-Oude Maas dan voor f_4 gelijk aan 6 zonder dat de saliniteit werd onderschat bij onder andere Rotterdam. Ook was een waarde van 2 nodig om niet te veel zout in de Oude Maas te krijgen. Daarnaast werd de amplitude van Hoek van Holland beter door niet alleen voor de Nieuwe Waterweg, maar ook voor het Hartelkanaal $f_4=2$ te hanteren en niet een hogere waarde.

Een fysische verklaring voor deze $f_4=2$ in deze takken is dat havens aanwezig zijn. Door uitwisseling van water in de hoofdtak met water in deze havens wordt in werkelijkheid de waterkolom gemengd, waardoor de stratificatie vermindert en minder zout de hoofdtak in dringt. Menging door deze uitwisseling is niet meegenomen in de f_4 -term en de f_3 -term. Deze extra menging die niet wordt geparametriseerd volgens de theorie is dus een reden de f_4 te verlagen.

In de Oude Maas en het Spui is het zouttransport als gevolg van waterstandsverschillen tussen de noordrand en de zuidrand al hoog, zoals bij een windopzet. Dit transport is al zo sterk dat het transport door dispersie laag moet zijn om te voorkomen dat te veel zout naar de zuidrand toe gaat. Hierdoor was $f_4=1$ noodzakelijk. Een fysische onderbouwing voor deze lage waarde is tweeledig. Ten eerste gaat er te veel water van en naar de zuidrand, en daarmee ook te veel zout. Ten tweede speelt dat menging op splitsingspunten, net als bij havens, niet is opgenomen in de theorie voor f_3 -term en f_4 -term. Bij eb vloeien Oude Maas en Nieuwe Maas samen en hebben zij mogelijk (zeer) verschillende saliniteits. Deze saliniteits mengen in de horizontaal en in de verticaal. Omdat deze menging niet is meegenomen in de parametriseringen is dit een reden de f_4 parameter te verlagen.

Voor de meeste takken is $f_4=6$ gehanteerd en ook $f_3=25$ conform de theorie. Voor de Hollandsche IJssel en Lek is afgeweken van deze waarde voor f_3 , omdat Kuijper (2016; 2017) waarden voor de dispersiecoëfficiënt heeft afgeleid die hoger lagen. De reden om $f_3=100$ te hanteren voor deze takken is pragmatisch: het gaf betere resultaten. Een goede fysische onderbouwing ontbreekt vooralsnog. In Kuijper (2017) wordt bovendien aangegeven dat een andere formulering voor f_3 dan ingebouwd in SOBEK 3 betere resultaten zou kunnen geven.

5.4.4 Evaluatie overschrijdingsduren

De vergelijking van gemeten en berekende overschrijdingsduur (paragraaf 5.2.7) laat zien dat de overschrijdingsduur van 150 mg/l en 300 mg/l gevoelig zijn voor onder andere de basisconcentratie, omdat de saliniteit (net voldoende lang) net wel of net niet boven de grenswaarde kan liggen. Ook is getoond dat ontzilting vaak niet goed gaat bij bijvoorbeeld Krimpen aan de IJssel en Kinderdijk en dat in de aanloop naar een relatief hoge saliniteit het SOBEK 3 RMM model de saliniteit vaak onderschat. Om deze redenen kan, net als bij het SOBEK-RE NDB model, alleen voorzichtig en in grote lijnen conclusies worden getrokken uit de berekende overschrijdingsduur.

Momenteel wijken de overschrijdingsduren voor een aanzienlijk aantal perioden en locaties meer dan 50% af tussen meting en berekening (net als bij het SOBEK-RE NDB model). Het model zou verbeterd moeten worden, voordat het model goed genoeg is om conclusies te kunnen trekken op basis van de berekende exacte overschrijdingsduur.

5.4.5 Vergelijking met SOBEK-RE

Waar beschikbaar zijn ook de SOBEK-RE resultaten getoond in de resultaten van waterstand, saliniteit en de dispersiecoëfficiënt. De verschillen zijn niet uitvoerig geanalyseerd. Wat betreft waterstand is duidelijk dat deze over het algemeen beter wordt gereproduceerd door het SOBEK 3 RMM model. De statistieken voldoen aan de nauwkeurigheidseisen, wat voor het SOBEK-RE NDB model niet voor zoveel stations en condities het geval was. Mede door het gebruik van eb-vloed ruwheid en de afvoerafhankelijke ruwheid in de Lek, is de berekende waterstand met het SOBEK 3 RMM model beter dan voor de herkalibratie met sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 en beter dan het SOBEK-RE NDB model.

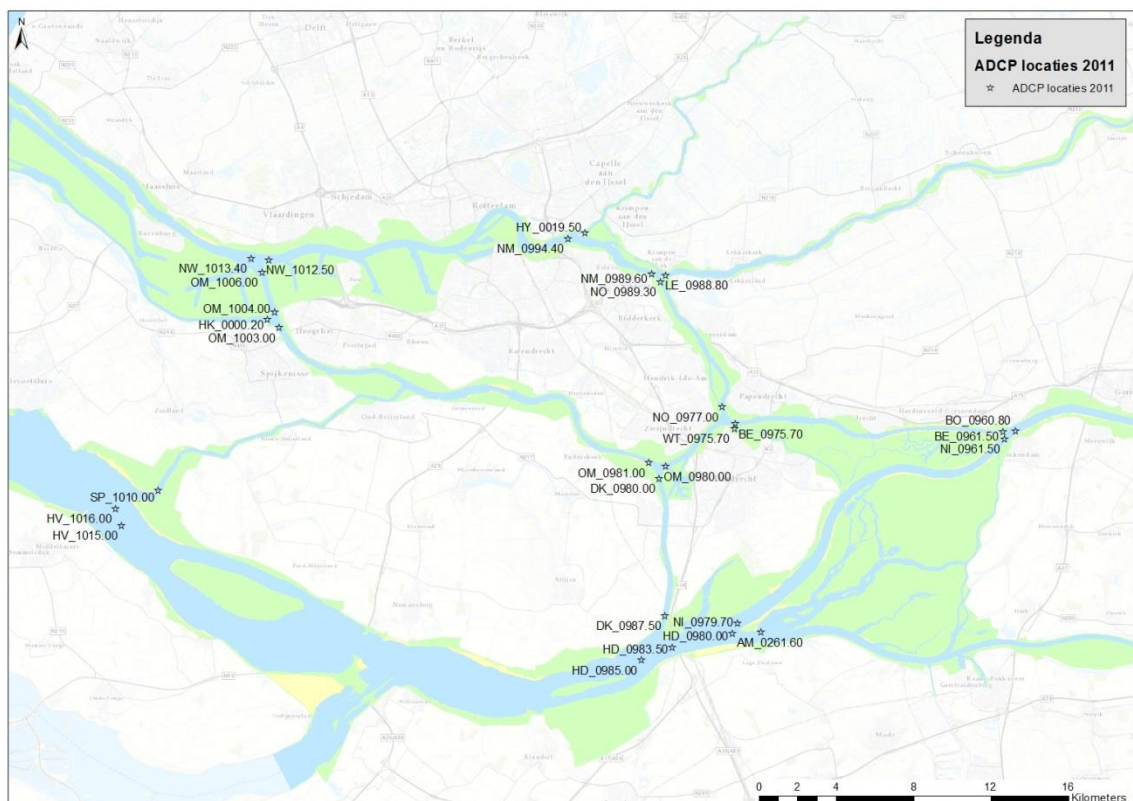
Wat betreft saliniteit is het lastiger om eenduidig aan te geven wat de prestatie is van het SOBEK 3 RMM model ten opzichte van het SOBEK-RE NDB model voor de kalibratieperioden. Een vergelijking van de statistieken (grijze lijnen voor het SOBEK-RE NDB model en rode lijnen voor het SOBEK 3 RMM model in Figuur 5.19 tot en met Figuur 5.22) leert dat het SOBEK 3 RMM model wat betreft bias en RMSE beter presteert voor de meeste locaties. Dit is het duidelijkst voor Spijkenisse, maar ook voor de meeste andere locaties is voor de meeste perioden de bias dichterbij 0 en de relatieve RMSE kleiner. Dichtbij de zuidrand, bij Zuidland, zijn de statistieken juist wat beter voor het SOBEK-RE model. Een vergelijking van de berekende tijdseries voor de verschillende locaties en perioden levert alleen voor een specifieke periode uitsluitend welk model het gedrag beter representeert. Op basis hiervan kunnen niet eenvoudig generieke conclusies worden getrokken, behalve dat de saliniteit bij windopzet goed wordt weergegeven door het SOBEK 3 RMM model, maar dat vooral bij het SOBEK 3 RMM model de saliniteit te lang hoog blijft na een dergelijke verhoging van de saliniteit.

De berekende waarde van de dispersiecoëfficiënt is getoond samen met de saliniteit en de condities. De dispersiecoëfficiënt kan niet worden vergeleken met de werkelijke waarde, omdat die niet bekend is. De dispersiecoëfficiënt berekend met het SOBEK 3 RMM model vertoont meer variatie, ook omdat in het SOBEK-RE NDB model vaste waarden als ondergrens zijn gebruikt. Daarbij wordt in het SOBEK-RE NDB model de rivierafvoer in een monding gebruikt voor de bepaling van de dispersiecoëfficiënt, waardoor de dispersiecoëfficiënt over het algemeen hoger is dan berekend met het SOBEK 3 RMM model, waarvoor de rivierafvoer in de specifieke tak wordt gebruikt. Naast de eigen monding aanpak ten opzichte van de zeemonding aanpak, wordt in het SOBEK 3 RMM model de Kuijper-van Rijn formulering gebruikt en in het SOBEK-RE NDB model de Thatcher-Harleman formulering, welke op punten verschillen (Huismans et al, 2016). Vanwege de betere fysische basis zou het SOBEK 3 RMM model de dispersiecoëfficiënt beter moeten weergeven, maar dit kon niet geverifieerd worden.

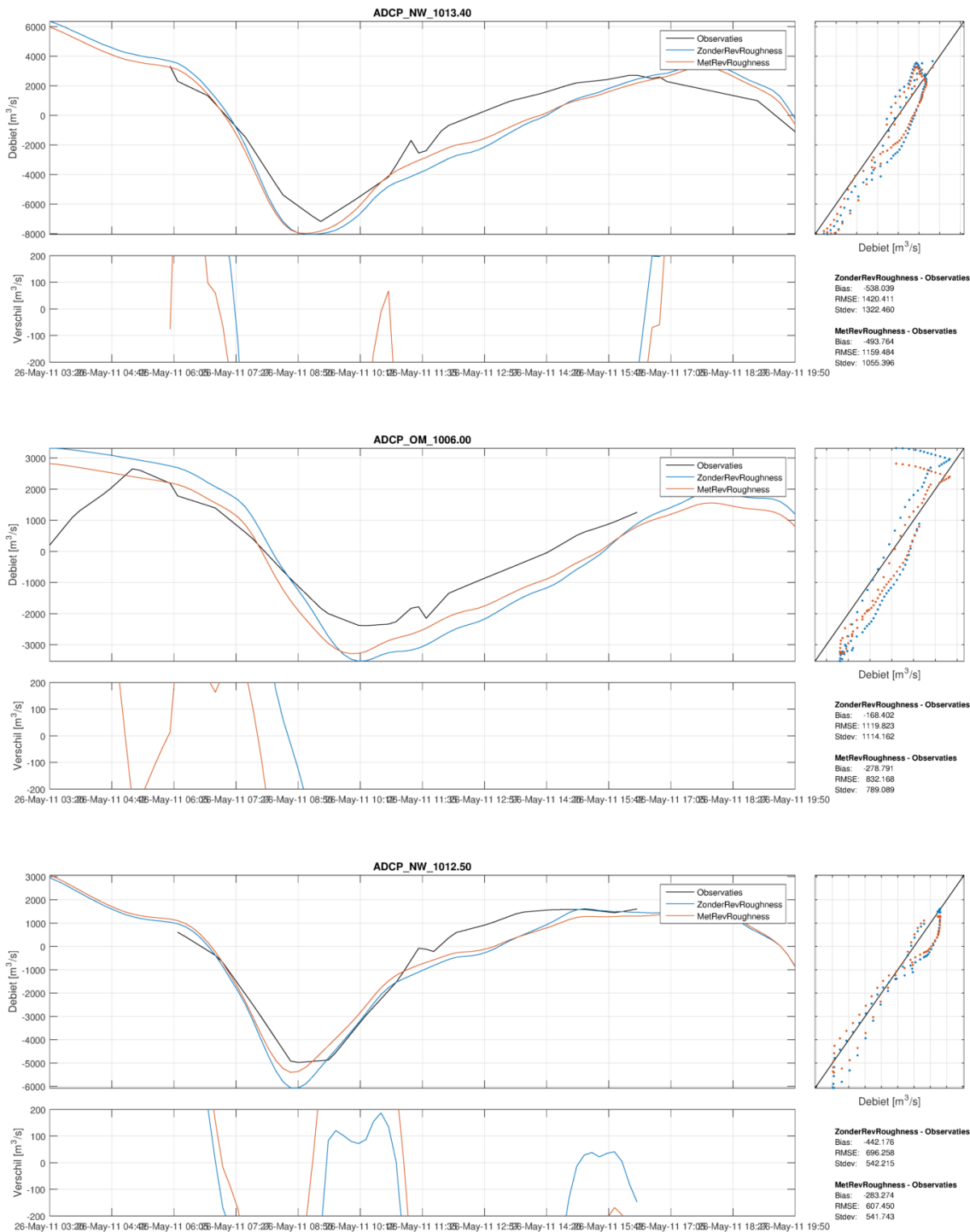
6 Verificatie

6.1 Afvoer

Bij splitsingspunten zijn in 2011 afvoeren bepaald in de omliggende riviertakken op basis van ADCP-vaartochten van ongeveer 13 uur. Afvoeren zijn beschikbaar voor een periode met lage rivierafvoer en geen windopzet (Tabel 2.1, Figuur 6.1). Van der Wijk & Fujisaki (2016) hebben deze afvoeren eerder gebruikt voor een validatie van hydrodynamische modellen. Zij hebben de onzekerheid van de metingen en de methodiek beschreven. De resulterende afvoeren zijn ook gebruikt voor een verificatie op afvoer van het SOBEK 3 RMM model. Voor de splitsing Nieuwe Waterweg- Oude Maas- Nieuwe Maas zijn de resultaten weergegeven in Figuur 6.2. Het verschil in de berekende afvoer tussen piek eb en piek vloed is voor deze splitsing licht groter dan voor de afvoer op basis van metingen. De getijvariatie wordt licht overschat. Ook zijn modelresultaten weergegeven van voordat eb-vloed ruwheid is toegepast (blauwe lijnen). In de meeste gevallen liggen de eindresultaten waarbij eb-vloed ruwheid is toegepast (rode lijnen) dichterbij de metingen.



Figuur 6.1 ADCP transectlocaties zoals gevaren in 2011

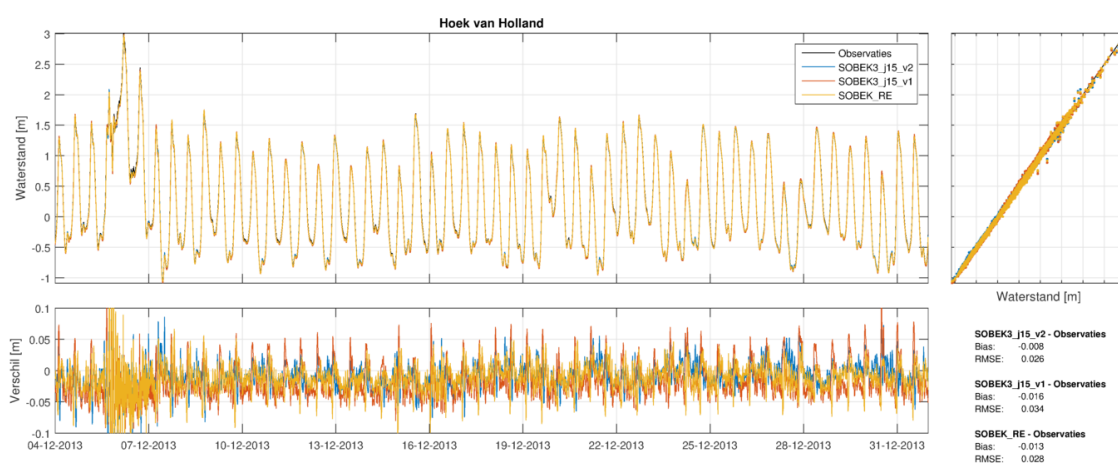


Figuur 6.2 Berekende afvoer met toepassing van eb-vloed ruwheid (rood) en het tussenresultaat met een vaste ruwheid (blauw) en afvoer op basis van metingen (zwart) voor drie dwarsdoorsneden rondom de splitsing Nieuwe Waterweg- Oude Maas- Nieuwe Maas op 26 mei 2011 (van boven naar beneden: westelijke tak, Oude Maas, oostelijke tak Nieuwe Waterweg)

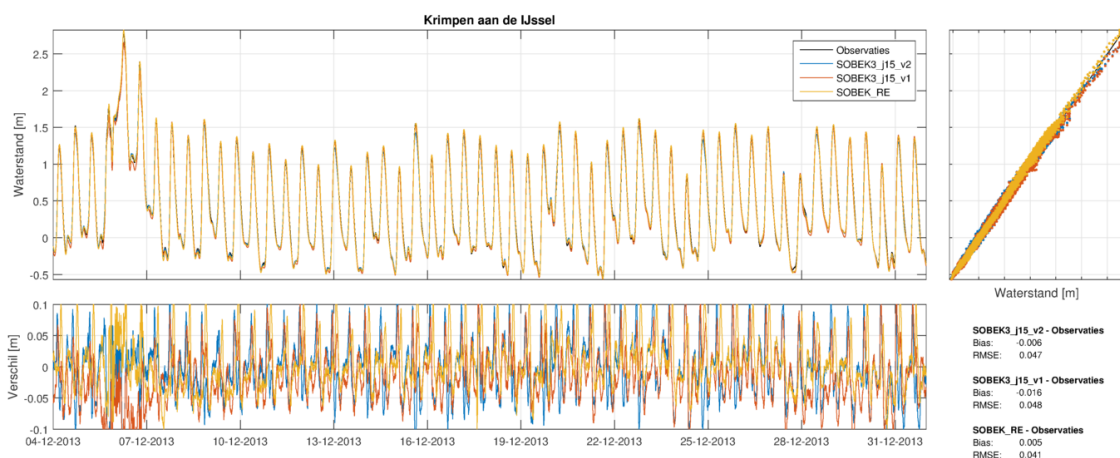
Vergelijkbare verificaties als bij de splitsing Nieuwe Waterweg- Oude Maas- Nieuwe Maas zijn uitgevoerd voor negen andere splitsingen en getoond in bijlage G. Langs de noordrand en in de Lek en in de Hollandsche IJssel is het beeld vaak vergelijkbaar als voor de splitsing Nieuwe Waterweg- Oude Maas- Nieuwe Maas. De amplitude van de afvoervariatie wordt licht overschat en resultaten met eb-vloed ruwheid liggen dichterbij de ADCP-afvoeren. In het middengebied en langs de zuidrand wordt deze amplitude over het algemeen duidelijk overschat. Deze overschatting van de afvoeramplitude is groter dan langs de noordrand en is in overeenstemming met de overschatting van getijvariatie in waterstand in het middengebied en langs de zuidrand. Op het Hollands Diep (zuidrand) en de Dordtsche Kil en het Spui (middengebied) liggen de metingen en modelresultaten verder uit elkaar te liggen, vooral door faseverschillen in de getijvariatie. Eerder is echter gebleken dat meerdere metingen in deze riviertakken minder betrouwbaar of onjuist waren (van der Wijk & Fujisaki, 2016). In bijlage is aangegeven welke metingen minder betrouwbaar zijn. In elk geval komt de berekende amplitude van de afvoer nu beter overeen met die op basis van metingen, waar deze bij de eerdere validatie flink werd overschat. Verder lijkt de afvoerverdeling beter te worden berekend bij de noordrand dan bij de zuidrand onder de omstandigheden van lage rivierafvoer en geen windopzet.

6.2 Waterstand

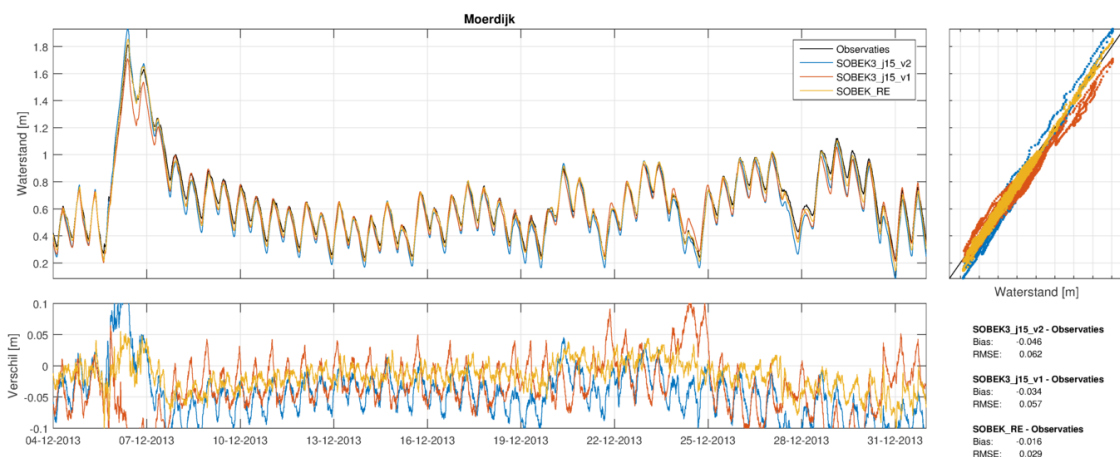
De berekende waterstand is voor vier perioden verifieerd (Tabel 2.1). De resultaten van de vergeleken tijdseries zijn getoond in bijlage F.2. Hier wordt alleen voor de periode van december 2013 met windopzet het resultaat getoond voor Hoek van Holland (Figuur 6.3), voor Krimpen aan den IJssel (Figuur 6.4) en voor Moerdijk (Figuur 6.5). Deze locaties liggen verspreid over het gebied en zijn daarmee enigszins representatief voor de andere locaties. Net als voor de kalibratieperioden volgt de berekende waterstand bij Hoek van Holland en Krimpen aan den IJssel de gemeten waterstand goed. De verschillen met metingen zijn kleiner dan 0,1 m, behalve een enkel moment rondom de windopzet van 5-12-2013. Voor Moerdijk zijn de afwijkingen rondom de windopzetperiode wat groter (Figuur 6.5). Ook wordt de getijvariatie bij Moerdijk in delen van de verificatieperiode met 0,1 m overschat. Tijdens de windopzet wordt de waterstand overschat en de dagen erna onderschat, net als voor de kalibratieperiode van december 2011 getoond is voor Rak Noord (Figuur 5.38).



Figuur 6.3 Berekende en gemeten waterstand bij Hoek van Holland voor december 2013



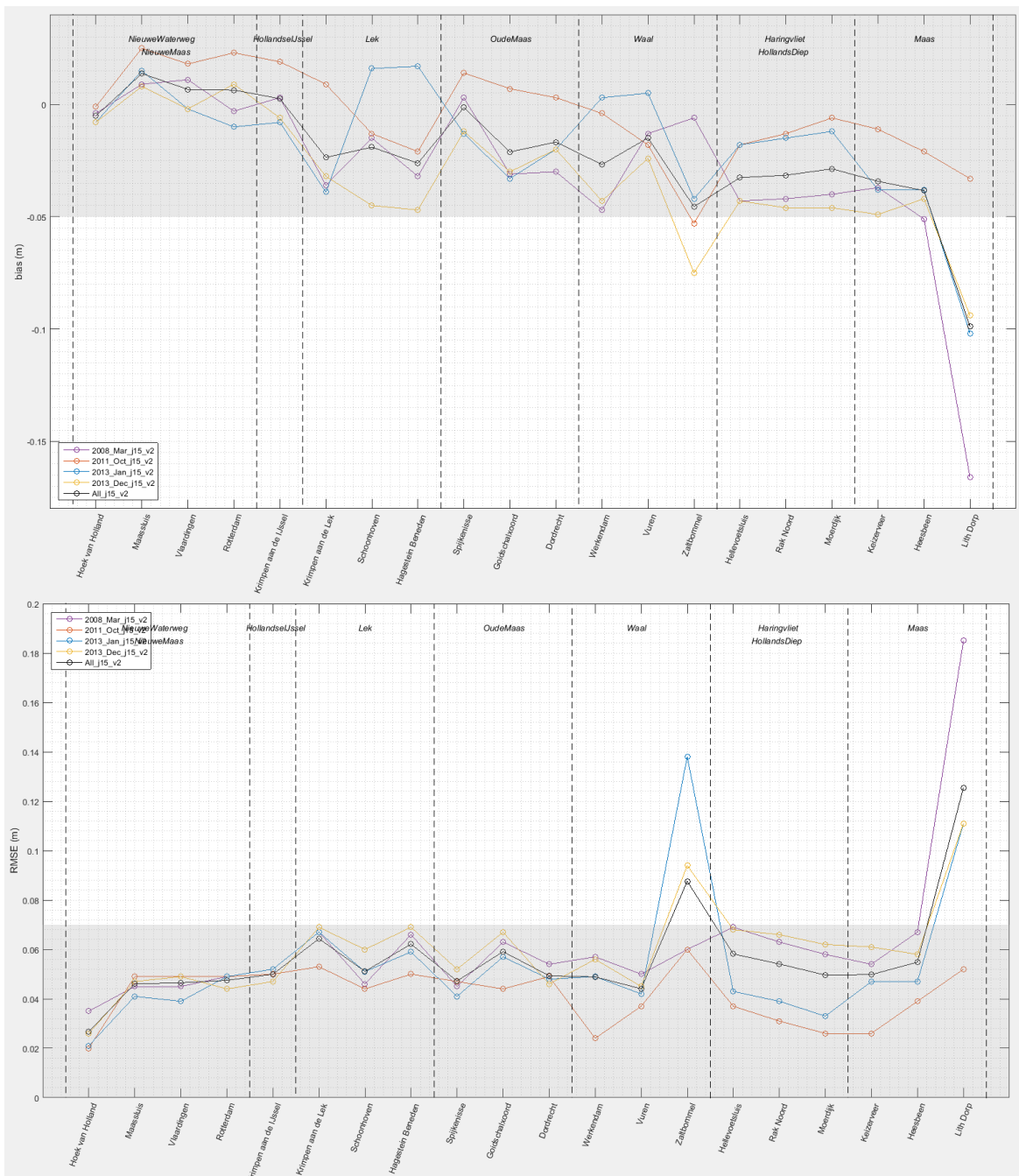
Figuur 6.4 Berekende en gemeten waterstand bij Krimpen aan den IJssel voor december 2013



Figuur 6.5 Berekende en gemeten waterstand op de zuidrand bij Moerdijk voor december 2013

Net als voor de kalibratieperioden (vergelijk met Figuur 5.44) is voor de verificatieperioden voor iedere waterstandslocatie de bias en RMSE weergegeven in Figuur 6.6. Behalve voor enkele stations in de Maas en de Waal voldoet de waterstand aan de vooraf bepaalde criteria. Voor deze stations dichtbij de rand van het model zijn in paragraaf 5.3.7 mogelijke verklaringen aangegeven voor de afwijking ten opzichte van de metingen.

Daarnaast is de prestatie ook vergeleken met het SOBEK-RE NDB model en het SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 model door alle statistieken op een rij te zetten en kleurlabels te geven (Tabel 6.1 en Tabel 6.2). Het algemene beeld en het beeld voor de vijf gebieden is vergelijkbaar met het beeld voor de kalibratieperioden: het SOBEK 3 model geeft over het algemeen de waterstand beter weer.



Figuur 6.6 De bias (boven) en RMSE (onder) voor de waterstanden per verificatieperiode en voor alle perioden samen voor de meetstations langs de verschillende takken

Tabel 6.1 De bias (m) voor alle waterstandsstations per verificatieperiode voor het SOBEK-RE NDB model, de voorganger SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 en voor het SOBEK 3 RMM model. Rode markering: voldoet niet aan het criterium; Groene markering: ruim binnen criterium ($-0,01 < bias < 0,01$ m).

		Maa 2008		Okt 2011			Jan 2013			Dec 2013		
		SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2
NieuweWaterweg /NieuweMaas	Hoek van Holland	-0.010	-0.004	0.000	-0.006	-0.001	-0.019	-0.016	-0.008	-0.007	-0.016	-0.008
	Maassluis	0.006	0.009	0.013	0.009	0.025	-0.002	0.007	0.015	0.011	0.004	0.008
	Vlaardingen	-0.010	0.011	0.001	-0.017	0.018	-0.033	-0.026	-0.002	0.001	-0.028	-0.002
	Rotterdam	-0.010	-0.003	0.047	0.008	0.023	-0.006	-0.021	-0.010	0.011	-0.006	0.009
Hollandse IJssel	Krimpen aan de IJssel	0.002	0.003	0.041	0.018	0.019	-0.006	-0.016	-0.008	0.001	-0.016	-0.006
	Gouda brug	-0.005	-0.016									
Lek	Krimpen aan de Lek	-0.044	-0.036	0.034	0.016	0.009	-0.037	-0.057	-0.039	-0.021	-0.041	-0.032
	Schoonhoven	0.010	-0.015	0.003	0.011	-0.013	0.086	0.040	0.016	-0.036	-0.040	-0.045
	Hagestein Beneden	0.004	-0.032	0.015	0.024	-0.021	0.064	-0.008	0.017	-0.032	-0.027	-0.047
OudeMaas	Spijkenisse	0.003	0.003	-0.001	0.003	0.014	-0.039	-0.015	-0.013	-0.008	-0.011	-0.012
	Goisdalhoord	-0.025	-0.031	0.005	0.008	0.007	-0.038	-0.024	-0.033	-0.021	-0.025	-0.030
	Dordrecht	-0.035	-0.030	0.017	0.009	0.003	-0.039	-0.018	-0.020	-0.009	-0.028	-0.020
Waal	Werkendam	-0.065	-0.047	0.041	0.010	-0.004	0.125	-0.032	0.003	-0.032	-0.060	-0.043
	Vuren	-0.075	-0.013	0.041	0.017	-0.018	0.058	-0.135	0.005	-0.015	-0.049	-0.024
	Zaltbommel	0.024	-0.006	0.074	0.038	-0.053	-0.025	-0.024	-0.042	-0.070	-0.008	-0.075
	Tiel Waal	-0.092	0.005	0.197	0.126	0.147	-0.045	-0.018	0.018	-0.091	-0.082	-0.023
Haringvliet/HollandsDiep	Hellevoetsluis	-0.057	-0.043	0.001	-0.008	-0.018	-0.003	-0.033	-0.018	-0.023	-0.027	-0.043
	Rak Noord	-0.039	-0.042	0.009	-0.002	-0.013	-0.008	-0.008	-0.015	-0.024	-0.034	-0.046
	Moerdijk	-0.025	-0.040	0.016	0.008	-0.006	-0.009	0.013	-0.012	-0.024	-0.034	-0.046
Maas	Keizerveer	-0.009	-0.037	0.024	0.018	-0.011	-0.004	-0.005	-0.038	-0.013	-0.037	-0.049
	Heesbeen	0.015	-0.051	0.020	0.025	-0.021	0.129	0.028	-0.038	-0.014	-0.021	-0.042
	Lith Dorp	-0.093	-0.166	0.009	0.018	-0.033	0.260	-0.033	-0.102	-0.052	-0.068	-0.094
Gemiddelde	alle stations	-0.024	-0.026	0.029	0.016	0.003	0.019	-0.019	-0.015	-0.022	-0.031	-0.032
Gemiddelde	Noordrand	-0.006	0.003	0.015	-0.002	0.016	-0.015	-0.014	-0.001	0.004	-0.012	0.002
	Lek en Hollandse IJssel	-0.007	-0.019	0.023	0.017	-0.002	0.027	-0.010	-0.004	-0.022	-0.031	-0.033
	Middengebied	-0.019	-0.019	0.007	0.007	0.008	-0.039	-0.019	-0.022	-0.013	-0.021	-0.021
	Zuidrand	-0.040	-0.042	0.009	-0.001	-0.012	-0.007	-0.009	-0.015	-0.024	-0.032	-0.045
	Maas en Waal	-0.042	-0.045	0.058	0.036	0.001	0.071	-0.031	-0.028	-0.041	-0.046	-0.050

Tabel 6.2 De RMSE (m) voor alle waterstandsstations per verificatieperiode voor het SOBEK-RE NDB model, de voorganger SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 en voor het SOBEK 3 RMM model. Rode markering: voldoet niet aan het criterium; Groene markering: ruim binnen criterium (RMSE<0,03 m).

		Maa 2008		Okt 2011			Jan 2013			Dec 2013		
		SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2
NieuweWaterweg/ NieuweMaas	Hoek van Holland	0.041	0.035	0.022	0.023	0.020	0.032	0.038	0.021	0.027	0.034	0.026
	Maassluis	0.053	0.045	0.028	0.038	0.049	0.022	0.048	0.041	0.048	0.048	0.047
	Vlaardingen	0.051	0.045	0.026	0.038	0.049	0.044	0.052	0.039	0.050	0.055	0.049
	Rotterdam	0.050	0.049	0.060	0.041	0.049	0.035	0.054	0.049	0.047	0.045	0.044
Hollandse IJssel	Krimpen aan de IJssel	0.047	0.052	0.049	0.040	0.050	0.038	0.057	0.052	0.048	0.048	0.047
	Gouda brug	0.080	0.081									
Lek	Krimpen aan de Lek	0.079	0.067	0.050	0.052	0.053	0.062	0.089	0.067	0.064	0.081	0.069
	Schoonhoven	0.042	0.046	0.055	0.029	0.044	0.109	0.052	0.051	0.056	0.061	0.060
	Hagestein Beneden	0.054	0.066	0.043	0.041	0.050	0.112	0.120	0.059	0.061	0.068	0.069
OudeMaas	Spijkenisse	0.050	0.045	0.031	0.039	0.047	0.055	0.045	0.041	0.052	0.044	0.052
	Goisdchalkoord	0.044	0.063	0.029	0.034	0.044	0.065	0.042	0.057	0.063	0.050	0.067
	Dordrecht	0.049	0.054	0.028	0.030	0.049	0.052	0.041	0.048	0.047	0.048	0.046
Waal	Werkendam	0.077	0.057	0.043	0.028	0.024	0.149	0.051	0.049	0.049	0.077	0.056
	Vuren	0.090	0.050	0.045	0.025	0.037	0.097	0.153	0.042	0.044	0.067	0.045
	Zaltbommel	0.101	0.060	0.078	0.045	0.060	0.107	0.118	0.138	0.090	0.036	0.094
	Tiel Waal	0.132	0.073	0.200	0.131	0.150	0.084	0.177	0.126	0.118	0.102	0.070
Haringvliet/HollandsDiep	Hellevoetsluis	0.073	0.069	0.024	0.022	0.037	0.034	0.049	0.043	0.057	0.058	0.068
	Rak Noord	0.050	0.063	0.021	0.020	0.031	0.030	0.026	0.039	0.053	0.055	0.066
	Moerdijk	0.044	0.058	0.023	0.027	0.026	0.028	0.035	0.033	0.049	0.057	0.062
Maas	Keizerveer	0.047	0.054	0.030	0.040	0.026	0.026	0.037	0.047	0.038	0.062	0.061
	Heesbeen	0.067	0.067	0.027	0.040	0.039	0.163	0.049	0.047	0.054	0.053	0.058
	Lith Dorp	0.131	0.185	0.032	0.051	0.052	0.340	0.055	0.111	0.085	0.094	0.111
Gemiddelde	alle stations	0.066	0.063	0.045	0.040	0.047	0.080	0.066	0.057	0.057	0.059	0.060
Gemiddelde	Noordrand	0.049	0.044	0.034	0.035	0.042	0.033	0.048	0.038	0.043	0.046	0.042
	Lek en Hollandse IJssel	0.060	0.062	0.049	0.041	0.049	0.080	0.080	0.057	0.057	0.065	0.061
	Middengebied	0.048	0.054	0.029	0.034	0.047	0.057	0.043	0.049	0.054	0.047	0.055
	Zuidrand	0.056	0.063	0.023	0.023	0.031	0.031	0.037	0.038	0.053	0.057	0.065
	Maas en Waal	0.092	0.078	0.065	0.051	0.055	0.138	0.091	0.080	0.068	0.070	0.071

Ook is de berekende maximale waterstand vergeleken met de maximale waterstand uit metingen. Het valt op dat voor maart 2008 de berekende pieken op de Lek lager zijn dan op basis van metingen (ongeveer 0,2 m). Voor de overige locaties is het beeld vergelijkbaar als voor de kalibratieperioden. Per gebied presteert het SOBEK 3 RMM model zeker zo goed als haar voorgangers.

Tabel 6.3 De verschillen voor de maximale waterstand (m) voor alle waterstandsstations per validatieperiode voor het SOBEK-RE NDB model, de voorganger SOBEK3_RMM-VOZO_5-j15-v1 en voor het SOBEK 3 RMM model. De gemeten maximale waarde per periode is weergegeven in Tabel 6.4.

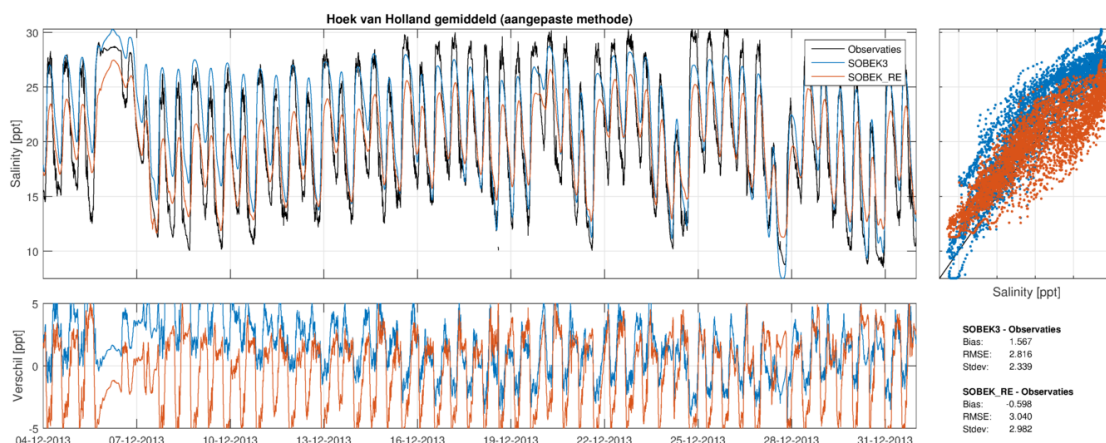
		Maa 2008		Nov 2011			Jan 2013			Dec 2013			
		SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2	SOBEK-RE	SOBEK3_j15-v1	SOBEK3_j15-v2
Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas	Hoek van Holland	nvt	0.155	0.115	0.008	0.018	-0.022	0.194	0.223	0.014	-0.039	-0.020	-0.034
	Maassluis		0.140	0.082	0.001	-0.004	0.046	0.064	0.169	0.034	-0.141	-0.162	-0.140
	Vlaardingen		-0.164	-0.010	-0.015	-0.076	0.049	0.016	0.021	-0.020	-0.149	-0.225	-0.107
	Rotterdam		-0.172	-0.091	0.048	-0.080	-0.033	0.115	0.052	-0.016	0.062	-0.165	-0.061
Hollandse IJssel	Gouda brug		-0.014	-0.077				0.100	-0.012	-0.074	0.199	0.083	0.125
	Krimpen ad IJssel		-0.098	-0.165	0.025	-0.014	-0.095	0.087	0.074	-0.021	0.056	-0.114	-0.138
Oude Maas	Dordrecht		-0.213	-0.230	0.016	-0.029	-0.076	0.034	-0.005	-0.011	0.017	-0.167	-0.076
	Spijkenisse		-0.051	0.075	0.023	-0.003	0.103	0.067	0.074	0.025	-0.016	-0.119	0.009
	Goidschalxoord		-0.183	-0.079	-0.012	-0.021	0.064	0.052	0.029	0.024	-0.129	-0.213	-0.046
Haringvliet/ Hollands Diep	Moerdijk		-0.045	0.005	0.046	0.026	0.048	0.056	0.017	0.043	0.046	-0.100	0.121
	Rak Noord		-0.081	0.005	0.052	0.023	0.050	0.058	-0.026	0.022	0.085	-0.055	0.152
	Hellevoetsluis		-0.025	0.071	0.036	0.005	0.029	0.049	-0.017	-0.012	0.148	0.070	0.203
Maas	Lith Dorp		-0.146	-0.157	-0.004	-0.014	-0.101	0.715	0.042	0.013	0.388	-0.105	-0.130
	Heesbeen		-0.054	-0.081	0.019	0.005	-0.062	0.318	0.086	-0.056	0.153	-0.085	0.119
	Keizersveer		-0.020	0.029	0.037	0.022	0.015	0.063	-0.006	0.016	0.081	-0.124	0.081
Lek	Hagestein Beneden		-0.083	-0.224	-0.017	0.046	-0.083	-0.011	-0.104	0.052	-0.016	-0.025	-0.051
	Schoonhoven		-0.046	-0.140	0.001	0.042	-0.054	0.031	0.025	-0.003	-0.003	-0.041	-0.052
	Krimpen aan de Lek		-0.039	-0.187	0.026	0.040	-0.098	0.075	0.076	-0.008	0.061	-0.055	-0.138
Waal	Tiel Waal		-0.177	-0.015	0.135	0.056	0.091	-0.027	0.209	0.109	-0.132	-0.244	-0.175
	Zaltbommel		-0.040	0.007	0.020	-0.030	-0.128	0.046	0.136	0.077	-0.130	-0.065	-0.171
	Vuren		-0.125	-0.080	0.018	-0.003	-0.065	0.289	-0.213	0.072	0.100	-0.123	0.039
	Werkendam		-0.093	-0.090	0.043	0.028	-0.014	0.226	-0.007	0.076	0.095	-0.079	0.077
Gemiddelde	alle stations		-0.072	-0.056	0.024	0.002	-0.016	0.119	0.038	0.016	0.033	-0.097	-0.018
Gemiddelde	Noordrand		-0.010	0.024	0.010	-0.035	0.010	0.097	0.116	0.003	-0.067	-0.143	-0.086
	Lek en Hollandse IJssel		-0.056	-0.159	0.009	0.029	-0.083	0.056	0.012	-0.011	0.059	-0.031	-0.051
	Middengebied		-0.149	-0.078	0.009	-0.018	0.031	0.051	0.033	0.013	-0.043	-0.166	-0.038
	Zuidrand		-0.051	0.027	0.045	0.018	0.042	0.054	-0.009	0.017	0.093	-0.028	0.159
	Maas en Waal		-0.094	-0.055	0.038	0.009	-0.038	0.233	0.035	0.044	0.079	-0.118	-0.023

Tabel 6.4 De gemeten maximale waarde per validatieperiode per station en per gebied.

		Maa 2008	Nov 2011	Jan 2013	Dec 2013
Nieuwe Waterweg/ Nieuwe Maas	Hoek van Holland	2.75	1.39	1.73	3.01
	Maassluis	2.35	1.3	1.71	2.84
	Vlaardingen	2.63	1.43	1.89	2.9
	Rotterdam	2.74	1.46	1.91	2.9
Hollandse IJssel	Gouda brug	2.26		2.21	1.94
	Krimpen ad IJssel	2.53	1.31	1.91	2.77
Oude Maas	Dordrecht	2	0.88	1.75	2.22
	Spijkenisse	2.4	1.29	1.75	2.68
	Goidschalxoord	2.12	1.07	1.61	2.46
Haringvliet/ Hollands Diep	Moerdijk	1.47	0.66	1.3	1.81
	Rak Noord	1.47	0.69	1.25	1.79
	Hellevoetsluis	1.39	0.7	1.12	1.63
Maas	Lith Dorp	3.66	0.78	3.92	3.29
	Heesbeen	1.93	0.69	2.1	1.91
	Keizersveer	1.57	0.67	1.52	1.9
Lek	Hagestein Beneden	2.9	1.19	3.56	2.86
	Schoonhoven	2.42	1.05	2.23	2.62
	Krimpen aan de Lek	2.35	1.13	1.91	2.6
Waal	Tiel Waal	7.04	2.99	8.72	5.99
	Zaltbommel	4.05	1.24	5.79	3.19
	Vuren	2.3	0.87	3.17	2.16
	Werkendam	1.9	0.77	2.06	2.01
Gemiddelde	alle stations	2.555909	1.121905	2.505455	2.612727
Gemiddelde	Noordrand	2.6175	1.395	1.81	2.9125
	Lek en Hollandse IJssel	2.492	1.17	2.364	2.558
	Middengebied	2.173333	1.08	1.703333	2.453333
	Zuidrand	1.443333	0.683333	1.223333	1.743333
	Maas en Waal	3.207143	1.144286	3.897143	2.921429

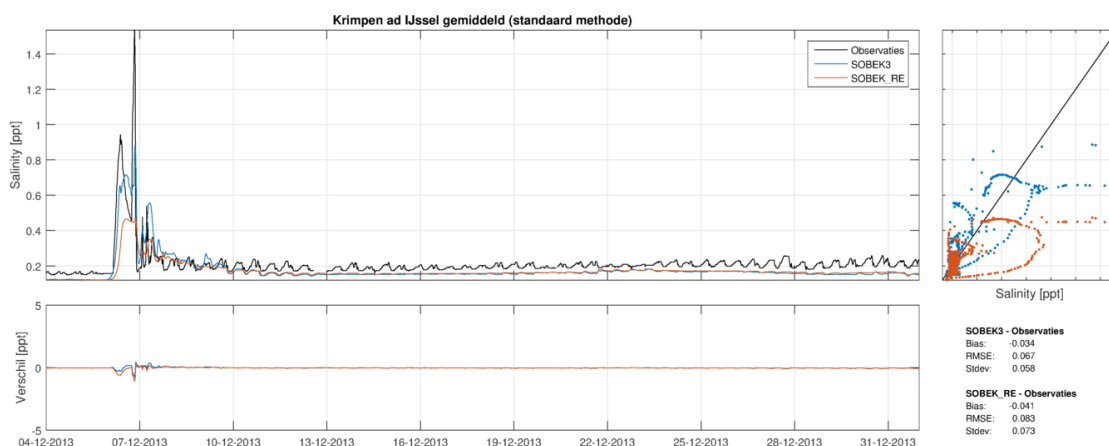
6.3 Saliniteit

Voor dezelfde periode van december 2013 is de vergelijking van saliniteit getoond voor Hoek van Holland (Figuur 6.7), Krimpen aan den IJssel (Figuur 6.8) en voor Zuidland (Figuur 6.9). Voor Hoek van Holland wordt de saliniteit overschat door het SOBEK 3 RMM model tijdens en kort na de stormopzet. Later in december worden vooral de piekconcentraties onderschat en is de variatie binnen een dag kleiner dan in de metingen. Op ieder moment is het verschil met de gemeten concentratie kleiner dan de variatie binnen een dag.

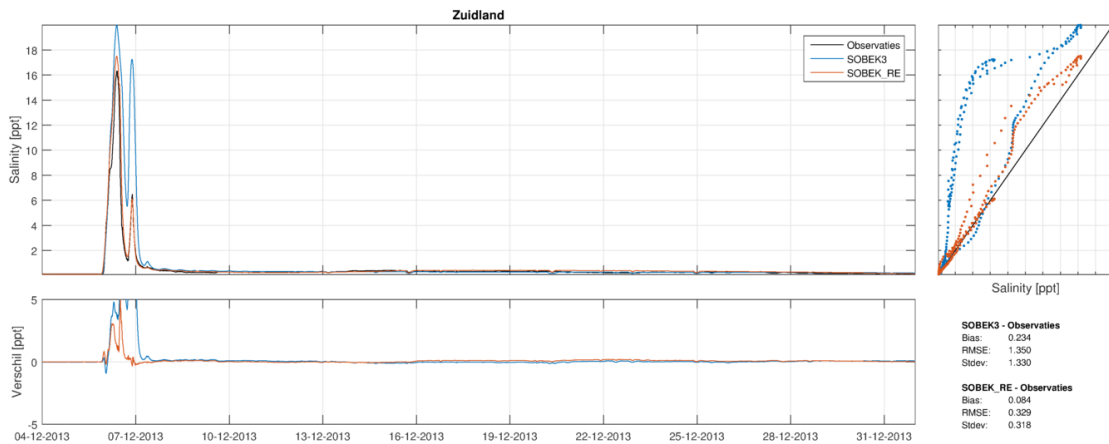


Figuur 6.7 Berekende en gemeten saliniteit bij Hoek van Holland voor december 2013

Voor Krimpen aan den IJssel wordt de pieksaliniteit door de windopzet 1,0 psu, terwijl deze volgens metingen ongeveer 1,5 psu is (Figuur 6.8). Bij Zuidland (Figuur 6.9) overschat het SOBEK 3 RMM model juist de pieksaliniteit met pieken tot ongeveer 20 psu, terwijl de meting aangeeft dat de achterwaartse verzilting heeft geleid tot 16 psu. Het SOBEK-RE NDB model reproduceert de piek beter. Na de piek wordt het verloop van de saliniteit door het SOBEK 3 RMM model redelijk gereproduceerd, hoewel de basisconcentratie voor beide locaties wat te laag wordt berekend. Dit is alleen in Figuur 6.8 goed zichtbaar voor Krimpen aan de IJssel, omdat de schaal voor Zuidland een groot bereik heeft.



Figuur 6.8 Berekende en gemeten saliniteit bij Krimpen aan den IJssel voor december 2013



Figuur 6.9 Berekende en gemeten saliniteit bij Zuidland voor december 2013

6.4 Puntsgewijze samenvatting

- Op basis van de ruwheden zijn waterstanden berekend voor vier verificatieperioden en vergeleken met metingen:
 - de bias en RMSE liggen ook voor deze verificatieperioden binnen de gestelde criteria voor alle waterstandsstations, behalve voor enkele stations in de Waal en de Maas.
 - De maximale waterstand wijkt maximaal 0,2 m af.
 - In het middengebied en op de zuidrand is de waterstandsvariatie echter op diverse locaties groter dan de metingen en de resultaten op basis van het SOBEK-RE NDB model.
 - Het SOBEK 3 model geeft over het algemeen de waterstand beter weer dan het SOBEK-RE NDB model en het sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 model.
- De afvoer bij splitsingen is vergeleken met ADCP metingen:
 - Het SOBEK 3 RMM model met eb-vloed ruwheden geeft over het algemeen de afvoer beter weer.
 - De afvoeramplitude wordt op de splitsing Nieuwe Waterweg- Oude Maas- Nieuwe Maas licht overschat met het SOBEK 3 RMM model.
 - De afvoeramplitude in het middengebied en langs de zuidrand wordt duidelijker overschat dan in langs de noordrand, in overeenstemming met de overschatting van getijvariatie in waterstand.
 - Langs de zuidrand valt op dat soms faseverschillen optreden van meer dan een uur tussen berekende en gemeten afvoeren.
- De saliniteit is vergeleken voor de verificatieperiode van december 2013 met een windopzet:
 - De variatie binnen een dag wordt onderschat bij Hoek van Holland.
 - De windopzet geeft een vergelijkbaar verloop van saliniteits als in metingen. De piek wordt in Hoek van Holland overschat, bij Krimpen aan den IJssel onderschat en bij Zuidland overschat.
 - Voor deze periode is het niet eenduidig welk model de saliniteit beter weergeeft.

7 Conclusies, toepasbaarheid en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Het SOBEK 3 RMM model is aangepast, opnieuw gekalibreerd voor waterstand en saliniteit en geverifieerd voor waterstand, afvoerverdeling en saliniteit. De schematisatie is aangepast door het volume in de takken westelijk van de Haringvlietsluizen te verkleinen. Door deze aanpassing volgde uit de kalibratie voor waterstand een fysisch realistische ruwheid rondom de Haringvlietsluizen. Bij de kalibratie zijn ruwheden voor eb en vloed bepaald, waarbij de ruwheid bij eb voor de meeste takken lager is dan voor vloed. Met deze ruwheden ligt de berekende waterstand in vergelijking met metingen binnen de vooraf opgestelde grenzen voor vrijwel alle perioden en meetlocaties. Daarbij wordt opgemerkt dat op locaties in het middengebied en de zuidrand de getijvariatie wordt overschat met ongeveer 0,1 m. Door het hanteren van de eb-vloed ruwheden is de weergave van afvoerverdeling licht verbeterd ten opzichte van de eerdere versie van het SOBEK 3 model. De saliniteit is gekalibreerd met behulp van dispersieparameters behorende bij formuleringen die nieuw zijn ingebouwd in SOBEK 3. In enkele takken was het nodig om de parameter voor stratificatiedispersie (f_4) lager in te stellen dan de theoretische ondergrens. Hiervoor zijn mogelijke verklaringen gegeven. Het gekalibreerde model geeft grofweg de pieken goed weer en vertoont kwalitatief vergelijkbare variatie als de metingen. Exacte saliniteits kunnen echter sterk verschillen ten opzichte van de metingen. Daarbij lijkt de saliniteit in het model vaak te traag te reageren op een verandering in externe forcering.

De *waterstand* berekend met het opnieuw gekalibreerde SOBEK 3 RMM model voldoet aan de vooraf opgestelde nauwkeurigheidseisen voor alle afzonderlijke perioden en locaties, behalve enkele stations in de Waal, Lek en de Maas. Die stations liggen dichtbij de rand van het model en zijn niet de eerste interesse van het model. Dit betekent dat voor alle condities de absolute bias kleiner is dan 0,05 m en de RMSE kleiner is dan 0,07 m, met uitzondering van enkele perioden en stations in de Waal en de Maas. De maximale berekende waterstand wijkt niet meer af dan 0,2 m. In deze statistieken komt niet naar voren dat de waterstandsvariatie door getij op locaties in het middengebied en op de zuidrand wordt overschat met orde 0,1 m. In vergelijking met de eerdere versie van het SOBEK 3 RMM model is de reproductie van waterstand verbeterd. In vergelijking met het SOBEK-RE NDB model reproduceert het SOBEK 3 RMM model de waterstanden beter, behalve de genoemde waterstandsvariatie op verschillende locaties in het middengebied en op de zuidrand.

De *afvoer* kon alleen worden vergeleken met afvoer op basis van bootmetingen vanaf een schip bij splitsingspunten gedurende een halve dag tijdens lage rivierafvoer en geen windopzet. De getijgemiddelde afvoer kon niet worden geverifieerd. Globaal komen de gemeten en berekende afvoer overeen. Vooral in het middengebied en langs de zuidrand wordt de berekende afvoeramplitude overschat, maar ook licht langs de noordrand. Daarnaast treden vooral op de zuidrand verschillen in fase op van meer dan een uur, waardoor het moment van kentering niet goed wordt weergegeven. Door het gebruiken van de eb-vloed ruwheid is de overschatting van de getijvariatie minder groot geworden dan met het sobek-rmm-vozo-j15_5-v1 model. Voor de beschikbare metingen bij de splitsing Oude Maas-Nieuwe Maas- Nieuwe Waterweg wordt de amplitude van het getijdebiet duidelijk minder overschat met het herkalibreerde SOBEK 3 RMM model.

De *saliniteit* is berekend met een verbeterde fysische basis voor het parametriseren van het zouttransport in SOBEK 3. Bij de kalibratie moest de parameter voor stratificatiedispersie (f_4) in de Nieuwe Waterweg, Hartelkanaal, Oude Maas en Spui lager ingesteld worden dan de

theoretische waarde om overschatting van de saliniteit te voorkomen. Hiervoor zijn een aantal mogelijke verklaringen gegeven, zoals te hoge amplitude van het getijdebiet, de waarde van de ruwheid, en diverse mengingsprocessen (zoals menging bij havens en splitsingen) die niet ondervangen worden door de formulering. Een andere verklaring is dat de theorie is afgeleid voor statische condities (Rigter cases). In dit project is deze parametrisatie toegepast op dynamische condities. Mogelijk dient een verschil voor statische en dynamische condities gehanteerd te worden om saliniteit beter te simuleren. In vergelijking met het SOBEK-RE NDB model zien we dat het SOBEK 3 RMM model niet altijd beter presteert. In het SOBEK 3 RMM model wordt bijvoorbeeld een piek door windopzet redelijk gereproduceerd, maar in de dagen daarna blijft de saliniteit soms te lang hoog. De statistieken voor de kalibratie- en verificatieperioden en de overschrijdingsduren geven aan dat het SOBEK 3 RMM model over het algemeen vergelijkbaar of iets beter presteert dan het voorgaande SOBEK-RE NDB model. Echter, er zijn ook perioden en meetlocaties waar het SOBEK 3 RMM model minder goed lijkt te presteren, zoals bij Zuidland.

Binnen dit project is besloten om niet te streven naar verdere verbetering van de zoutreproductie. Dit model kan in eerste instantie de SOBEK-RE modellen vervangen en voldoet daarmee aan het eerste beoogde gebruik. Voor verdere verbeteringen is het raadzaam om eerst terug te gaan naar de vertaling van de theorie naar het model. In paragraaf 7.3 wordt verder ingegaan op de mogelijke verbeteringen, gezien de betere fysische basis van de nieuwe formulering en de berekening van dispersie per tak zien we potentie voor verbetering voor zowel de resultaten als het voorspellende vermogen van het model. Met een verbetering van de zouttrand bij de Maasmond en het verlagen van de getijvariatie in het middengebied kan wellicht de kalibratie van f_4 worden verbeterd en daarmee de voorspelling van saliniteit in het middengebied en langs de zuidrand. Met het oog op de beperkte reproductie van de overschrijdingsduren en de vele vragen rondom zoetwaterbeschikbaarheid (o.a. Kierbesluit en klimaatverandering) en de beperkte reproductie van de overschrijdingsduren, wordt geadviseerd een dergelijke verbetering te maken.

7.2 Toepasbaarheid

Voor het berekenen van de *waterstand* voldoet het opnieuw gekalibreerde SOBEK 3 RMM model voor de verschillende stations en voor de verschillende condities op basis waarvan kalibratie- en verificatieperioden zijn geselecteerd aan de gestelde nauwkeurigheidseisen. De enige uitzondering zijn enkele stations in de Lek, Waal en de Maas dichtbij de rand. Mogelijk wordt de waterstand voor deze locaties nauwkeuriger bepaald met het Rijnakken model. De waarden voor zomerbedruwheid zijn fysisch realistisch en kunnen verklaard worden. Daarmee is het model generiek geschikt voor toepassingen gericht op operationeel beheer gericht op de waterstand en kan het voor dit doel toegepast worden in BOS-Stormvloedkering en RWsOS-RMM. Een beperking van de geschiktheid is de overschatting van de getijvariatie in het middengebied en op de zuidrand met ongeveer 0,1 m, waardoor berekende getijpoorten en het areaal intergetijdegebied in dit deel van de Rijn-Maasmonding mogelijk minder nauwkeurig zijn. Hoge waterstanden worden goed gereproduceerd en daarmee kan het model toegepast worden binnen de MHW-processor.

Voor scenariostudies zoals het bepalen van het effect van een hogere zeewaterstand, kieren van het Haringvliet of het effect van hoge of lage afvoeren is het model geschikt om waterstand te berekenen, zo lang de situatie bij dat scenario niet te veel afwijkt van de huidige schematisatie. De onnauwkeurigheid is naar verwachting groter dan bij het berekenen van actuele situaties.

Voor het berekenen van de *saliniteit* is het SOBEK 3 RMM model geschikt om het globale beeld van een zoutindringingsgebeurtenis voor de actuele situatie weer te geven. Doordat de exacte saliniteits sterk kunnen afwijken van de metingen, wijken de overschrijdingsduren voor een aanzienlijk aantal perioden en locaties meer dan 50% af tussen meting en berekening (net als bij het SOBEK-RE NDB model). Hierdoor is het model (nog) niet geschikt om uitspraken te doen op basis van de berekende *exacte* overschrijdingsduur. Aan de zuidrand geldt dat de mengingsprocessen in het Haringvliet niet goed kunnen worden weergegeven door het model, omdat de diepte en breedte van het Haringvliet relatief groot zijn en de zoutverspreiding bepaald wordt door 3D processen die niet goed zijn te parametriseren in een ééndimensionaal model. Bovendien wordt dispersie van zout in het huidige SOBEK 3 RMM model voorkomen door de dispersieparameters ten oosten van de Haringvlietsluizen voor 1 km op 0 te zetten. Zoutverspreiding in het Haringvliet ten gevolge van achterwaartse verzilting of het openen van de sluisen, kan daardoor niet goed berekend worden.

Voor scenariostudies met het SOBEK 3 RMM model kan onderscheid gemaakt worden tussen een verandering van randvoorwaarden (aanpassing rivierafvoeren, waterstand op zee en de saliniteit Maasmond) en van de schematisatie (verdieping of aanpassing aan keringen). Voor scenario's met alleen andere randvoorwaarden is de vraag of het gedrag voor eventuele nieuwe extreme forceringen goed wordt gereproduceerd, terwijl bij een aanpassing van bijvoorbeeld de diepte in een deel van het model het geparametriseerde effect hiervan op het zouttransport juist moet zijn. Voor beide typen scenariostudies wordt geadviseerd om voorafgaand met een 3D berekening te verifiëren dat het SOBEK 3 RMM model de juiste respons op een verandering berekent. Uit deze verificatie moet blijken dat het model correct reageert op de te bestuderen verandering en dat de veranderingen in de relevante mengingsprocessen goed worden weergegeven. De verwachting is dat scenariostudies met aanpassingen aan de schematisatie niet altijd voldoen aan de verificatie, omdat de waarden van f_4 passen bij de huidige situatie (2015) en de dispersiecoëfficiënt gevoelig is voor onder andere diepteveranderingen. Nadat is geverifieerd dat het SOBEK 3 RMM model correct reageert op de te bestuderen verandering, kan het model worden ingezet om een beeld te krijgen van hoe de reactie van het systeem verandert en met welke mate de zoutindringing zal toe- of afnemen. Ook kan een beeld verkregen worden hoe de overschrijdingsduren verschillen tussen de scenario's. Het model is echter niet geschikt om exacte overschrijdingsduren te evalueren.

De *afvoerverdeling* hebben we met metingen bij splitsingen van een halve dag geverifieerd. Dit was onvoldoende data om te verifiëren binnen welke marges deze door het model wordt berekend. Voor getijgemiddelde afvoerverdeling was het in het geheel niet mogelijk om te verifiëren met metingen. Geconstateerd is dat vooral in het middengebied en langs de zuidrand de afvoeramplitude wordt overschat. Langs de zuidrand zijn faseverschillen van meer dan een uur gevonden. Aangezien de waterstand over het algemeen nauwkeurig wordt gereproduceerd en daarmee ook verhangen, zou verondersteld kunnen worden dat de afvoerverdeling ook binnen de veronderstelde marge ligt. Echter, het grote aantal splitsingen, zoutindringing en de interacties tussen de takken maken dat de afvoerverdeling binnen een getij en getijgemiddeld complex is en niet alleen door het lokale verhang wordt bepaald. Slechts voor een algemeen beeld van de afvoerverdeling en de verandering hierin als gevolg van maatregelen en als gevolg van andere randvoorwaarden kan het model gebruikt worden.

7.3 Aanbevelingen

Aanbevelingen om meer inzicht te krijgen in de redenen voor afwijkingen berekend met het SOBEK 3 RMM model ten opzichte van metingen en om de kalibratie te verbeteren en daarmee het toepassingsbereik te vergroten staan beschreven in Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Aanbevelingen voor verbetering waterstand, saliniteit en afvoer

Wat	Doel	Hoe
Nagaan hoe het getijdebiet varieert in het model en waarom	Door te veel water in en uit de Rijn-Maasmonding, ontstaan er te hoge saliniteits, m.n. aan de zuidrand. Als achterhaald kan worden waar de te hoge getijdebieten vandaan komen, kan dit mogelijk verbeterd worden. Met een betere weergave van afvoer, zal ook het voorspellend vermogen van de waterstanden verbeterd kunnen worden.	<ol style="list-style-type: none"> 1 Nader kwantificeren hoeveel de afvoer afwijkt voor de andere splitsingspuntmetingen dan die van mei 2011 op splitsingspunt OMS-NMS-NWW. 2 Analyse van amplitude dubbeldagse getijdebiet in waterstand (incl. vergelijking met metingen) en afvoer bij verschillende condities 3 SOBEK 3 profielen vergelijken met SOBEK-RE profielen, m.n. bij Oude Maas. Als deze te ruim zijn gaat meer water in- en uit. 4 Controle van het effect van het nieuwe advection-junction schema.
Effect zoetwateruitstroom op de randvoorwaarde/afleiding betere zeerandvoorwaarde	Bij lage rivierafvoer zal de zoutrand bij Maasmond zouter zijn en bij lage rivierafvoer hoger. Dit zit mogelijk niet goed in de randvoorwaarde. Met een betere randvoorwaarde wordt waarschijnlijk ook de respons van het systeem op afvoer en windopzet beter.	<ol style="list-style-type: none"> 1 Controleer of inderdaad de zoetwateruitstroom onvoldoende terugkomt in de randvoorwaarde. 2 Zo ja, dan kan misschien op basis van Hoek van Holland een betere randvoorwaarde worden afgeleid.
Waarom afwijking f4	Als we begrijpen waar de afwijkingen vandaan komen, dan weten we beter wat het toepassingsbereik is en welke mogelijke verbeteringen er nog mogelijk zijn.	<ol style="list-style-type: none"> 1 Ga na of de theorie ook toepasbaar is dynamische condities. 2 Controleer welke diepte van het profiel in SOBEK 3 gebruikt wordt en vergelijk dit met settings in het analytische model van Kees Kuijper (m.n. ruwheid en diepte) 3 Vergelijk met waarden uit de zoutfluxontrafelaar, waarmee ook duidelijk wordt welk type dispersie het belangrijkste is op welke plaats.

Wat	Doel	Hoe
Effect splitsingspunten	Als door mengingsprocessen op splitsingspunten meer of minder menging ontstaat dan volgens de dispersieformulering, vormt dit een onderbouwing voor afwijking van f_4 .	Check effect splitsingspunt door het estuariumgetal voor de Oude Maas en Nieuwe Maas met elkaar te vergelijken. In de praktijk is de Nieuwe Maas meer gelaagd, komt dat ook uit de vergelijking?
Waarom trage respons van zout	De te trage respons leidt tot de grootste problemen in de kalibratie. Hierdoor is het soms te zoet en soms te zout. Als we achterhalen waar dit door veroorzaakt wordt kan het mogelijk ook opgelost worden.	Bekijk hoe dispersie-waarden in SOBEK 3 en SOBEK-RE variëren met condities als afvoer en windopzet.

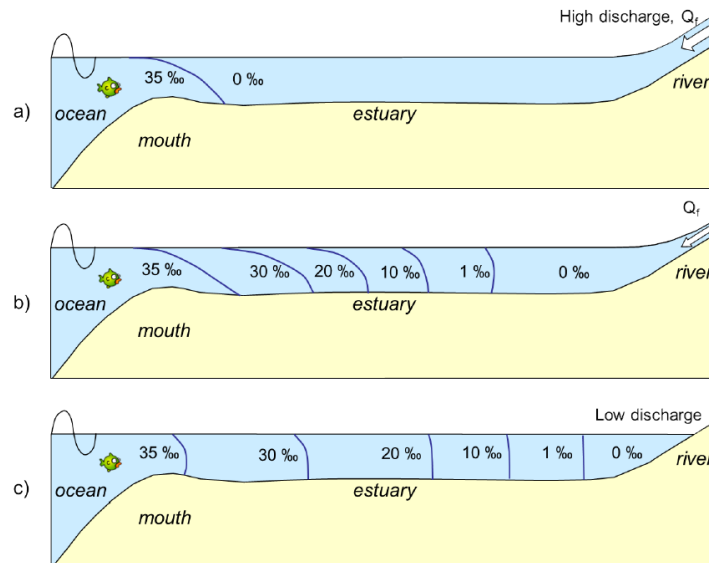
8 Literatuuroverzicht

- Berends, K.D. (2014). *SOBEK 3 model Rijn-Maasmonding*. Deltares rapport 1209449-004-ZWS-0015
- Buschman, F.A. (2017). Verificatie eigen monding aanpak voor modelleren van zoutverspreiding met SOBEK 3. Deltares rapport 11200570-002-ZKS-0009.
- Daniels, Jeroen. 2016. "Dispersion and Dynamically One-Dimensional Modeling of Salt Transport in Estuaries." Master thesis, Delft: Delft University of Technology and National University of Singapore.
- Fujisaki, A. (2015) SOBEK 3-model of Rijnmaasmonding 2015: Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijnmaasmonding 2015, Deltares kenmerk 1220072-004-ZWS-0004.
- Fujisaki, A. (2016). Coupling of the SOBEK 3-models of Volkerak and Zoommeer (VOZO) and Rijnmaasmonding (RMM), Deltares memo 1220072-018-ZWS-0001.
- Groenenboom, J. & Kranenburg, W.M. (2016). Beperking Zoutindringing Nieuwe Waterweg, Onderdeel KPP CIP 2016. Deltares, rapport 1230049-002-BGS-0001.
- Huisman, Ymkje, Frans Buschman, Jan Noort en Kees Kuijper. 2017 "Modelleren van zoutverspreiding met SOBEK 3: Verkenning alternatief voor branch-mouth relatie", Deltares kenmerk 11200569-006-ZWS-0001, juni 2017.
- Huisman, Ymkje, Frans Buschman, Carine Wesselius, Jeroen Daniels, and Kees Kuijper (2016) "Modelleren van Zoutverspreiding Met SOBEK 3 en SOBEK-RE." 1230077-003. Delft: Deltares.
- Huisman, Y. en R.M. van der Wijk (2017). *Werkplan KPP 2017 project – Rijn-Maasmonding*. Deltares rapport 11200569-006-ZWS-0003
- Huisman, Y., R.M. van der Wijk, A. Fujisaki, C. Sloff (2018), Zoutindringing in de Rijn-Maasmonding: Knelpunten en effectiviteit stuurknoppen, Deltares kenmerk 11200589-001-ZWS-0010.
- Kraaijeveld, M. 2003, Een SOBEK model van het Noordelijk Deltabekken; kalibratie en verificatie zoutbeweging Noordrand, RIZA rapport 2003.047X
- Kuijper, C., and L.C. van Rijn. 2011. "Analytical and Numerical Analysis of Tides and Salinities in Estuaries; Part II: Salinity Distributions in Prismatic and Convergent Tidal Channels." *Ocean Dynamics* 61 (11): 1743:1765.
- Kuijper, C. (2016), Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel: Afleiding dispersiecoëfficiënt, Deltares kenmerk 1230077-001-ZWS-0005.
- Kuijper, C. (2017), Analyse van zoutmetingen in de Lek: met schatting dispersiecoëfficiënt, Deltares kenmerk 11200589-001-ZWS-0003.

- Rigter, B.P. 1973. "Reproductie Zouttoestand Getijrivieren. Dimensie Analyse Zoutindringing. Systematisch Onderzoek." Report M896-XV. Waterloopkundig laboratorium.
- Savenije, H.H.G. 2012. Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. 2nd completely revised edition. salinityandtides.com.
- Spruyt, A. en A. Fujisaki, (2016) Herkalibratie SOBEK 3-model Rijntakken: kalibratie en validatie in SOBEK 3.4 – hoofdrapport, Deltares kenmerk 1230071-003-ZWS-0013.
- Thatcher, M.L., and D.R.F. Harleman. 1972. "A Mathematical Model for the Prediction of Unsteady Salinity Intrusion in Estuaries." MITSG 72-7. Massachusetts Institute of Technology.
- Van der Wijk, R.M., Fujisaki, A. (2016). *Afvoerverificatie Rijnmaasmonding; Vergelijking tussen ADCP metingen en WAQUA en SOBEK simulaties*. Deltares rapport 1230071-004-ZWS-0028
- Van der Wijk, R.M. (2016) Resultaten onderzoek naar oscillaties binnen WAQUA-RMM model, memo, Deltares kenmerk 1230071-004-ZWS-0019.
- Wesselius, C., Gao, Q., Prinsen, G. (2017). *LSM-RWS; verificatiesom 2003*. Deltares rapport 11200569-011-ZWS-0004.
- Zetten, J. van en M. van der Linden, 2001. Een SOBEK model van het Noordelijk Deltabekken: bouw, kalibratie en verificatie.
- Zijl, F., D. Kerkhoven, A. Visser en T. van der Kaaij (2011) WAQUA-model Rijn-Maasmonding, modelopzet, calibratie en verificatie. Deltares rapport 1202199-005-ZKS-0035.

A Conversie naar dieptegemiddelde zoutconcentraties

Wanneer zoet en zout water samenkomen, kan stratificatie optreden. In estuaria treedt dit met name op wanneer de rivierafvoer hoog is ten opzichte van de getijslag, zie Figuur A.1

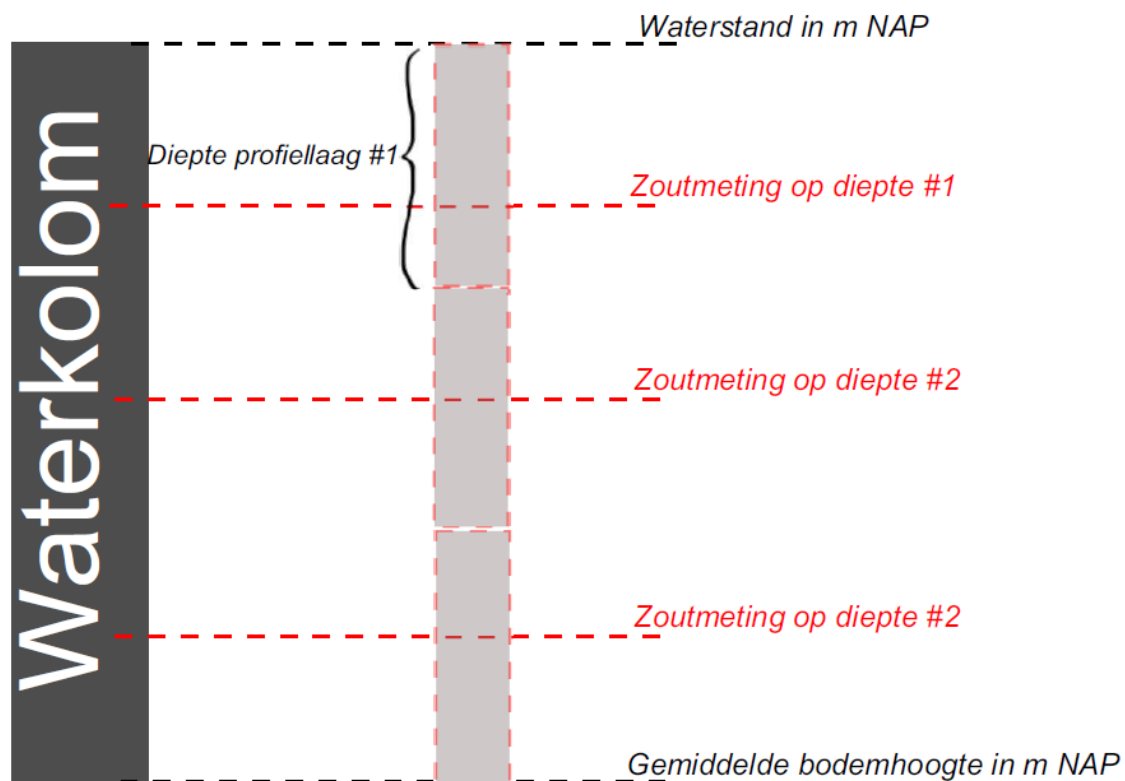


Figuur A.1 Verdeling van zout voor een gestratificeerd systeem (a), een gedeeltelijk gemengd systeem (b) en een goed gemengd systeem (c). Figuur overgenomen uit Savenije (2012).

Voor meetstations waarop metingen beschikbaar zijn op meerdere dieptes wordt een gewogen gemiddelde bepaald op de volgende wijze:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{b,i} c_i)}{\sum_{i=1}^n (d_{b,i})} \quad (0.1)$$

Met \bar{c} de dieptegemiddelde concentratie, $d_{b,i}$ de diepte van profiellaag i en c_i de concentratie in die laag. Volgens de standaardmethode zijn de lagen verdeeld als in Figuur A.2. Aangenomen wordt dat de resulterende dieptegemiddelde concentratie voor de hele breedte representatief is.

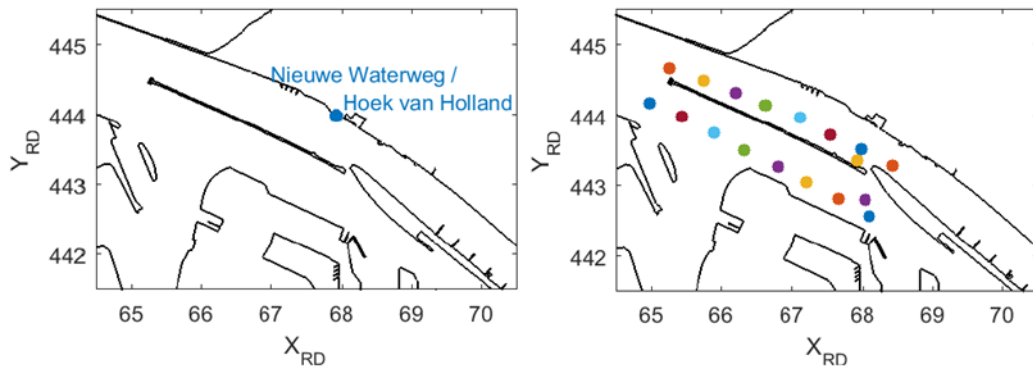


Figuur A.2 Verdeling van een profiel in profiellagen volgens de standaardmethode

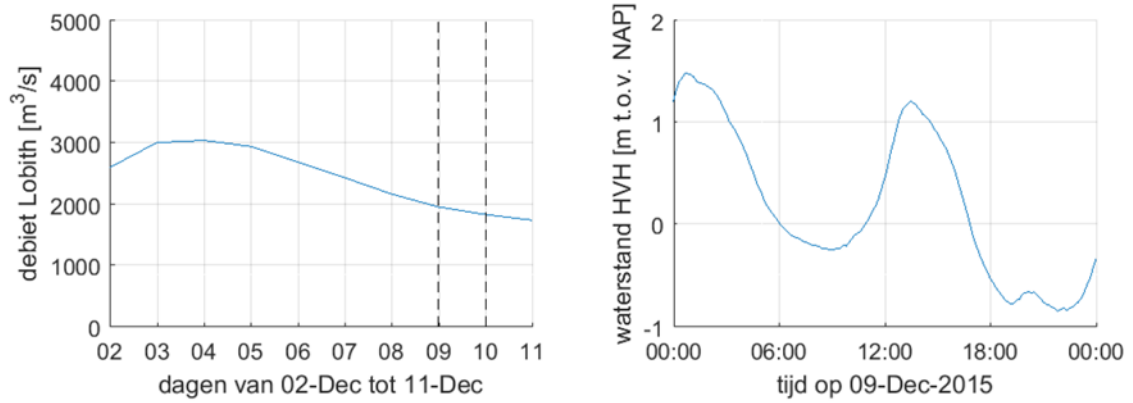
Voor Hoek van Holland wordt aangenomen dat door het hanteren van deze methode met profiellagen de dieptegemiddelde saliniteit wordt onderschat, omdat de meeste metingen relatief hoog in het profiel zijn genomen. De diepste van 3 sensoren meet op -9 m NAP, terwijl de lokale bodemligging in het model -17 m NAP is. Hierdoor zal de getijfluctuatie worden overschat, omdat met name de bovenste kolom door de zoete uitstroom van rivierwater en zoute instroom van zeewater sterke fluctuaties vertoont.

Om een schatting te krijgen van het effect zijn profielmetingen bekeken die met behulp van schepen zijn uitgevoerd (Groeneboom en Kranenburg, 2016)¹. Op 9 december 2015 zijn profielmetingen uitgevoerd bij Hoek van Holland (Figuur A.3 en Figuur A.4). Op 6 juli 2016 zijn deze herhaald (Figuur A.5 en Figuur A.6).

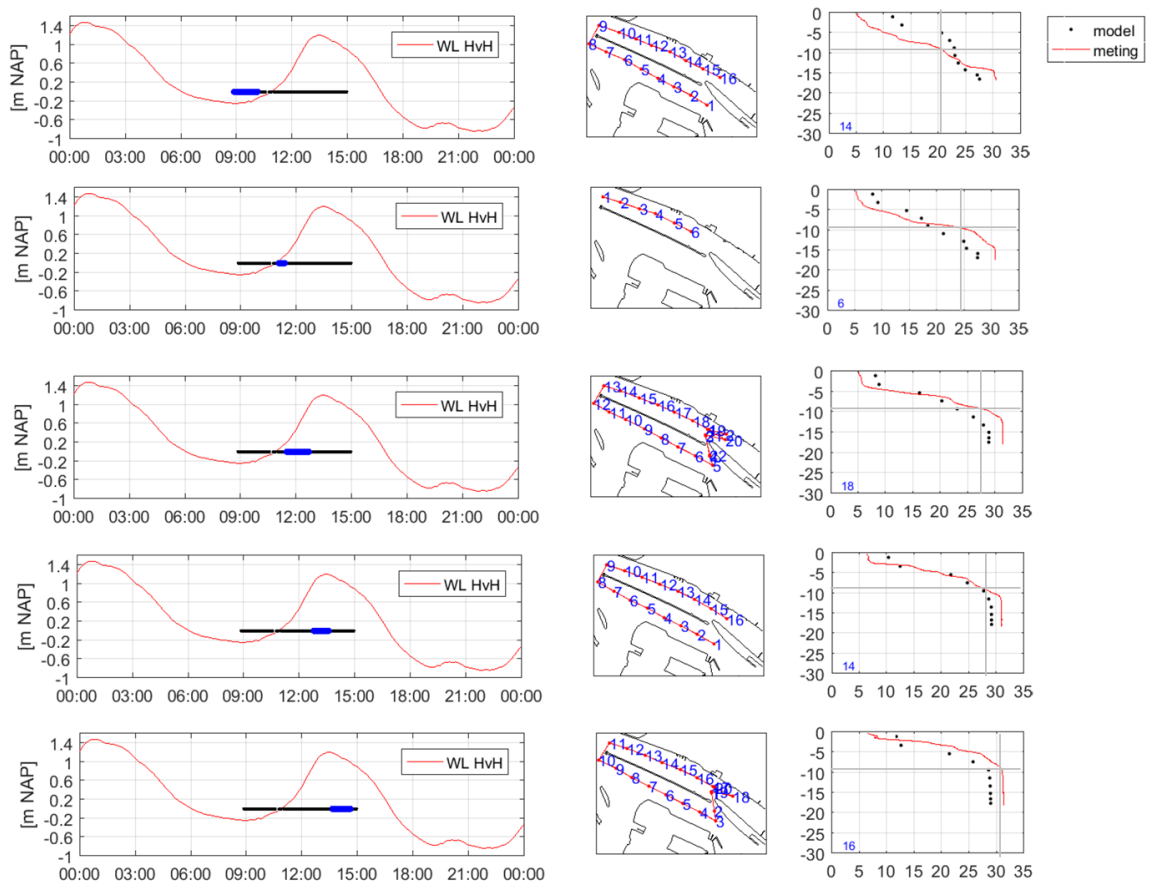
¹ Hoewel dit niet binnen het project kon worden uitgevoerd



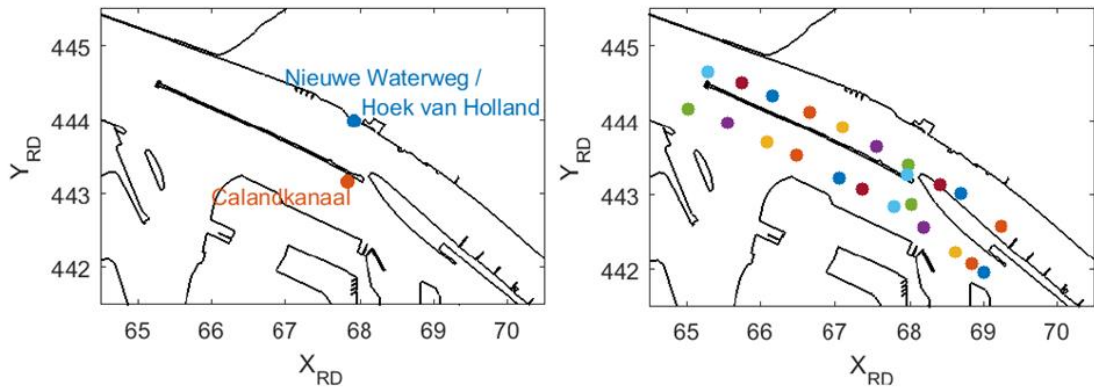
Figuur 1.3 Links: Waterstandsmeetlocatie Hoek van Holland in de Nieuwe Waterweg. Rechts: Gegroepede saliniteitsmeetpunten.



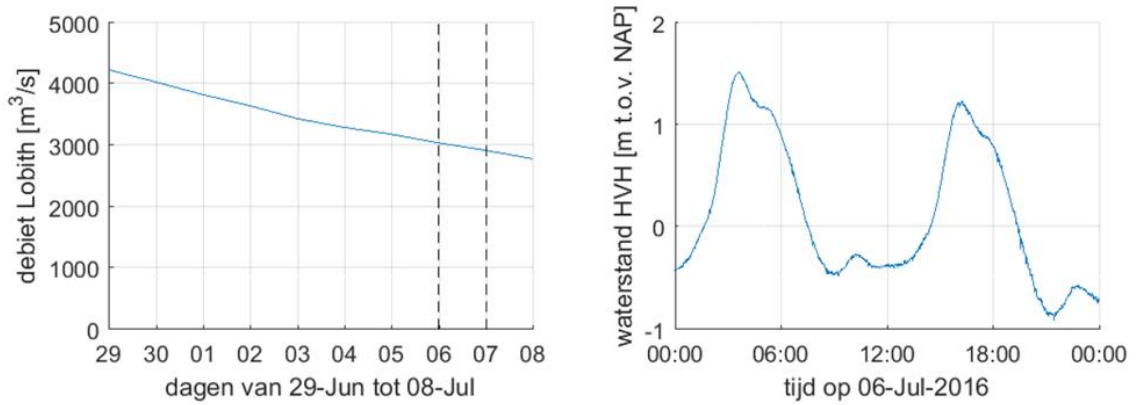
Figuur A.3 Locatie profielmetingen (boven) en de conditie van afvoer (onder) op 9 december 2015. De rivierafvoer bij Hoek van Holland loopt ongeveer 3 dagen achter bij Lobith. De rivierafvoer was vrijwel gemiddeld.



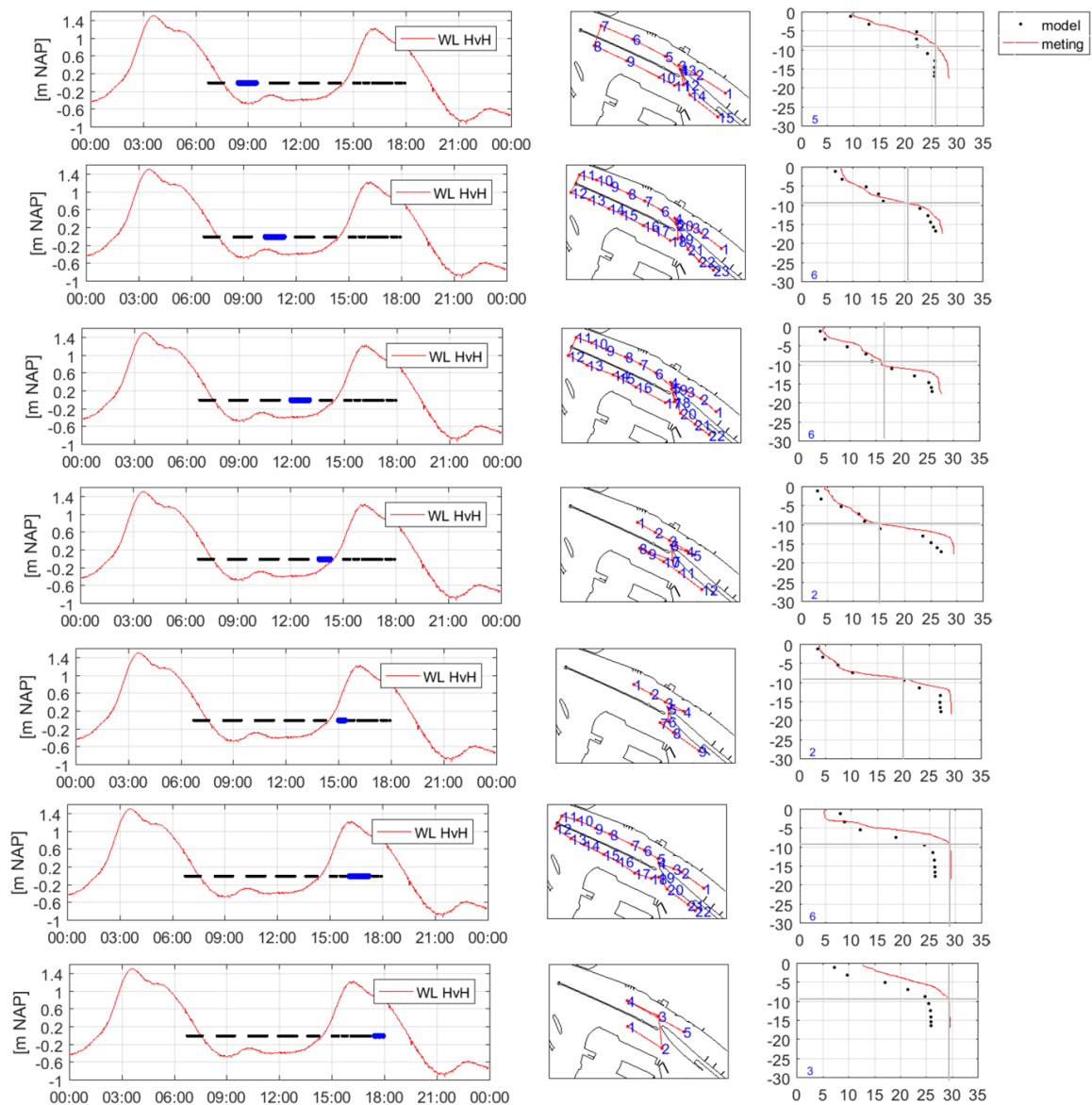
Figuur A.4 De gemeten profielen van zoutconcentratie (rood, rechts), tijd (links) en locatie (midden) op 9 december 2015. De aangegeven modelconcentraties zijn berekend met het 3D OSR model en zijn hier niet van belang.



Figuur 1.5 Linker paneel: Waterstandsmeetlocatie Hoek van Holland in de Nieuwe Waterweg en een tijdelijk observatiepunt in het Calandkanaal. Rechter paneel: Gegroepeerde saliniteitsmeetpunten.



Figuur A.5 Locatie profielmetingen (boven) en de conditie van afvoer (onder) op 6 juli 2016. De rivierafvoer bij Hoek van Holland loopt ongeveer 3 dagen achter bij Lobith. De rivierafvoer was wat hoger dan gemiddeld.



Figuur A.6 De gemeten profielen van zoutconcentratie (rood, rechts), tijd (links) en locatie (midden) op 6 juli 2016

Uit de gemeten zoutprofielen op de twee dagen en de daaruit afgeleide zoutconcentraties onder de laagste sensor (Tabel A.1) blijkt dat bij hoogtij de chlorideconcentraties < -9 m NAP constant zijn met een waarde van ~ 31 PSU voor 9 december (vrijwel gemiddelde afvoer) en ~ 29 PSU voor 6 juli 2016 (rivierafvoer iets verhoogd). En voor de laag-, neergaand- of opgaand tij variëren de concentraties van 21 – 31 PSU voor 9 december 2015 en 15 – 29 PSU voor 6 juli 2015. Hieruit blijkt tevens – en zoals verwacht – dat de zoutconcentratie lager is bij hogere rivierafvoer. Voor echt lage afvoer (QLobith ~ 1000 m³/s) zullen de zoutconcentraties hoger zijn.

Tabel A.1 De zoutconcentratie (psu) gemeten onder -9 m NAP met de zoutprofielen nabij Hoek van Holland

deconcentraties < - 9 m NAP in PSU	9 december 2015 (QLobith ~ 2200 m3/s)	6 juli 2015 (QLobith ~ 3000 m3/s)
Laag water	21 – 31	21 – 27
Opgaand tij	26 – 31	15 - 29
Hoog water	30 – 31	29 - 29
Neergaand tij	Geen data	26 – 28

Om een ruwe schatting te krijgen hoe dit de vertaling van dieptemetingen met de vaste opnemers naar gemiddelde concentraties beïnvloedt is de data als volgt geïnterpoleerd:

- Van 0 m NAP naar -3.5 m NAP waarde van station op -2.5 m NAP
- Van -3.5 m NAP naar -6.75 m NAP waarde van station op -4.5 m NAP
- Van -6.75 m NAP naar -17 m NAP waarde van station op -9 m NAP op -6.75 lineair geïnterpoleerd naar 31 PSU op -17 m NAP (als waarde op -9 m > 31 PSU, dan die waarde voor de hele kolom).

Deze aangepaste methode is toegepast voor het bepalen van de dieptegemiddelde zoutconcentratie bij Hoek van Holland.

B Aanpassingen aan profielen

Bij nadere inspectie is gebleken dat details van profielen overgenomen uit eerdere SOBEK modellen (vooral gelegen rondom de Maas) niet altijd goed waren over genomen. Onderstaande tabel geeft de veranderingen weer aan profielen die niet met waq2prof zijn afgeleid.

Naam profiel	Sobek-rmm-j15_5-v1		Sobek-rmm-j15_5-v2	
	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)
Amertak1	0	55	55	0
Amertak2	0	55	55	0
Donge	0	120	120	0
"CrossSection1" hernoemd naar "Overdiep"	0	110	110	0
193a	0	35	35	0
DB_AA_20	100	-50	50	0
RWZ015-RWZ016_0	196	-98	98	0
RWZ015-RWZ016_1	196	-98	98	0
RWZ015-RWZ016_2	196	-98	98	0
RWZ016-RWZ017_3	196	-98	98	0
RWZ016-RWZ017_4	196	-98	98	0
RWZ016-RWZ017_5	196	-98	98	0
RWZ016-RWZ017_6	196	-98	98	0
RWZ017-RWZ018_7	900	-450	450	0
RWZ017-RWZ018_8	900	-450	450	0
RWZ017-RWZ018_9	900	-450	450	0
RWZ017-RWZ018_10	900	-450	450	0
RWZ017-RWZ018_11	900	-450	450	0
RWZ018-RWZ019_12	132	-66	66	0
RWZ018-RWZ019_13	132	-66	66	0
RWZ018-RWZ019_14	132	-66	66	0
RWZ018-RWZ019_15	132	-66	66	0
RWZ018-RWZ019_16	132	-66	66	0
RWZ018-RWZ019_17	132	-66	66	0
RWZ018-RWZ019_18	132	-66	66	0
RWZ019-RWZ020_22	88	-44	44	0
RWZ019-RWZ020_23	88	-44	44	0
RWZ019-RWZ020_24	88	-44	44	0
RWZ020-RWZ021_25	148	-74	74	0
RWZ020-RWZ021_26	148	-74	74	0
RWZ020-RWZ021_27	148	-74	74	0

Naam profiel	Sobek-rmm-j15_5-v1		Sobek-rmm-j15_5-v2	
	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)
RWZ020-RWZ021_28	148	-74	74	0
RWZ020-RWZ021_29	148	-74	74	0
DB_OD_10	100	-50	50	0
RWZ018-RWZ019_20	132	-66	66	0
RWZ019-RWZ020_21	88	-44	44	0
RWZ018-RWZ019_19	132	-66	66	0
DB_OD_55	100	-50	50	0
DB_OD_30	102	-51	51	0
DB_DM_01	88	-44	44	0
DB_DM_02	90	-45	45	0
DB_DM_03	90	-45	45	0
DB_DM_04	92	-46	46	0
DB_DM_05	98	-49	49	0
DB_DM_06	98	-49	49	0
160100_0	150	-75	75	0
160110_1	150	-75	75	0
160110_2	150	-75	75	0
160110_3	150	-75	75	0
160120_4	150	-75	75	0
160120_5	150	-75	75	0
160120_6	150	-75	75	0
160120_7	150	-75	75	0
160120_8	150	-75	75	0
160120_9	150	-75	75	0
160120_10	150	-75	75	0
160120_11	150	-75	75	0
160120_12	150	-75	75	0
160120_13	150	-75	75	0
160120_14	150	-75	75	0
160120_15	150	-75	75	0
160120_16	150	-75	75	0
160120_17	150	-75	75	0
160120_18	150	-75	75	0
160130_19	150	-75	75	0
160130_20	150	-75	75	0
160130_21	150	-75	75	0
160130_22	150	-75	75	0
160140_23	176	-88	88	0

Naam profiel	Sobek-rmm-j15_5-v1		Sobek-rmm-j15_5-v2	
	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)
160140_24	176	-88	88	0
160140_25	176	-88	88	0
160140_26	176	-88	88	0
160140_27	176	-88	88	0
160140_28	176	-88	88	0
160150_29	160	-80	80	0
160150_30	160	-80	80	0
160150_31	160	-80	80	0
160160_32	222	-111	111	0
160165_33	222	-111	111	0
160165_34	222	-111	111	0
160165_35	222	-111	111	0
160165_36	222	-111	111	0
160165_37	222	-111	111	0
160165_38	222	-111	111	0
160170_39	154	-77	77	0
160170_40	154	-77	77	0
160170_41	154	-77	77	0
160170_42	154	-77	77	0
160170_43	154	-77	77	0
160170_44	154	-77	77	0
160170_45	154	-77	77	0
160170_46	154	-77	77	0
160180_47	164	-82	82	0
160180_48	164	-82	82	0
160180_49	164	-82	82	0
160180_50	164	-82	82	0
160180_51	164	-82	82	0
160180_52	164	-82	82	0
160180_53	164	-82	82	0
160180_54	164	-82	82	0
160180_55	164	-82	82	0
160180_56	164	-82	82	0
160180_57	164	-82	82	0
160180_58	164	-82	82	0
160190_59	104	-52	52	0
160200_60	136	-68	68	0
160200_61	136	-68	68	0

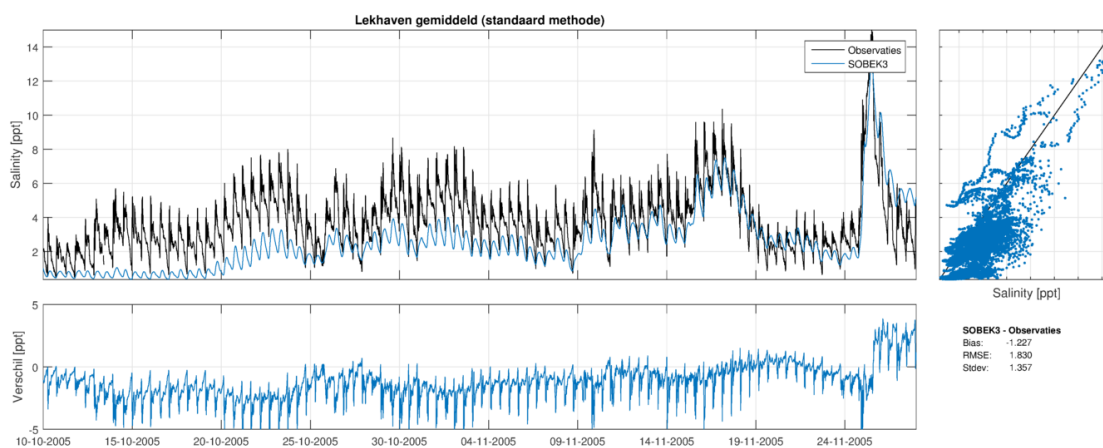
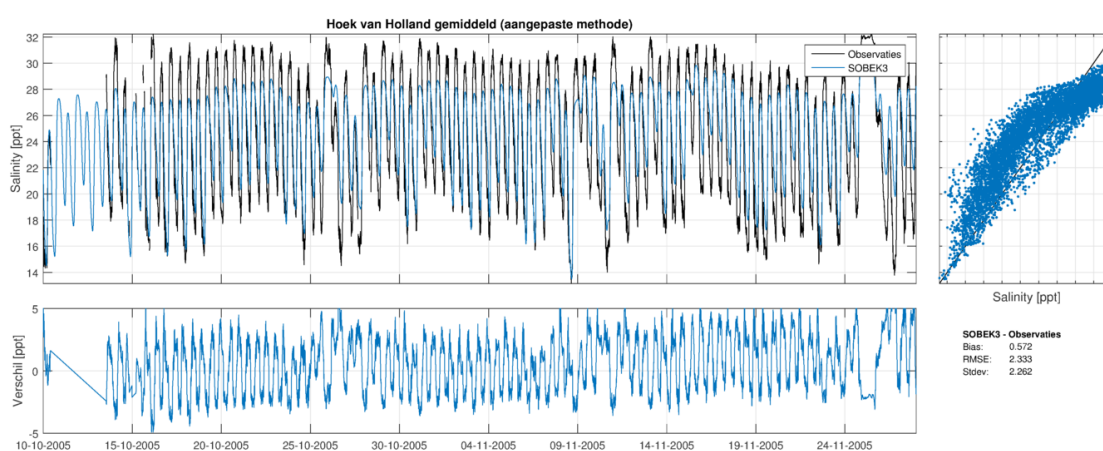
Naam profiel	Sobek-rmm-j15_5-v1		Sobek-rmm-j15_5-v2	
	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)	Breedte hoofdgeul (m)	Breedte uiterwaarden (m)
160200_62	136	-68	68	0
160210_63	198	-99	99	0
160210_64	198	-99	99	0
160210_65	198	-99	99	0
160210_66	198	-99	99	0
160210_67	198	-99	99	0
160220_68	174	-87	87	0
160220_69	174	-87	87	0
160220_70	174	-87	87	0
160220_71	174	-87	87	0
160220_72	174	-87	87	0
160230_73	164	-82	82	0
160230_74	164	-82	82	0
160230_75	164	-82	82	0
160230_76	164	-82	82	0
160230_77	164	-82	82	0
160230_78	164	-82	82	0
160230_79	164	-82	82	0
160230_80	164	-82	82	0
160230_81	164	-82	82	0
160240_82	224	-112	112	0
160240_83	224	-112	112	0
160240_84	224	-112	112	0
160240_85	224	-112	112	0
160240_86	224	-112	112	0
160240_87	224	-112	112	0
160240_88	224	-112	112	0
160240_89	224	-112	112	0
160240_90	224	-112	112	0
160240_91	224	-112	112	0
160240_92	224	-112	112	0
160240_93	224	-112	112	0
160240_94	224	-112	112	0
160240_95	224	-112	112	0
160260_100	180	-90	90	0
160260_98	180	-90	90	0
160260_99	180	-90	90	0

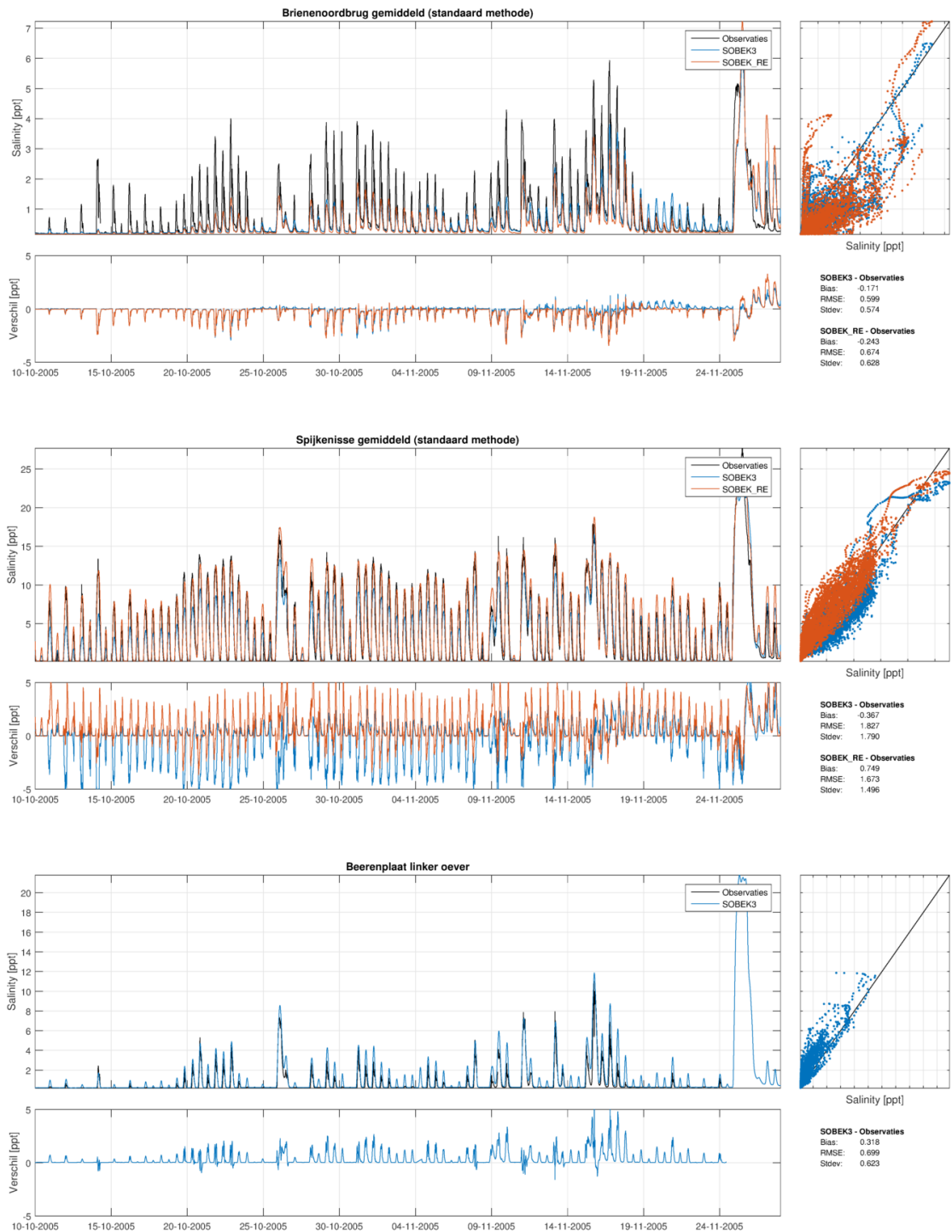
C Tijdsreeksen van berekende en gemeten zoutconcentratie

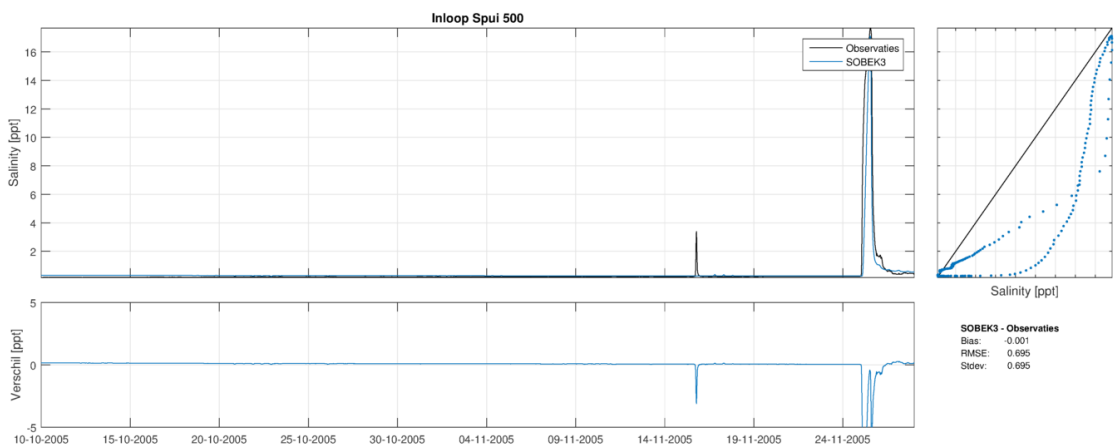
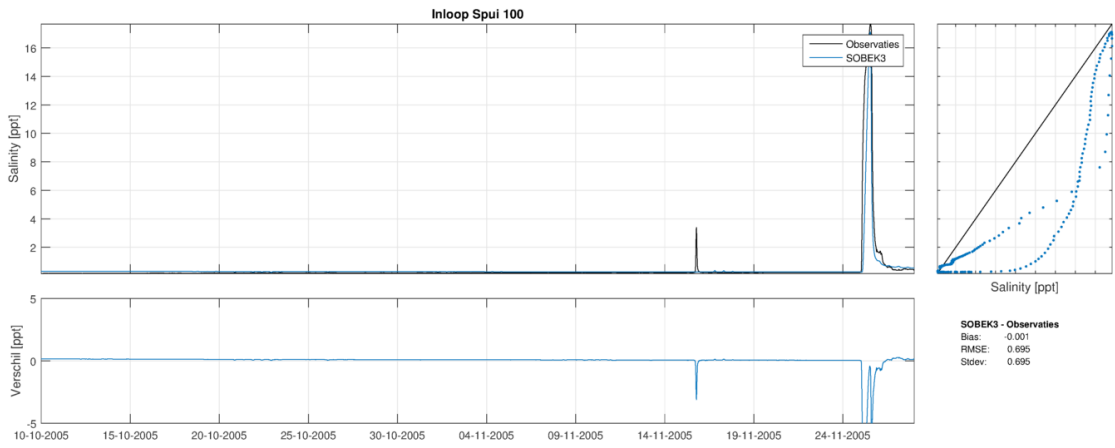
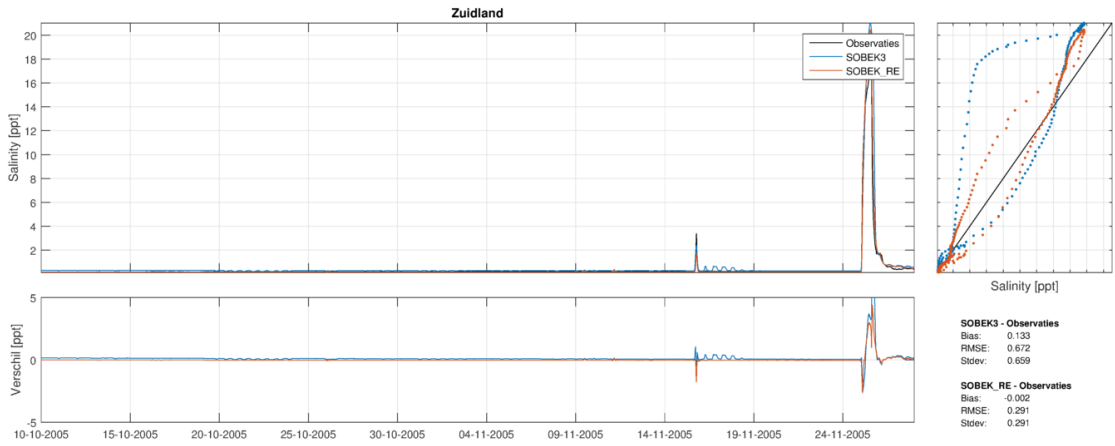
In deze bijlage zijn alle figuren van tijdsreeksen met zoutconcentratie opgenomen, die voor de herkalibratie en verificatie zijn gemaakt. Enkele hiervan zijn ook opgenomen in het hoofdrapport.

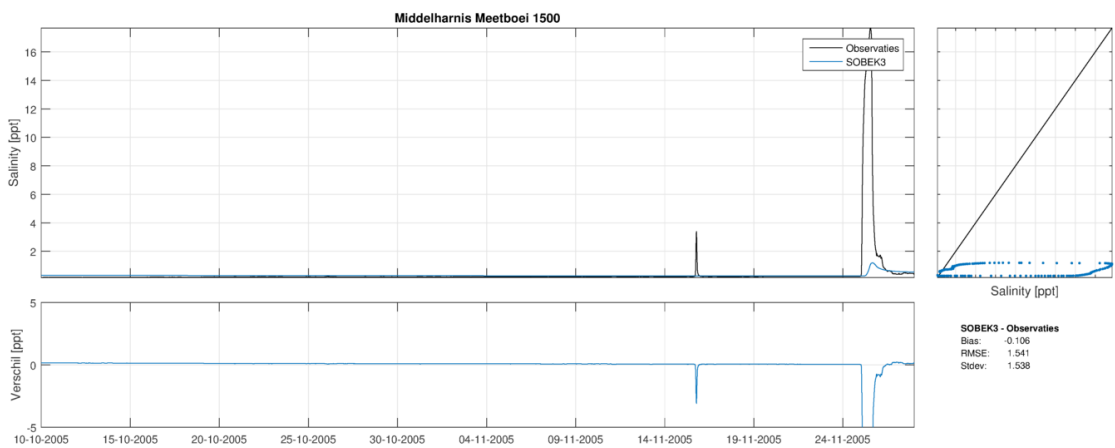
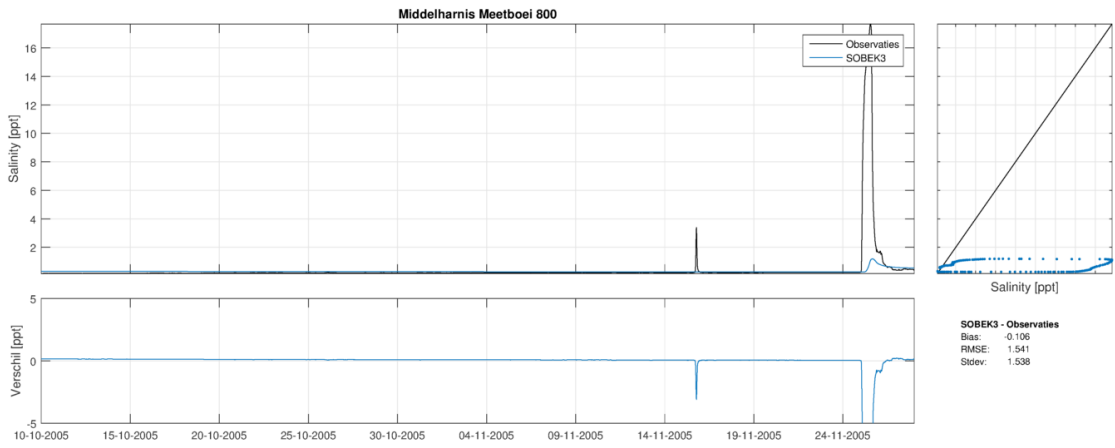
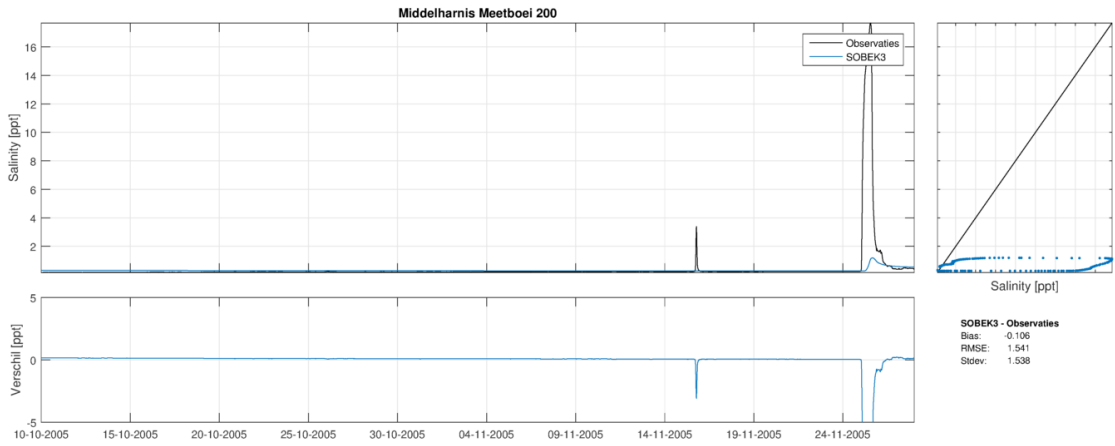
C.1 Herkalibratie

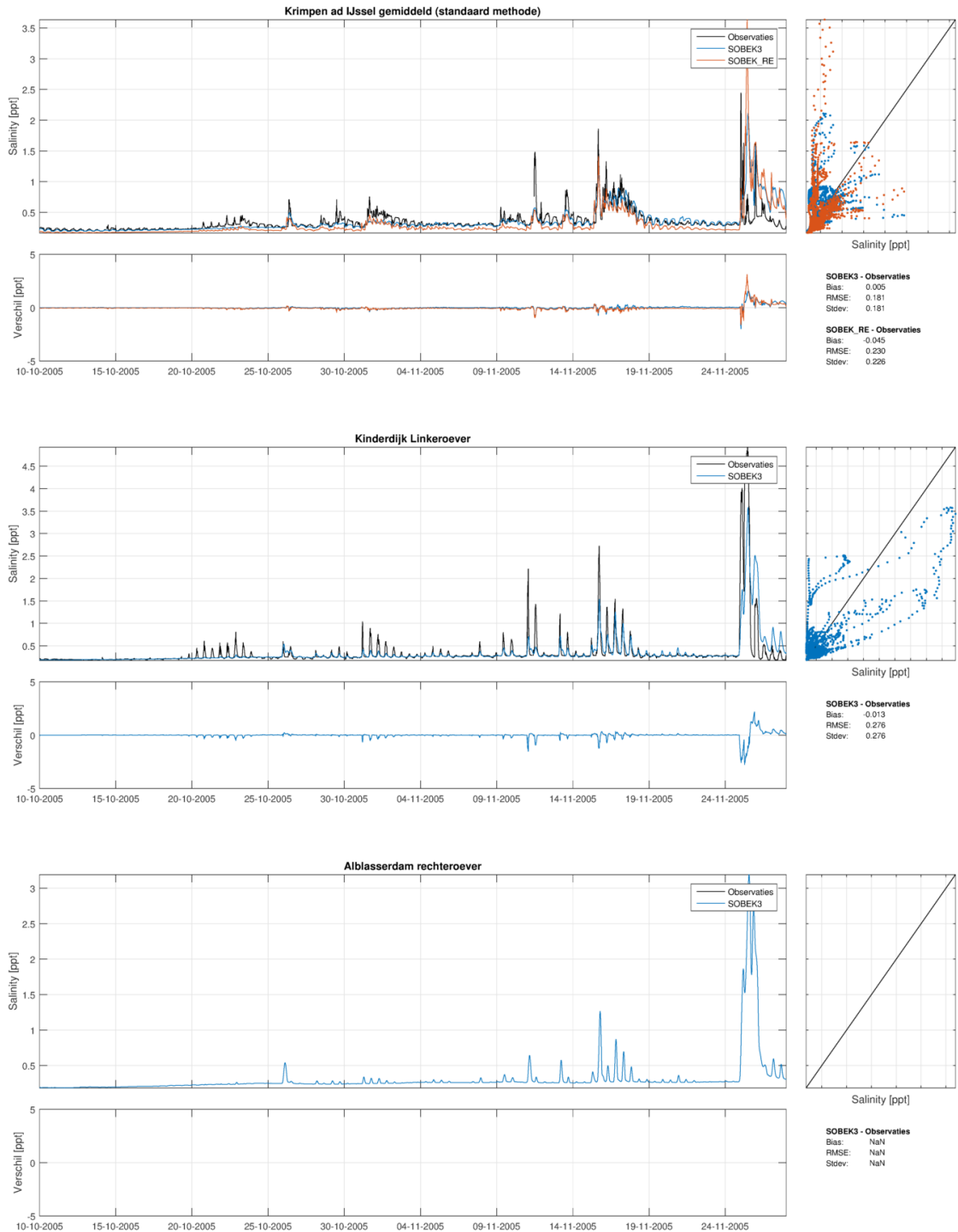
C.1.1 Periode november 2005

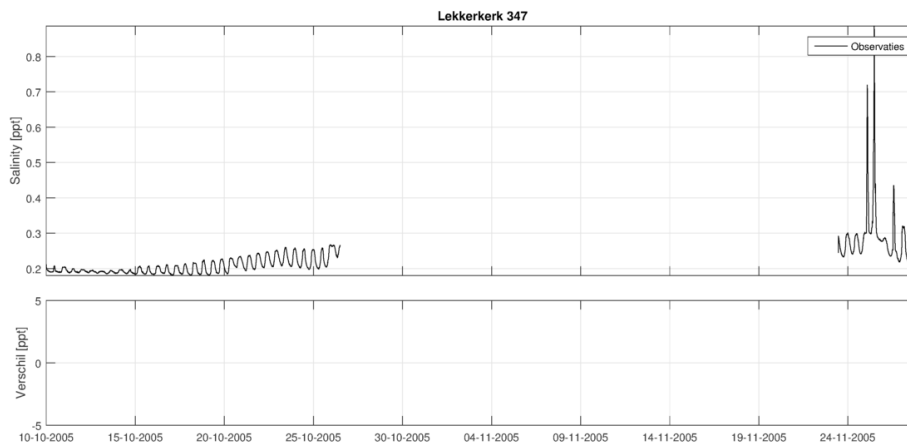
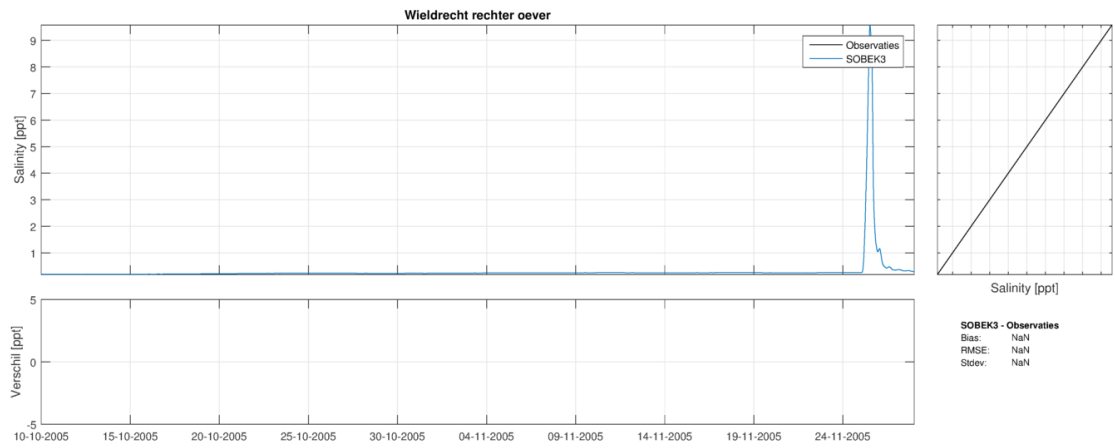




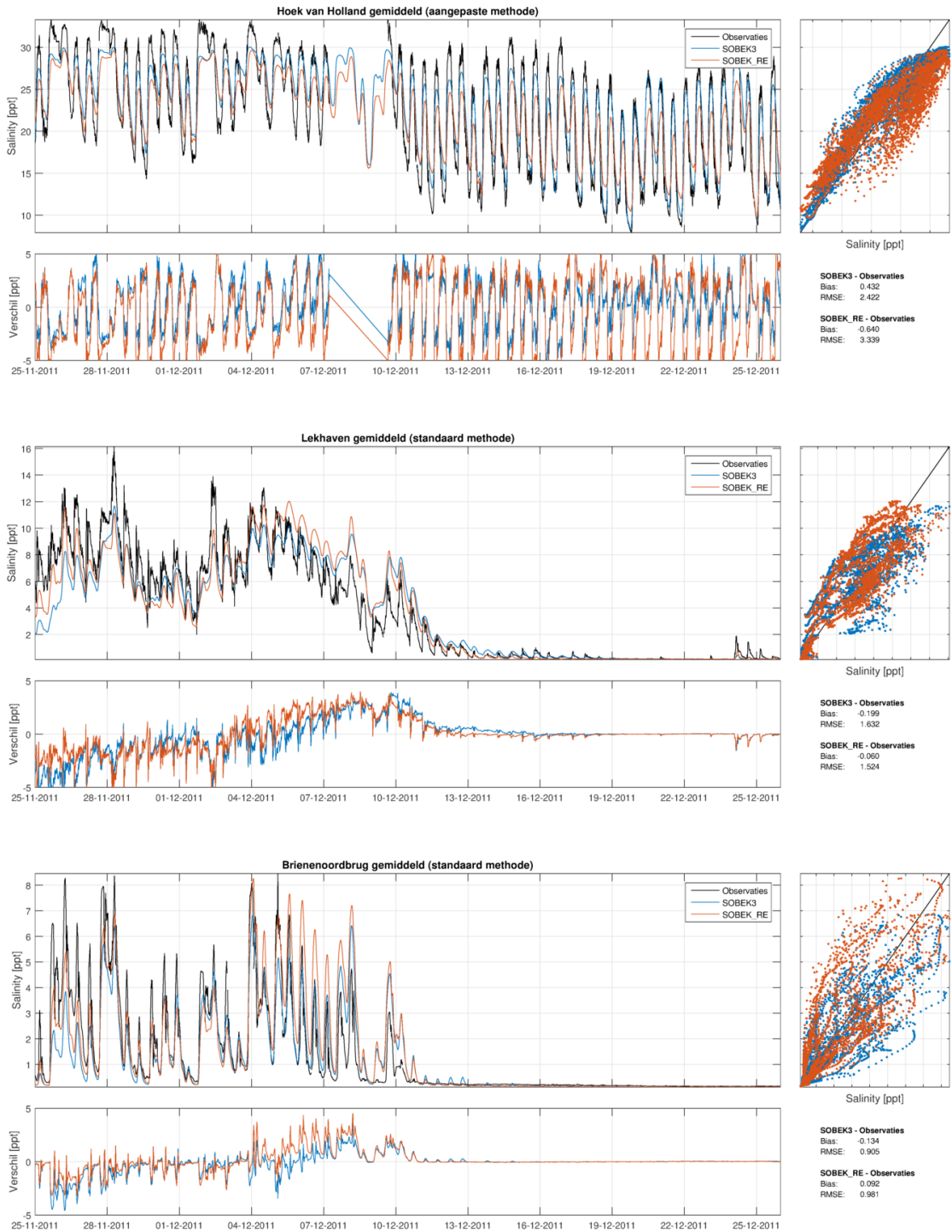


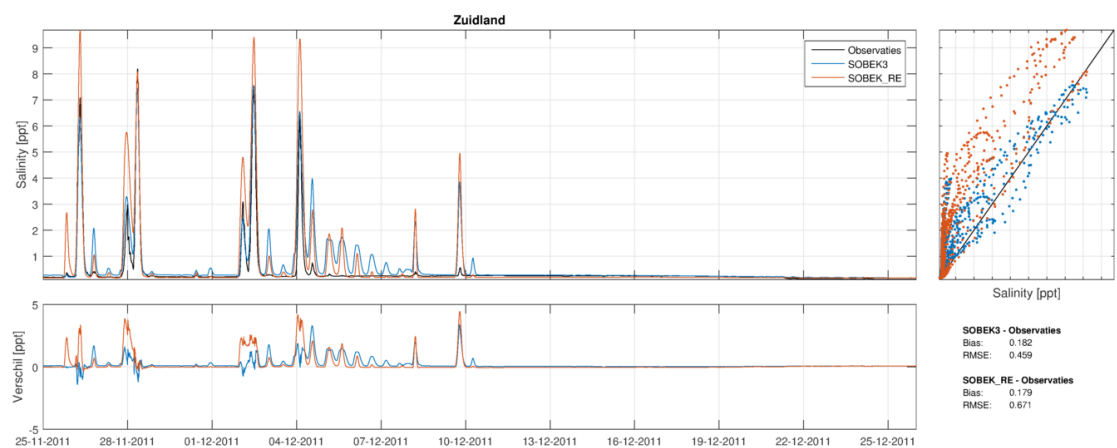
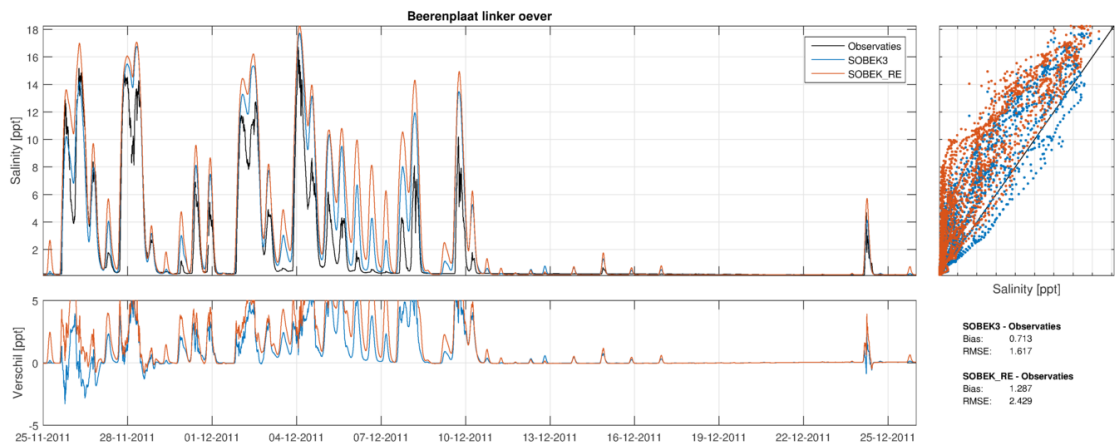
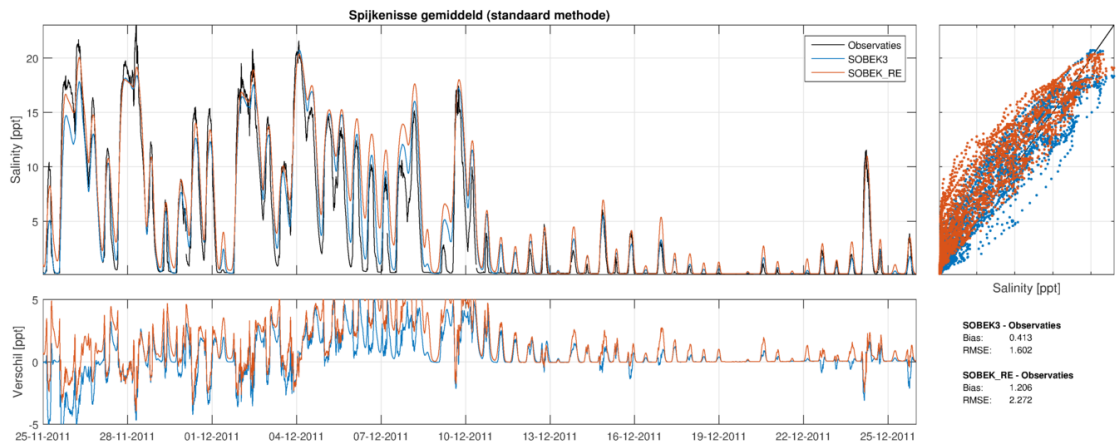


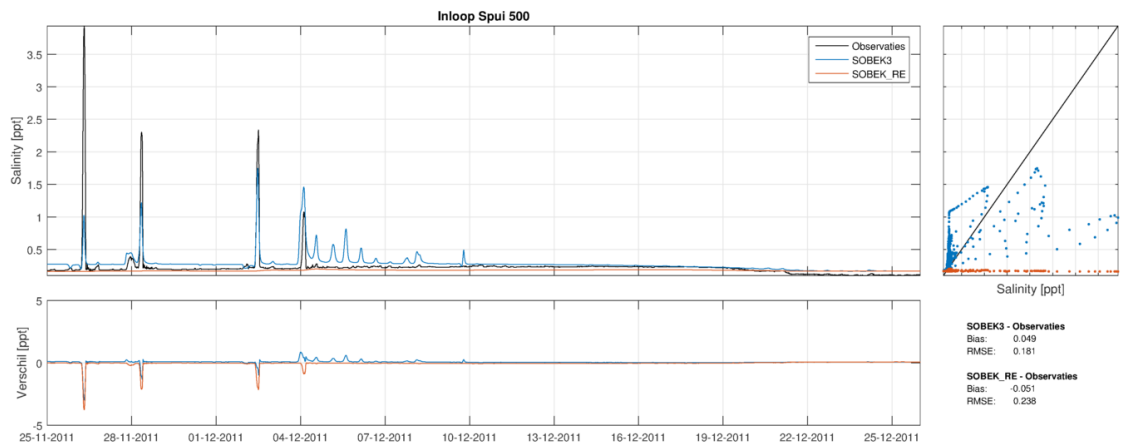
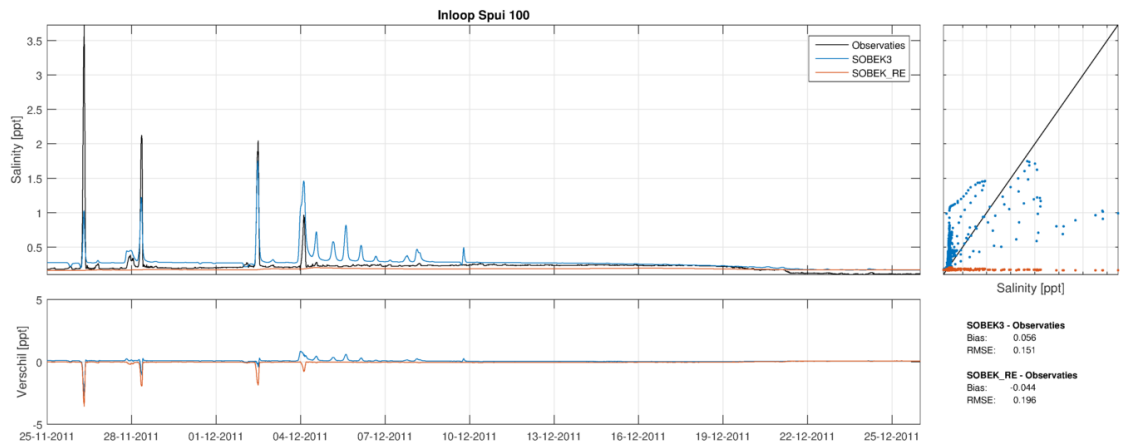


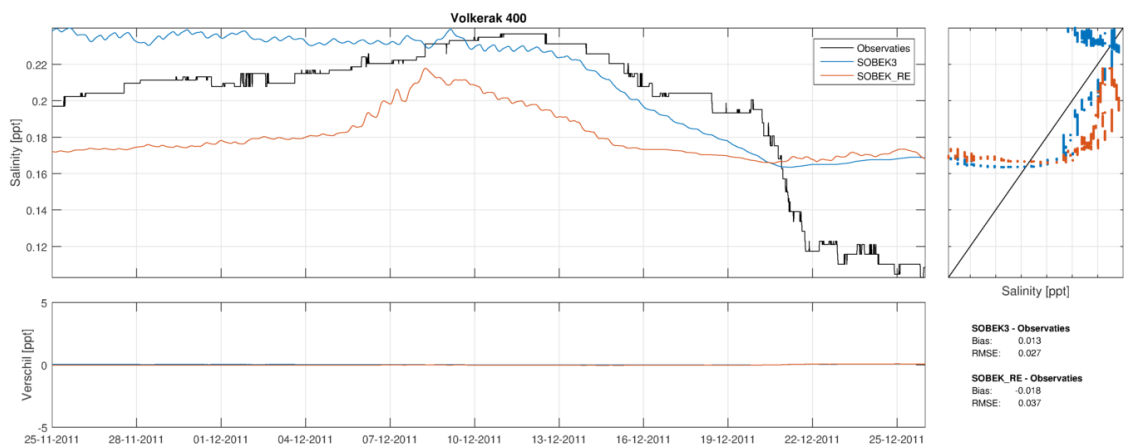
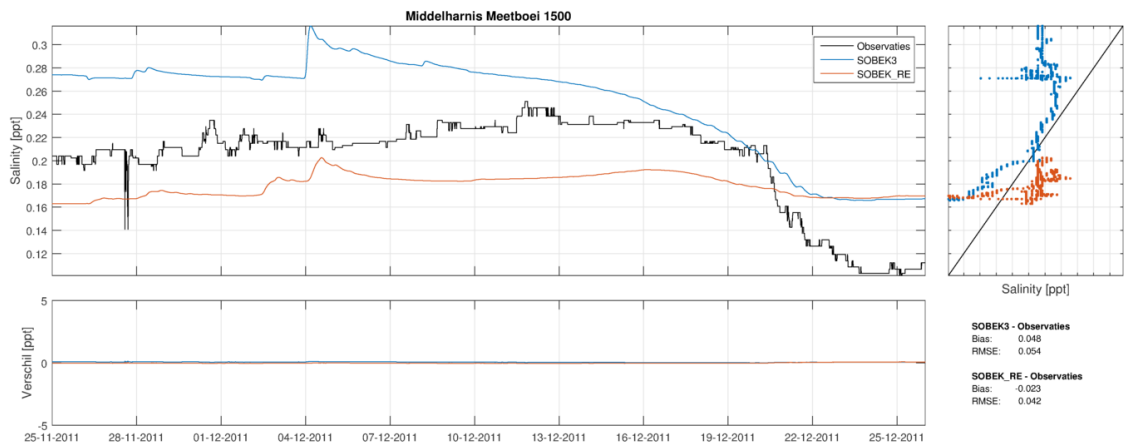


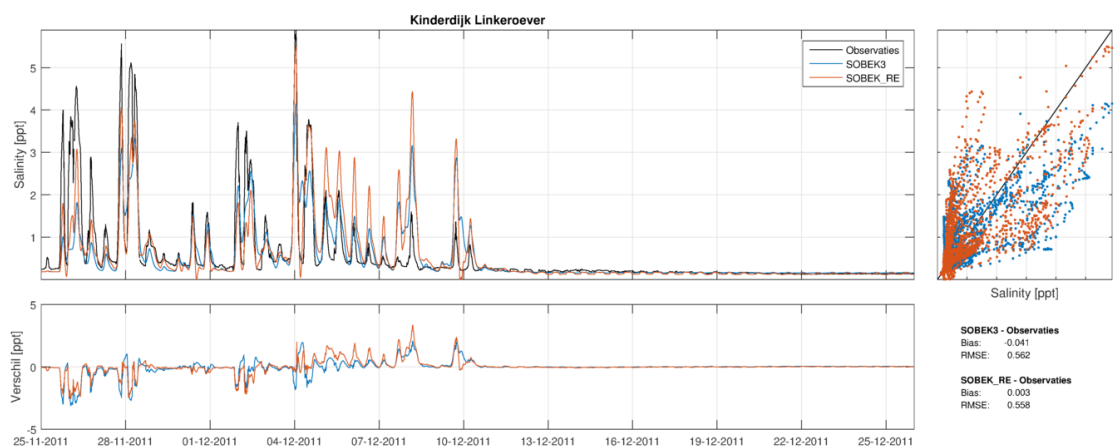
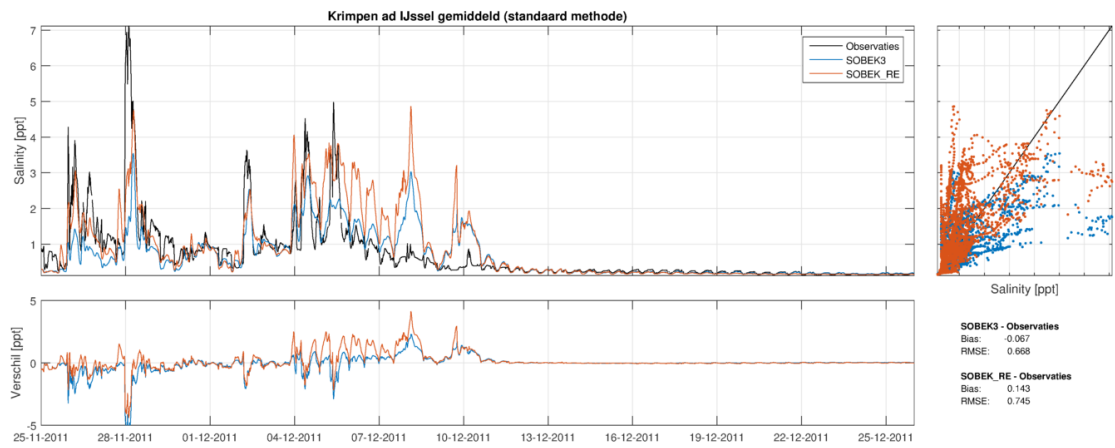
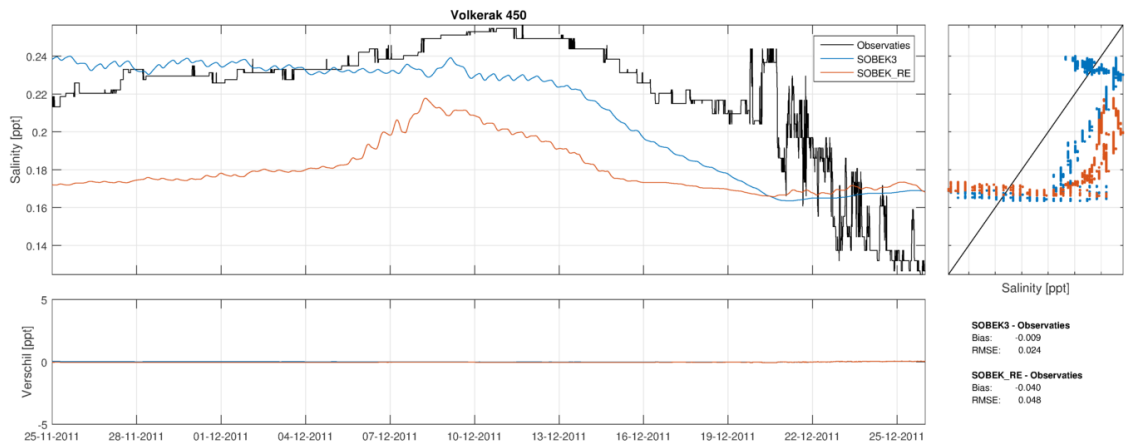
C.1.2 Periode december 2005



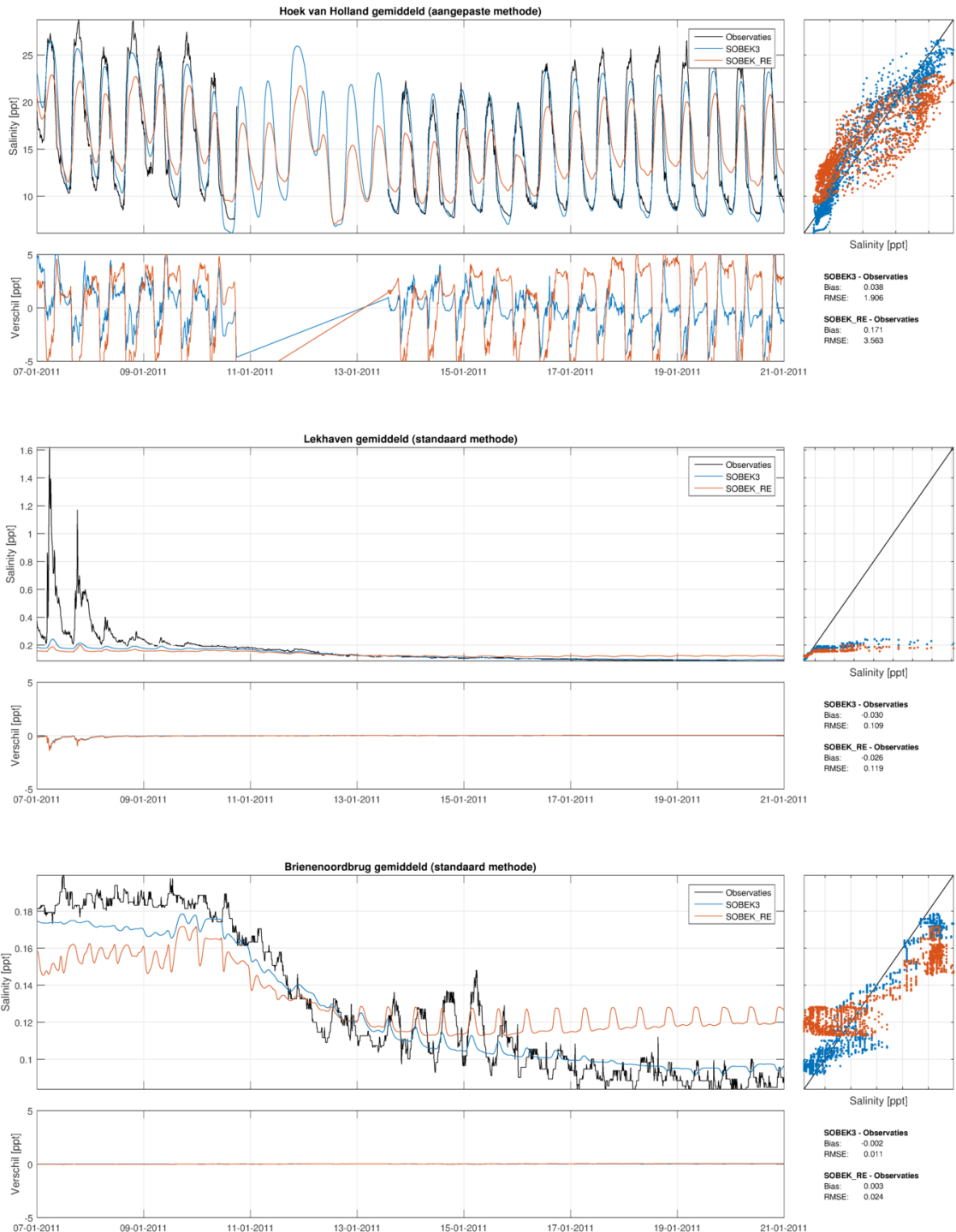


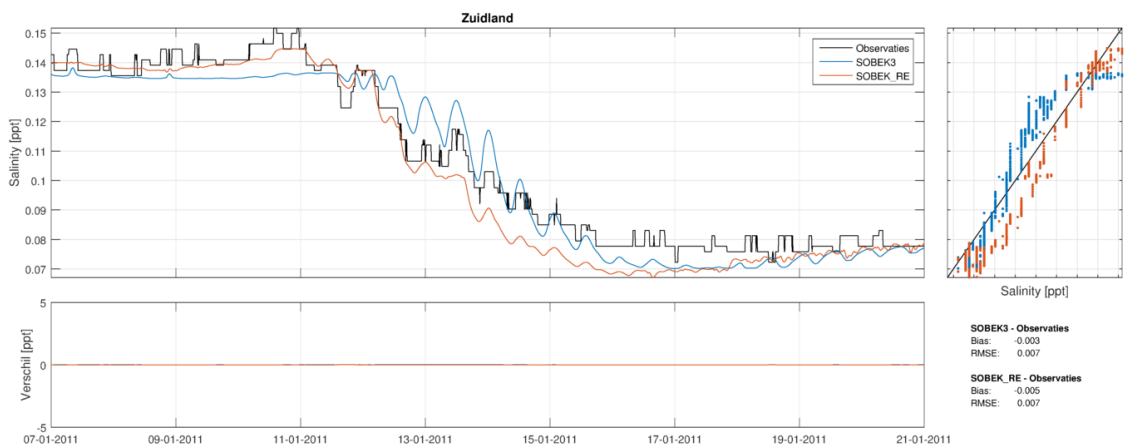
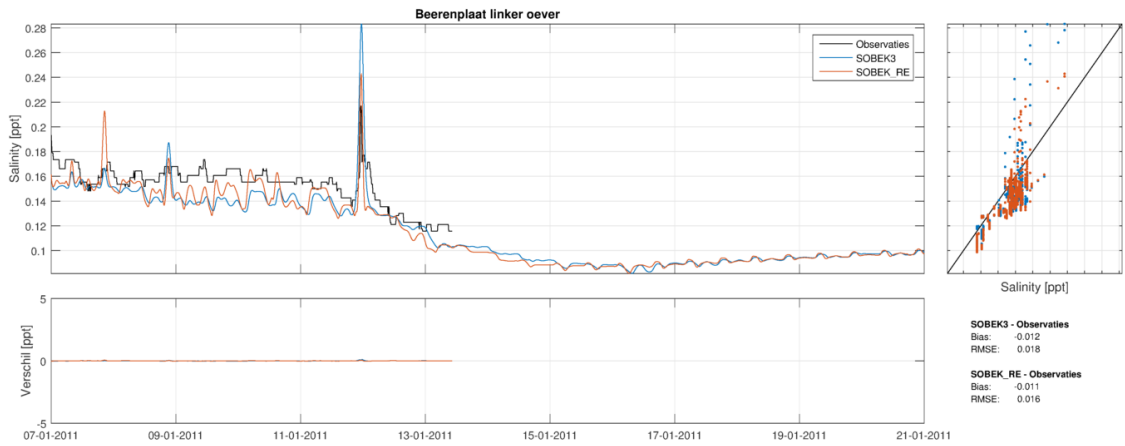
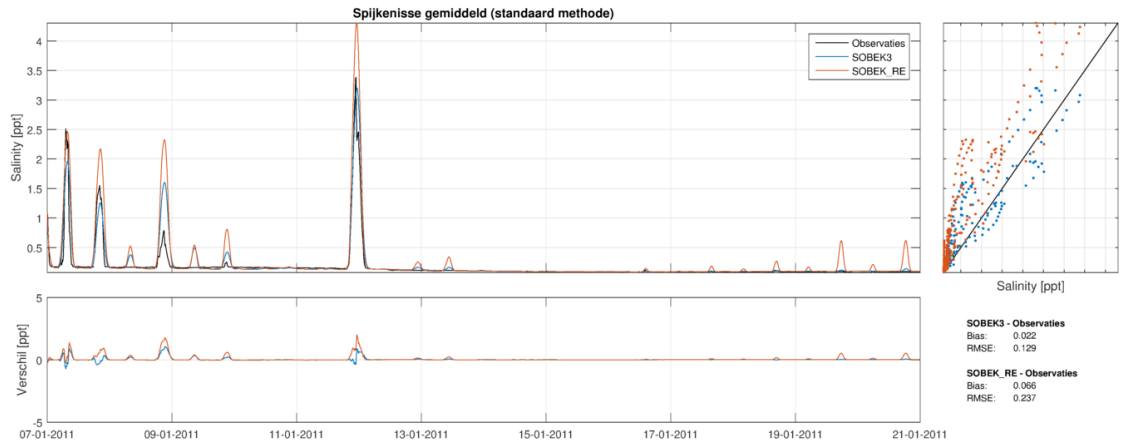


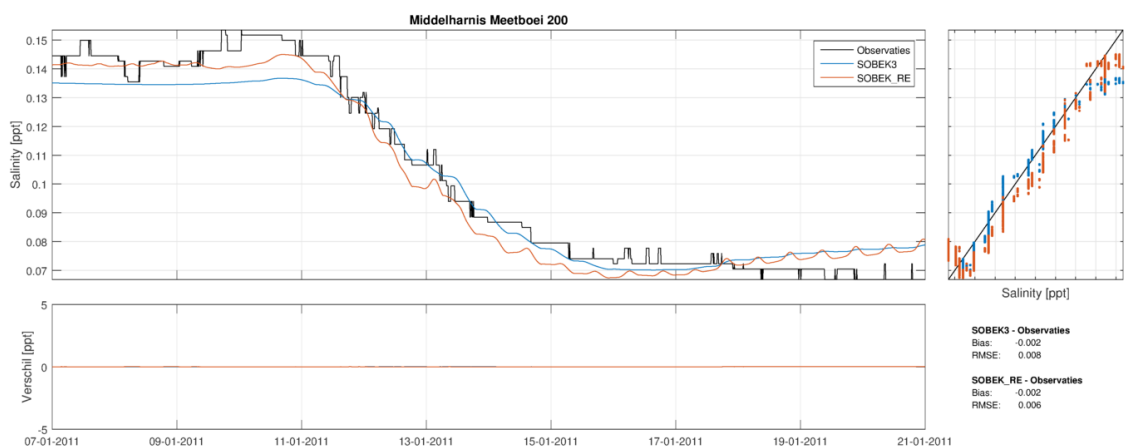
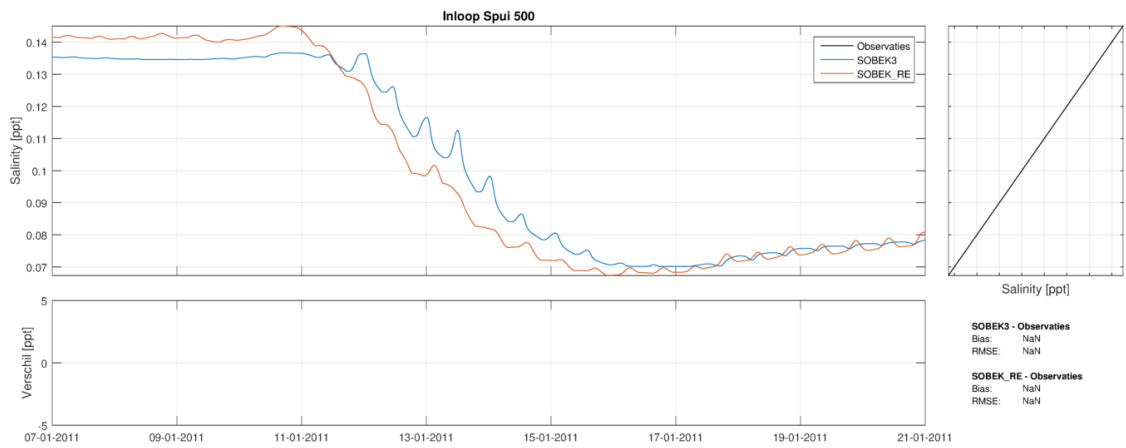
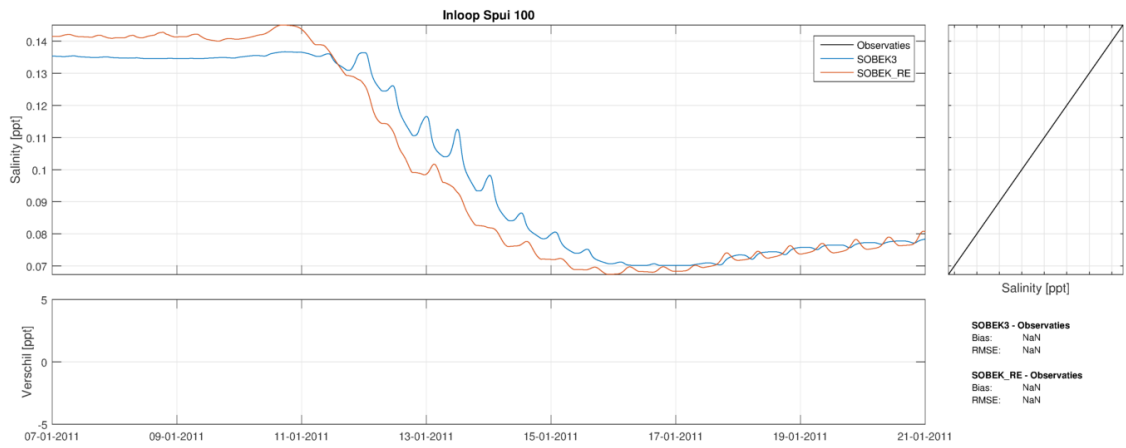


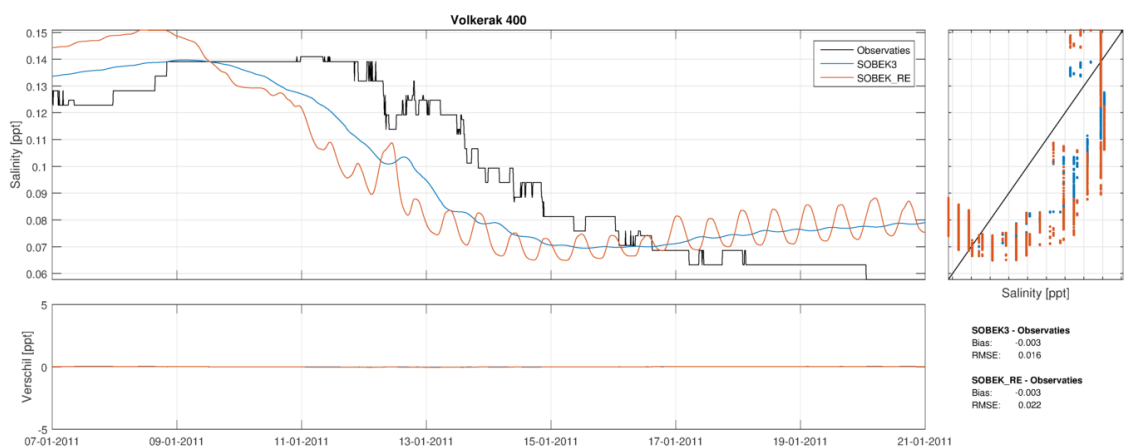
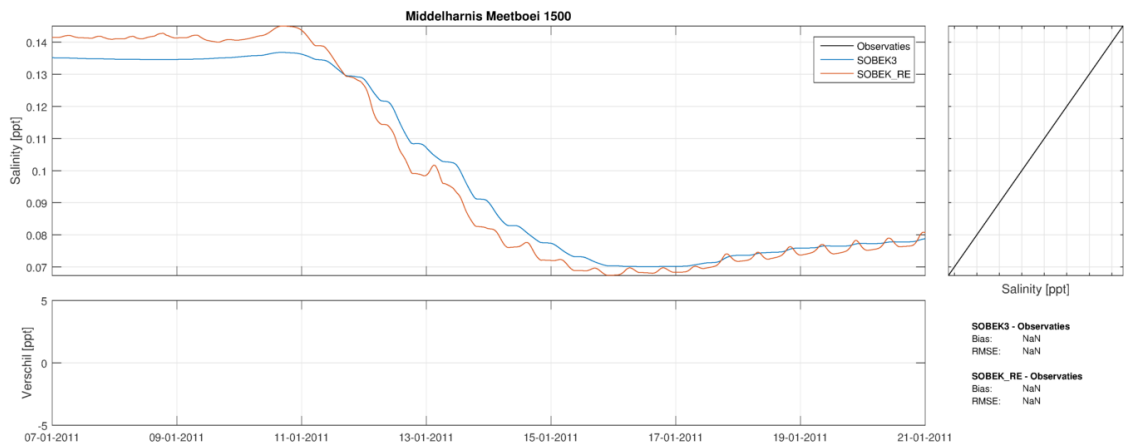
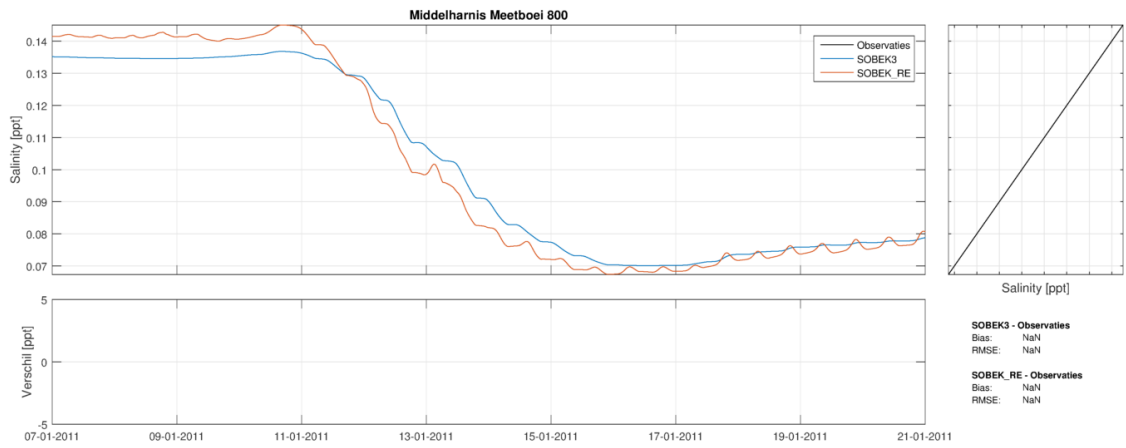


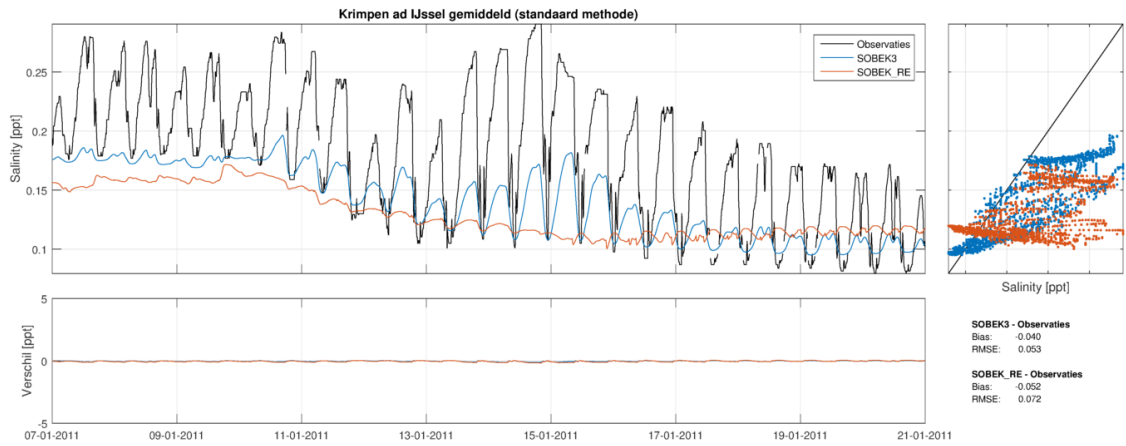
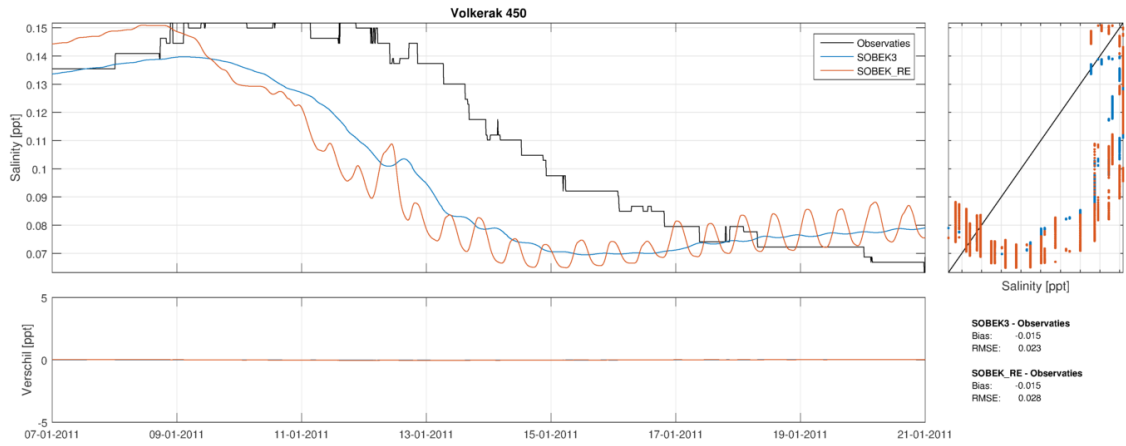
C.1.3 Periode januari 2011



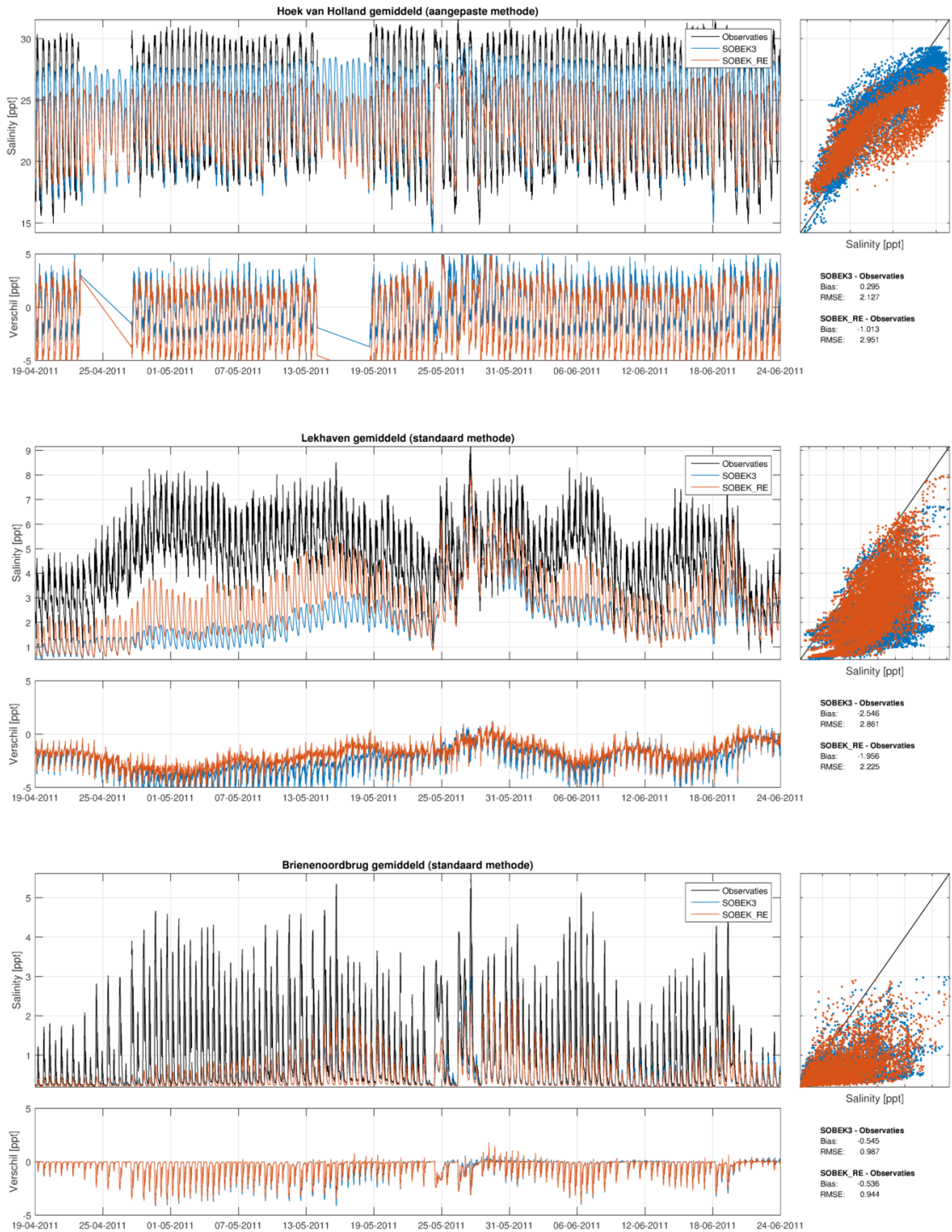


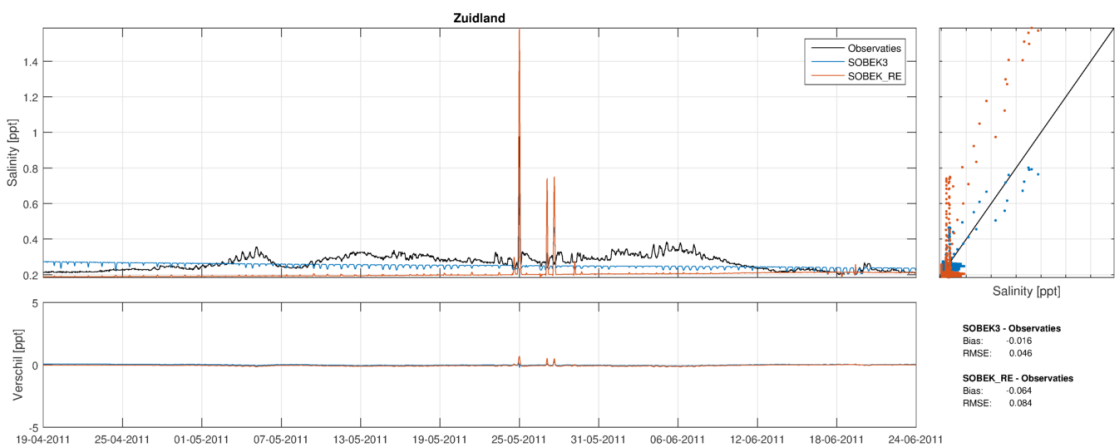
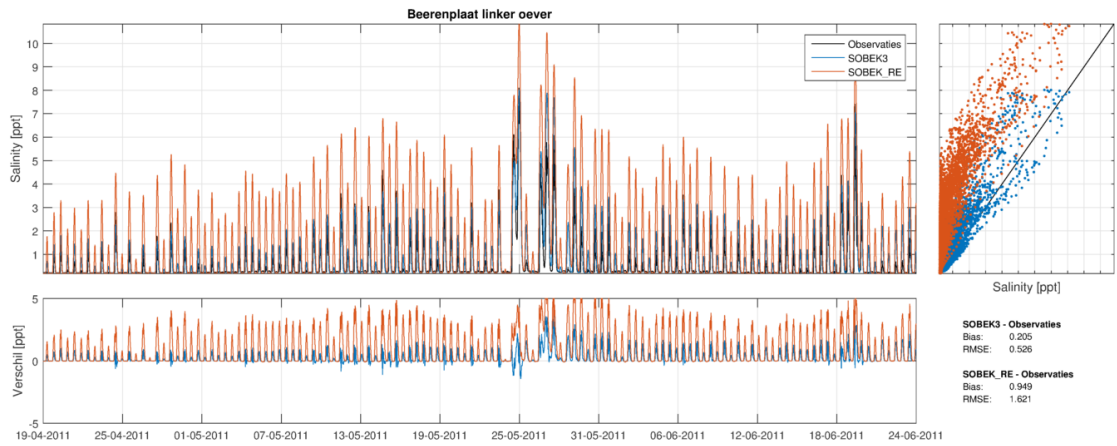
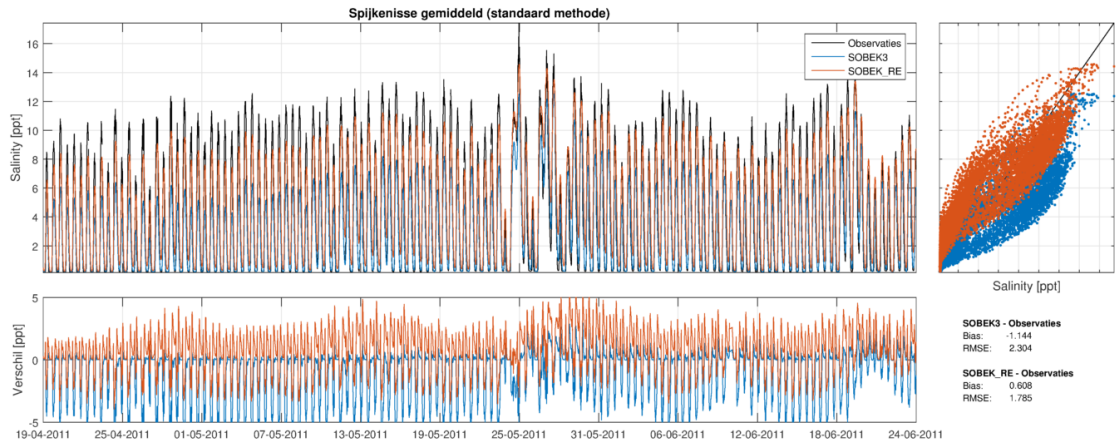


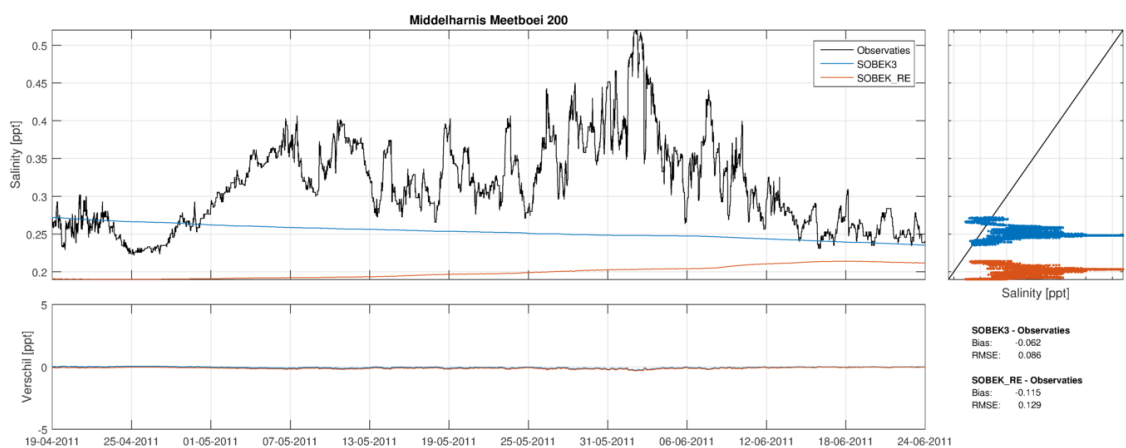
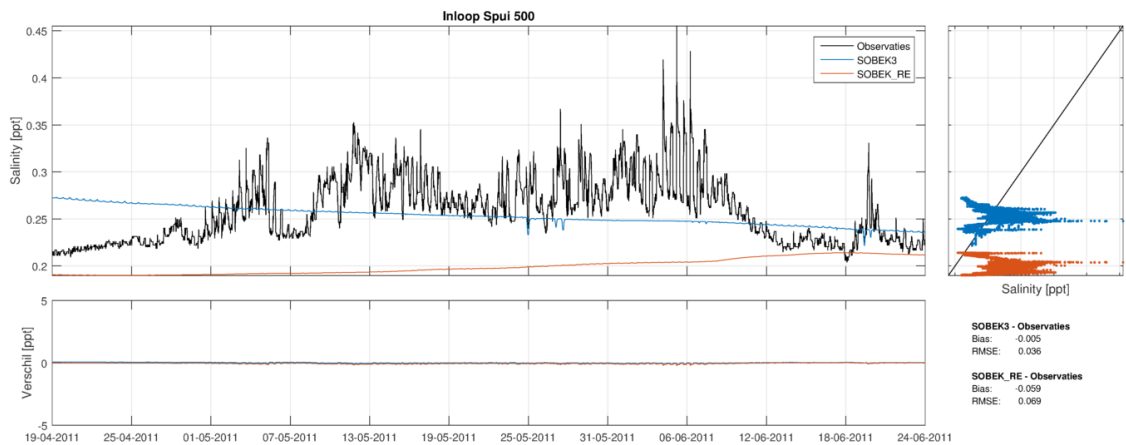
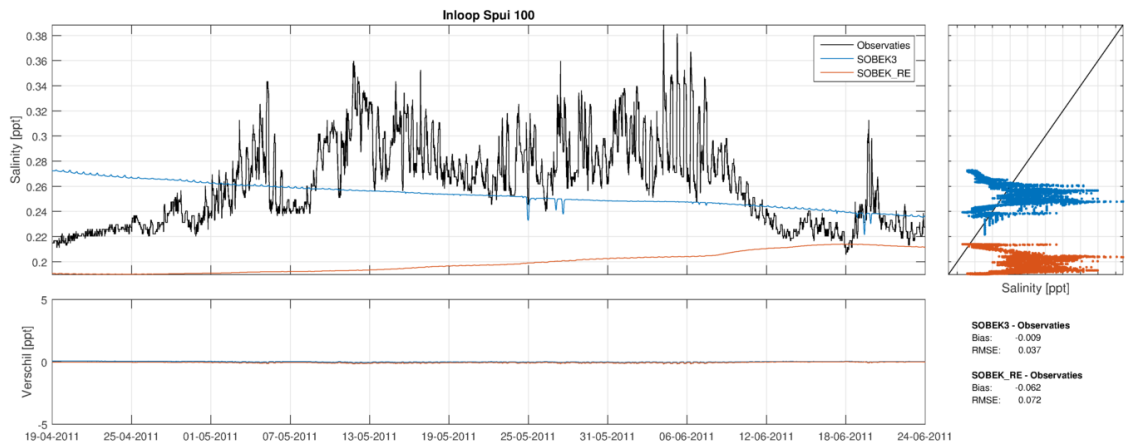


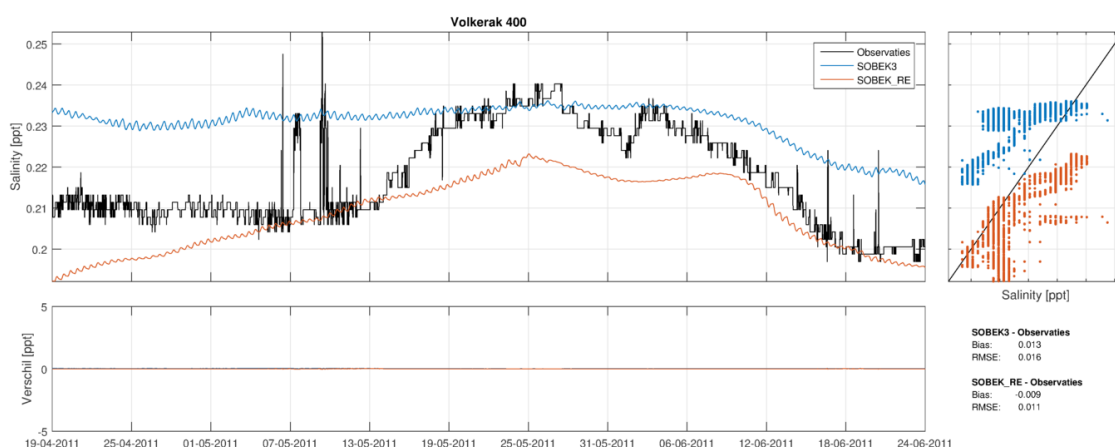
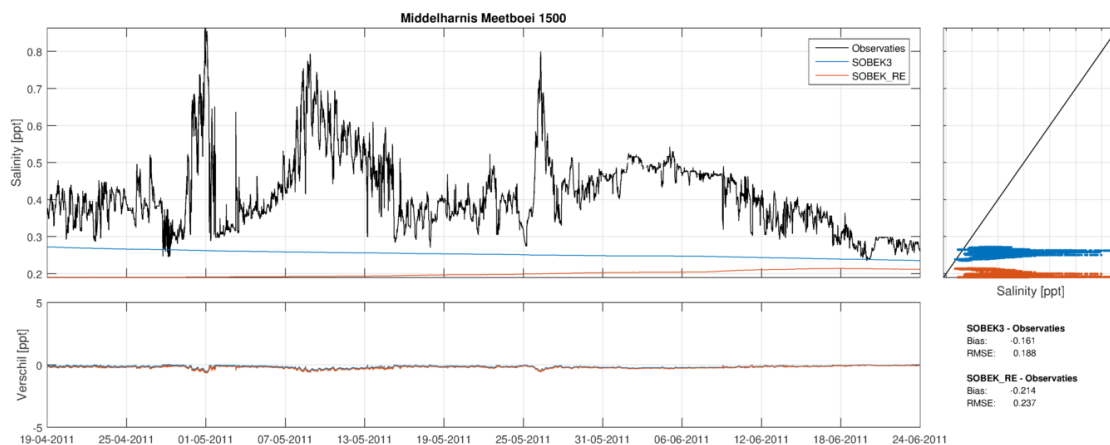
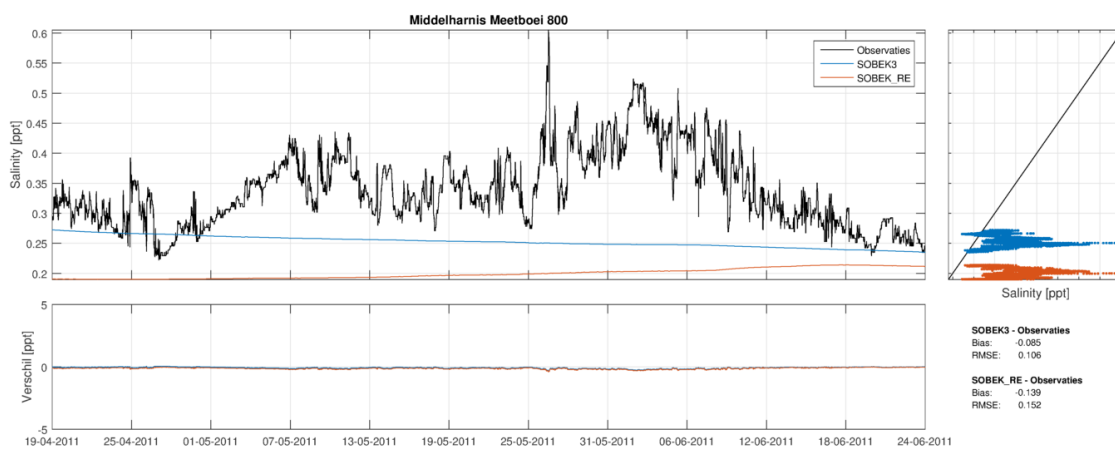


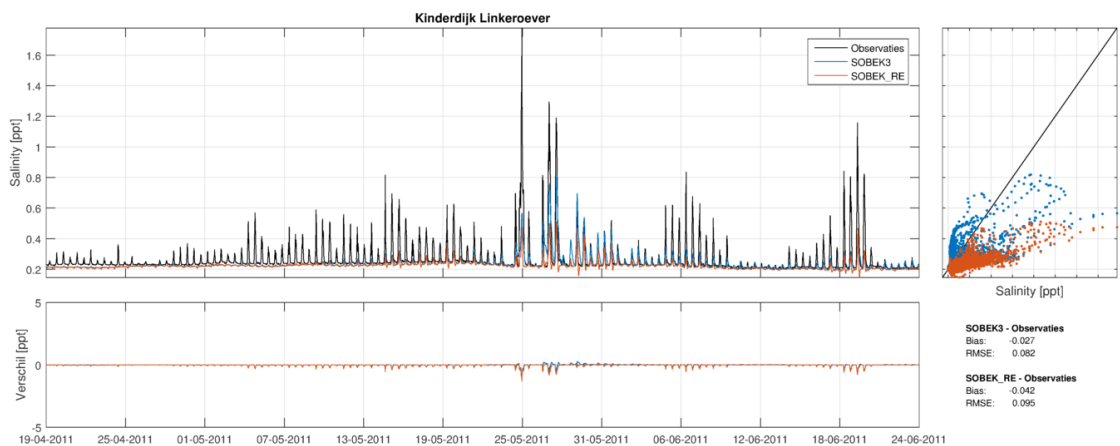
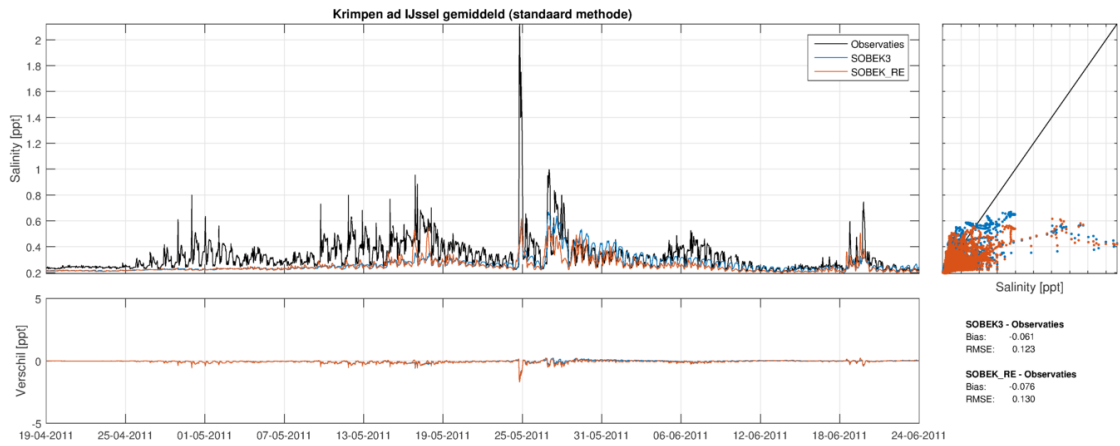
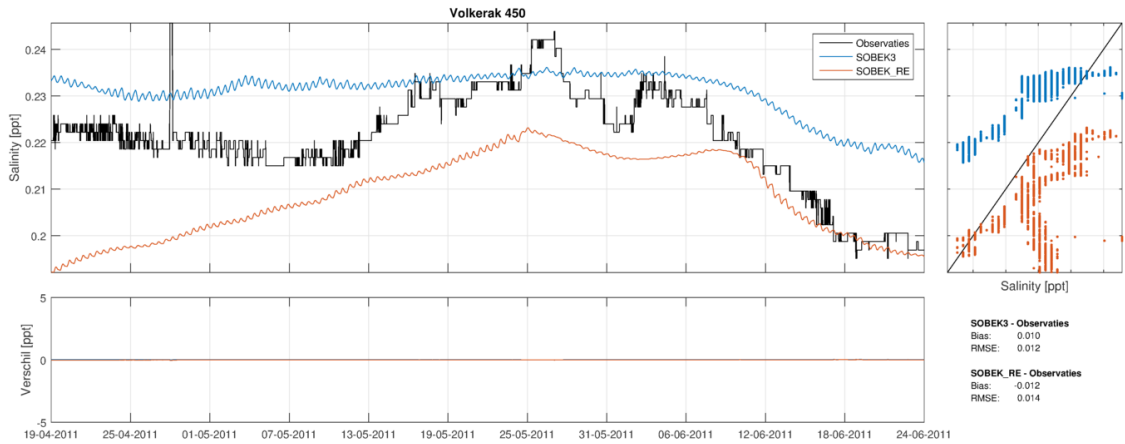
C.1.4 Voorjaar 2011



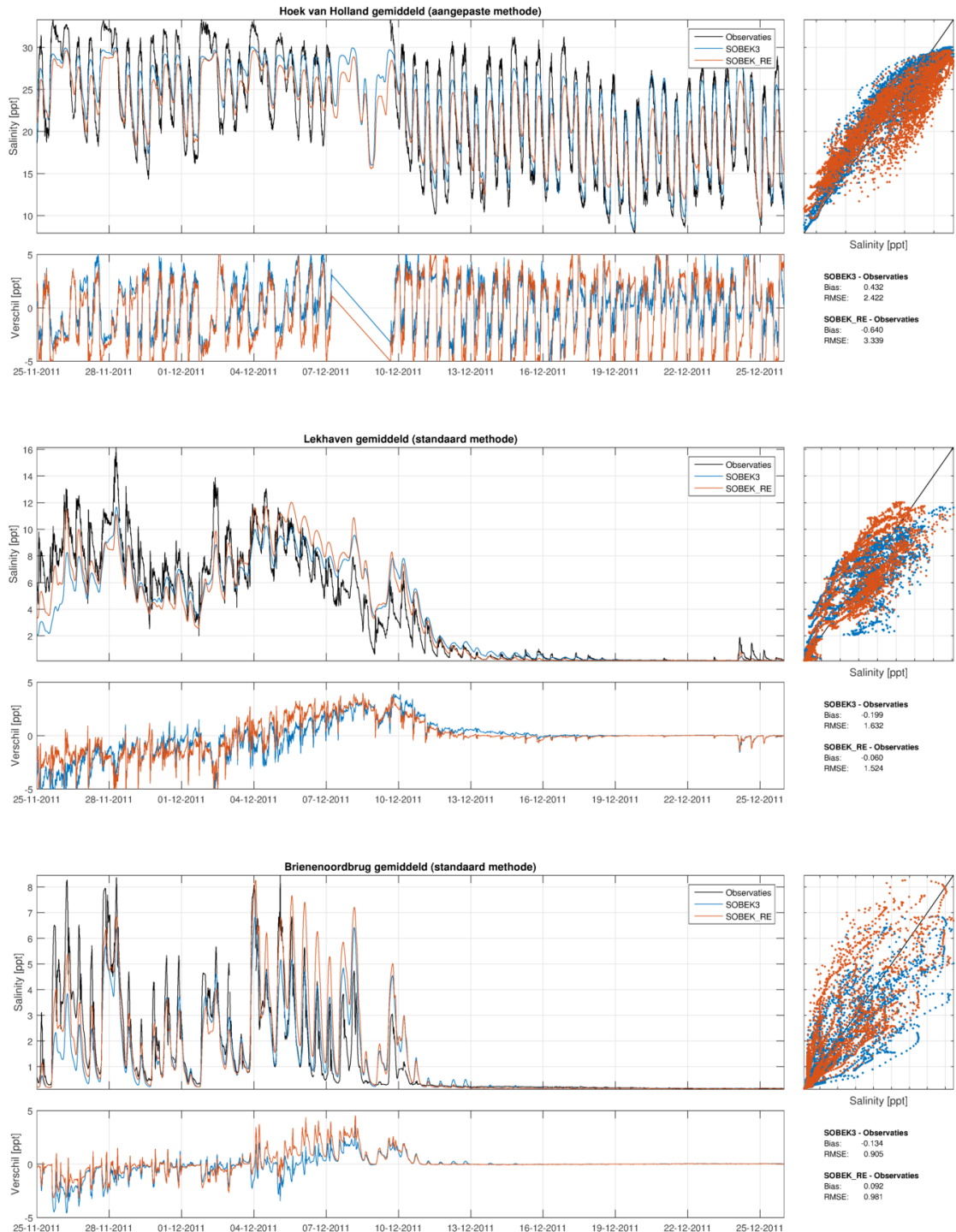


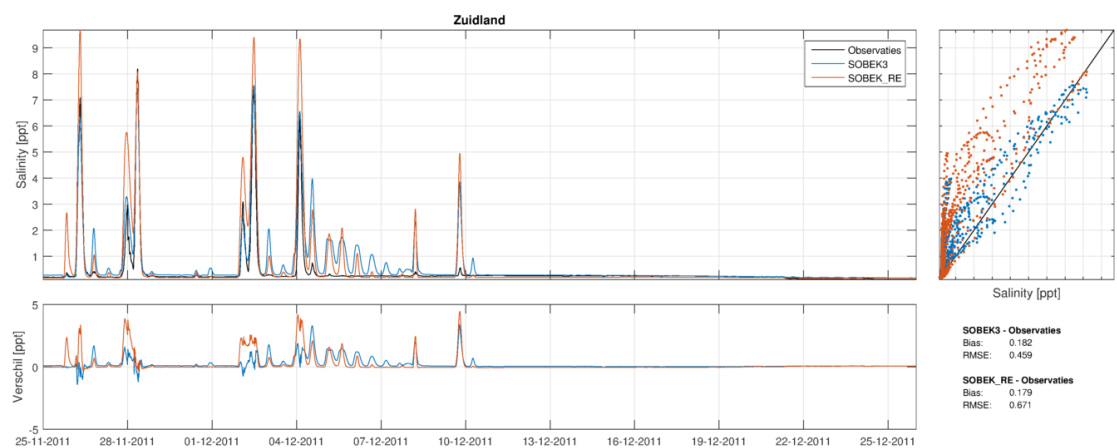
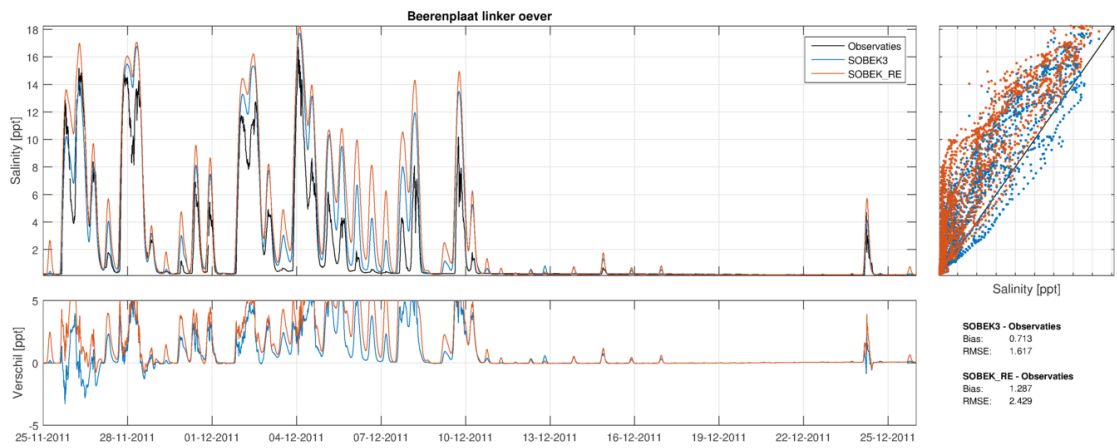
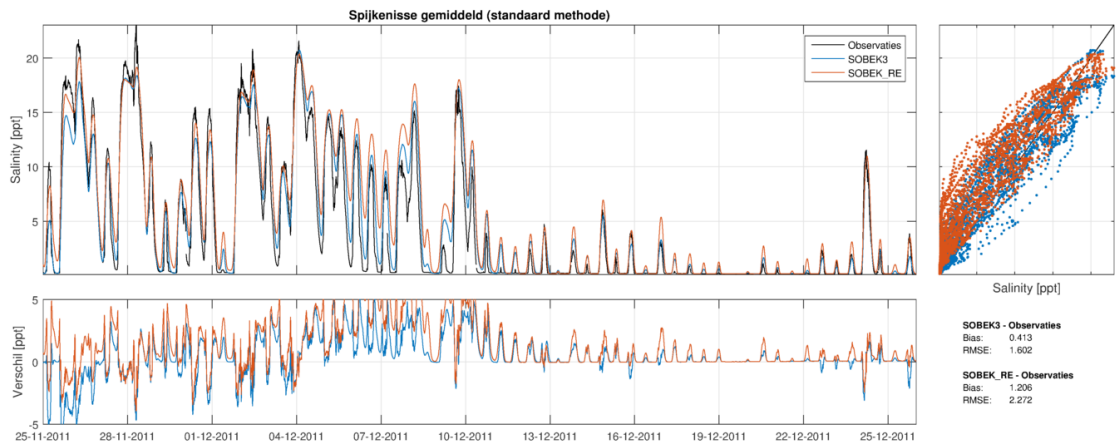


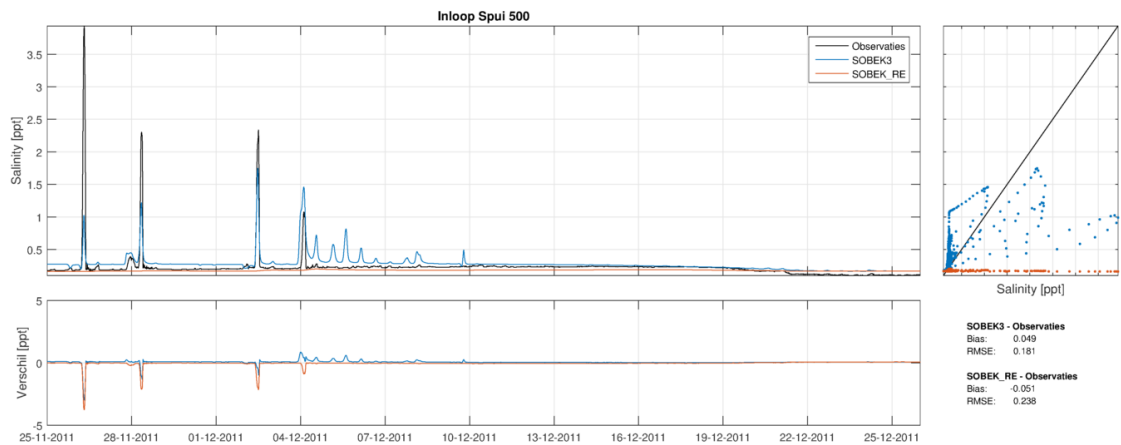
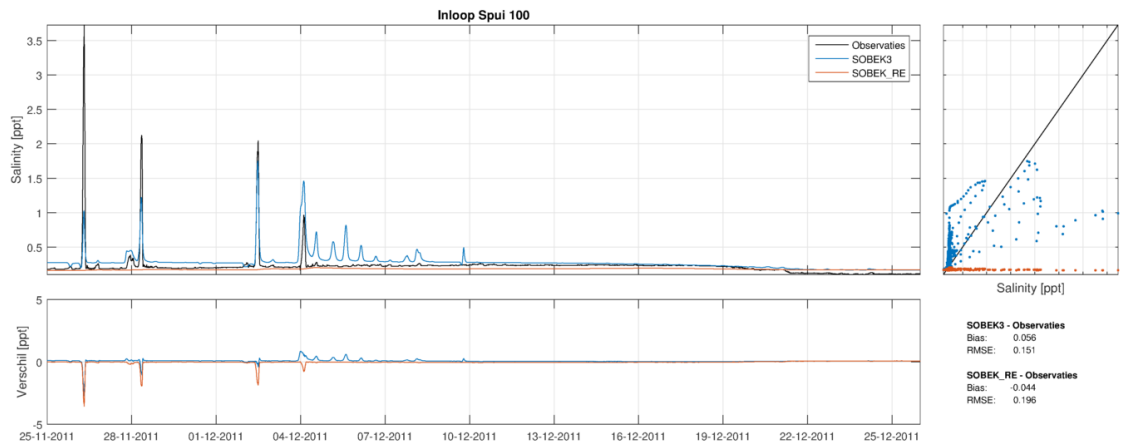


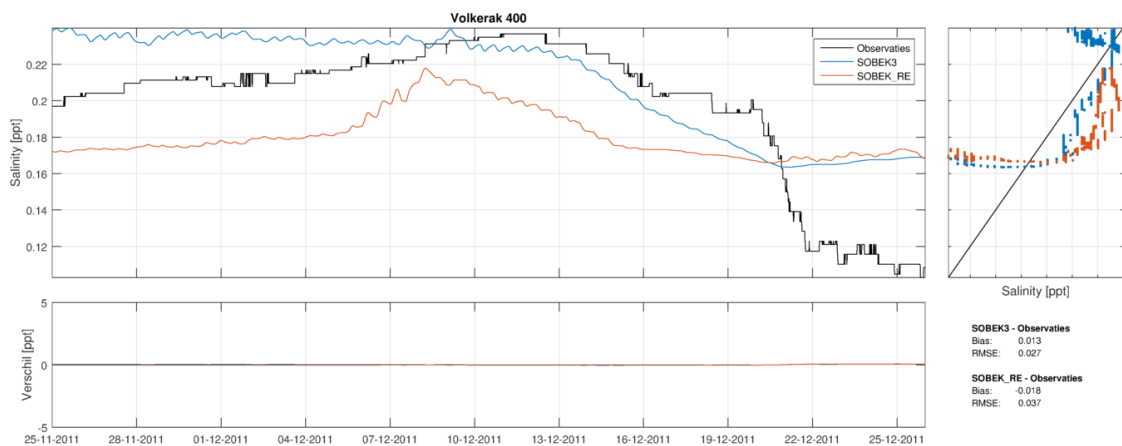
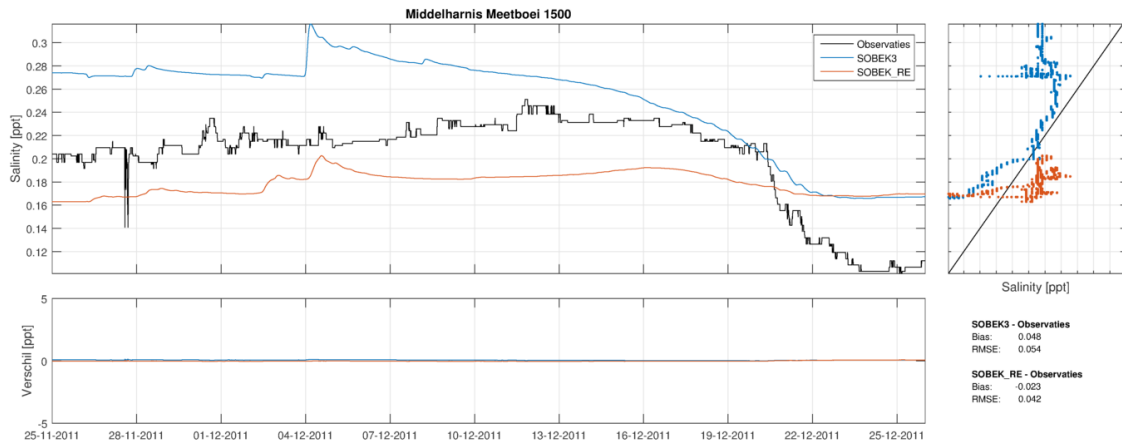
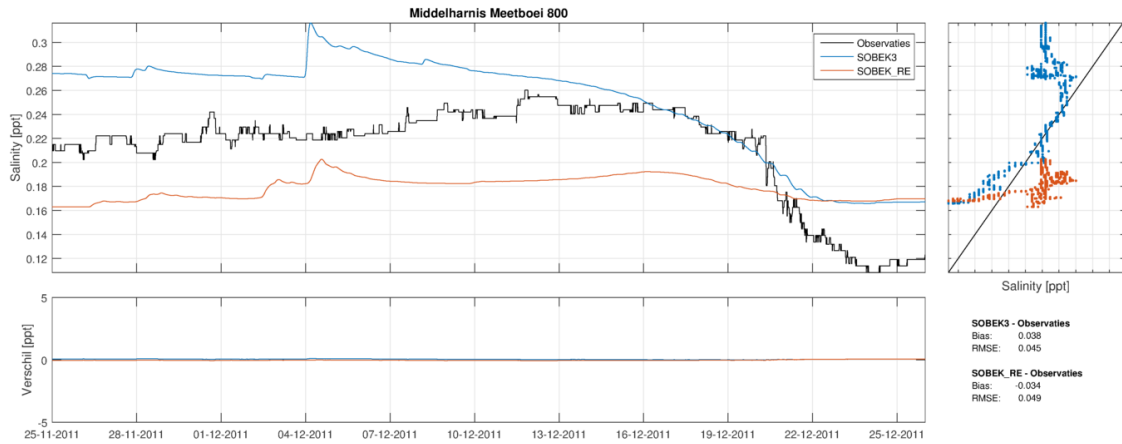


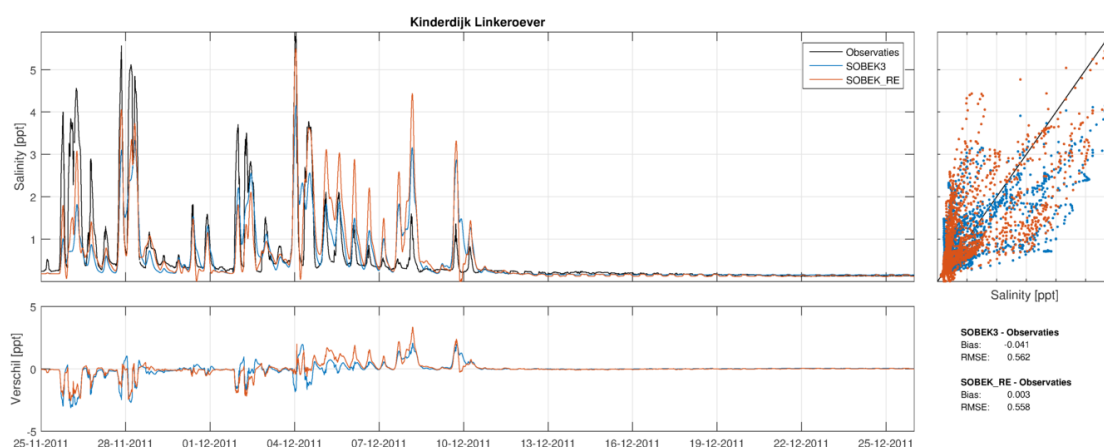
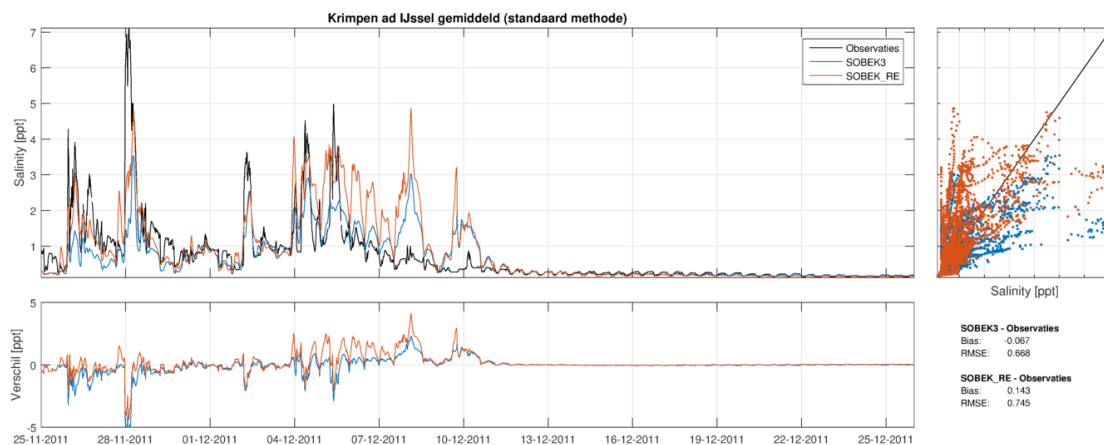
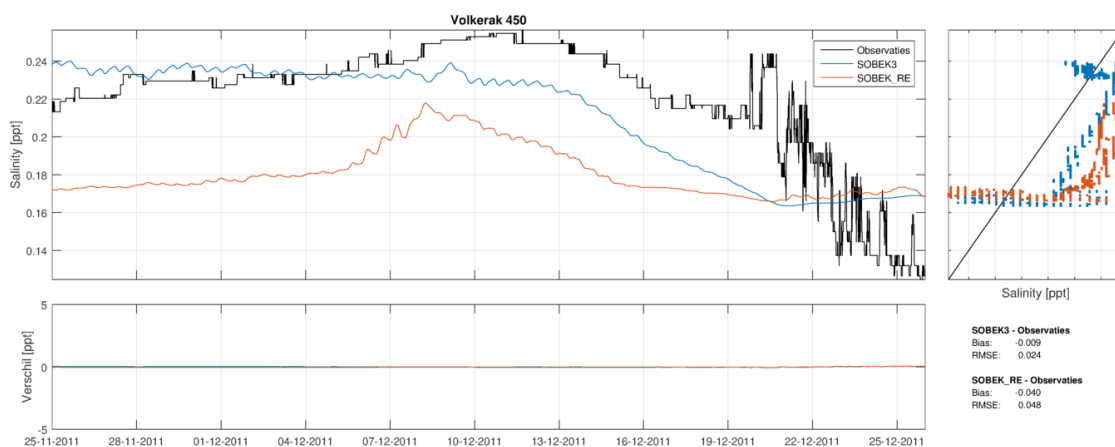
C.1.5 December 2011





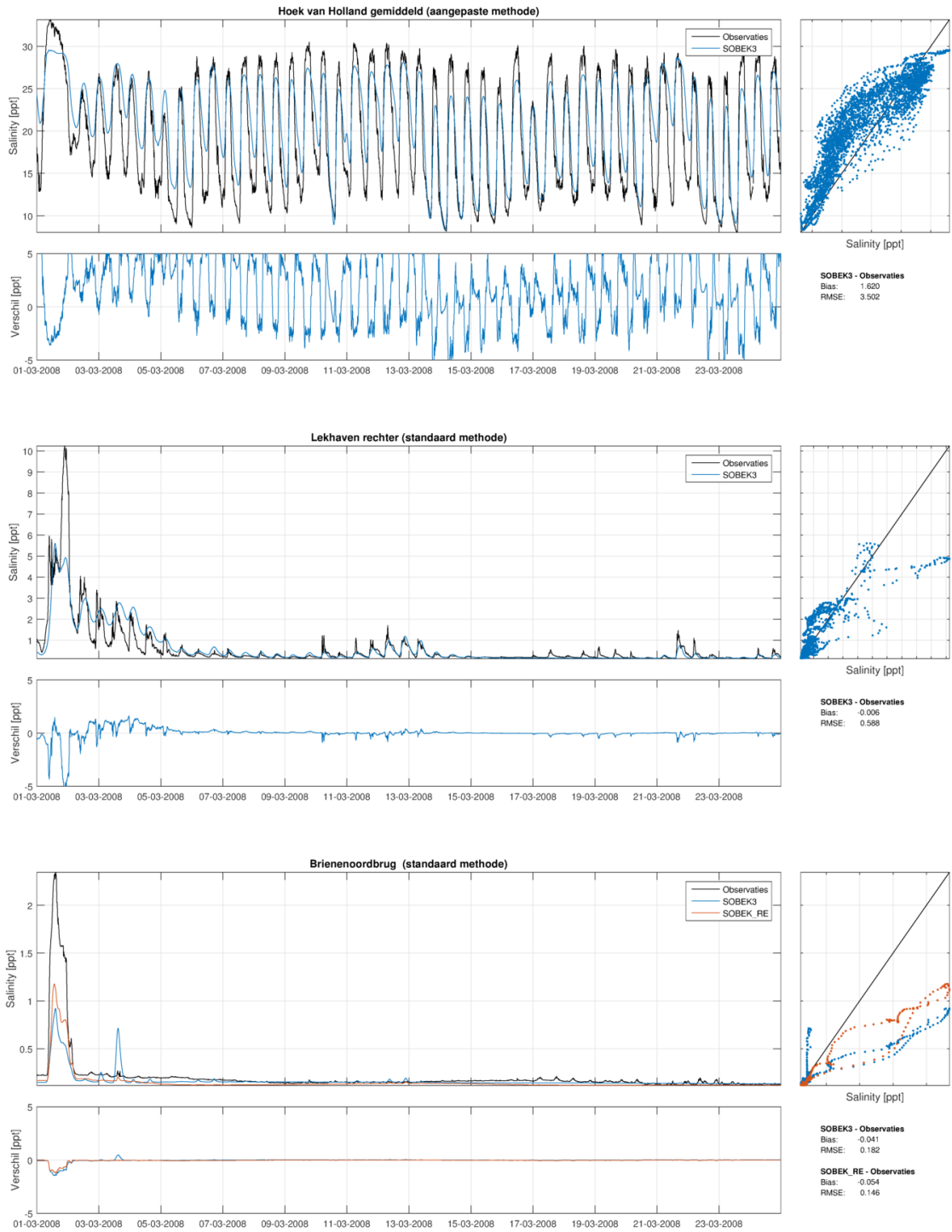


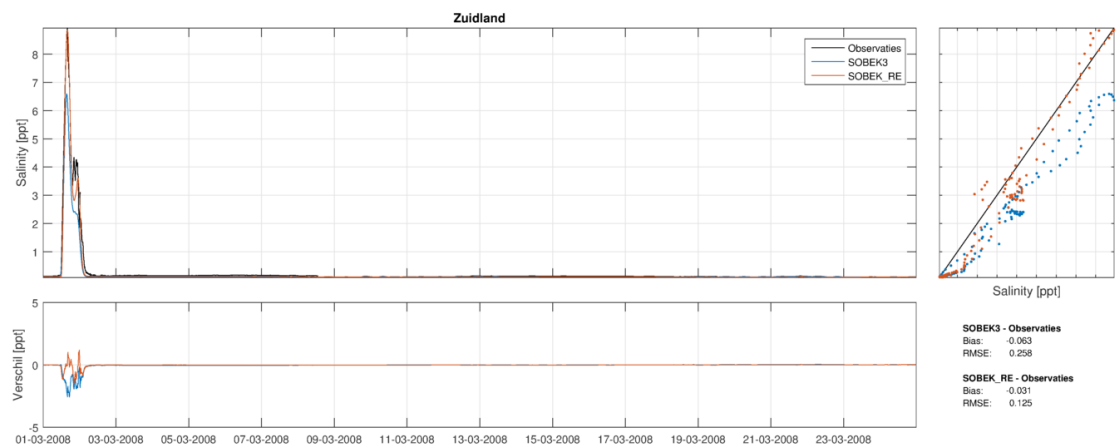
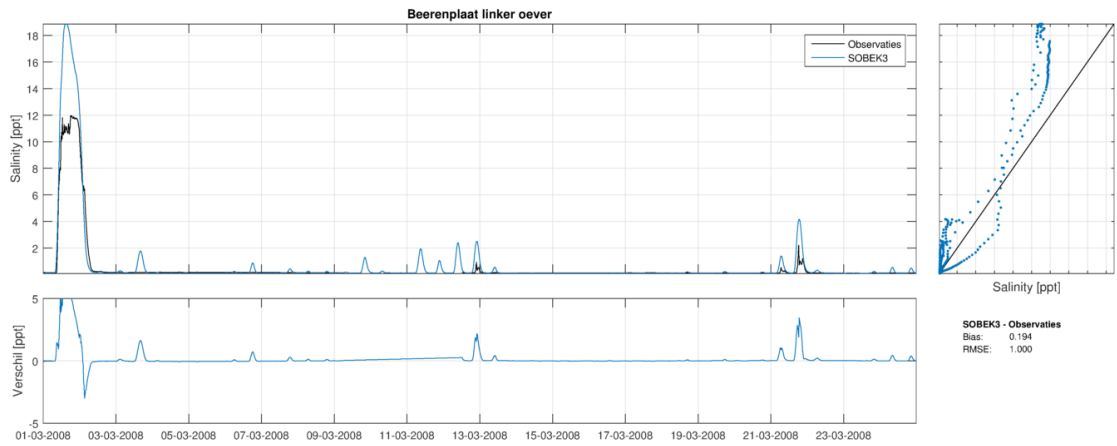
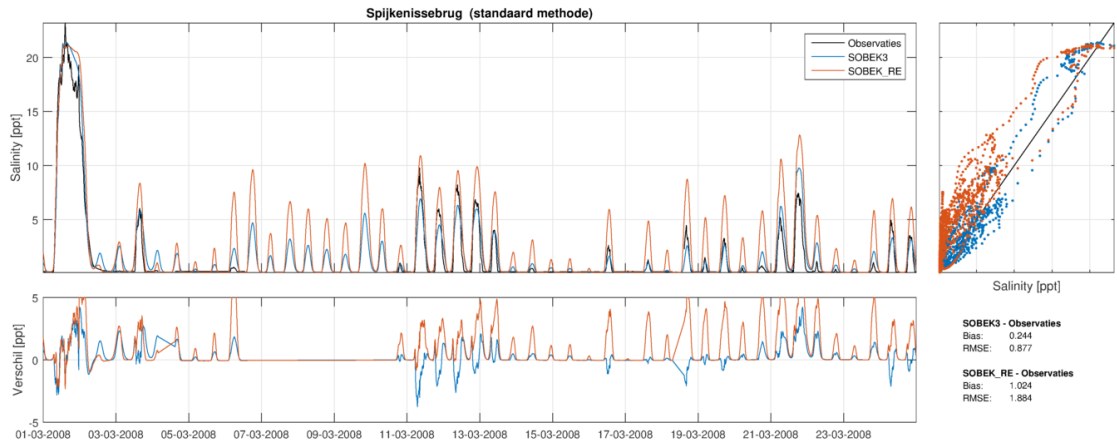


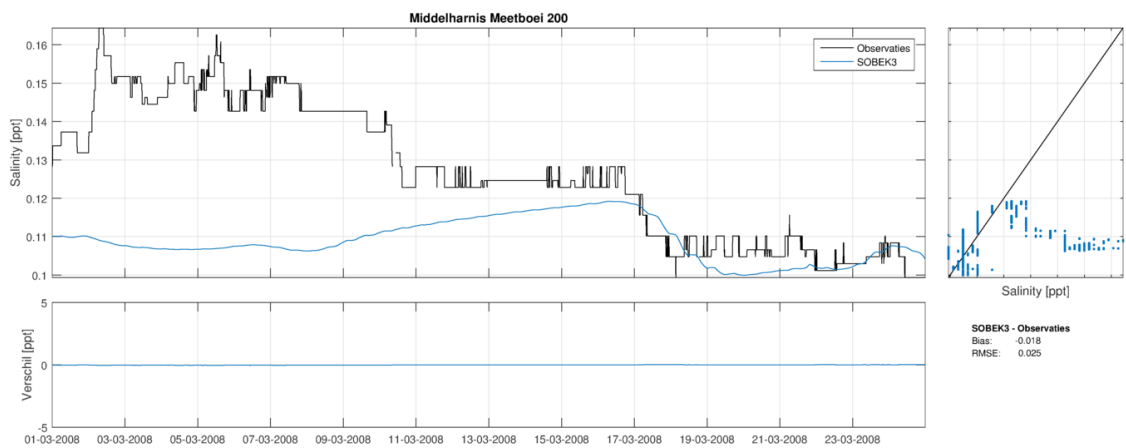
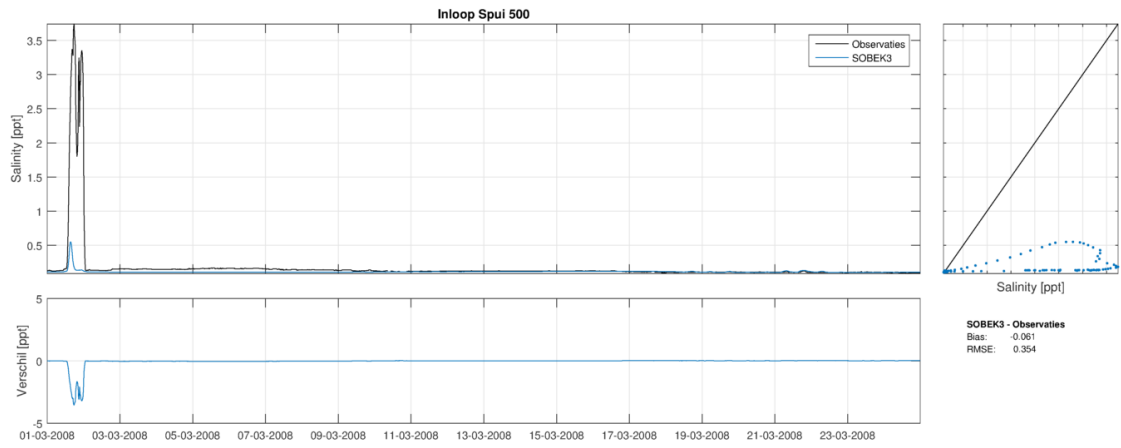
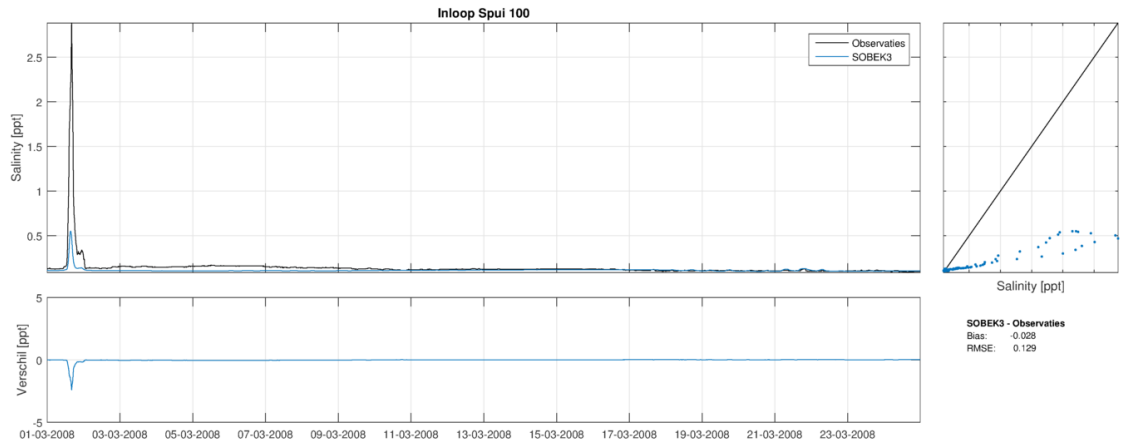


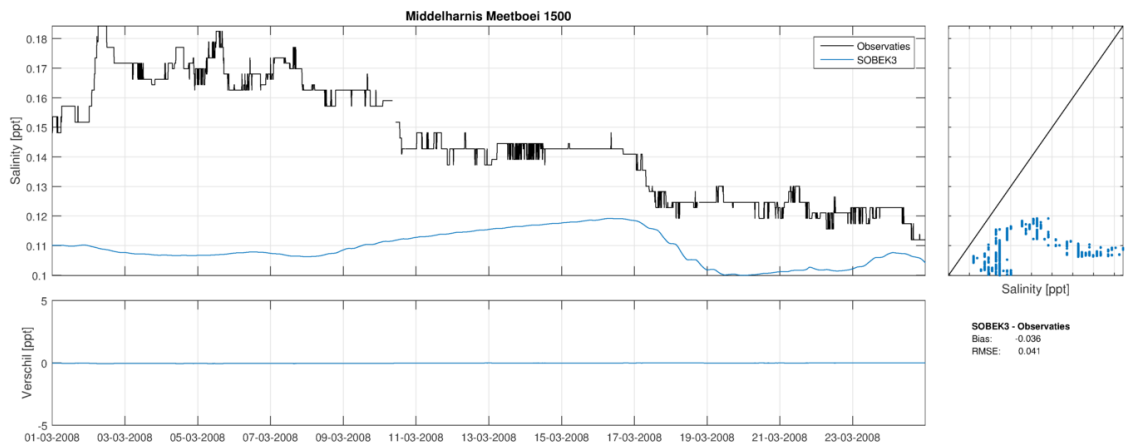
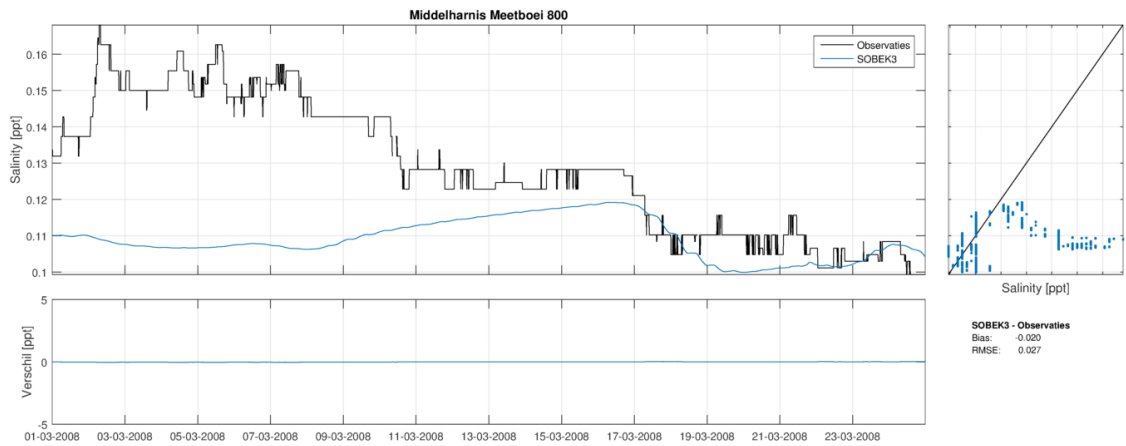
C.2 Verificatie

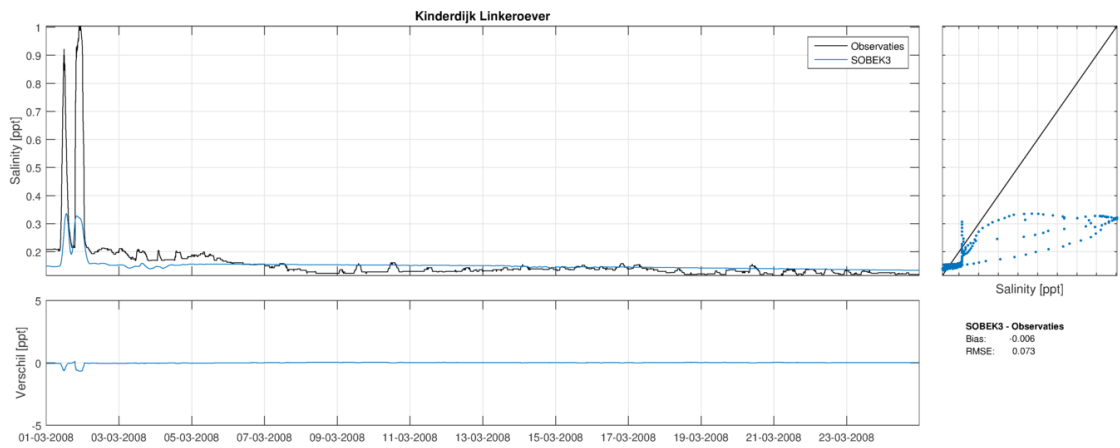
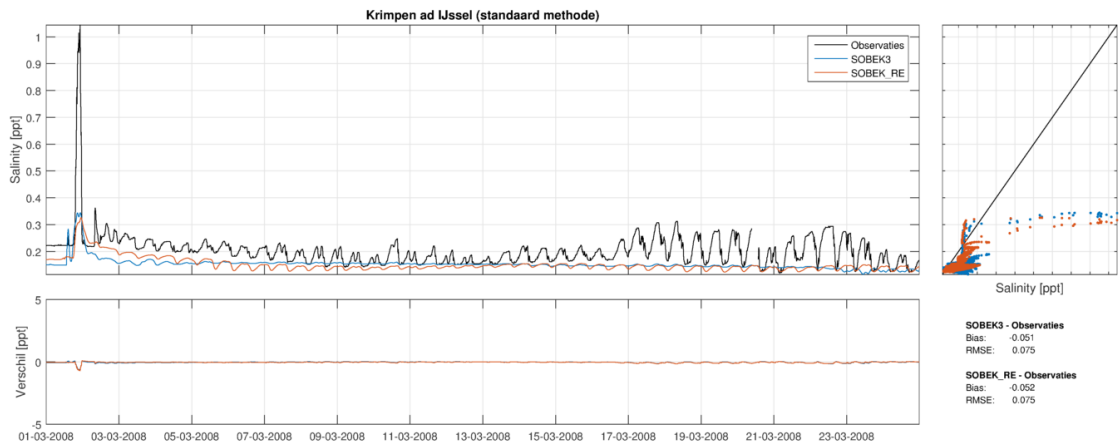
C.2.1 Maart 2008



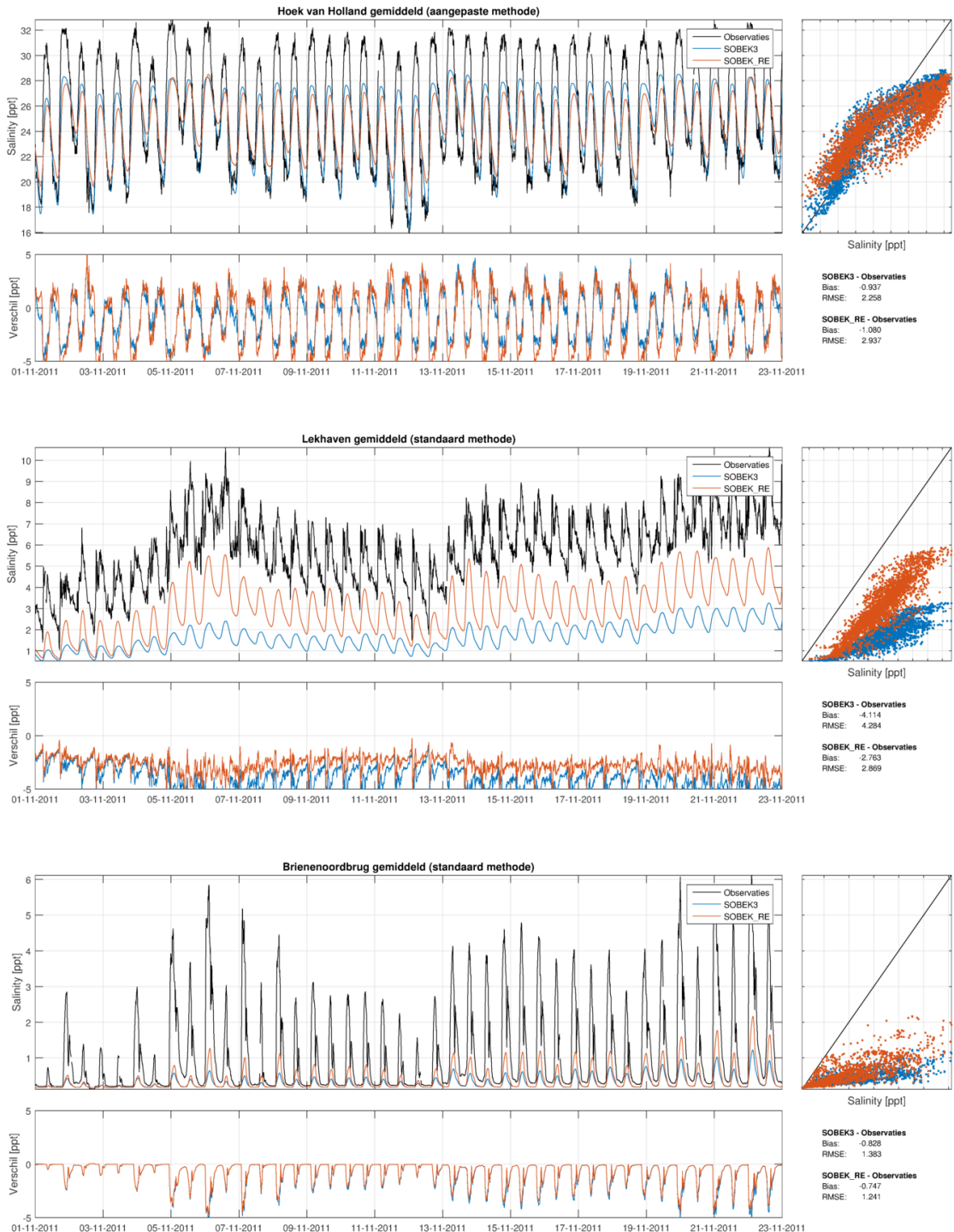


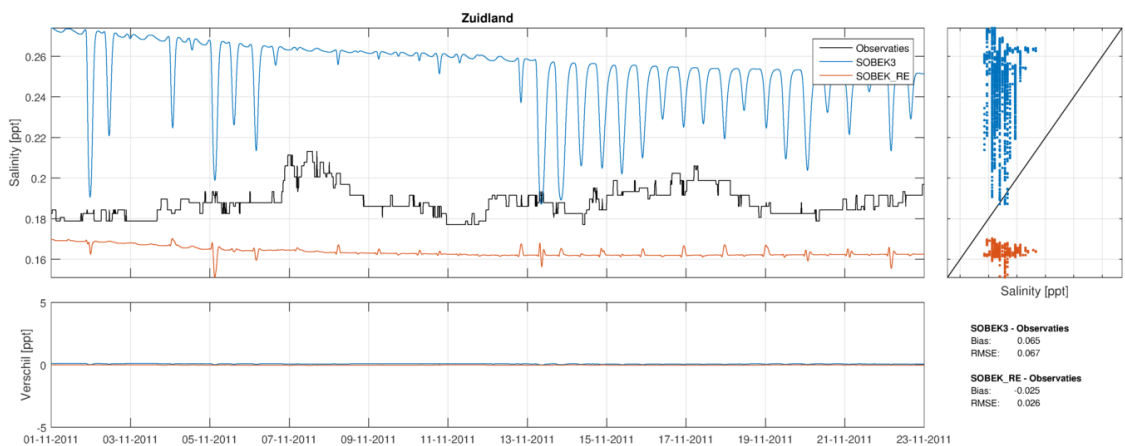
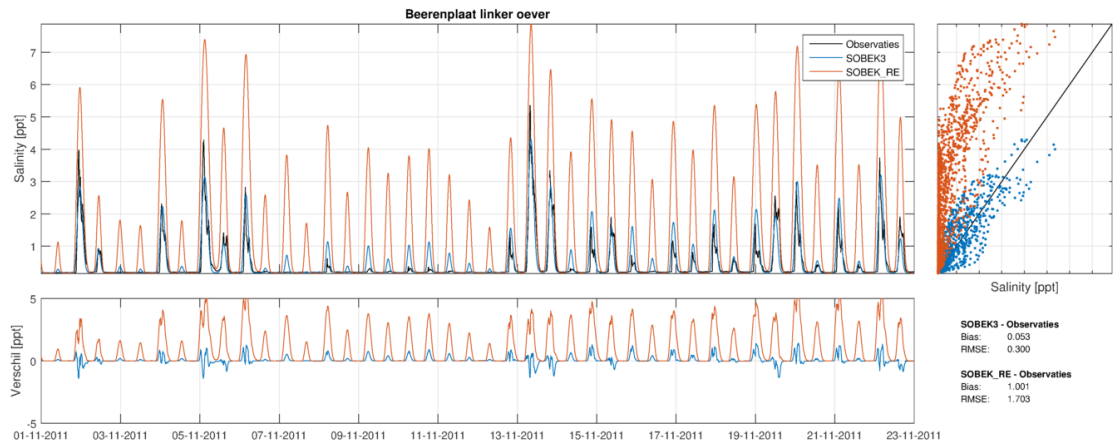
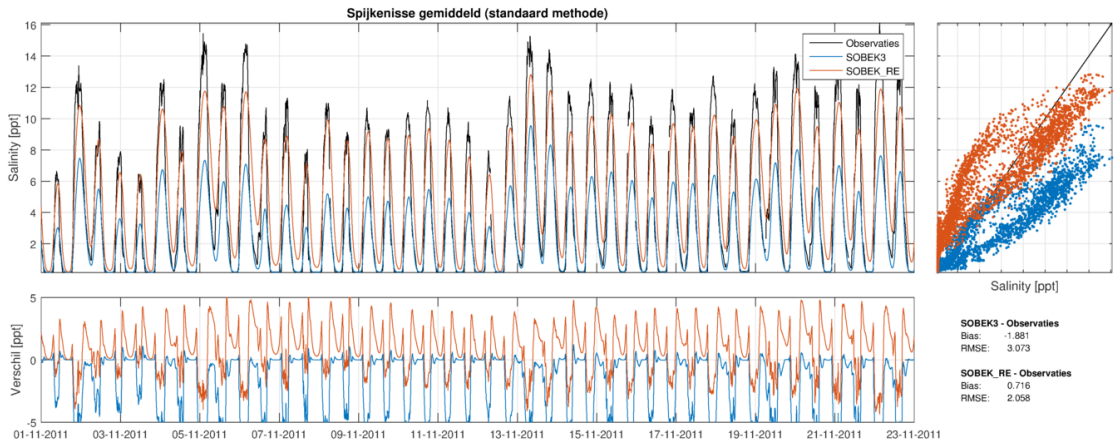


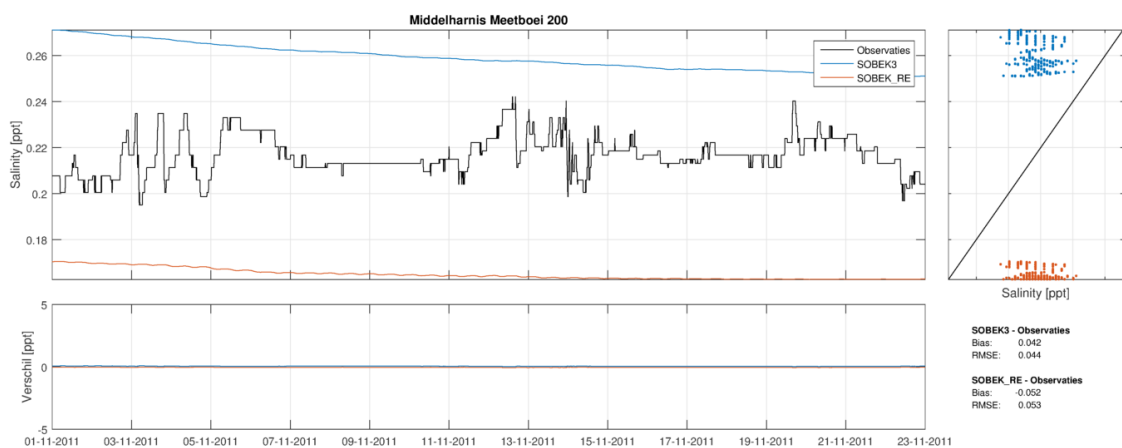
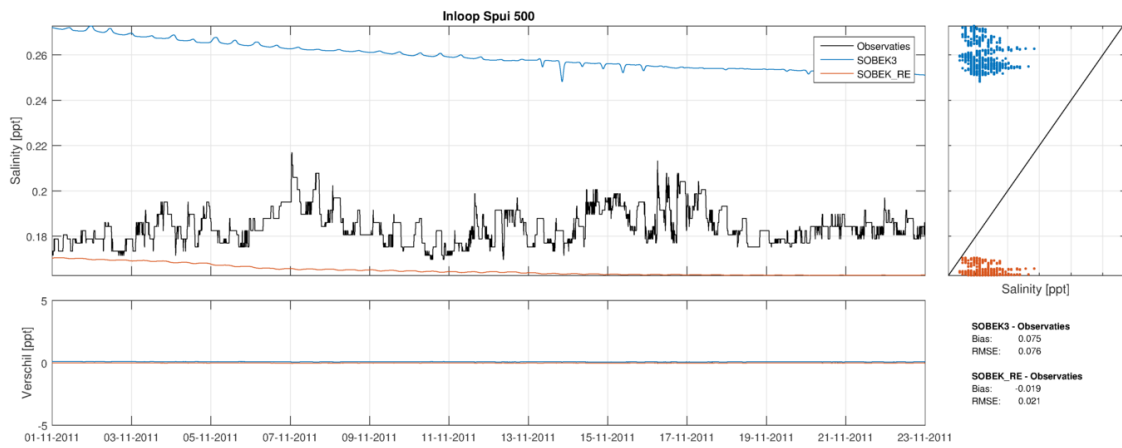
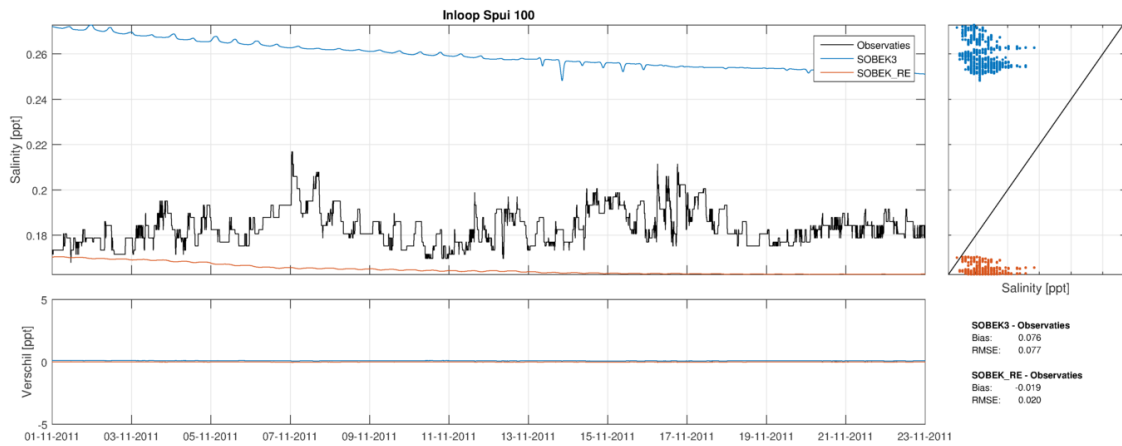


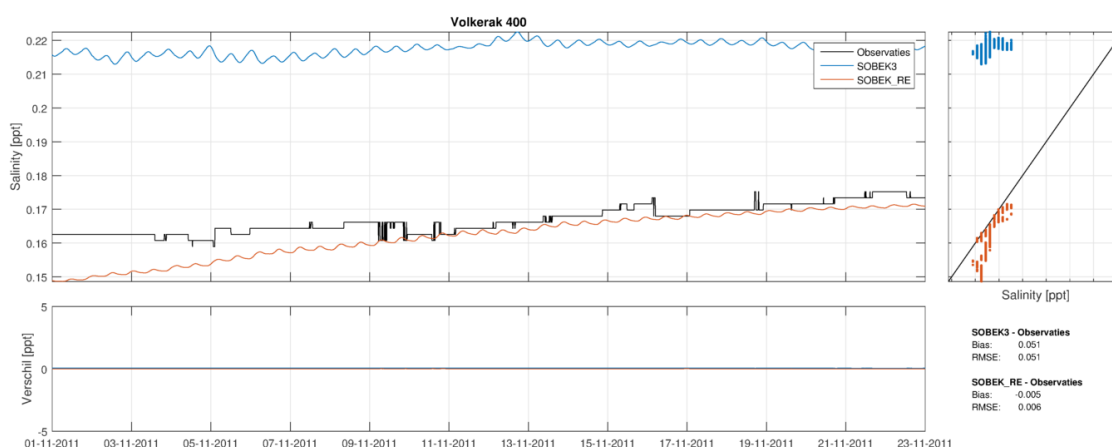
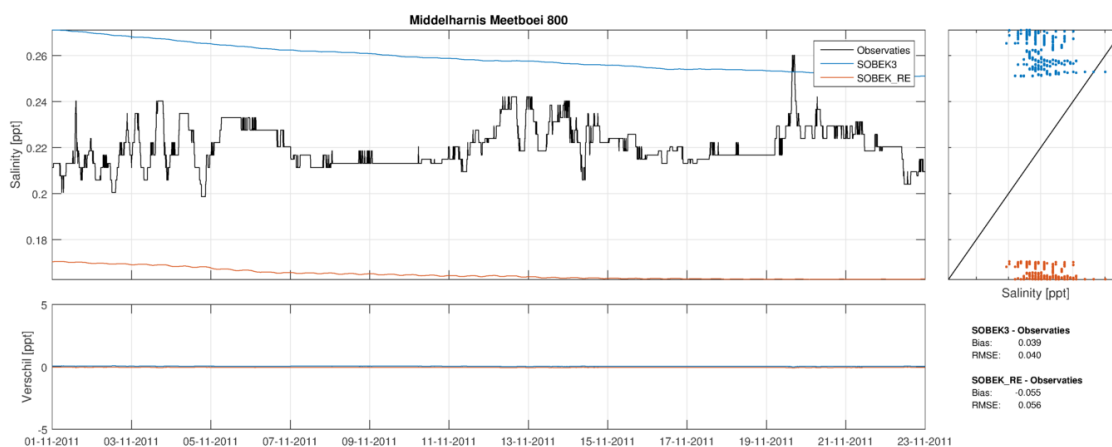


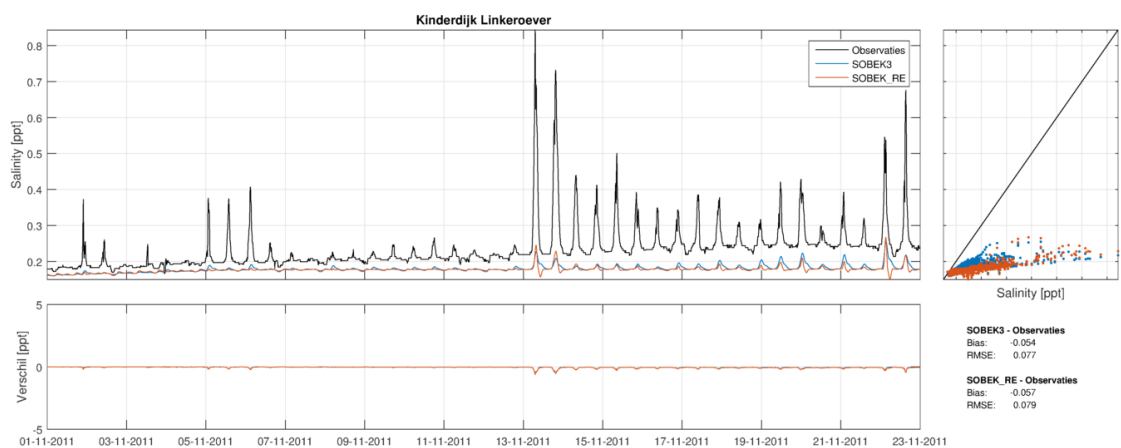
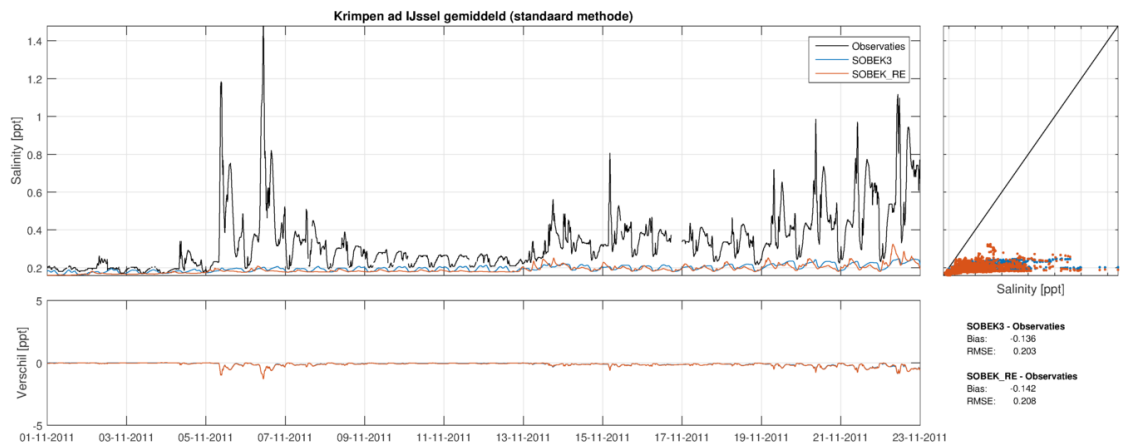
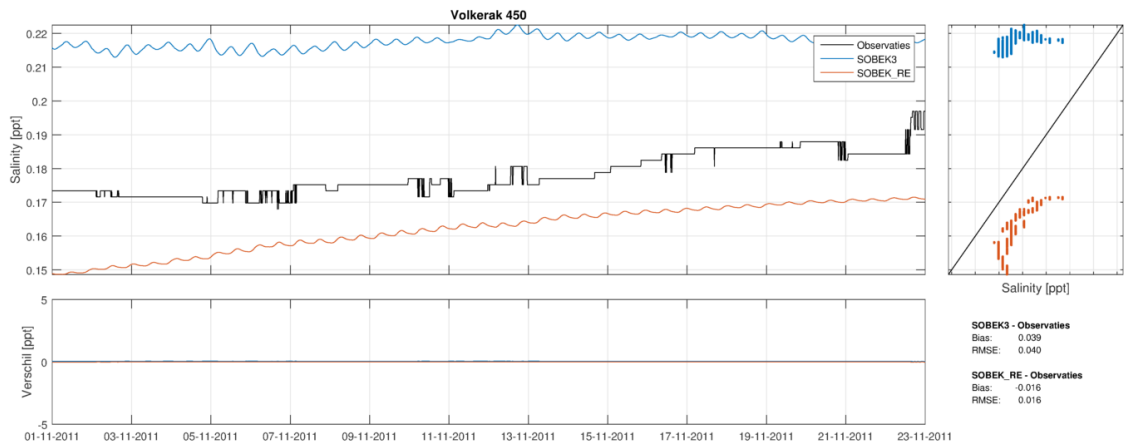
C.2.2 Periode 1-23 november 2011



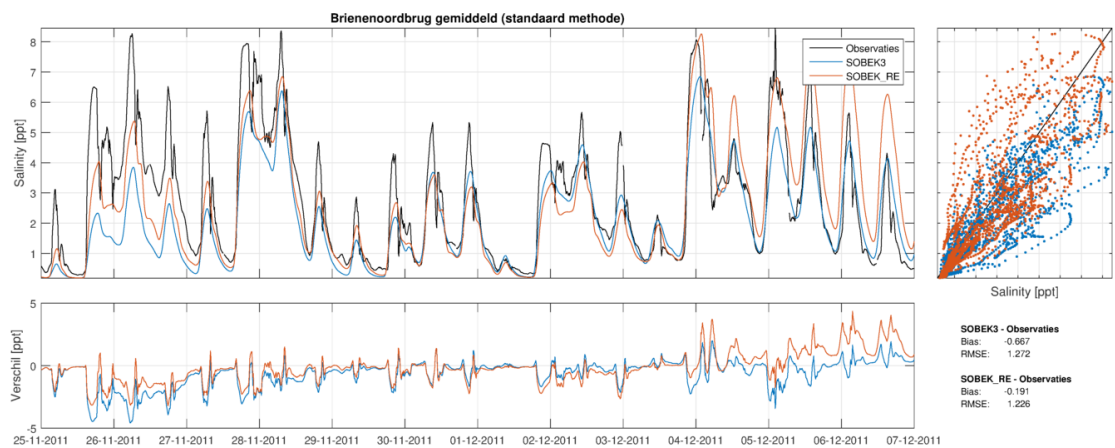
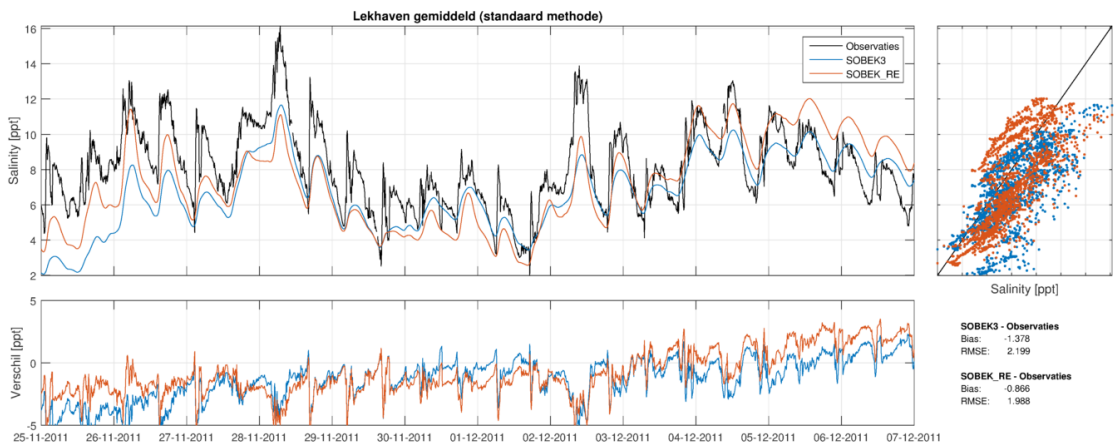
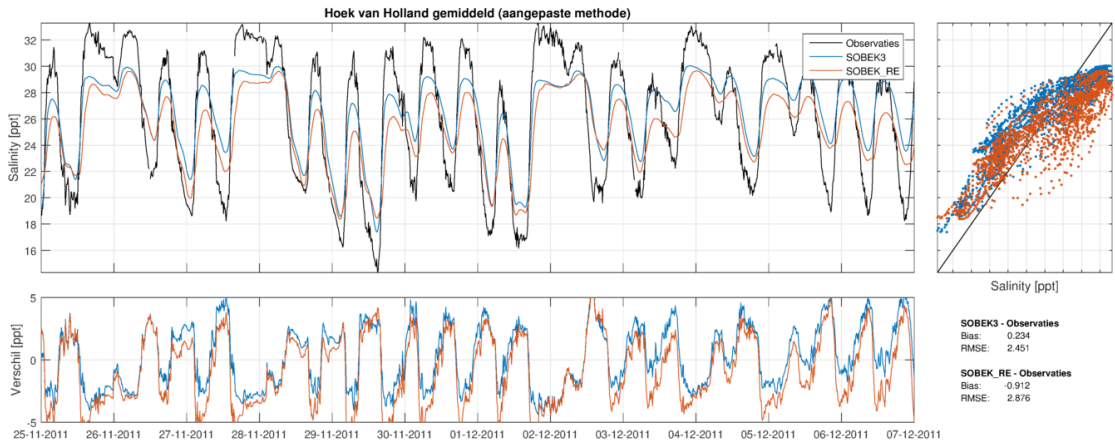


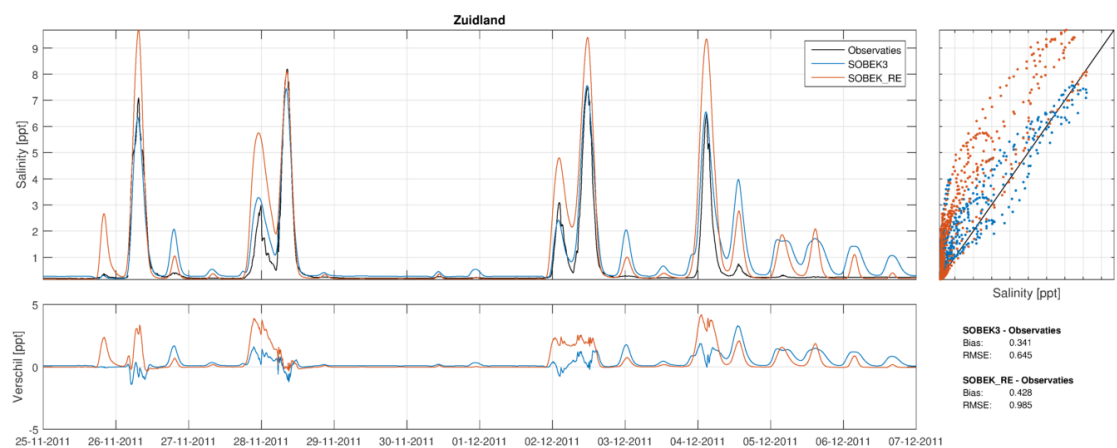
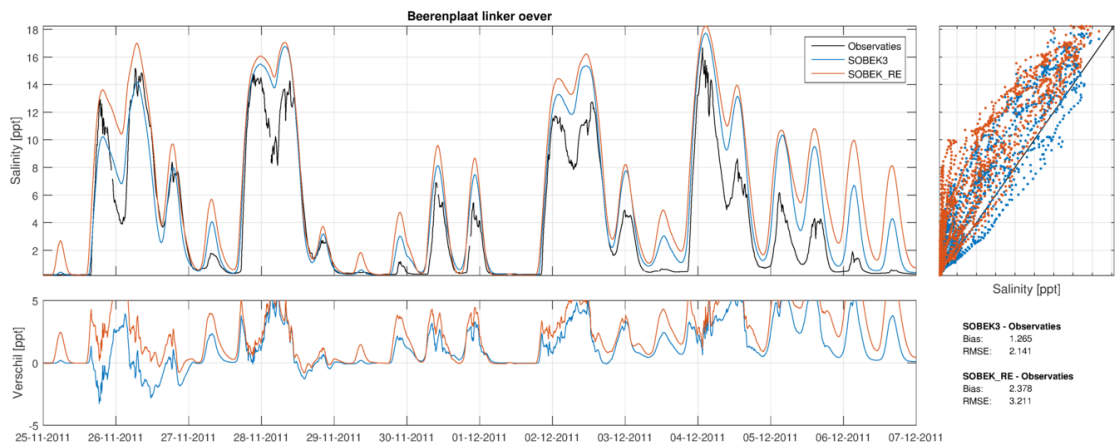
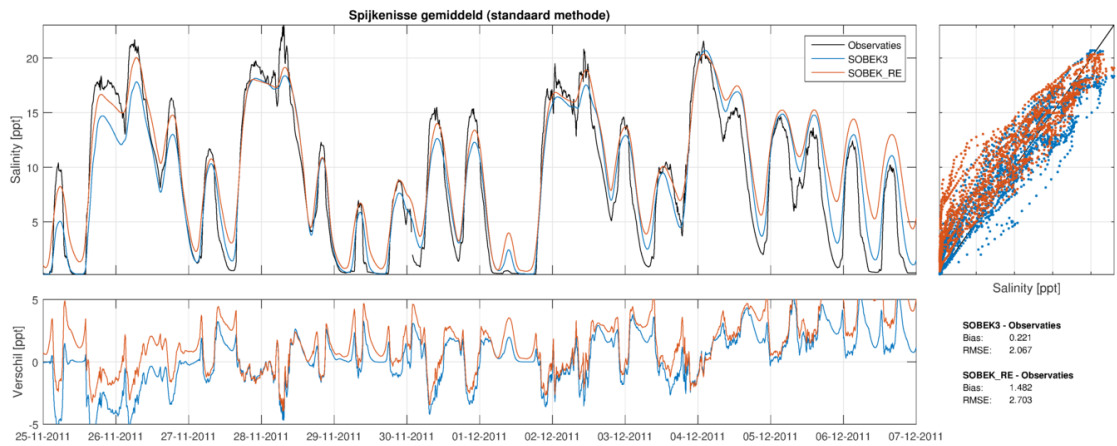


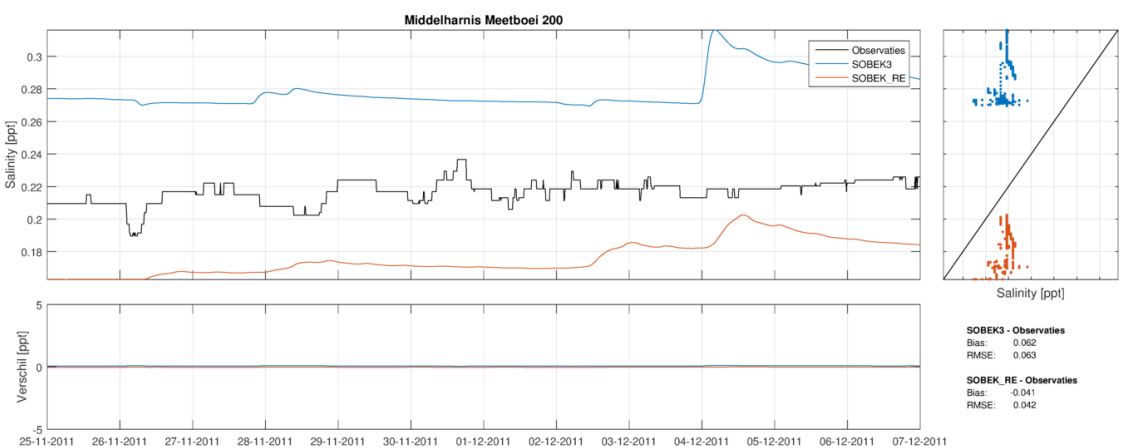
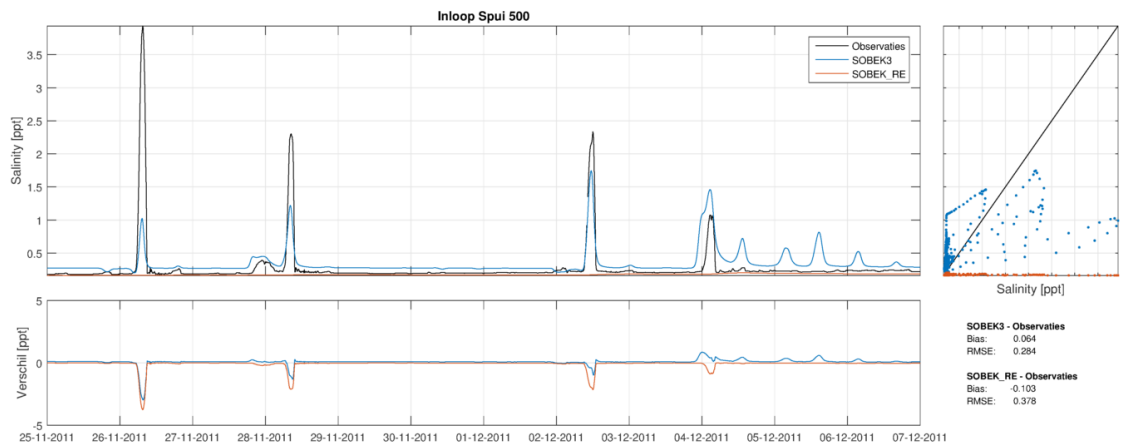
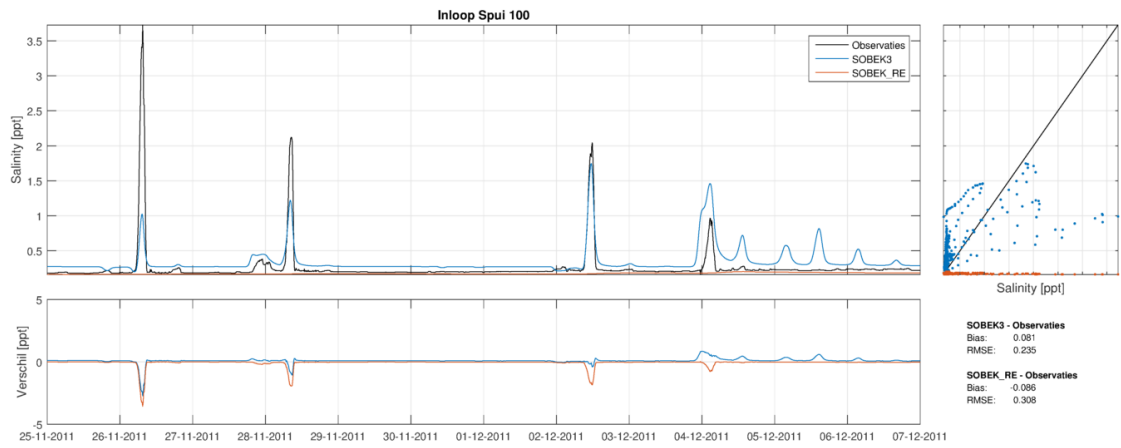


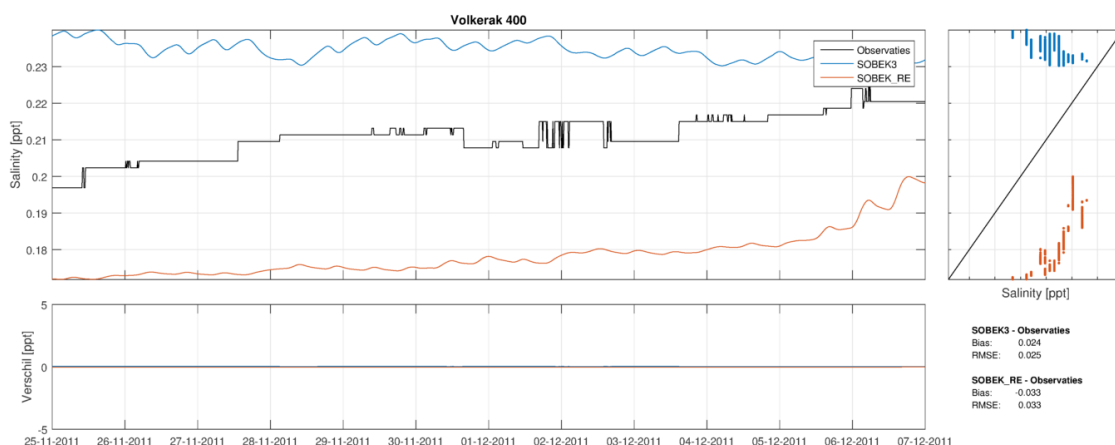
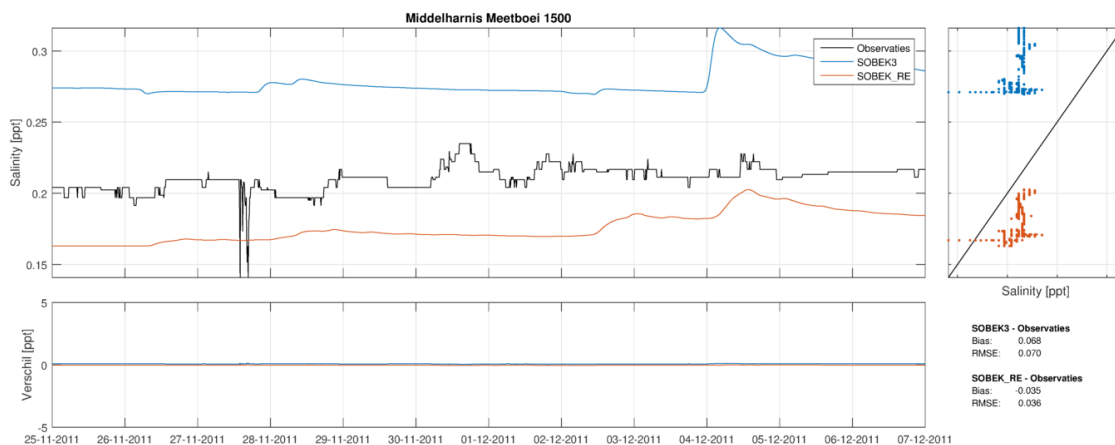
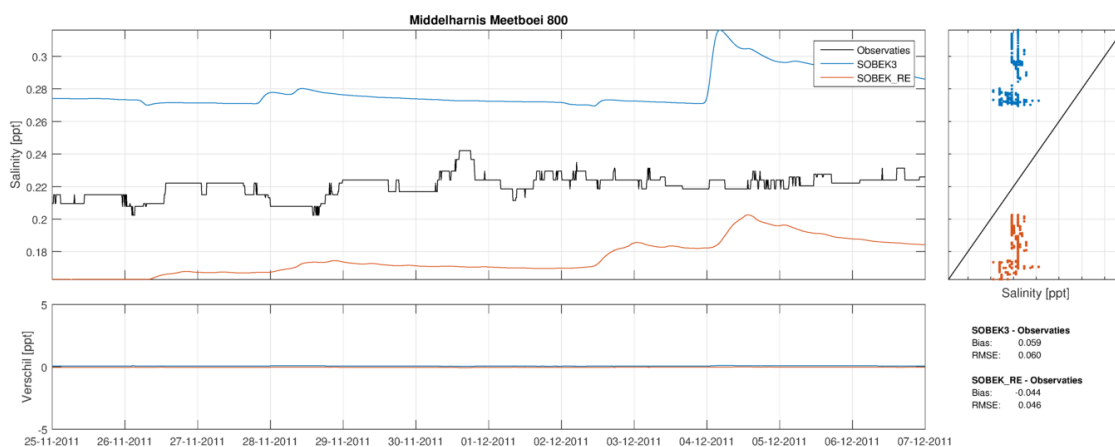


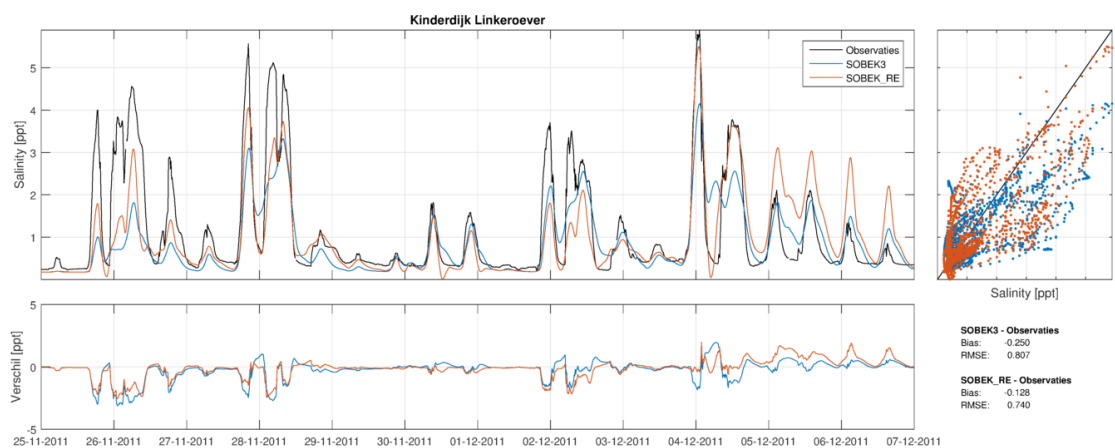
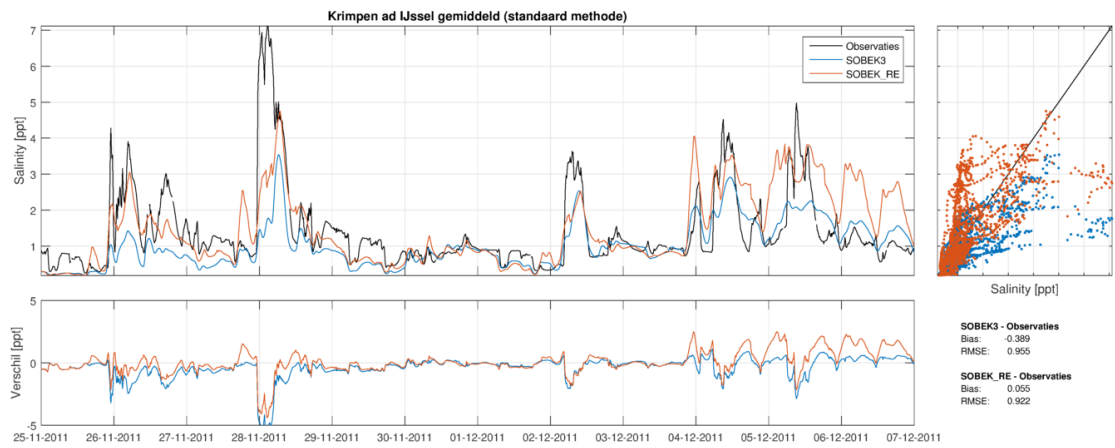
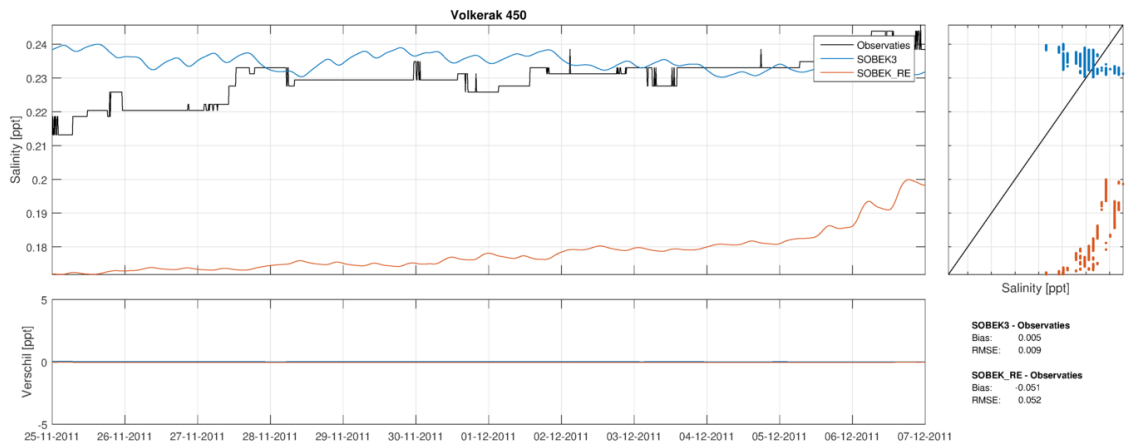
C.2.3 Periode 25 november – 7 december 2011



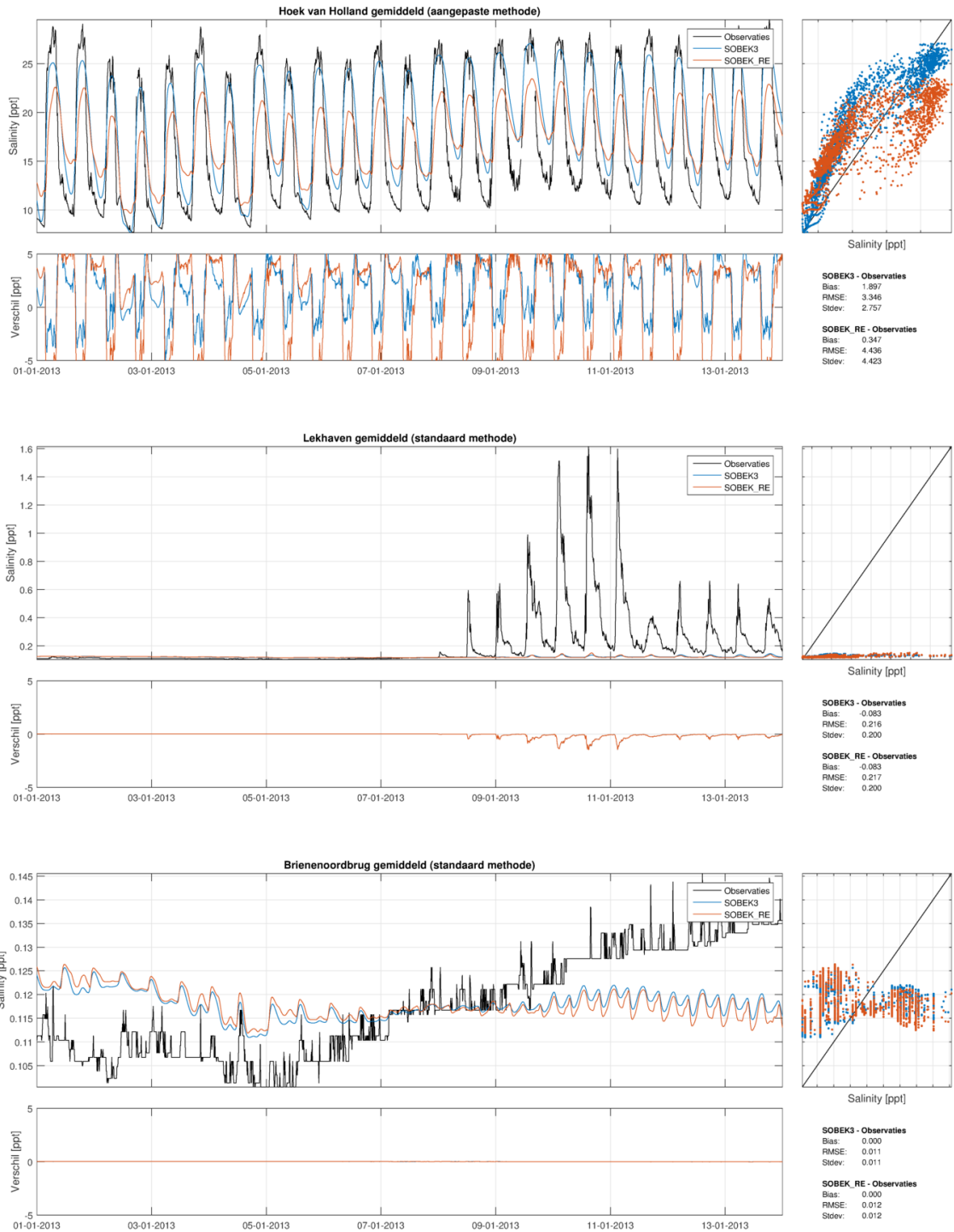


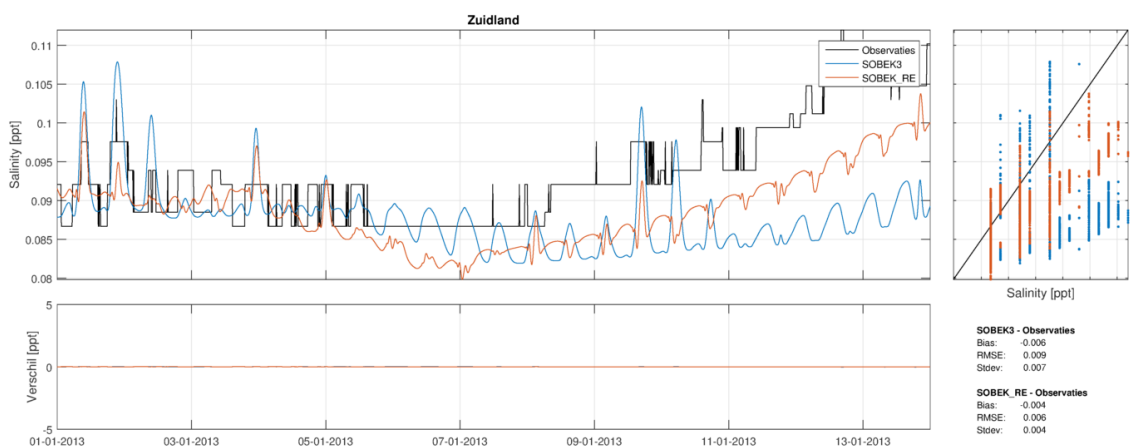
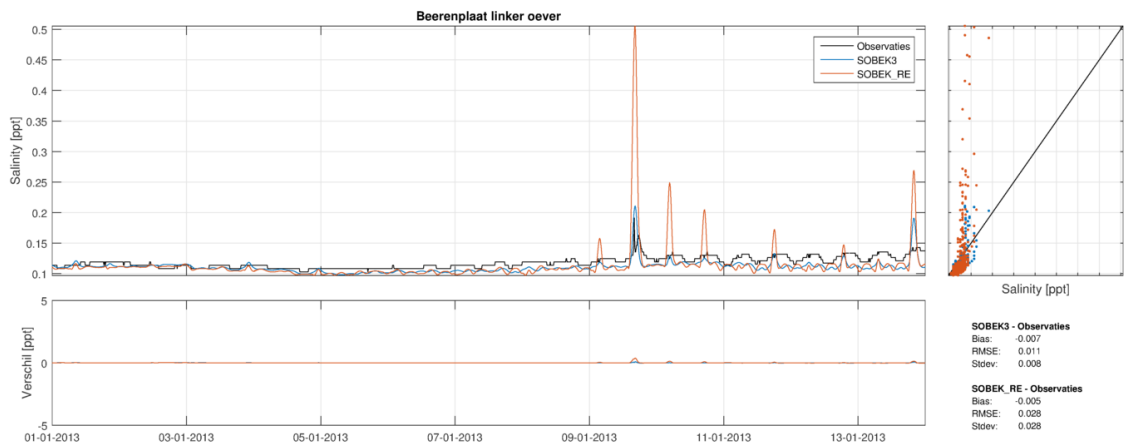
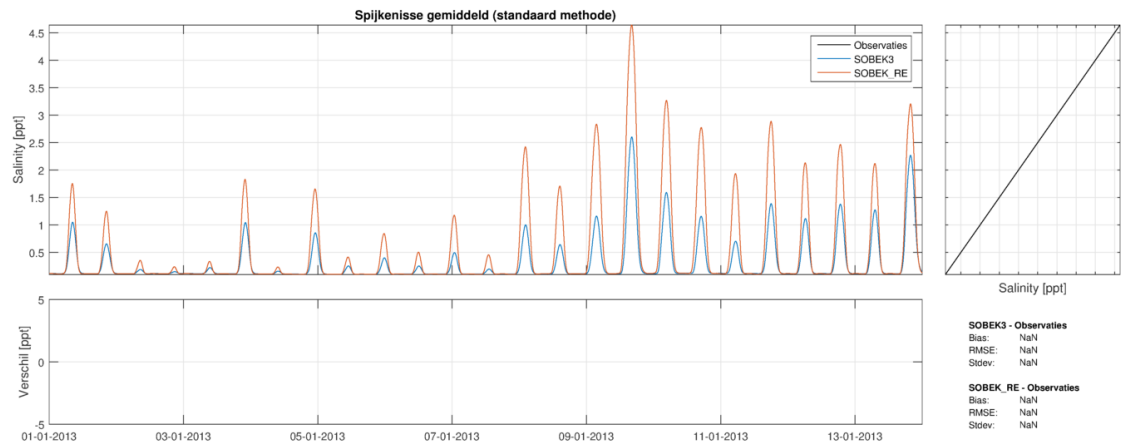


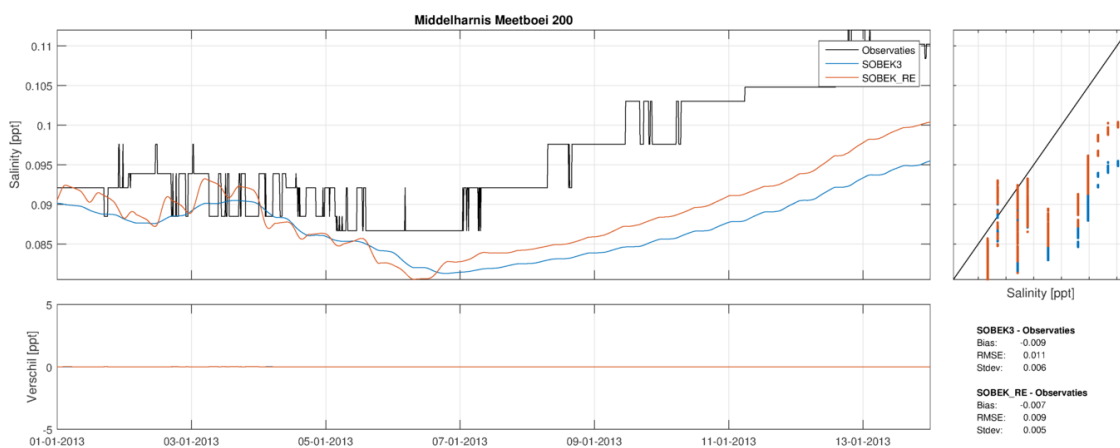
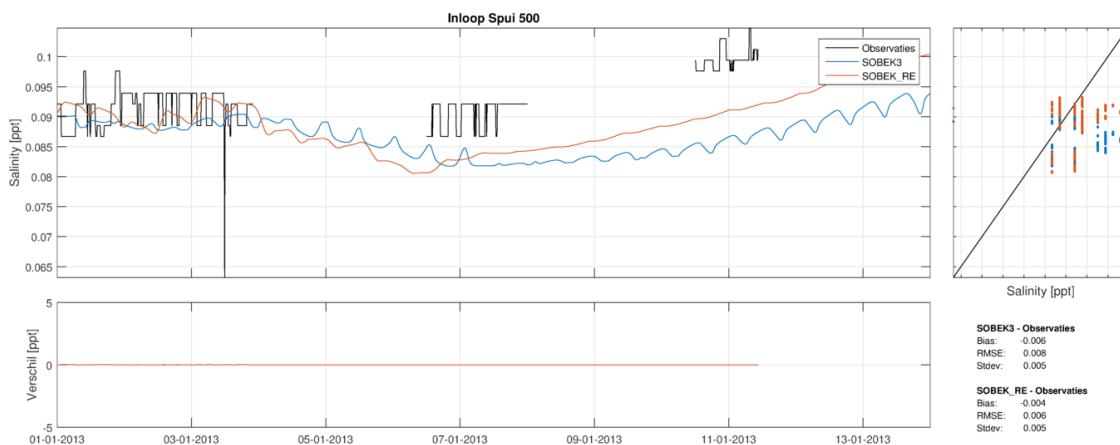
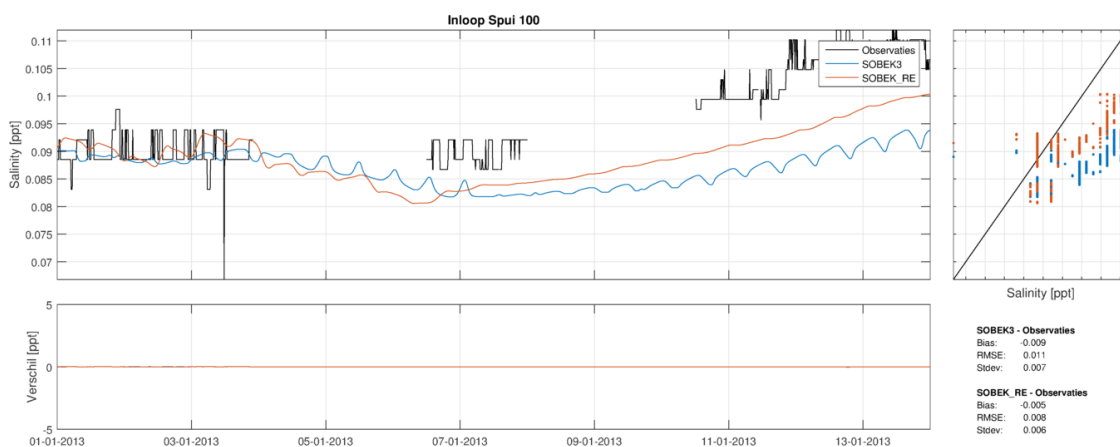


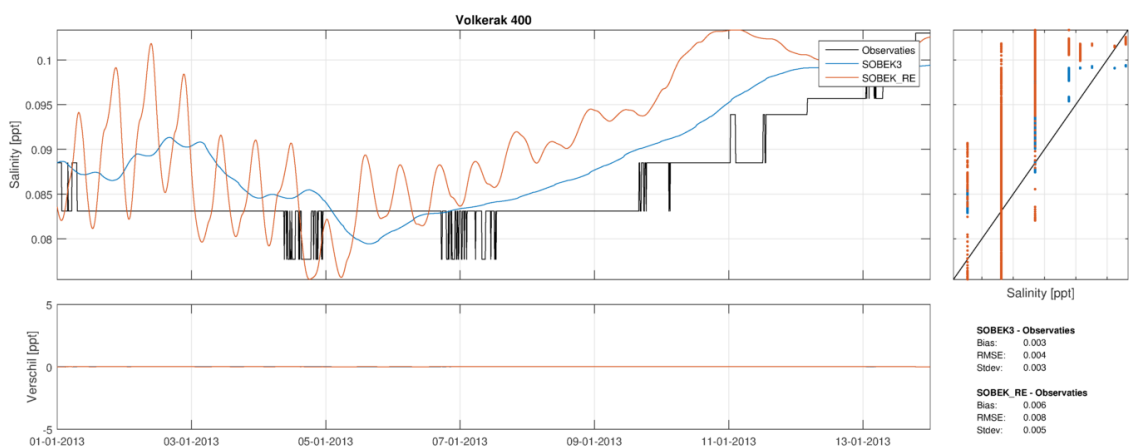
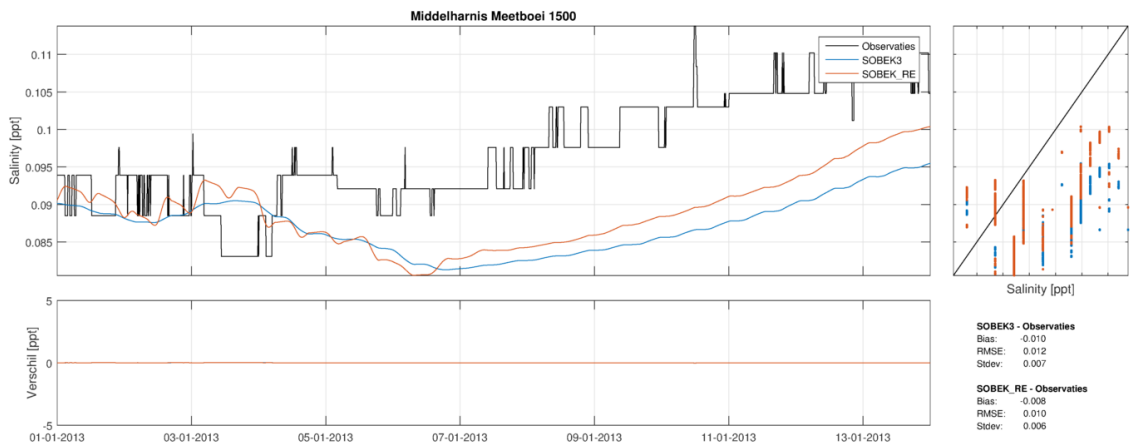
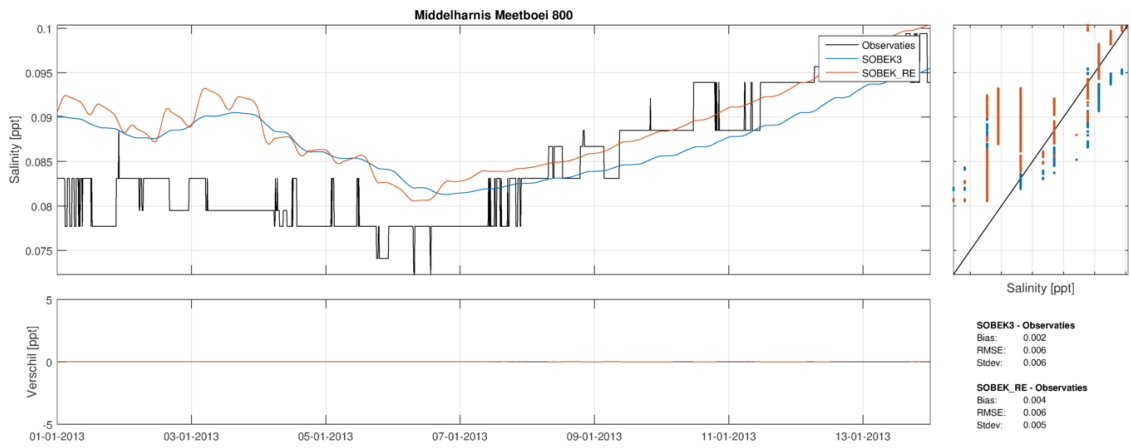


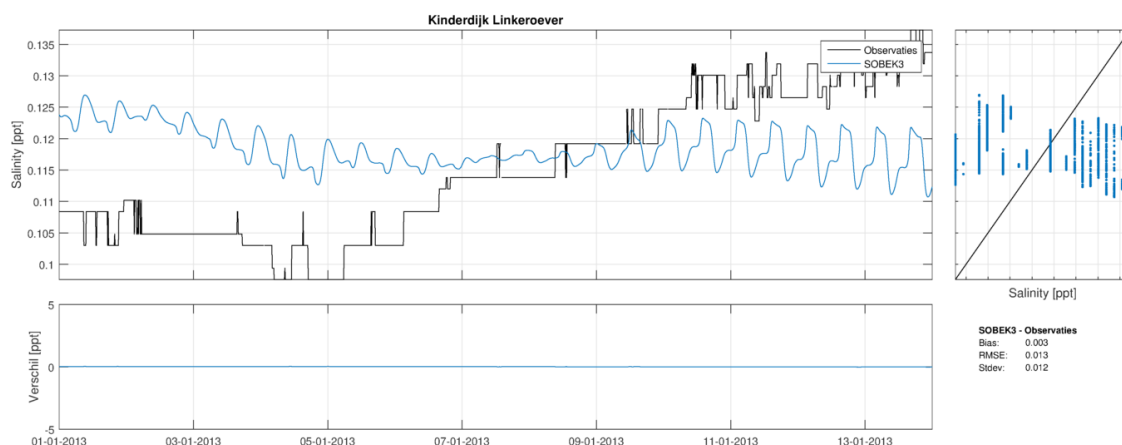
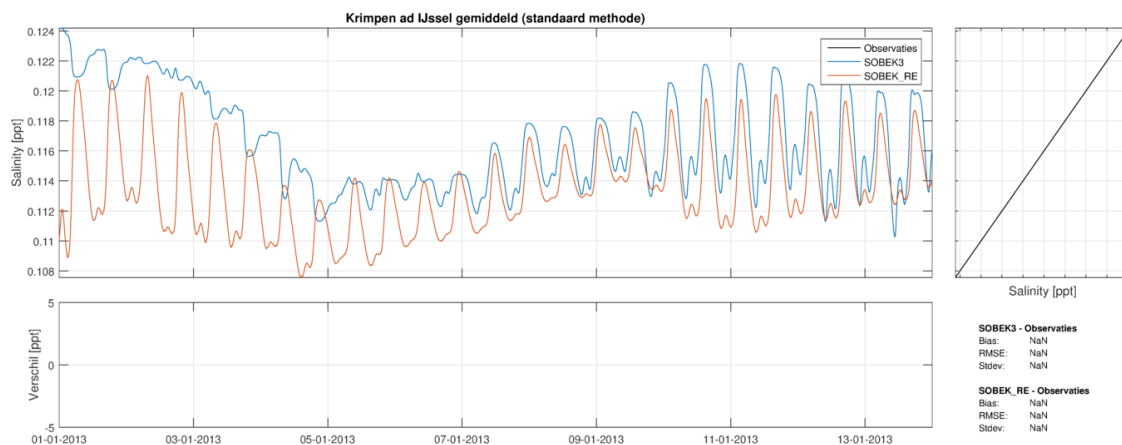
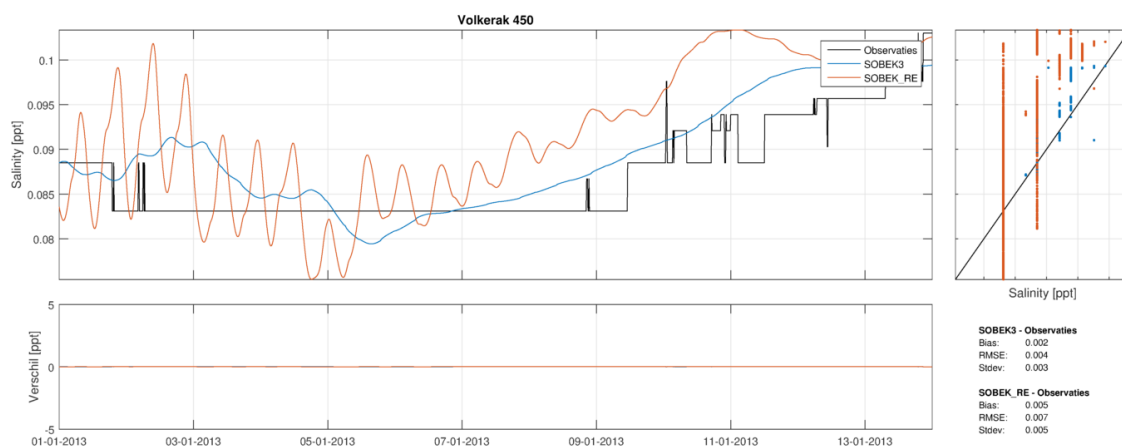
C.2.4 Januari 2013



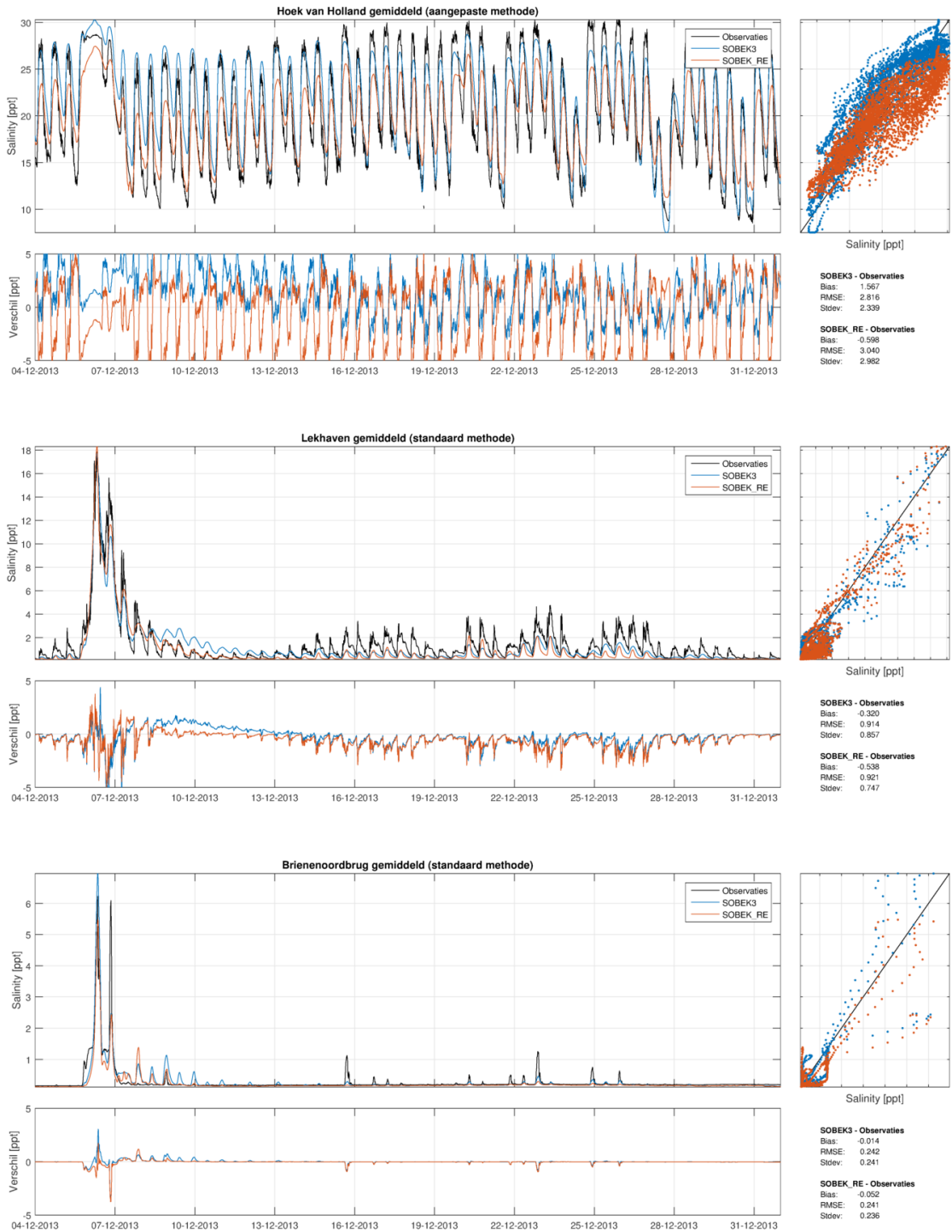


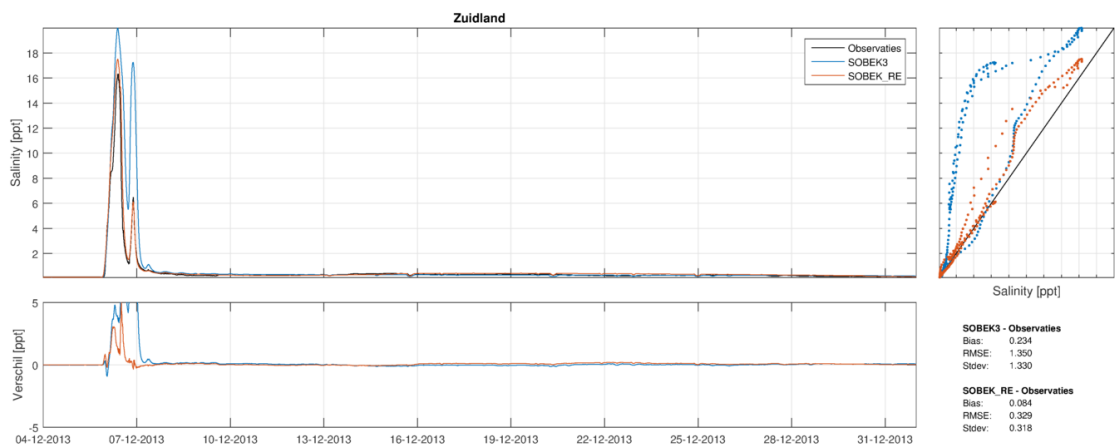
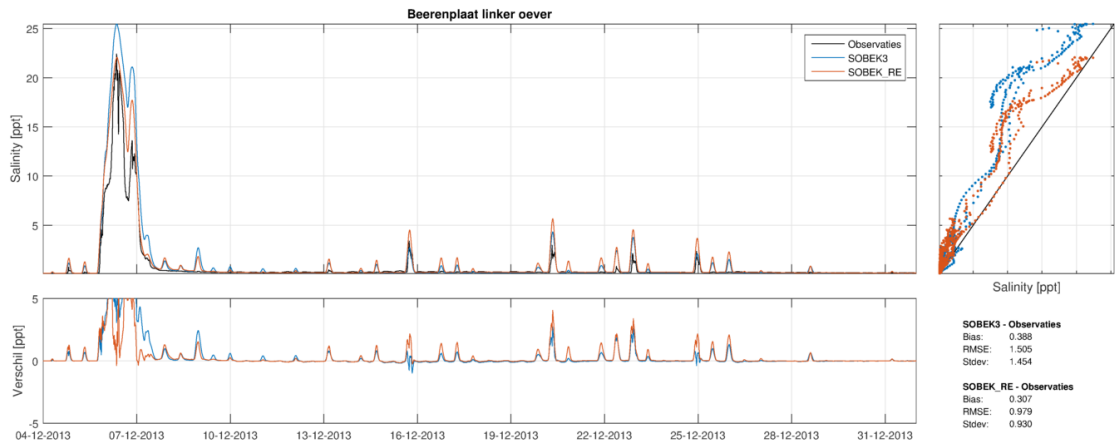
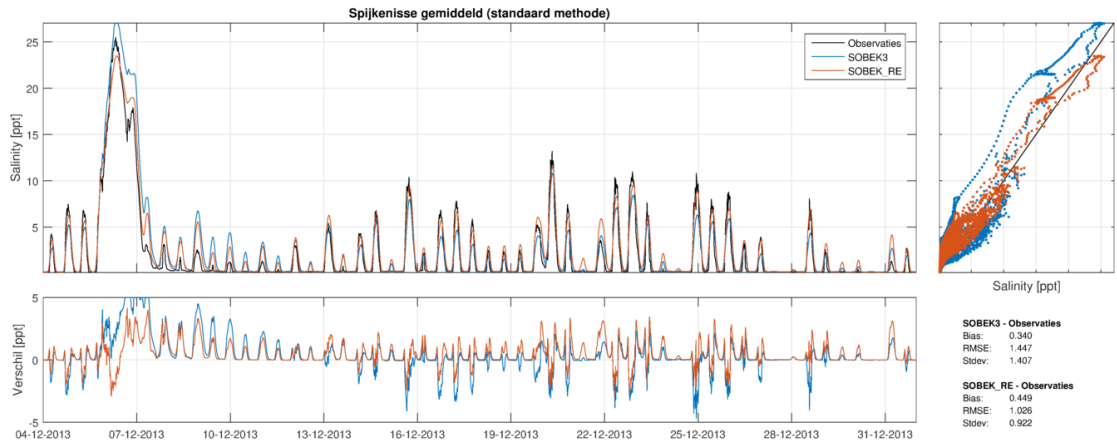


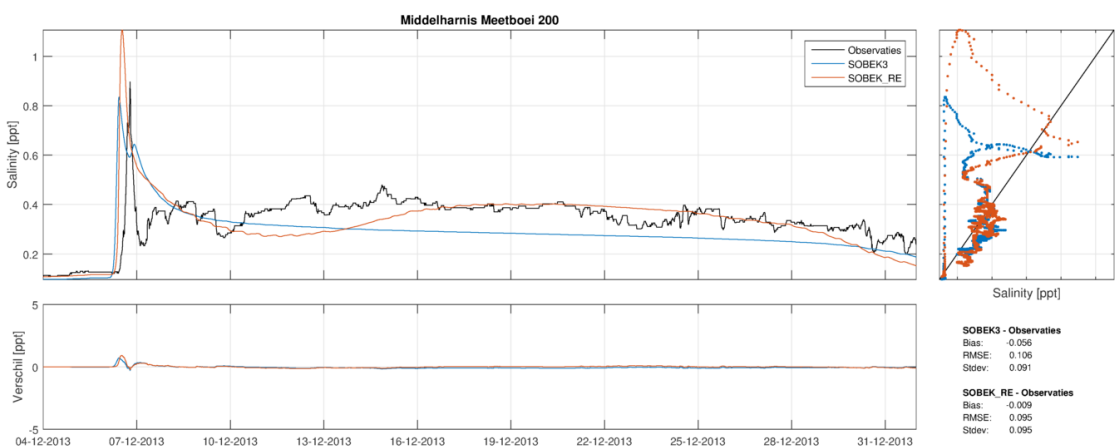
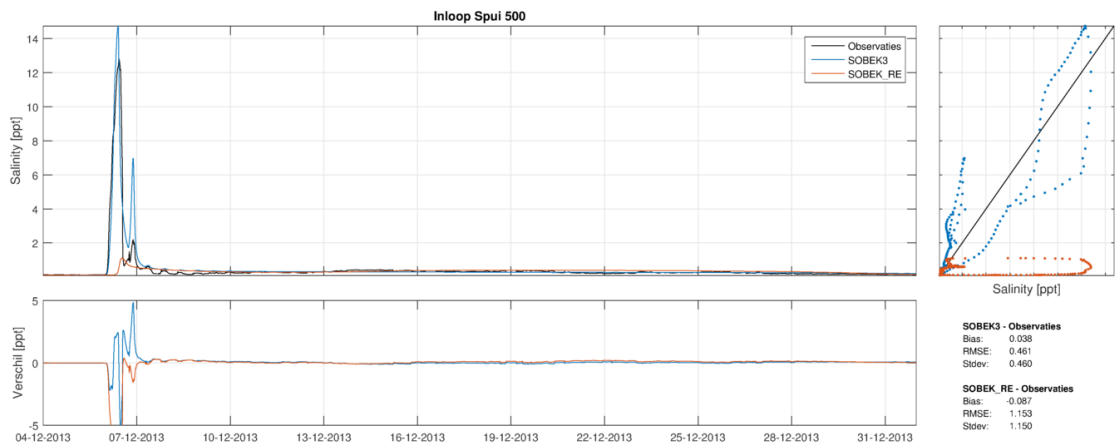
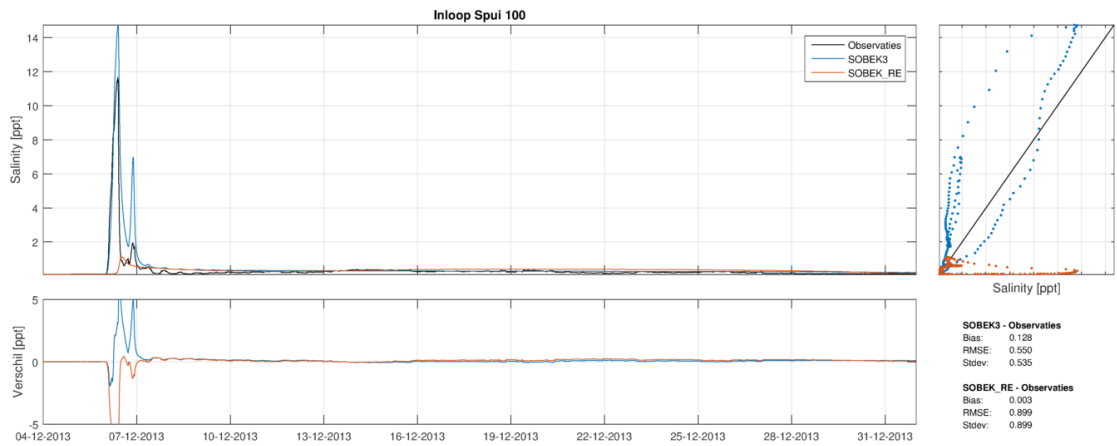


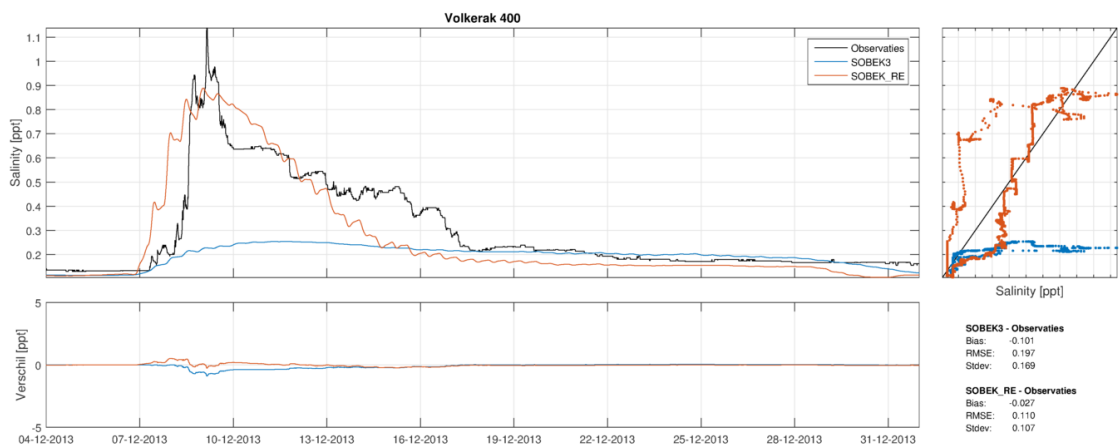
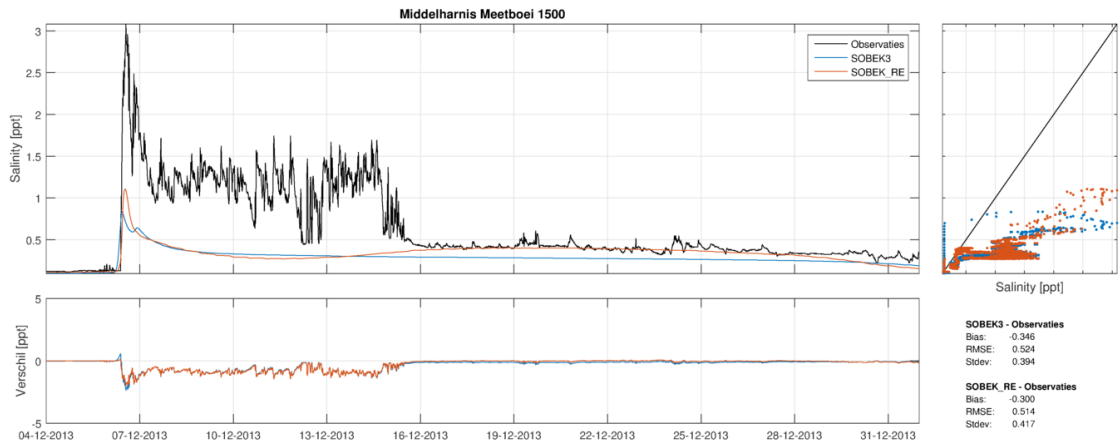
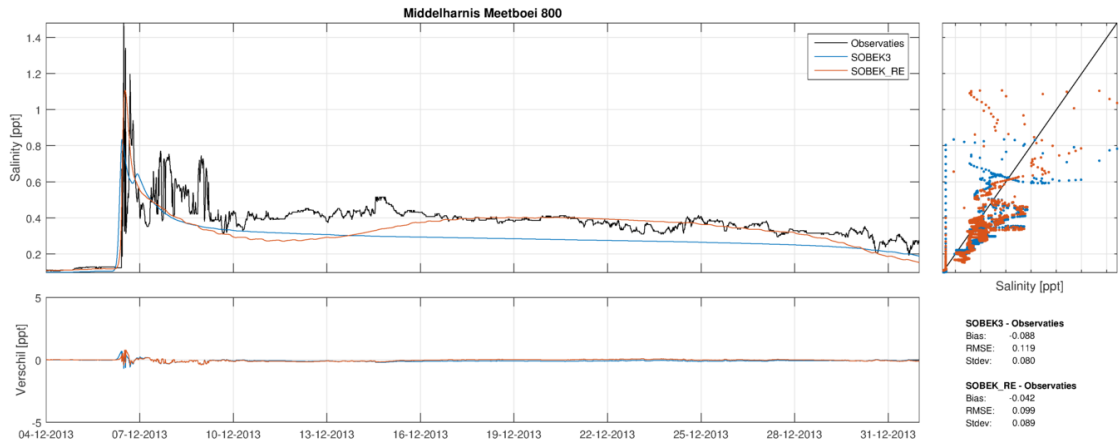


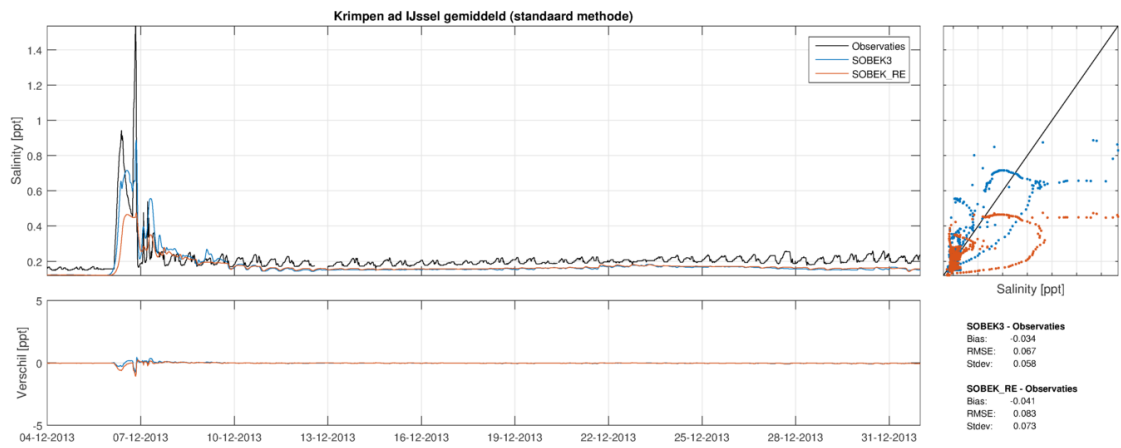
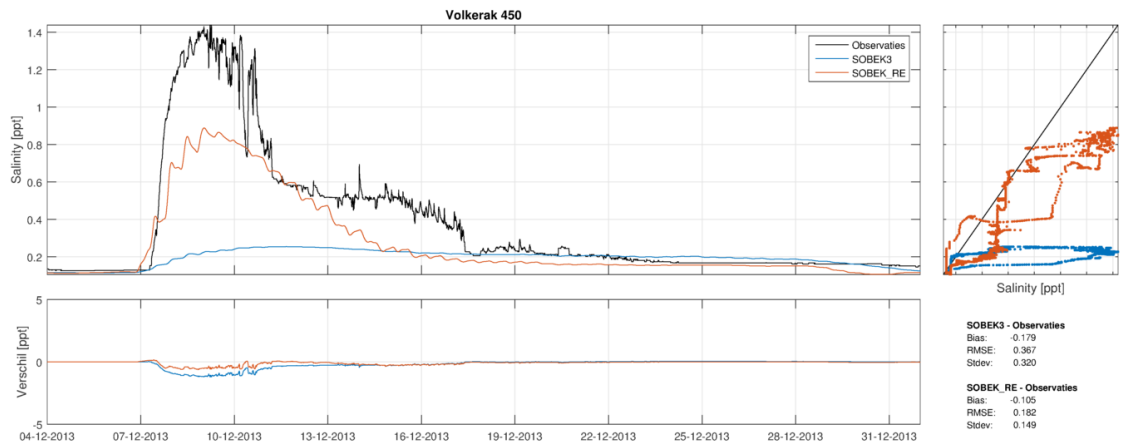
C.2.5 December 2013





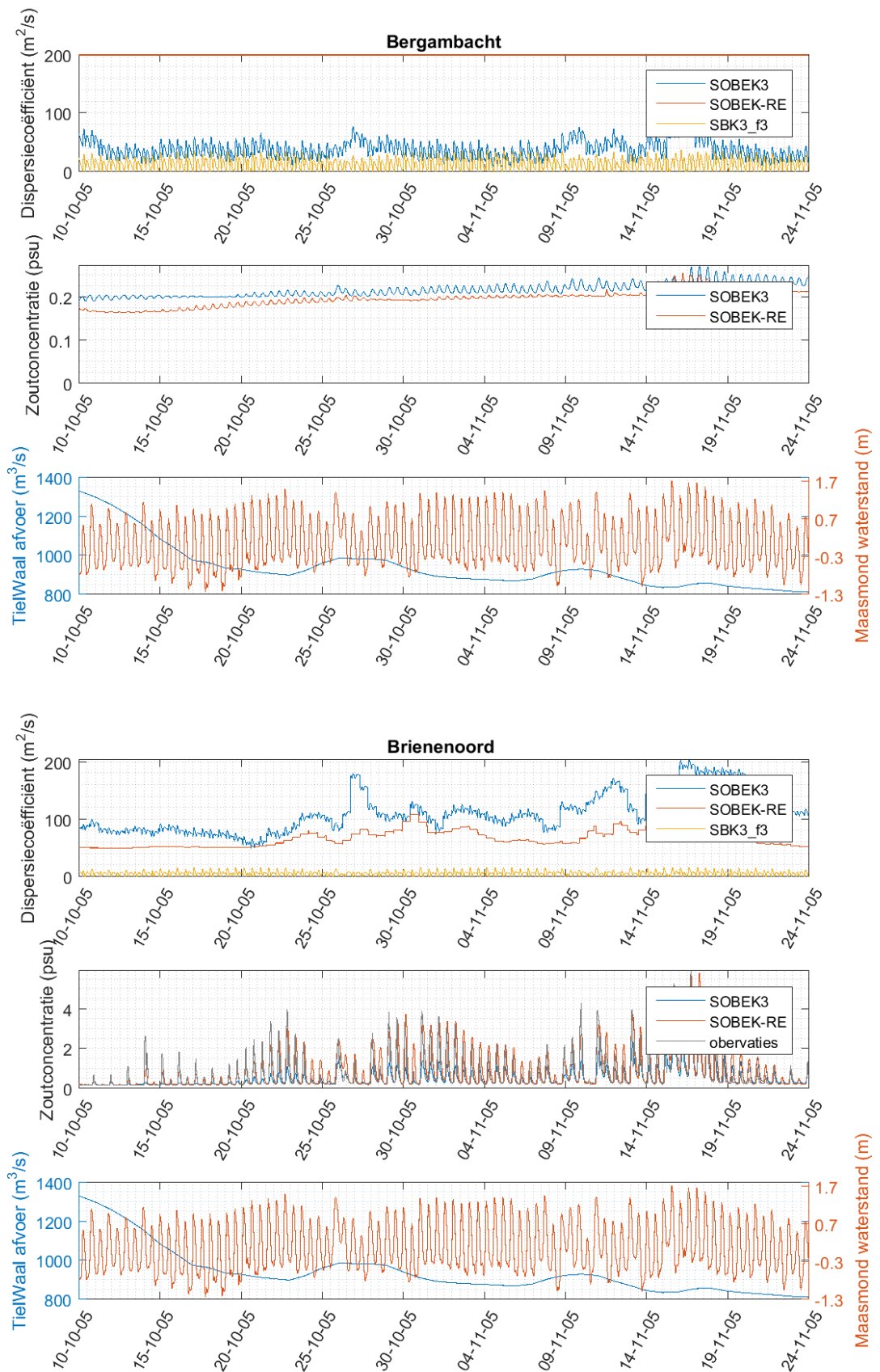


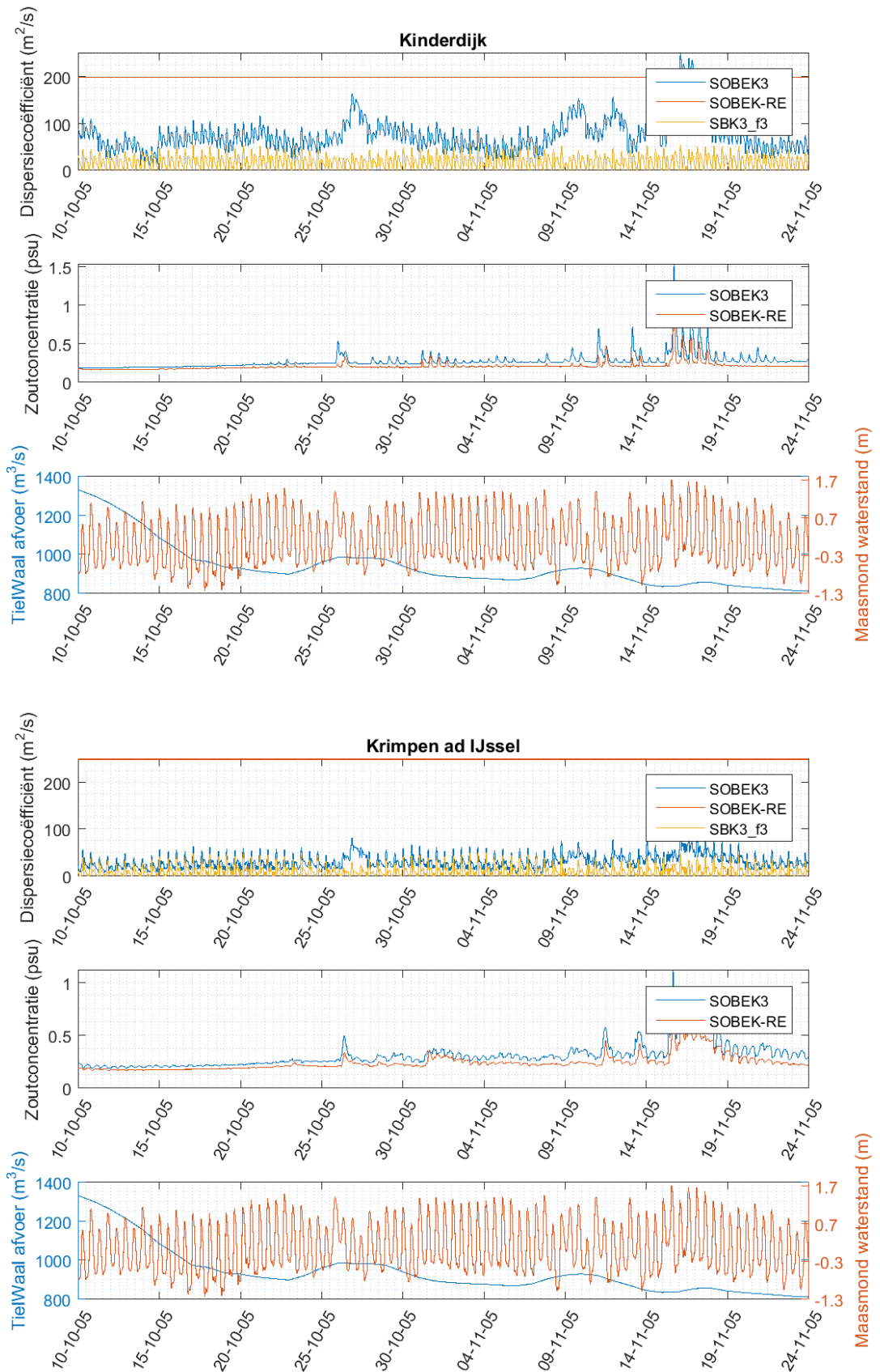


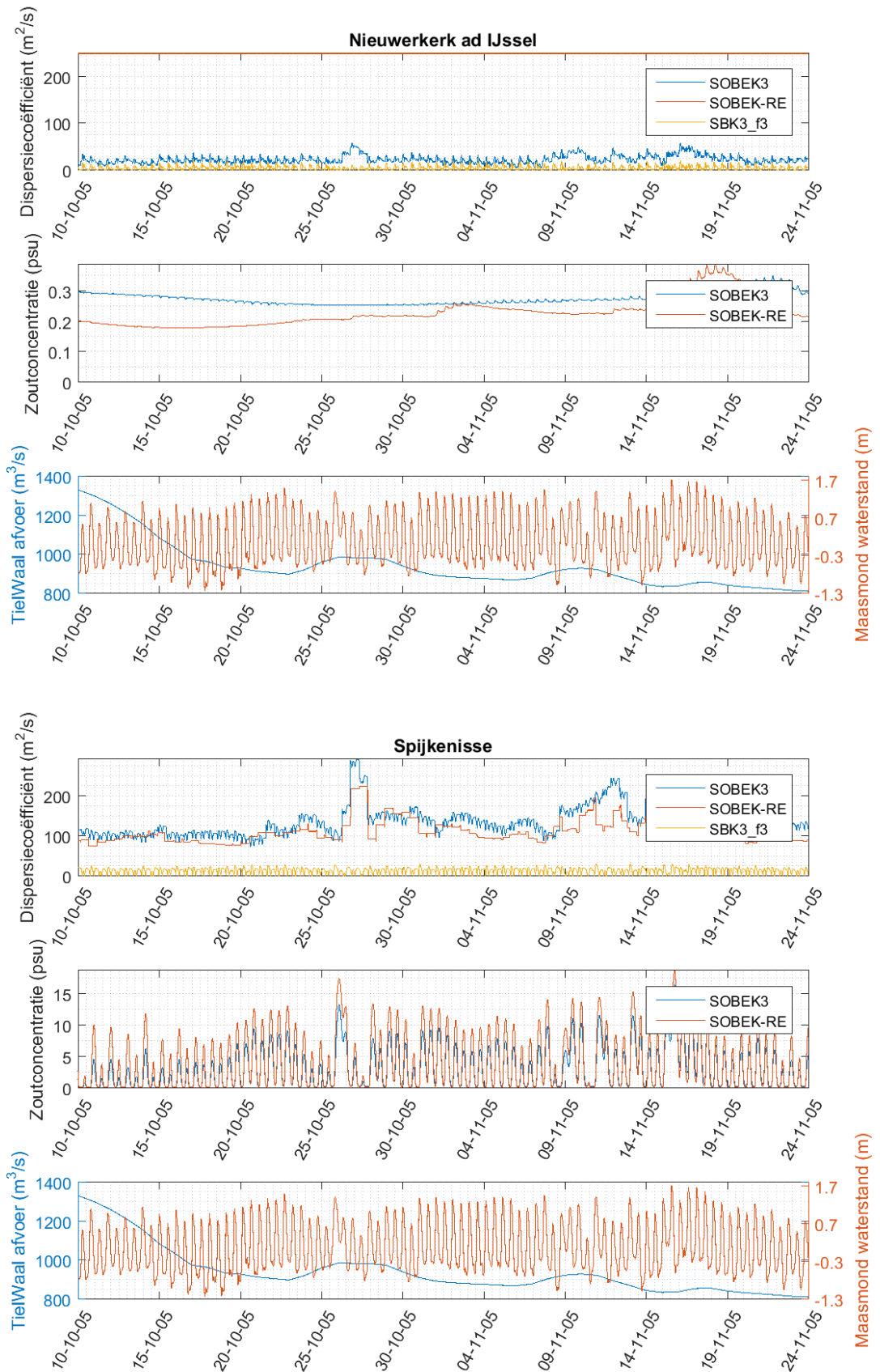


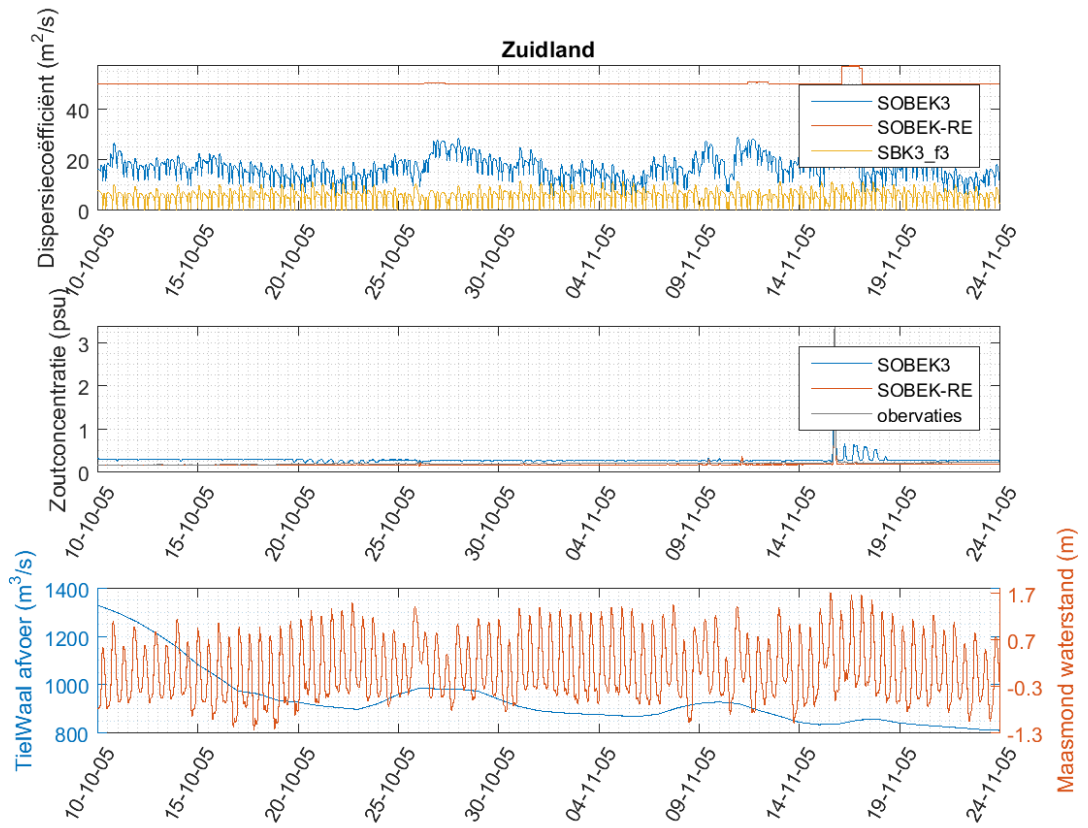
D Dispersiecoëfficiënt voor kalibratieperioden

D.1 Periode november 2005

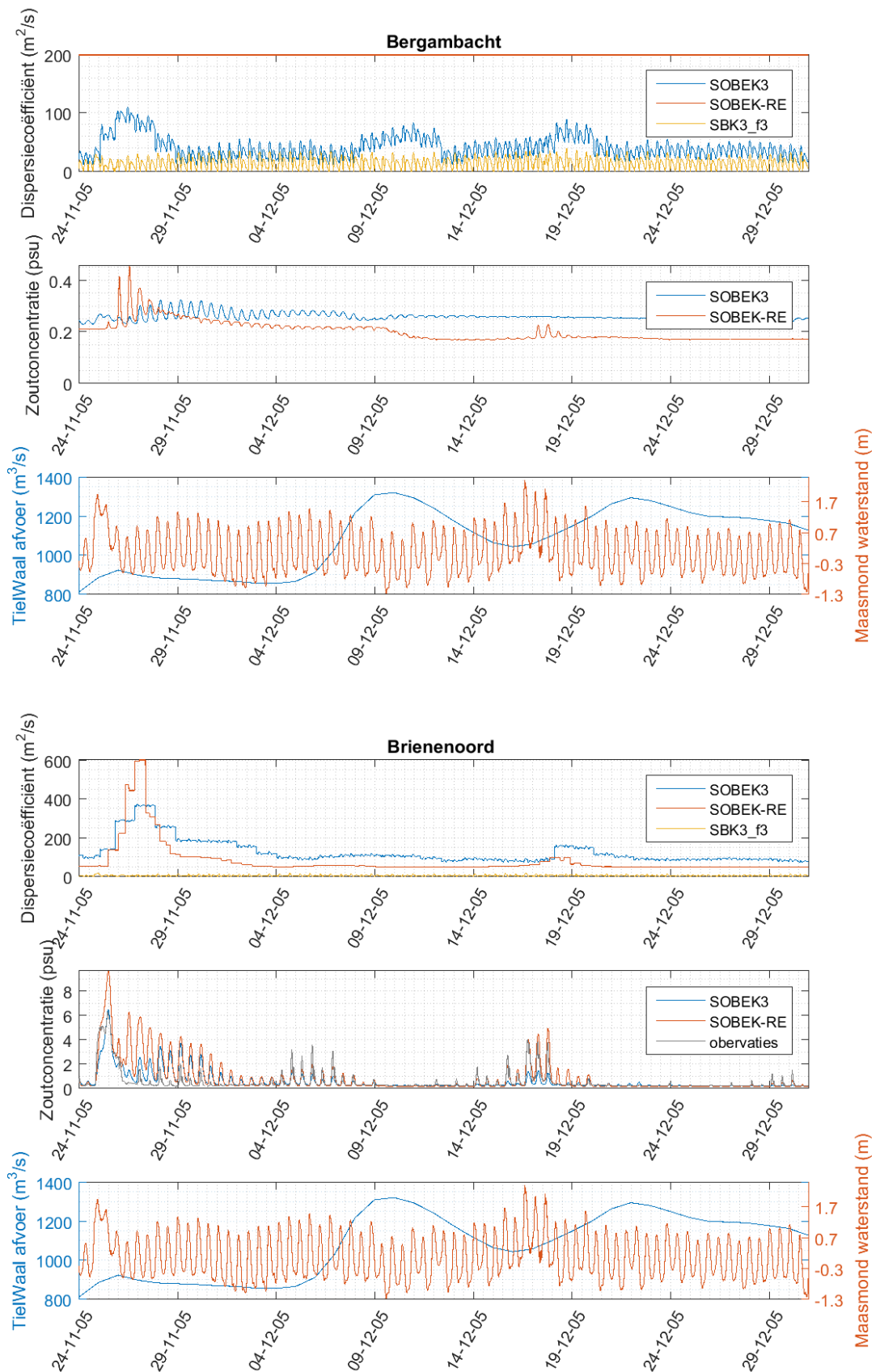


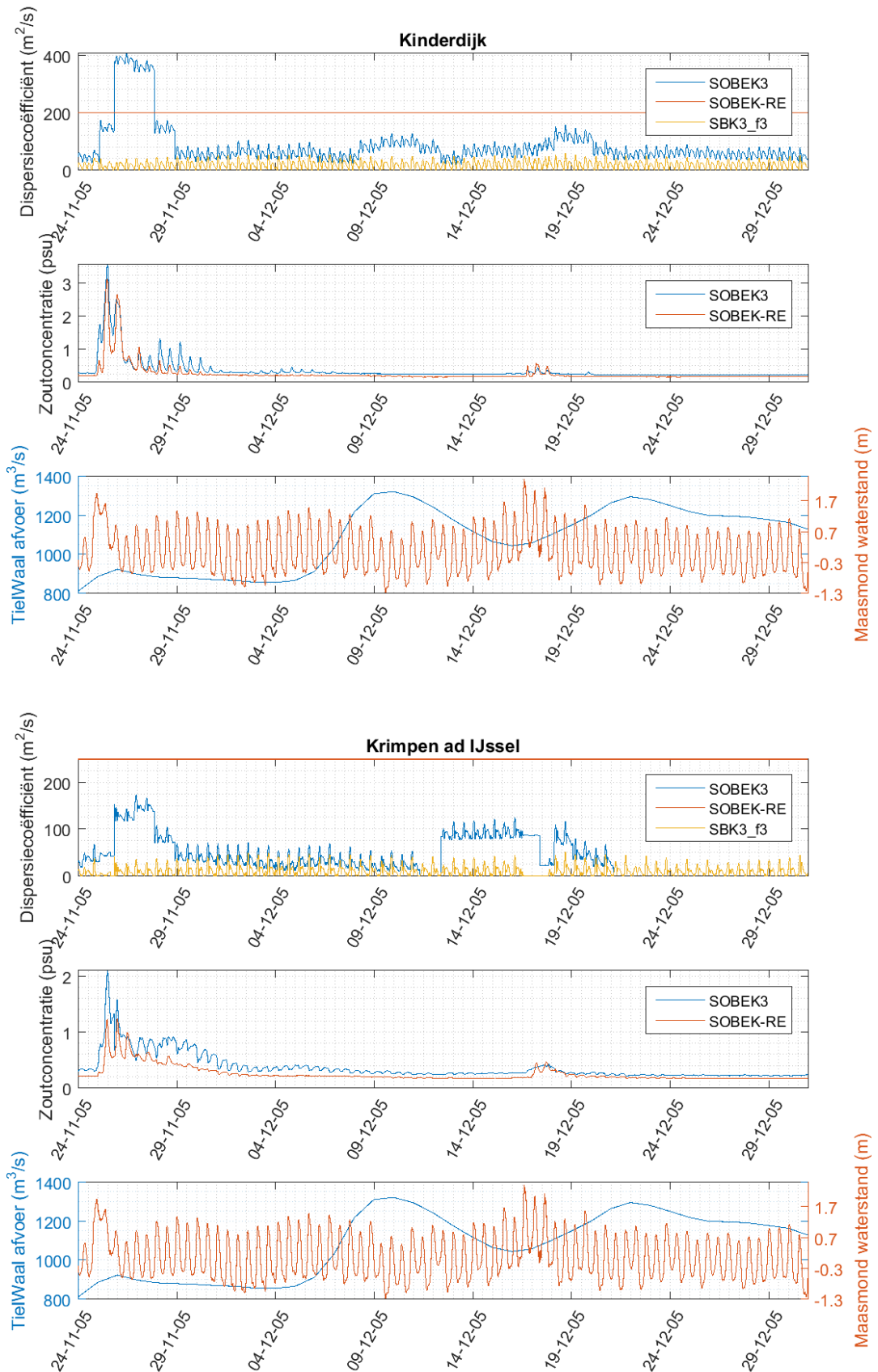


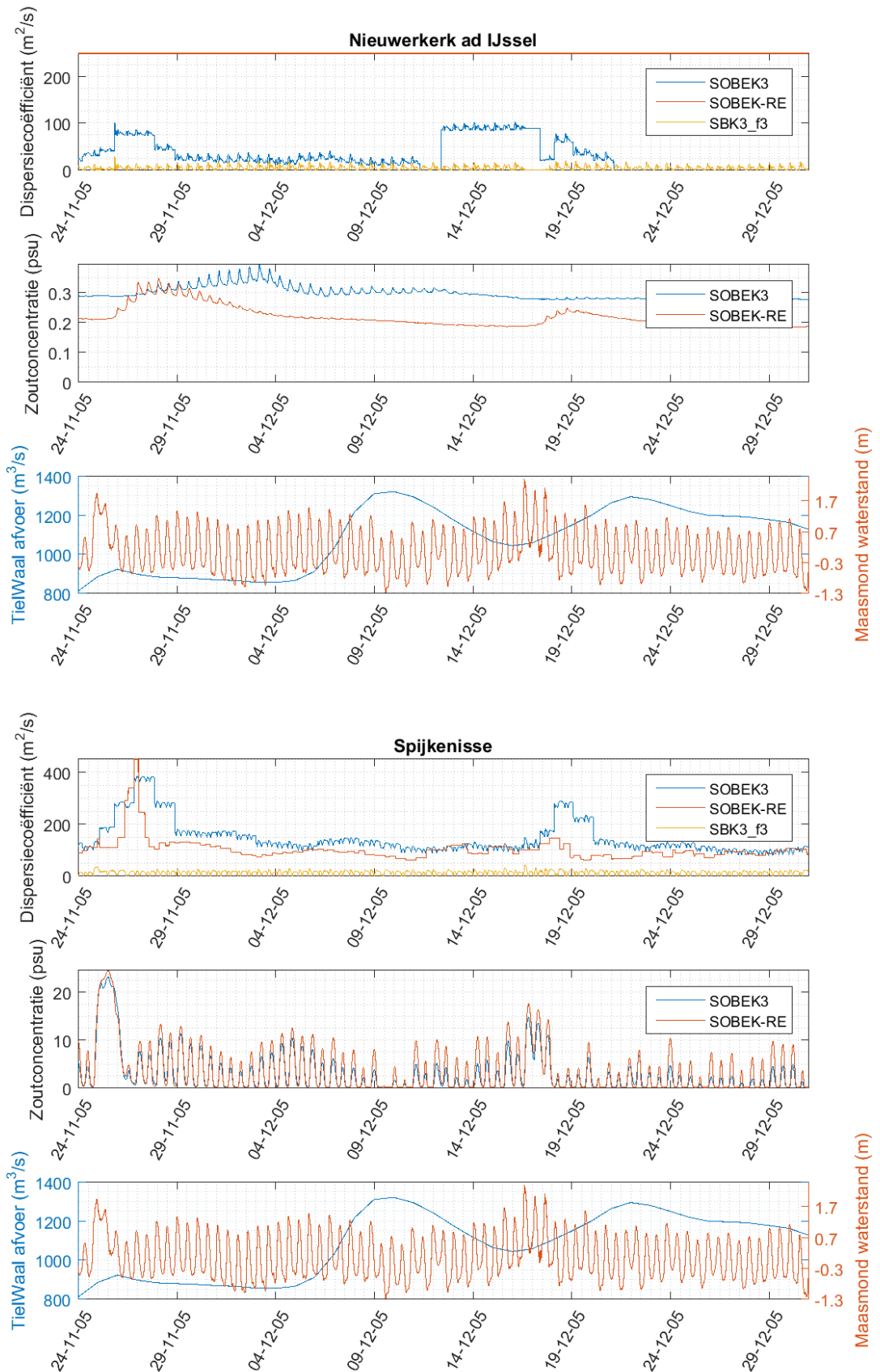


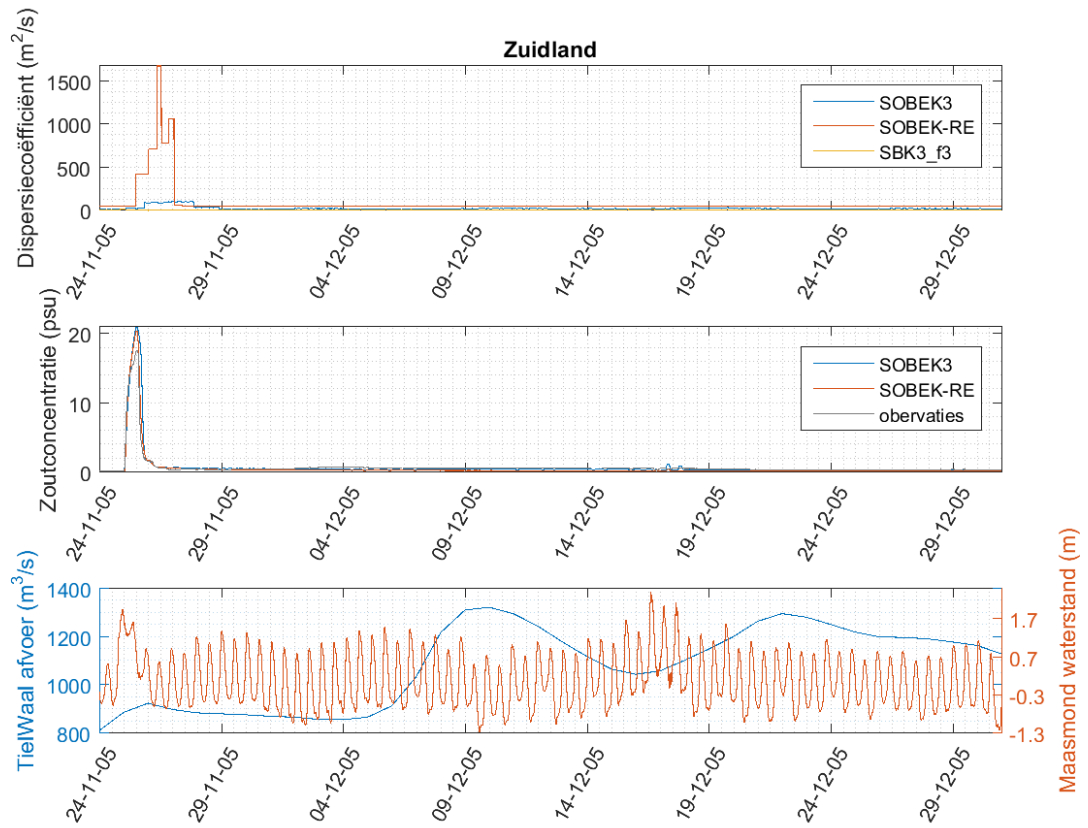


D.2 Periode december 2005

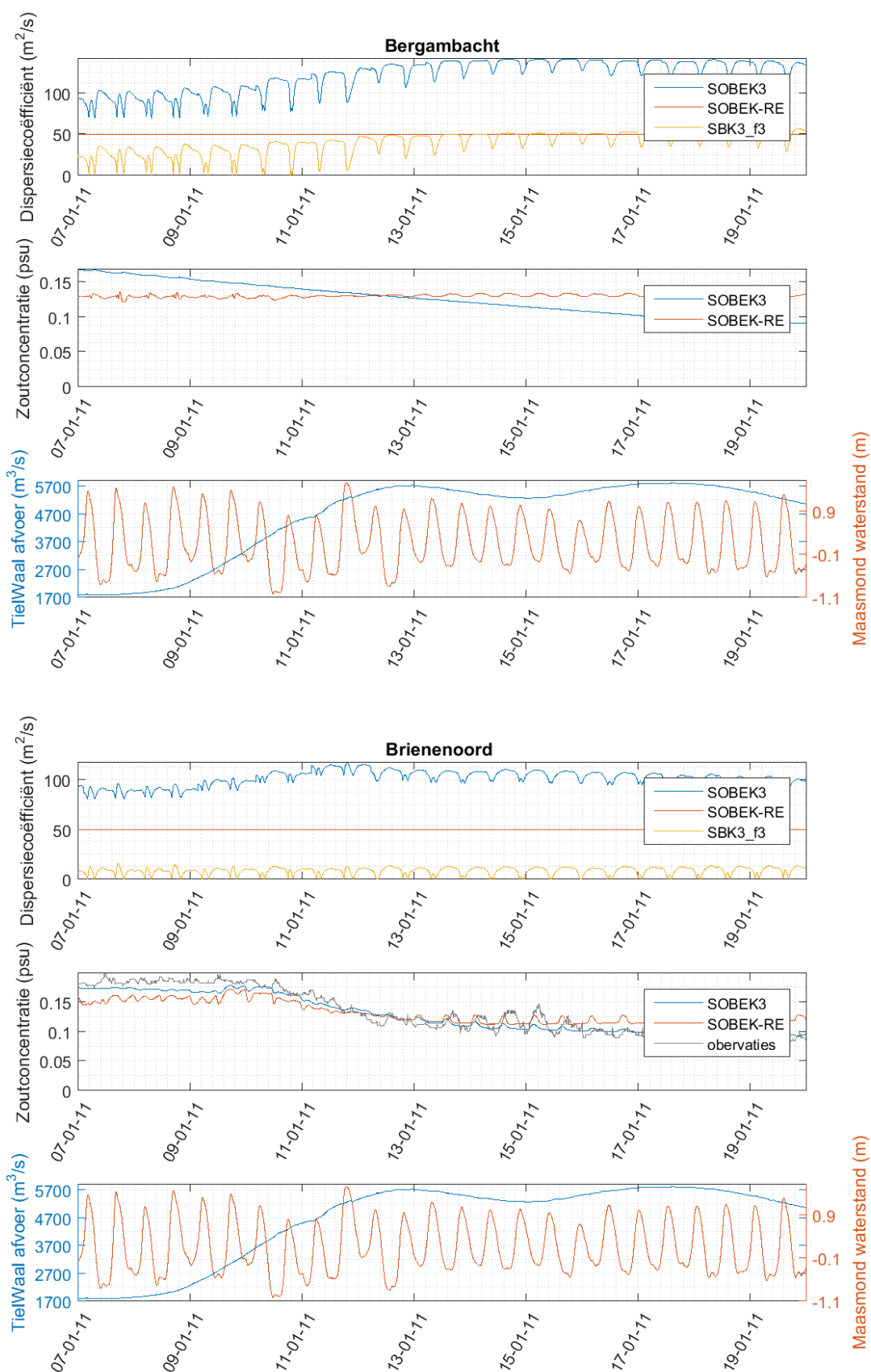


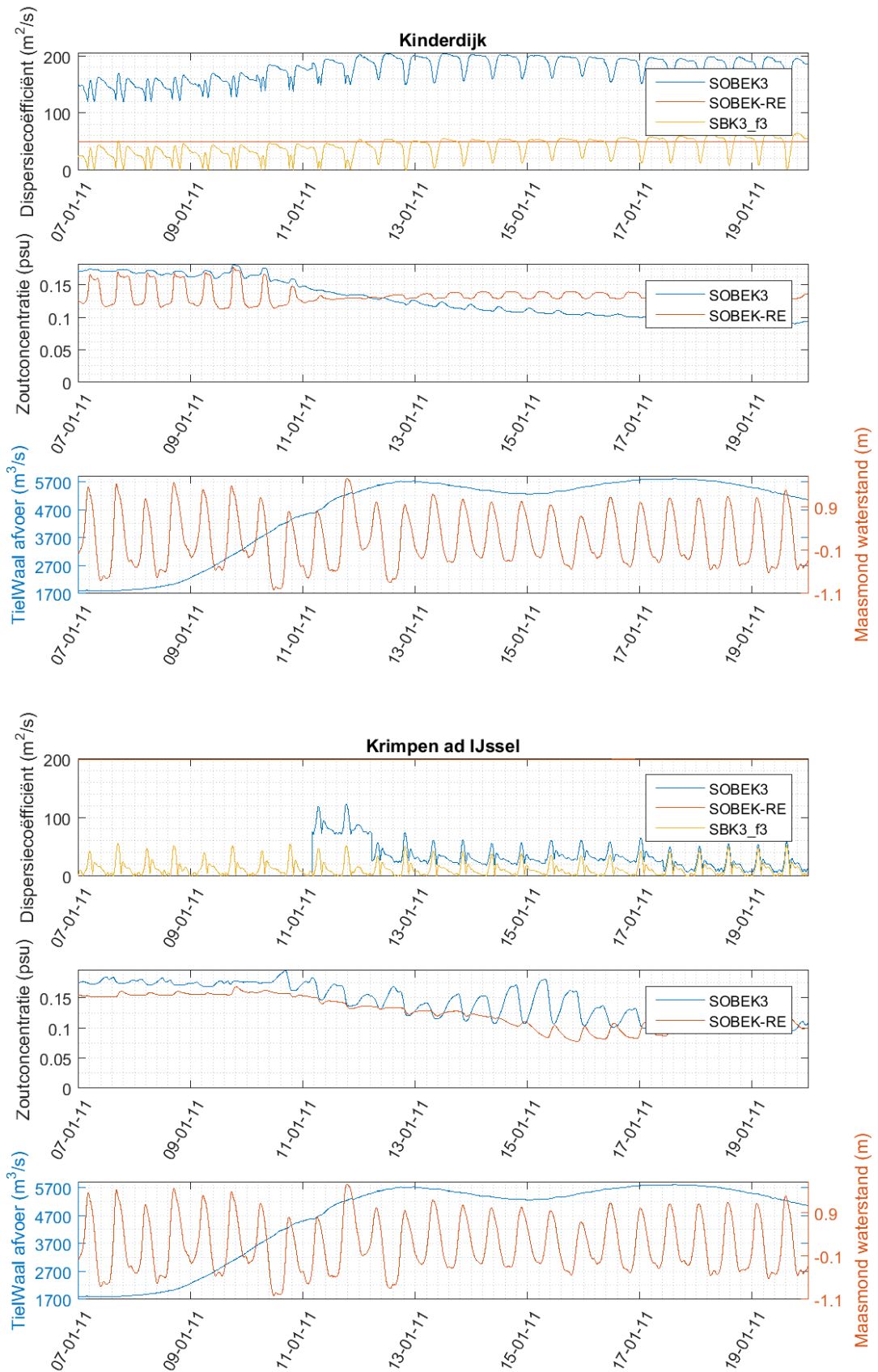


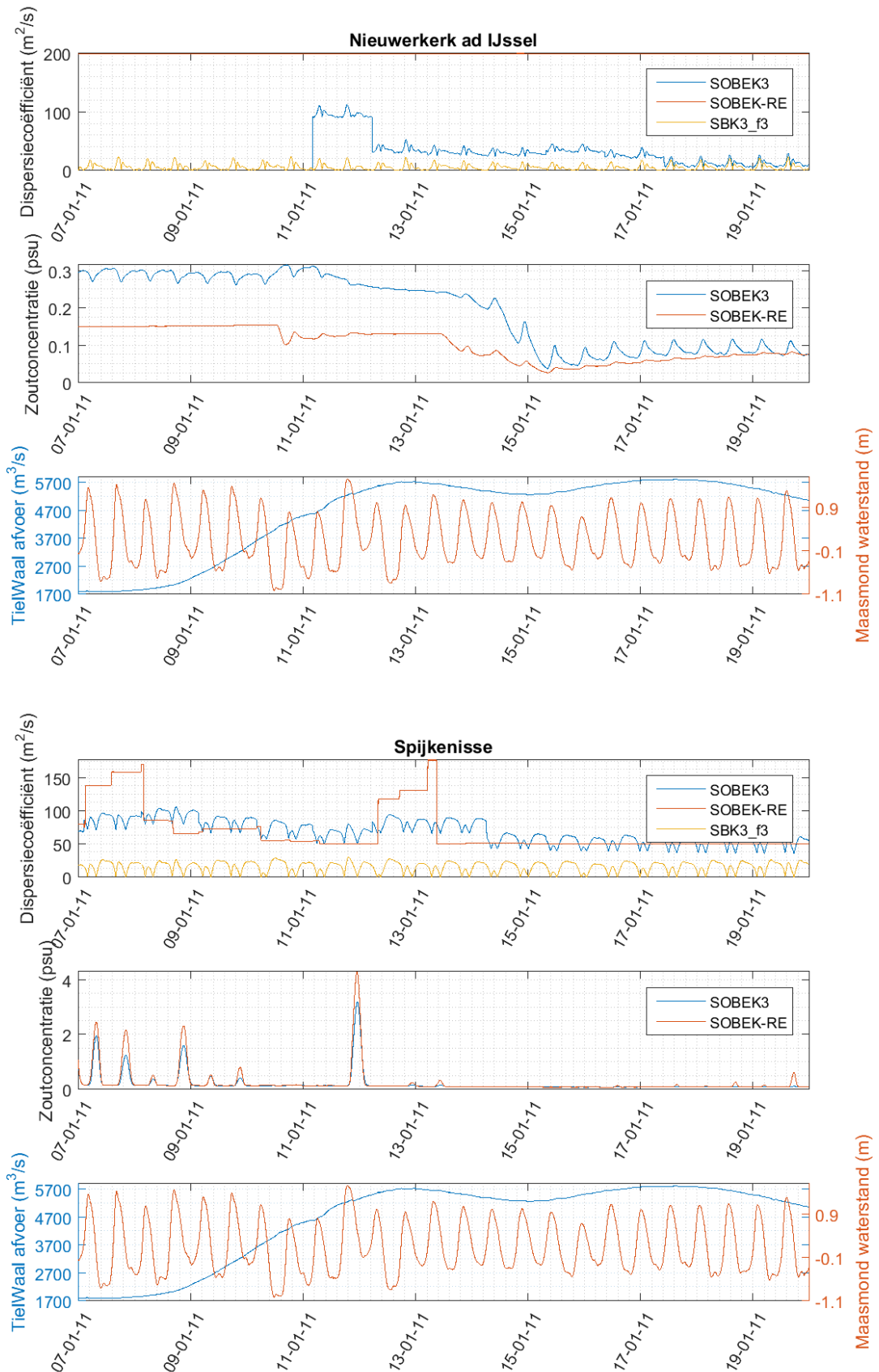


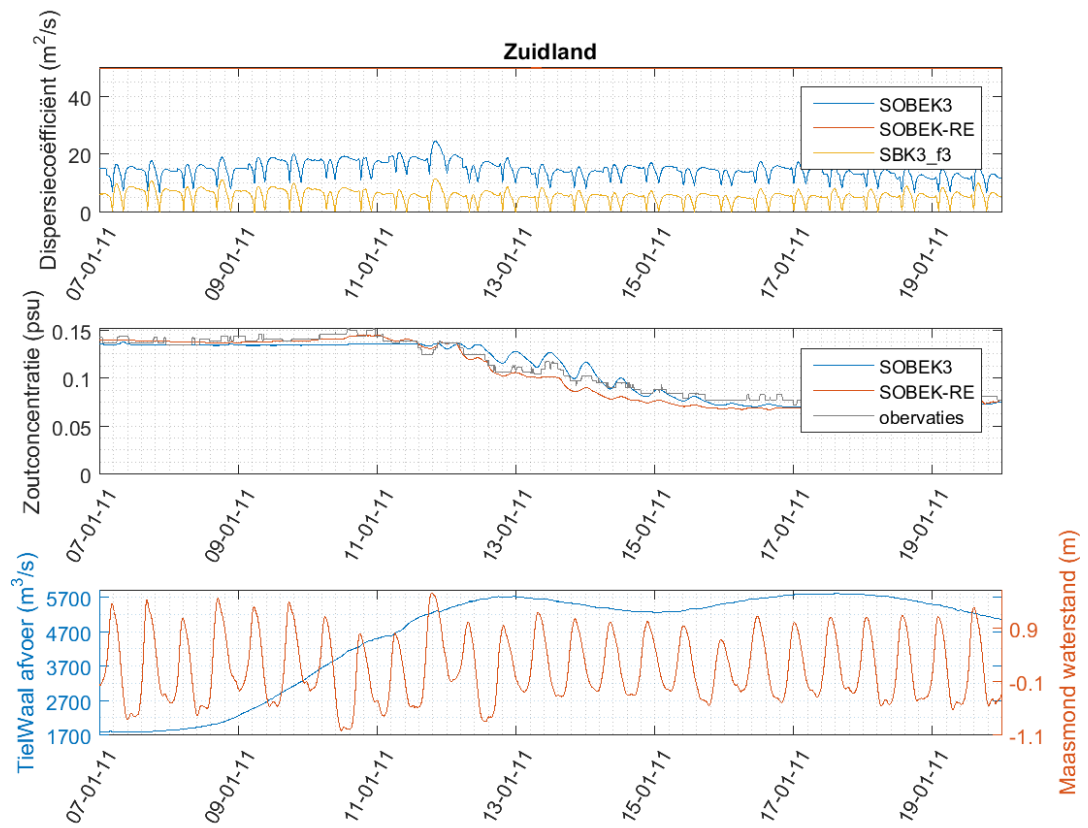


D.3 Periode januari 2011

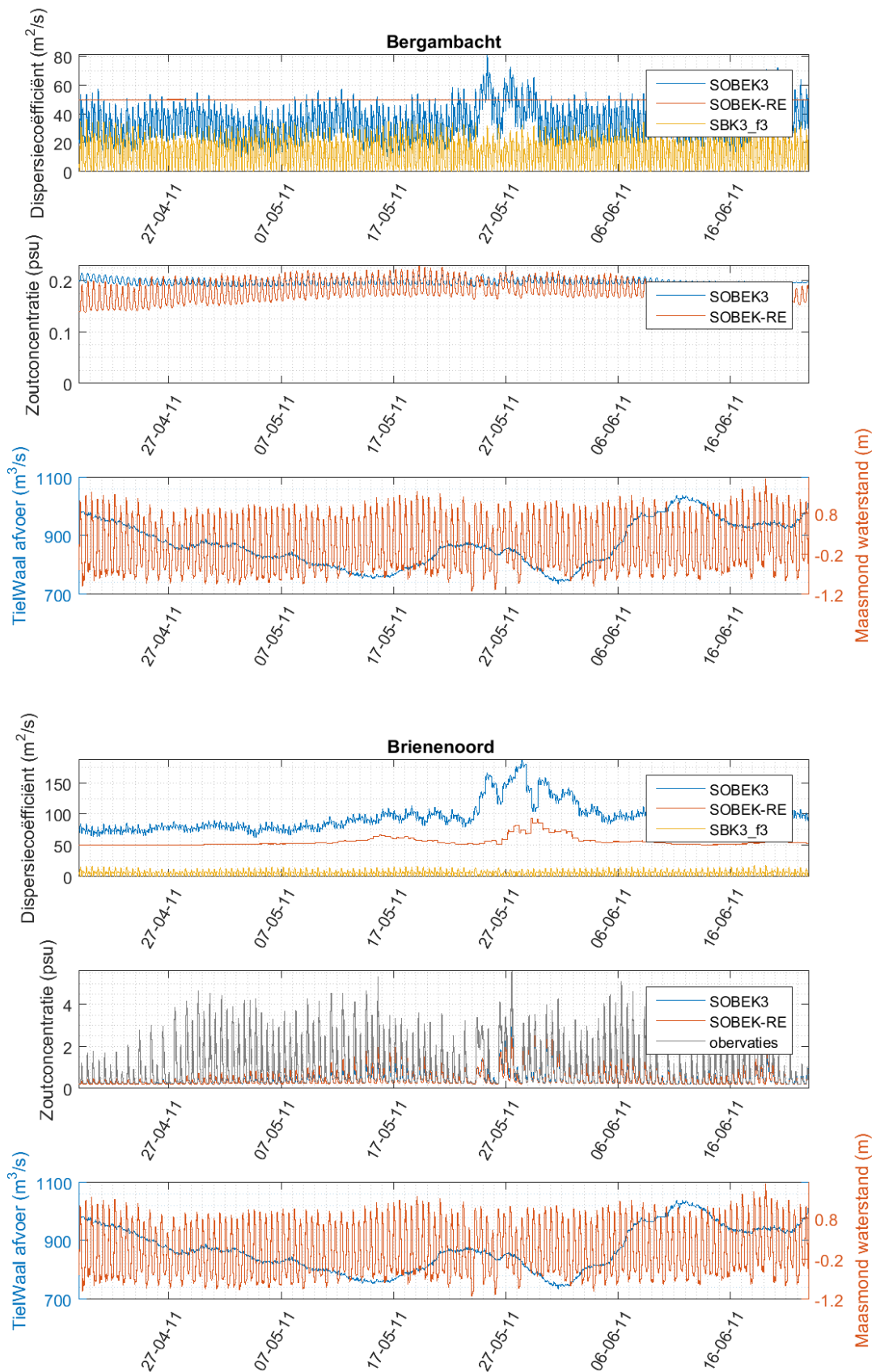


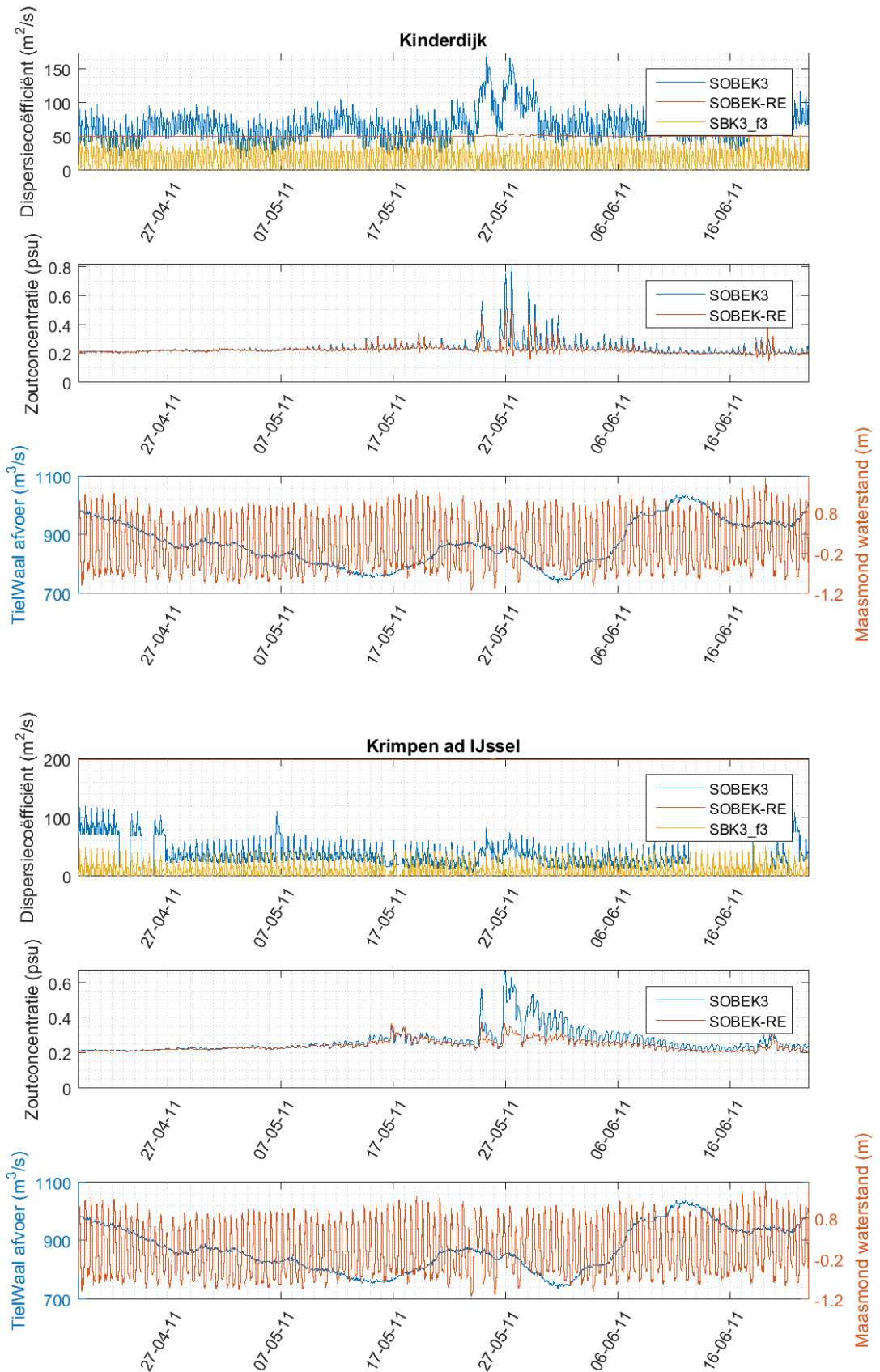


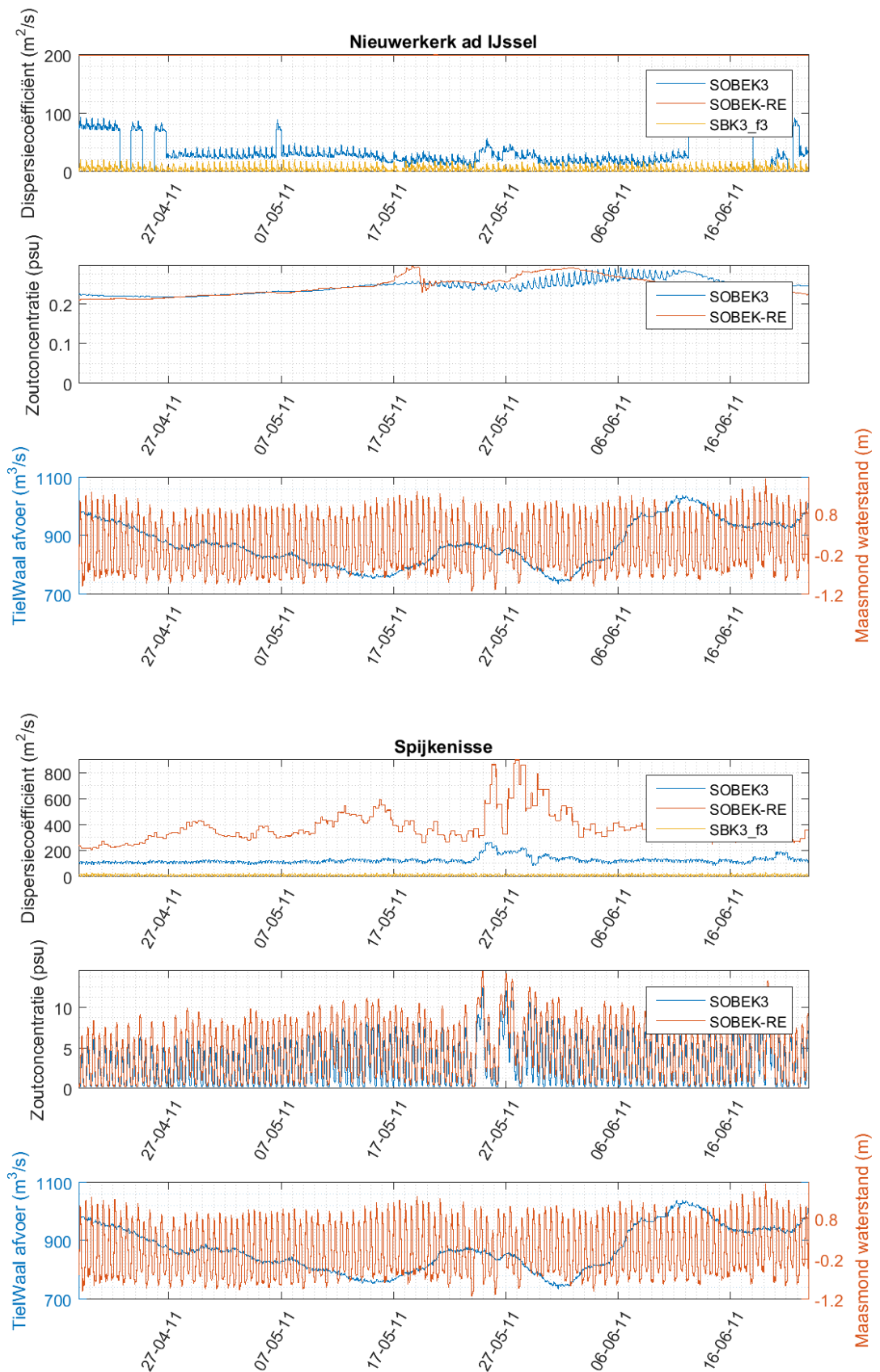


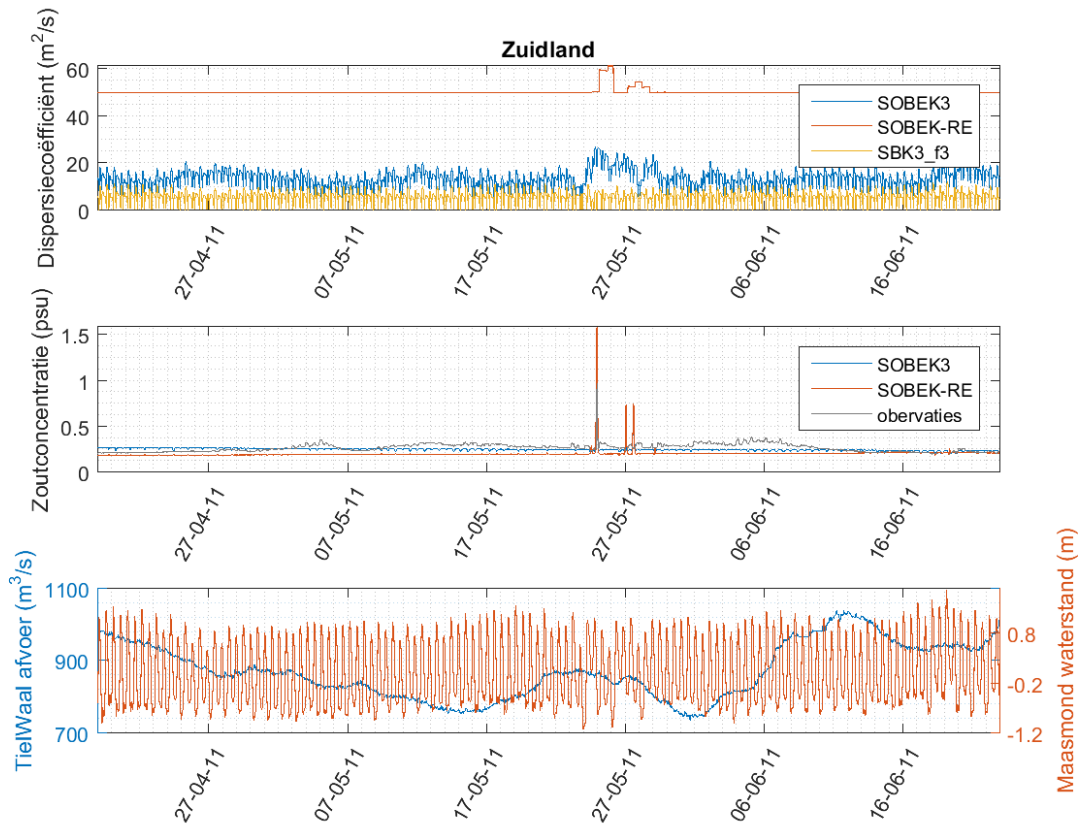


D.4 Voorjaar 2011

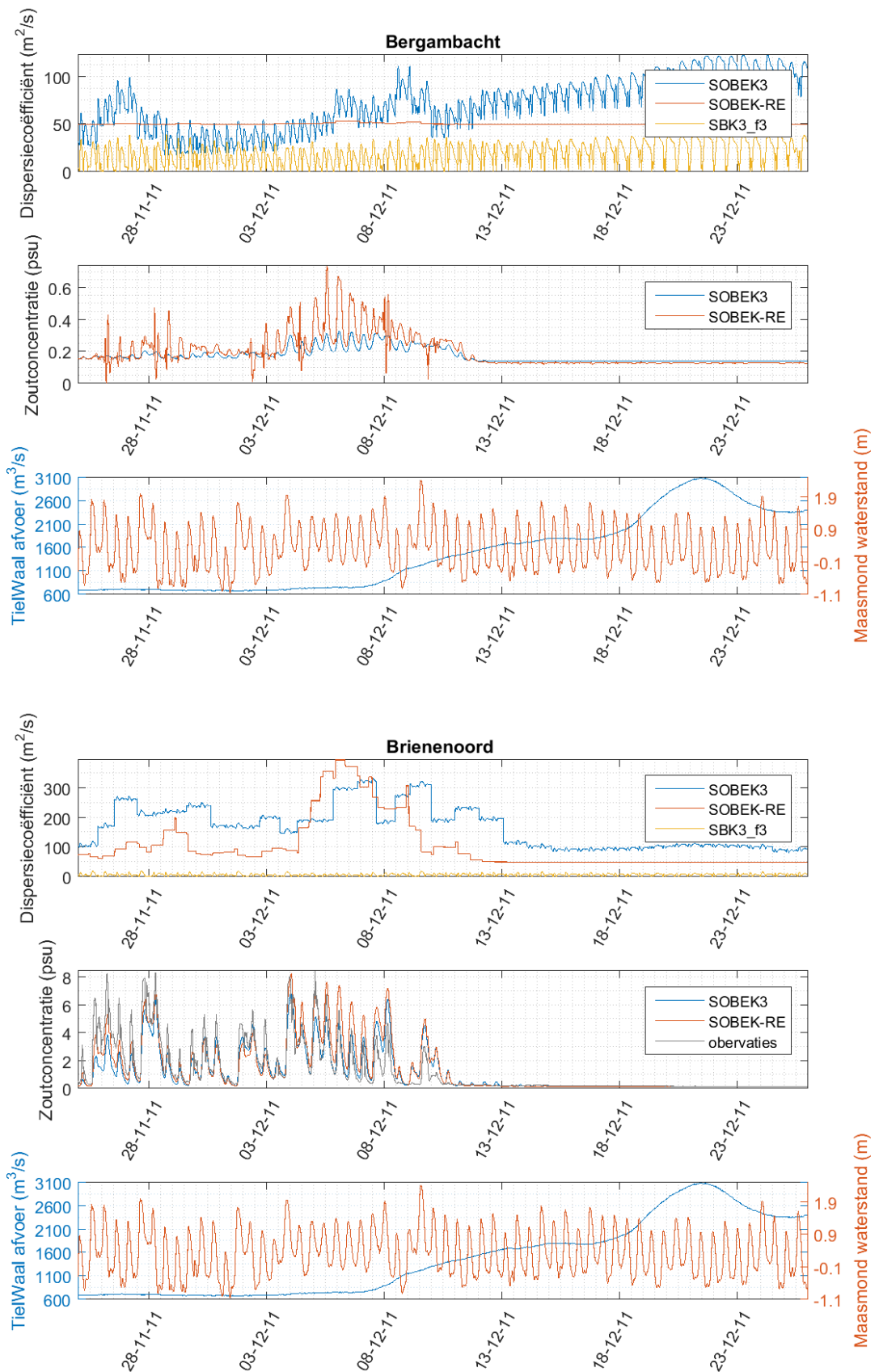


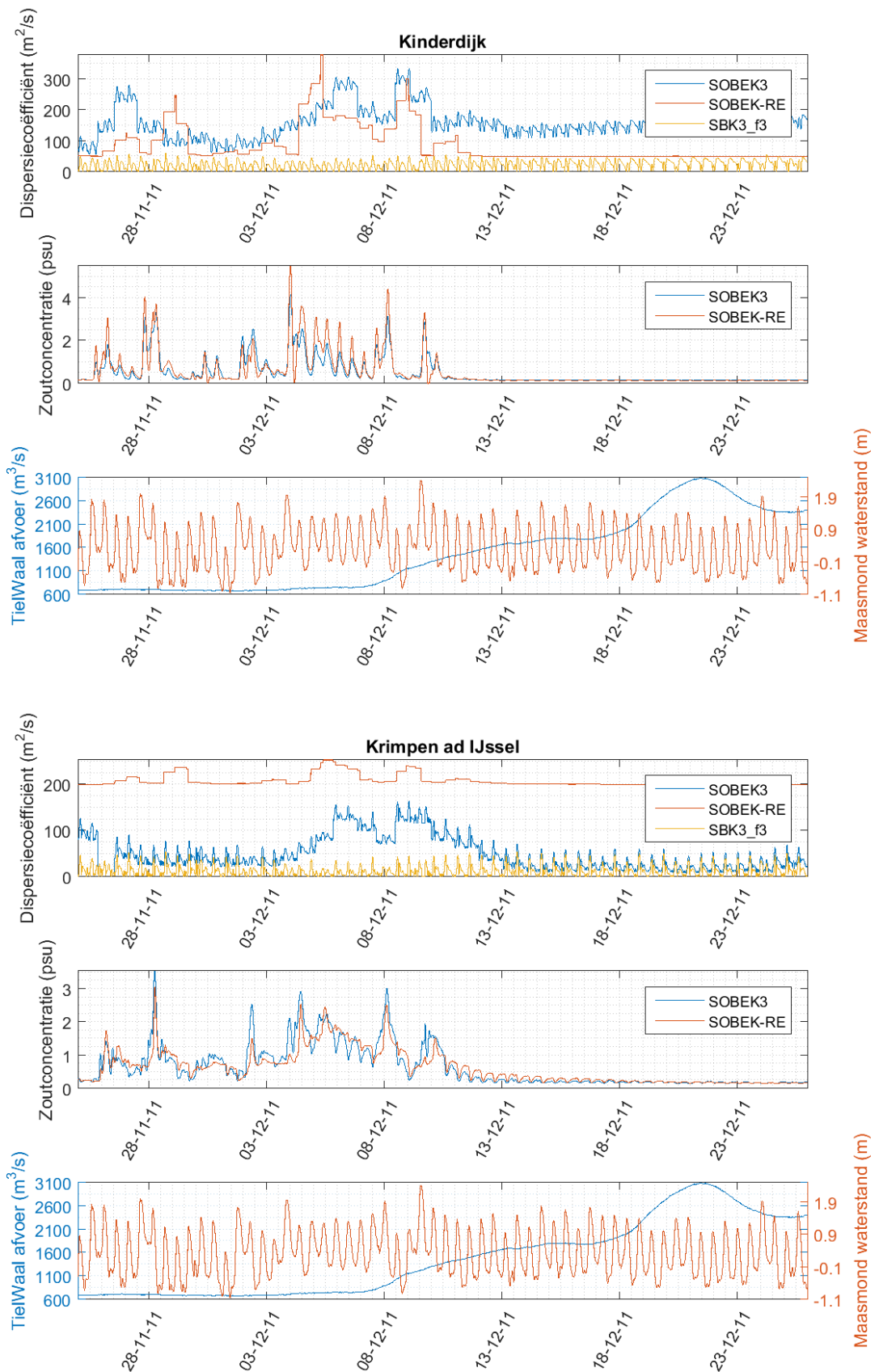


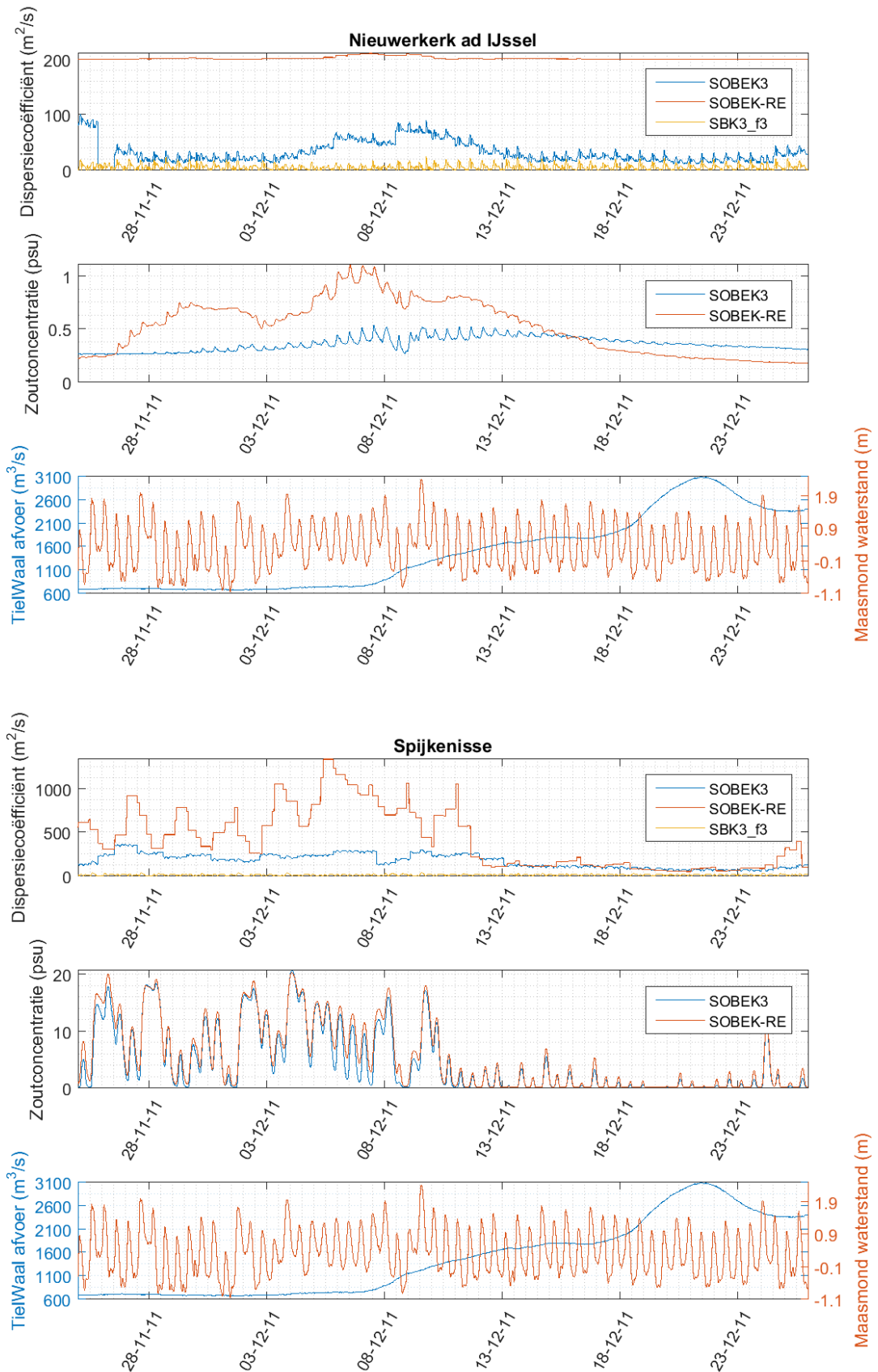


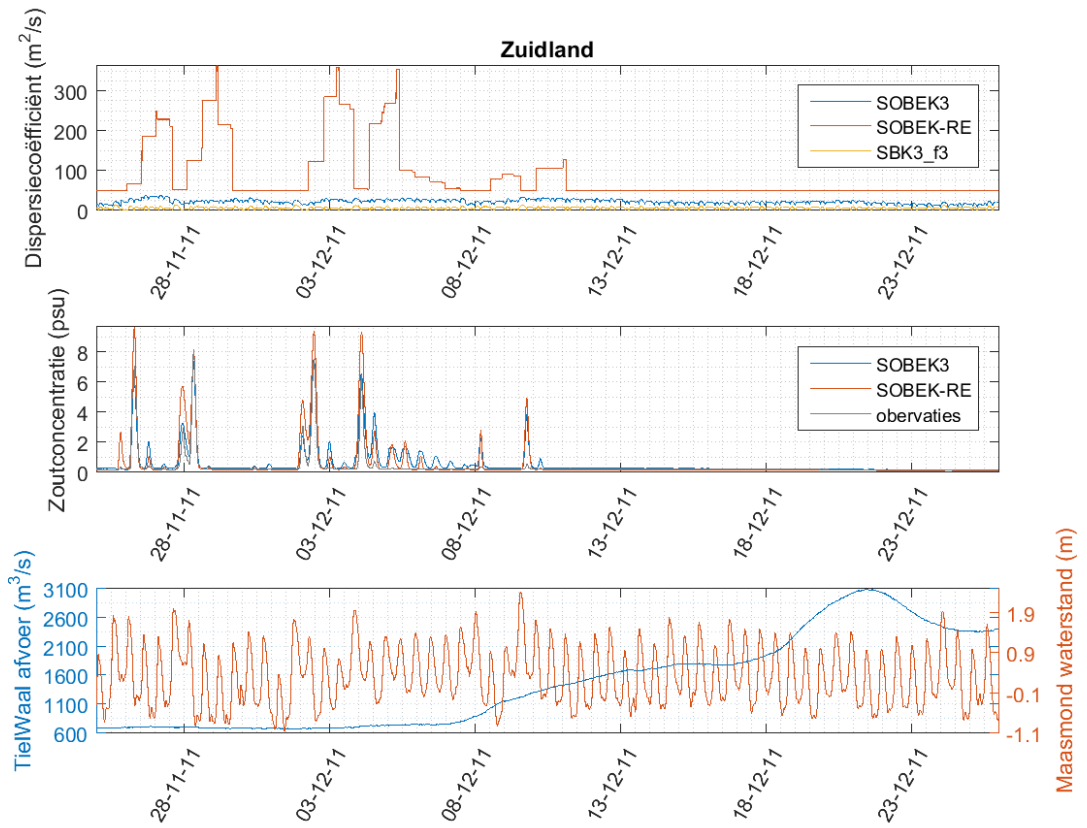


D.5 Periode december 2011



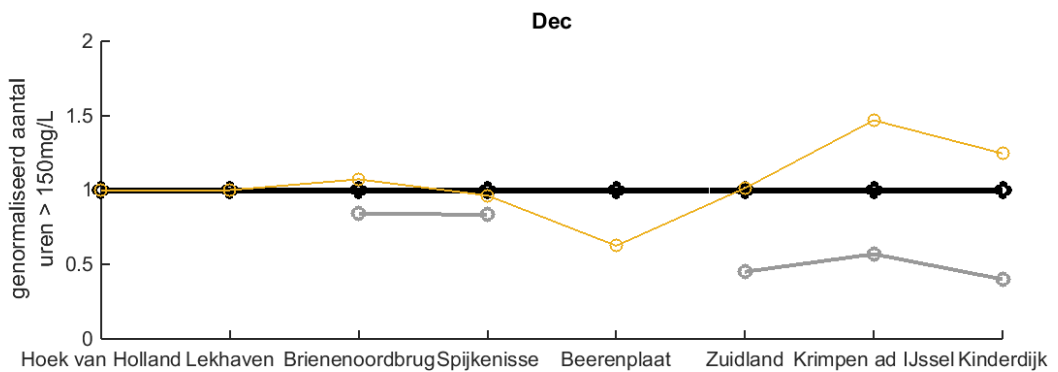
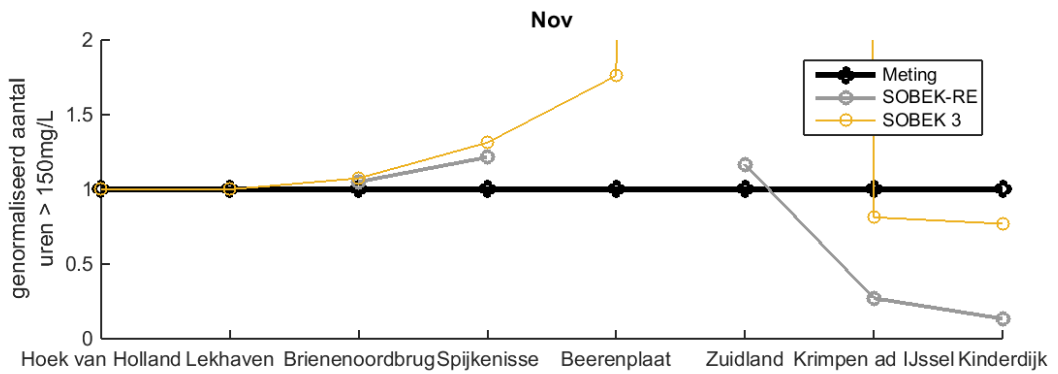
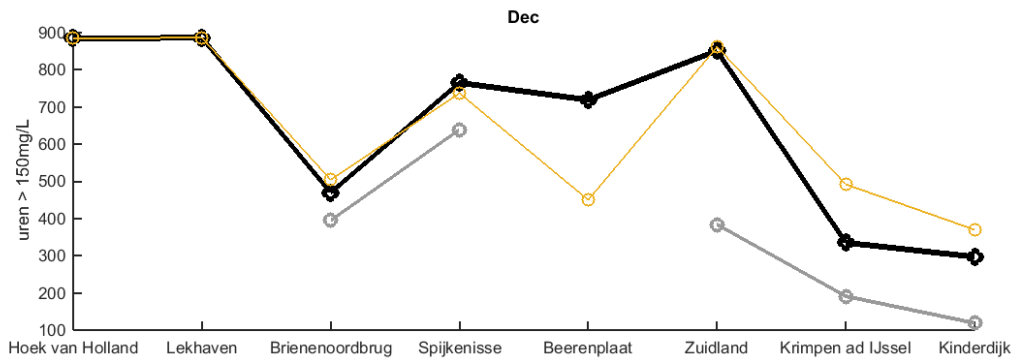
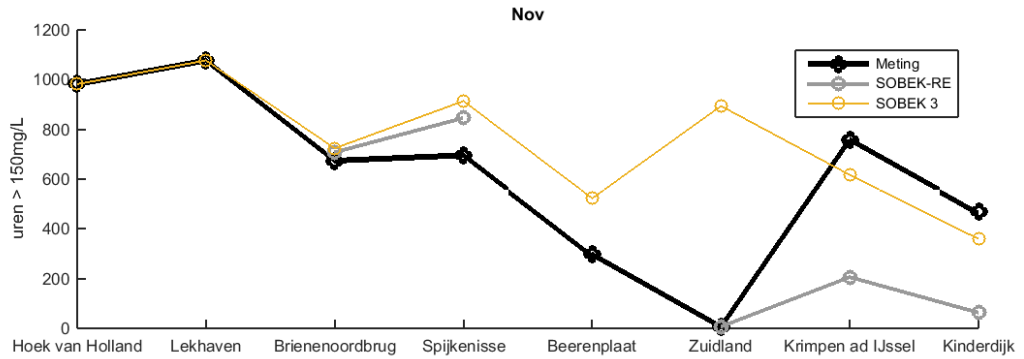




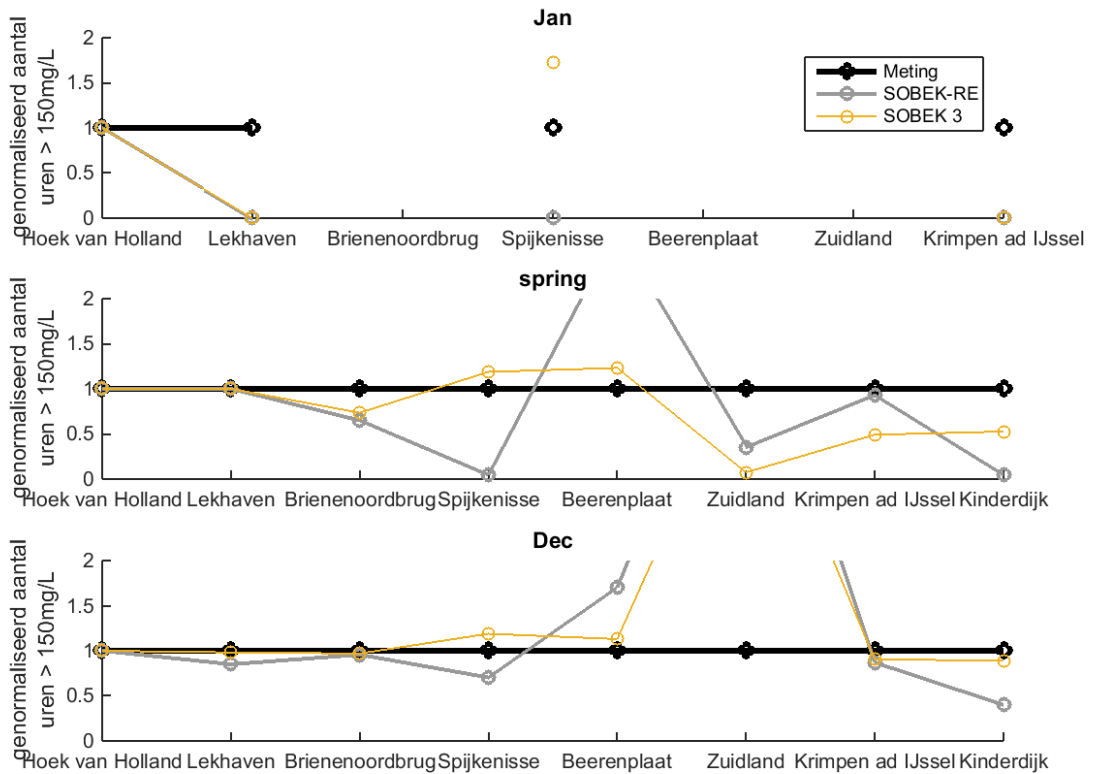
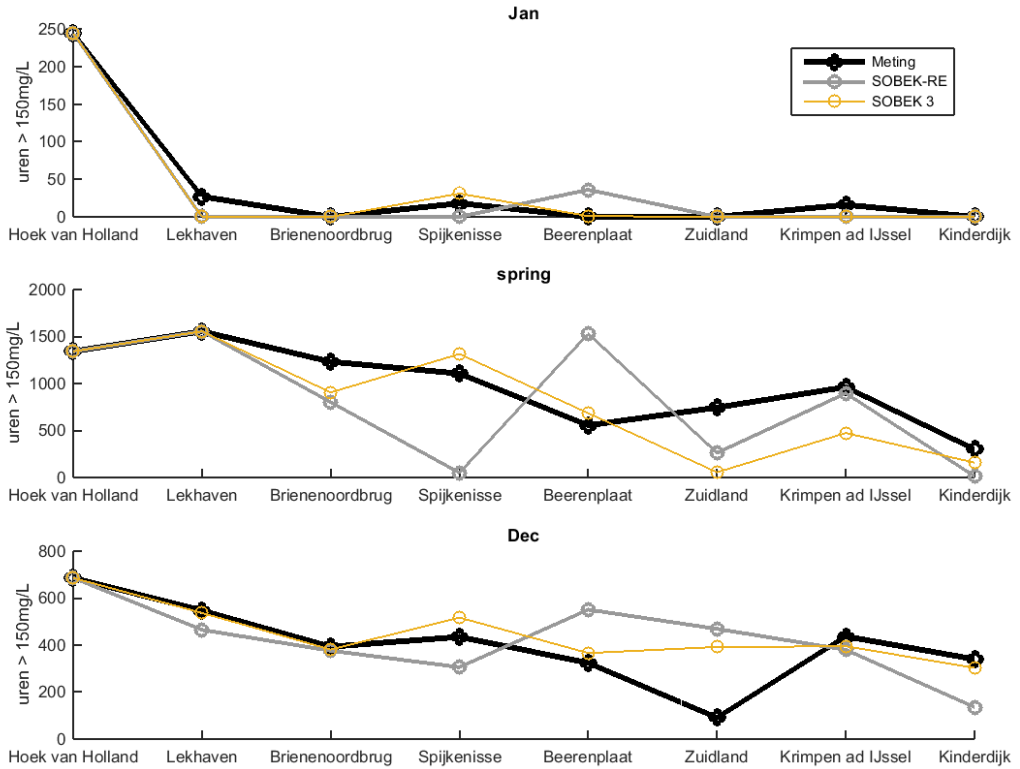


E Overschrijdingsduren kalibratieperioden

E.1 Boven 150 mg/l in 2005



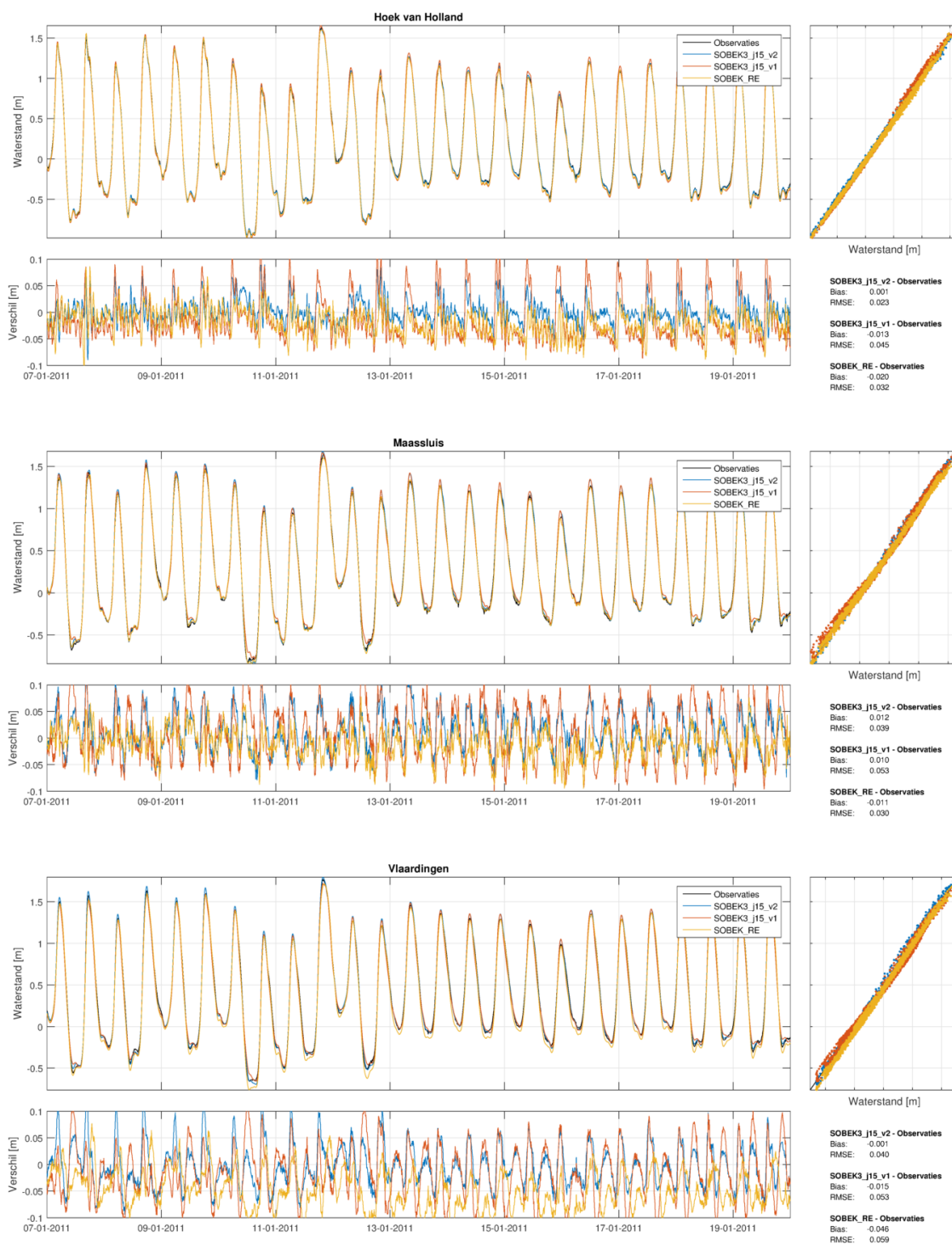
E.2 Boven 150 mg/l in 2011

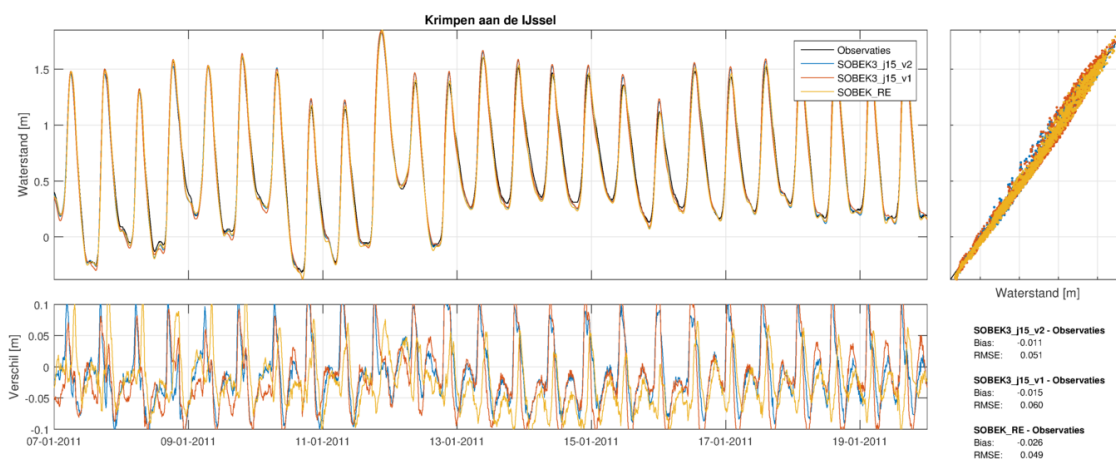
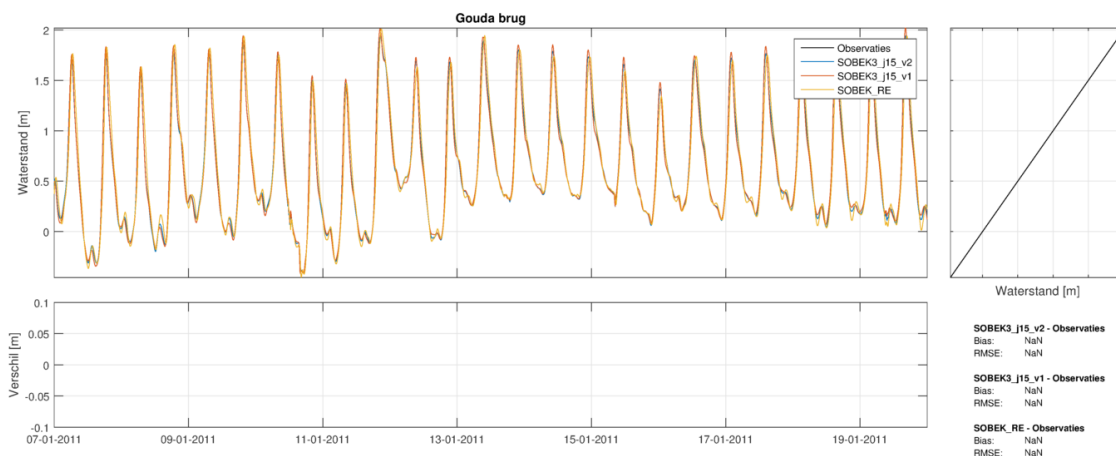
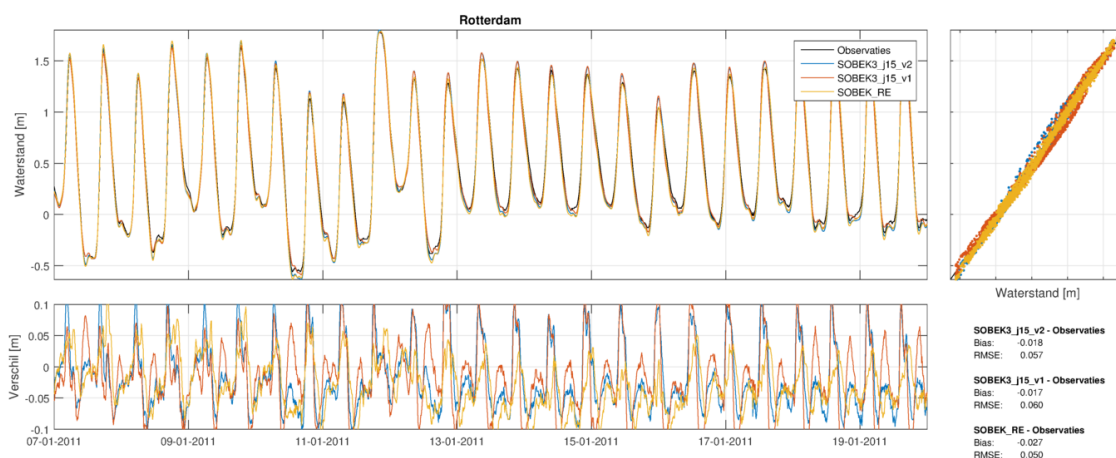


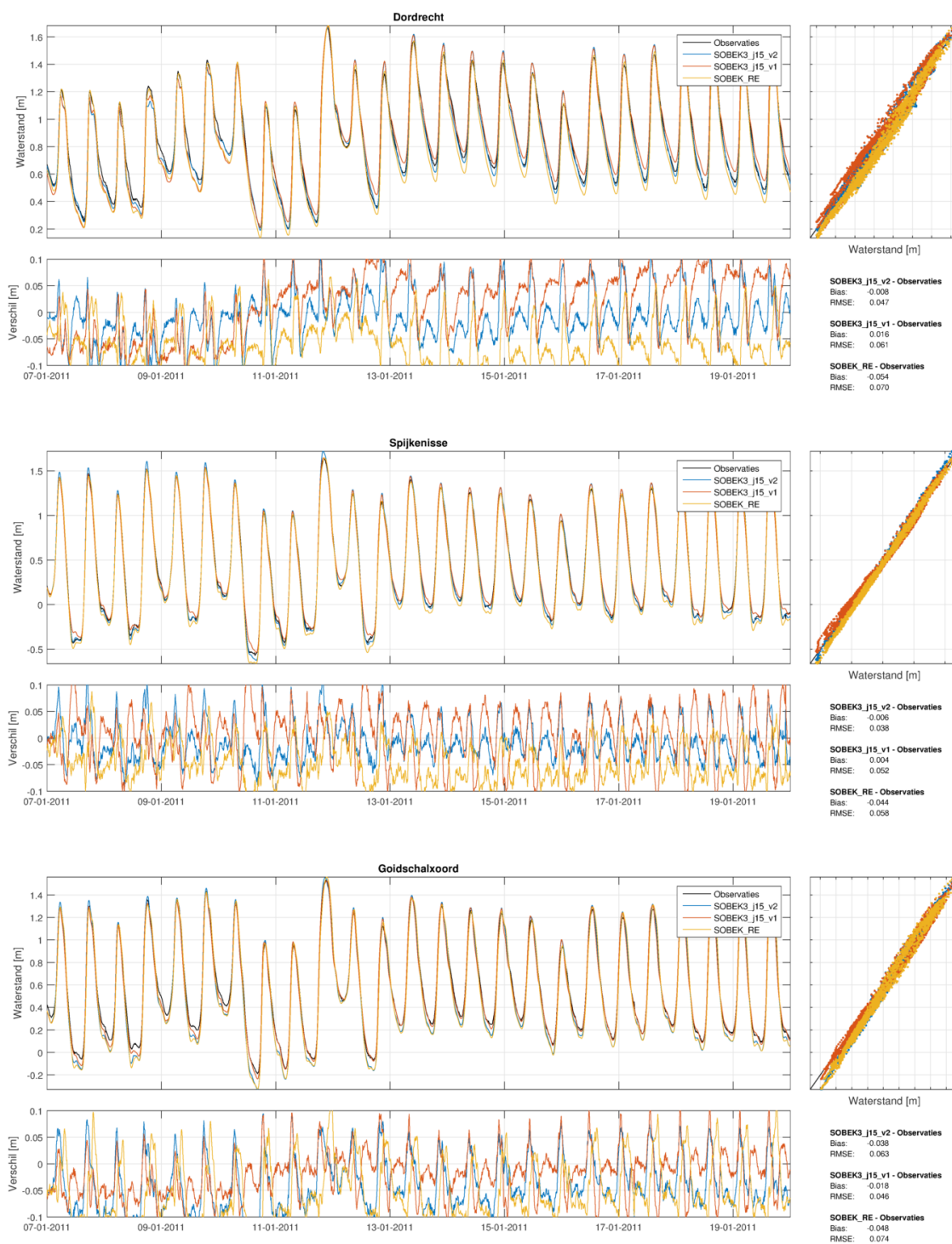
F Tijdsries van berekende en gemeten waterstand

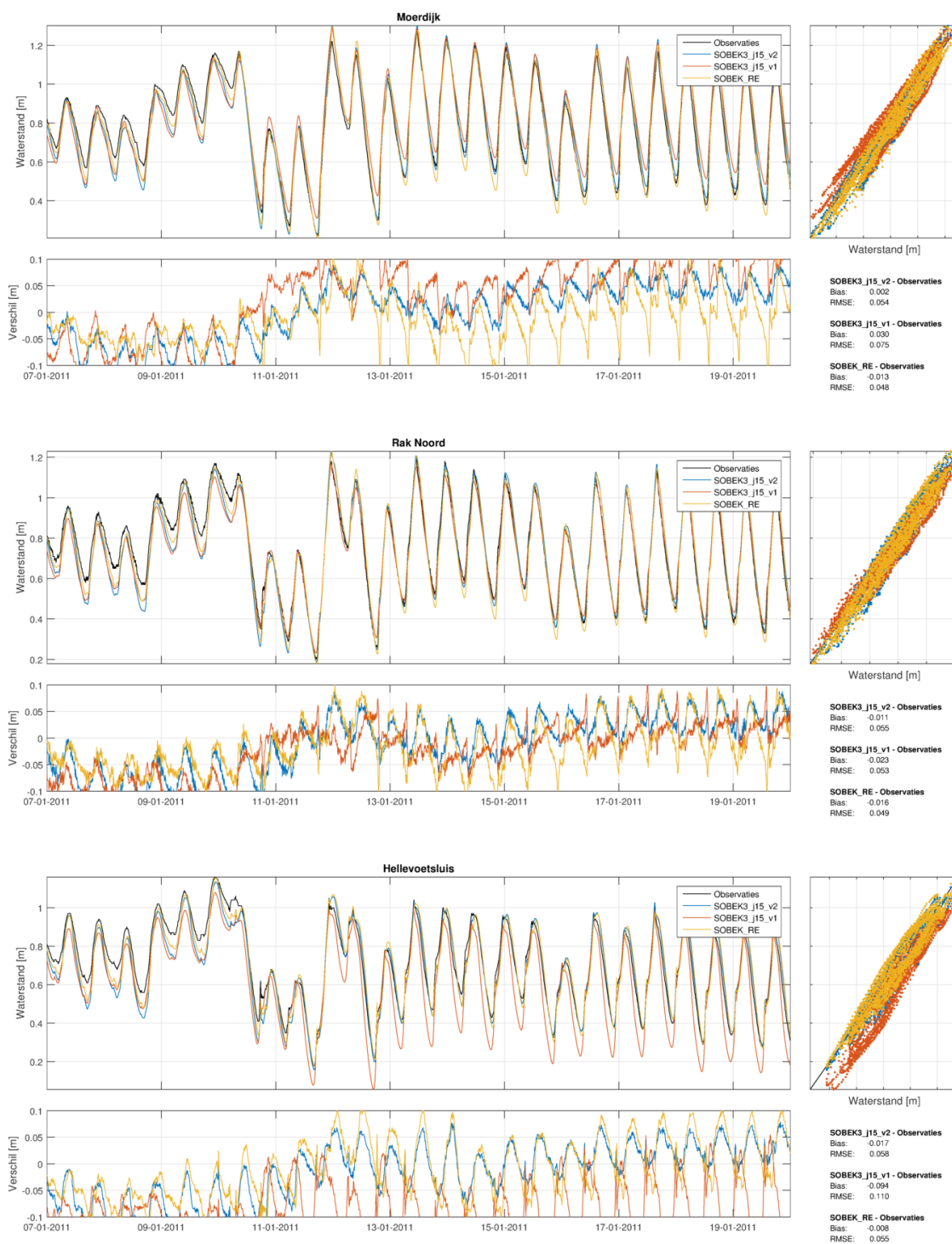
F.1 Herkalibratie

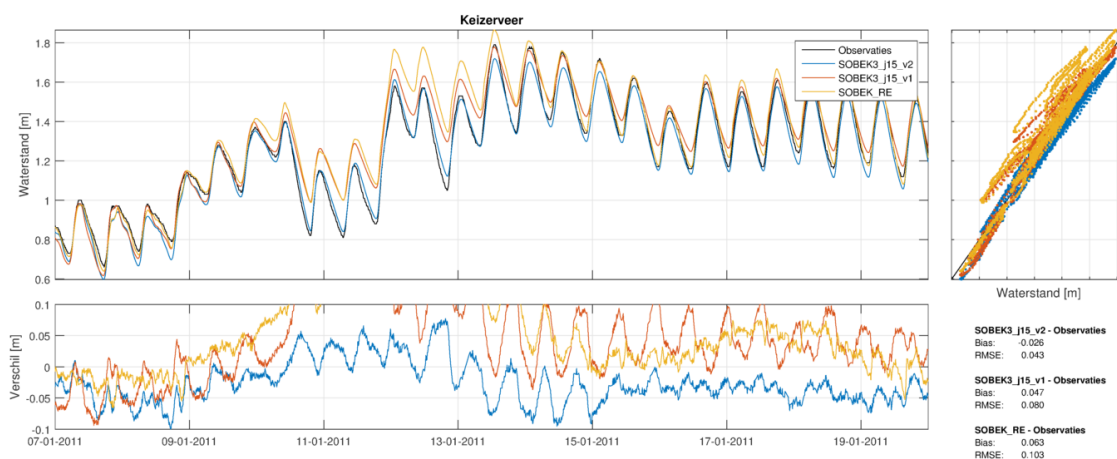
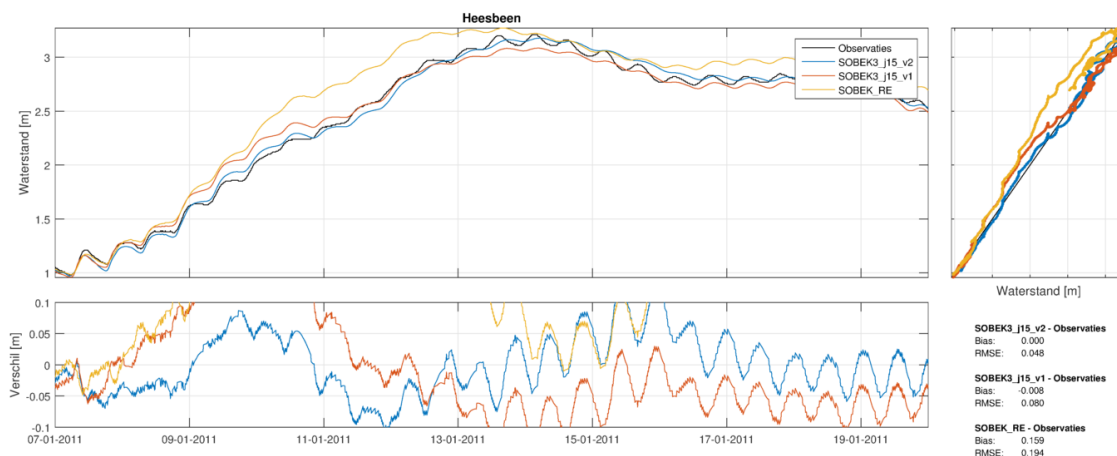
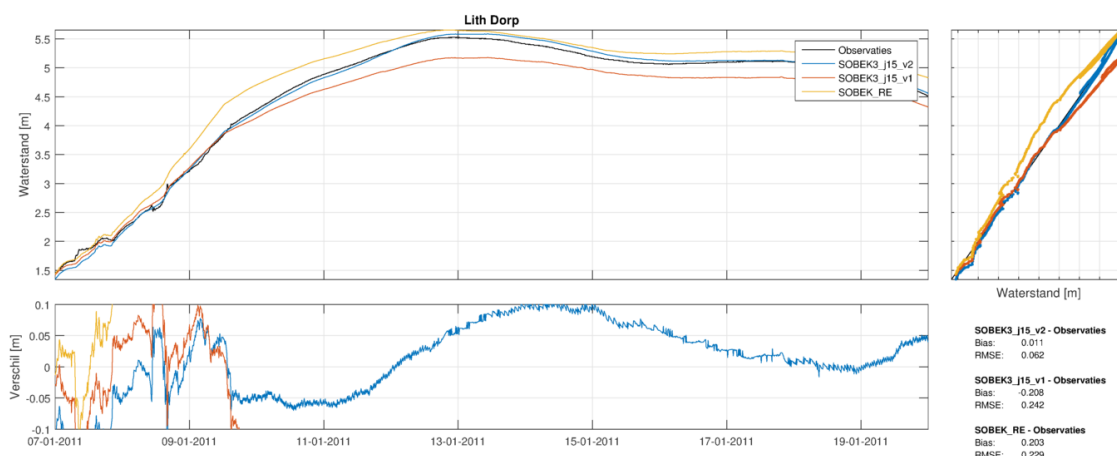
F.1.1 Periode januari 2011

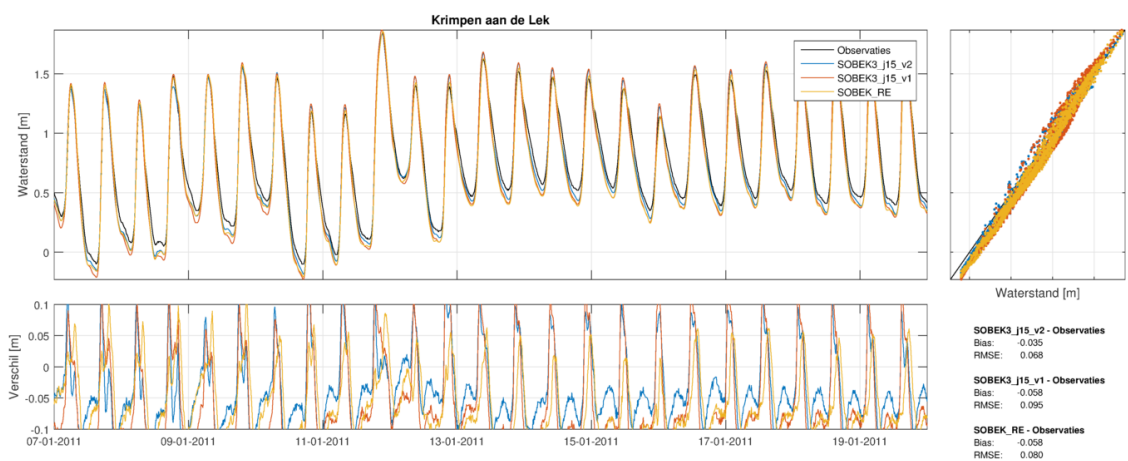
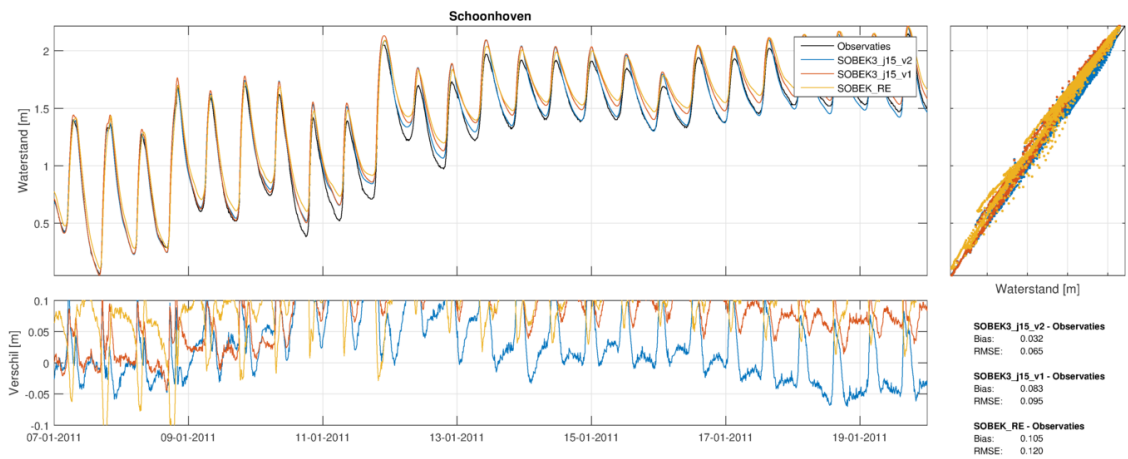
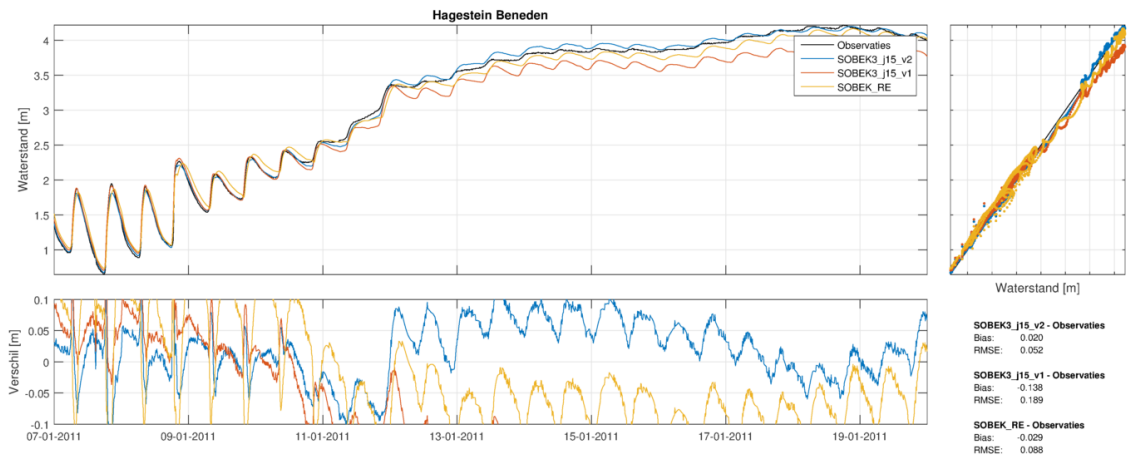




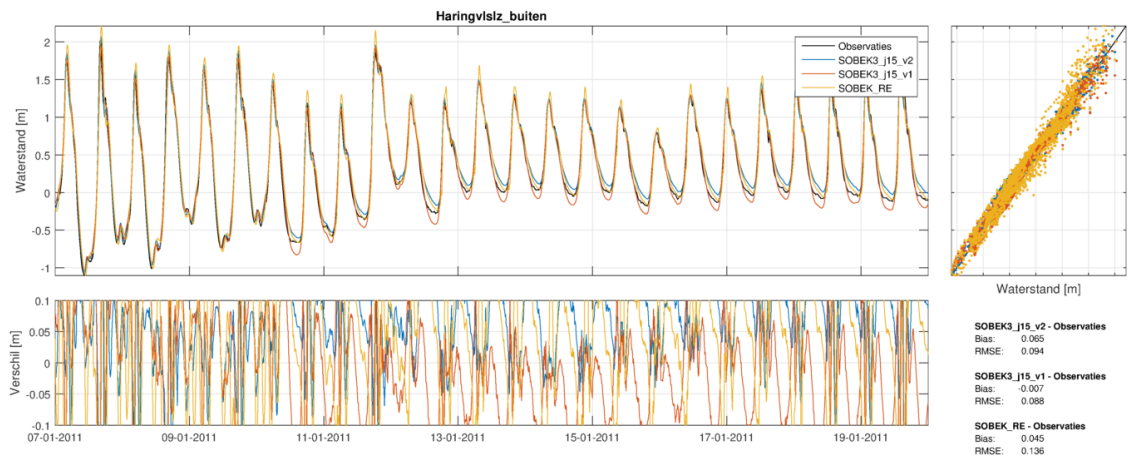
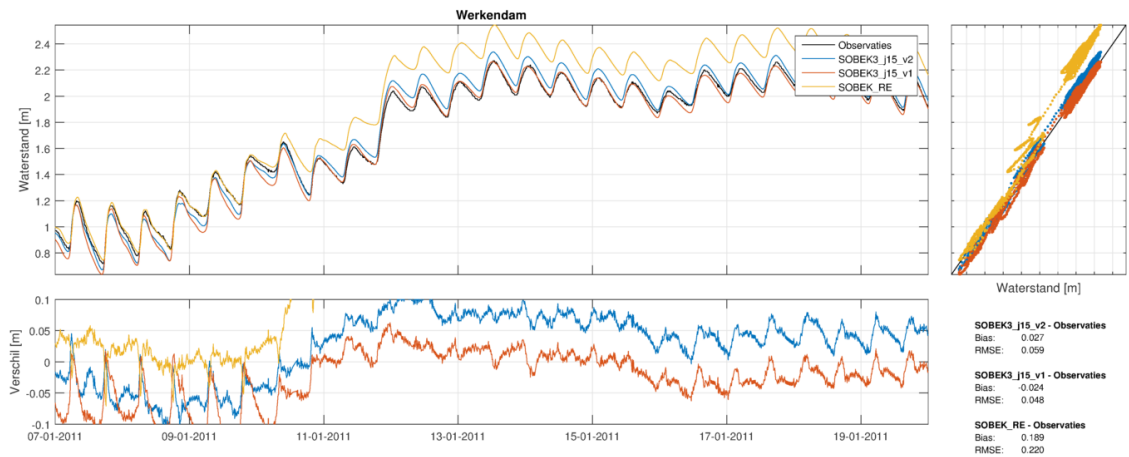




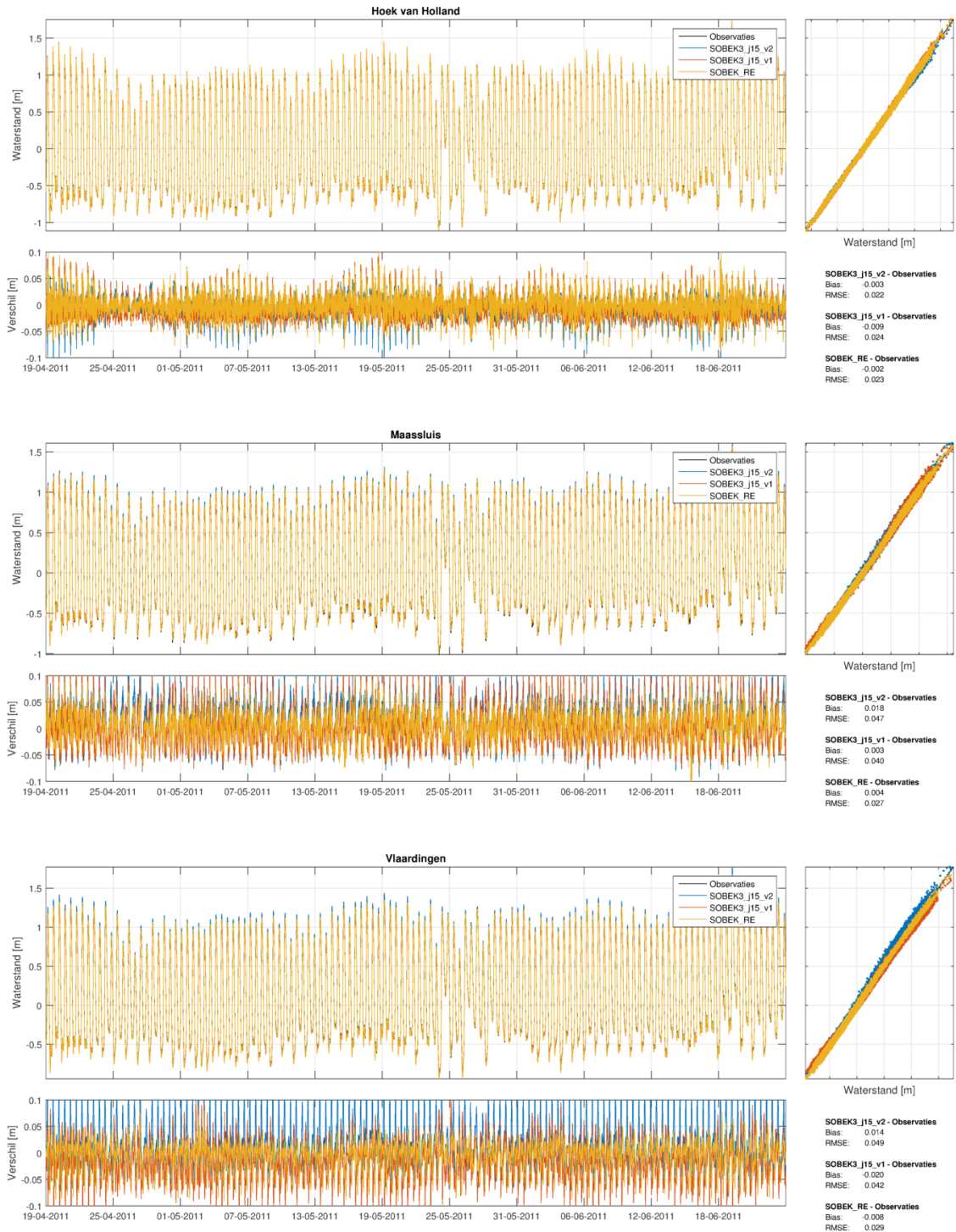


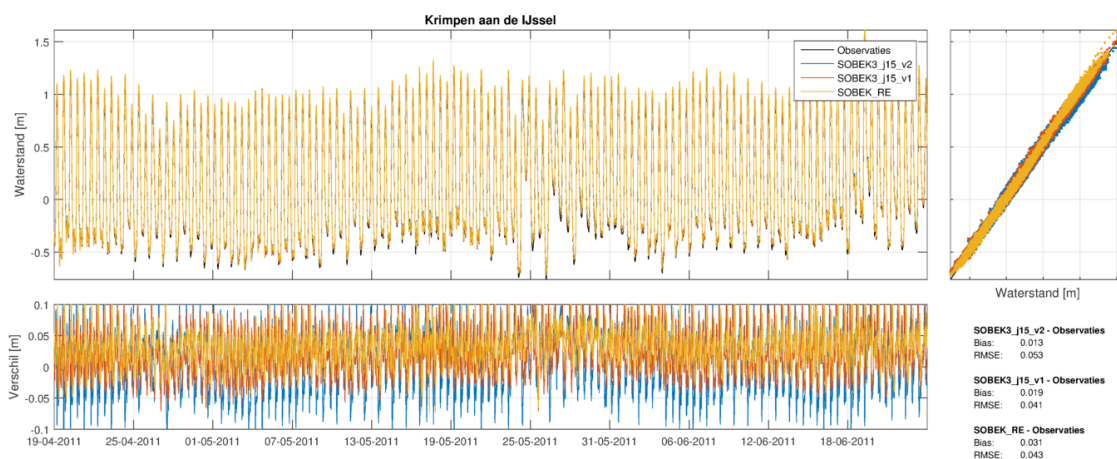
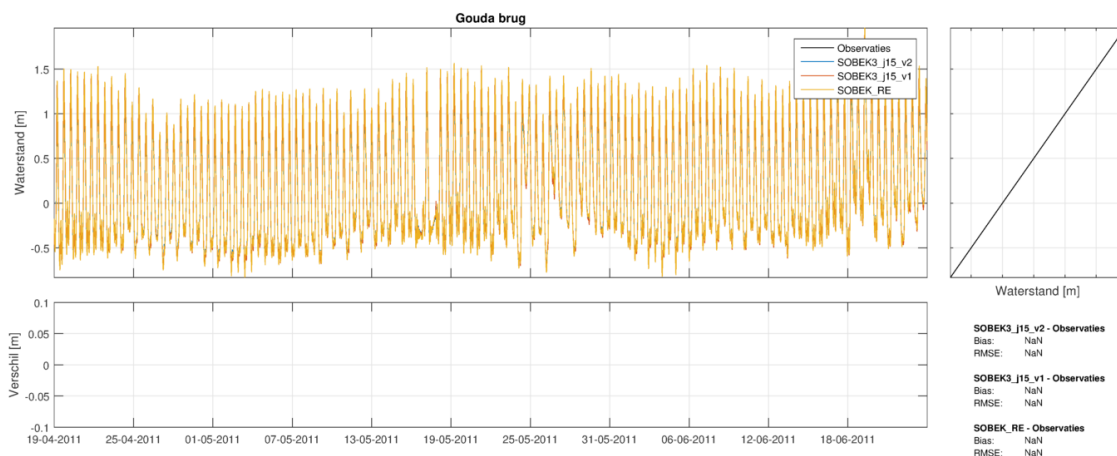
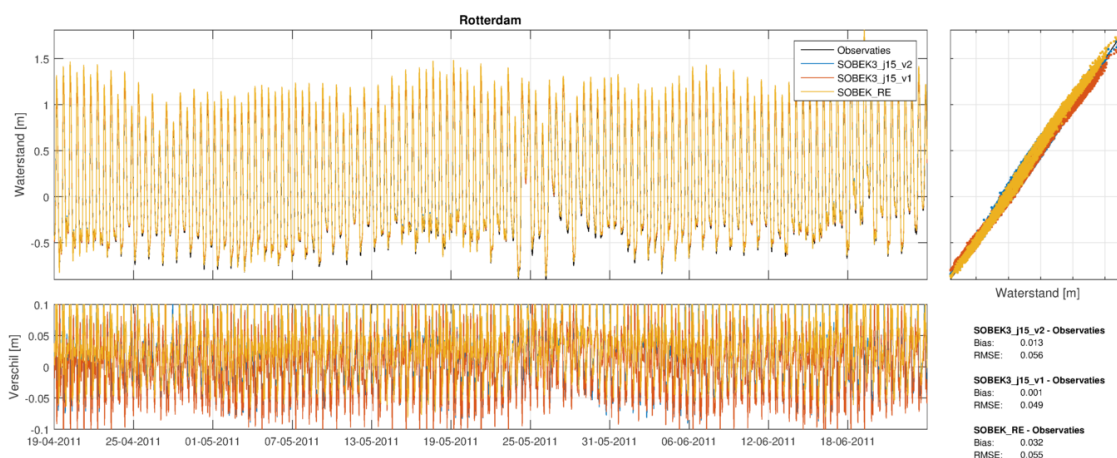


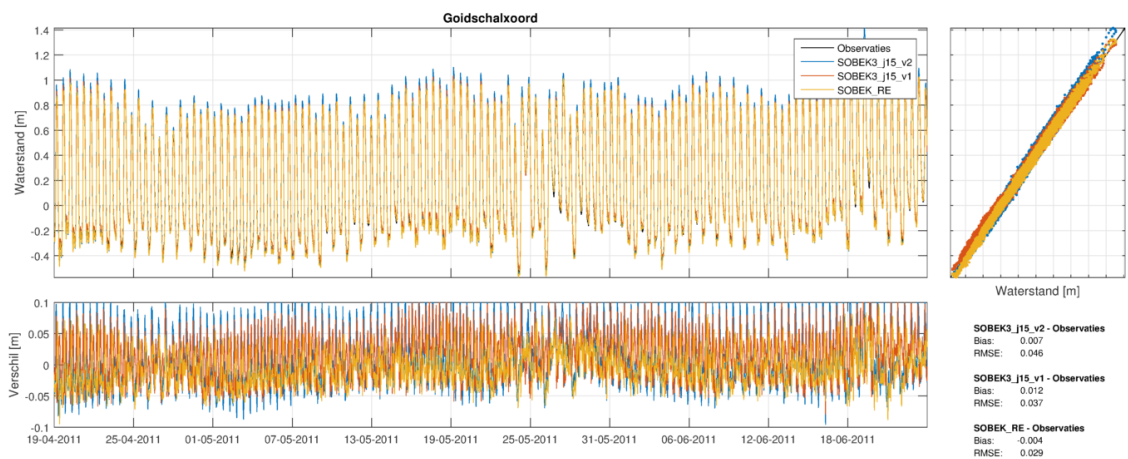
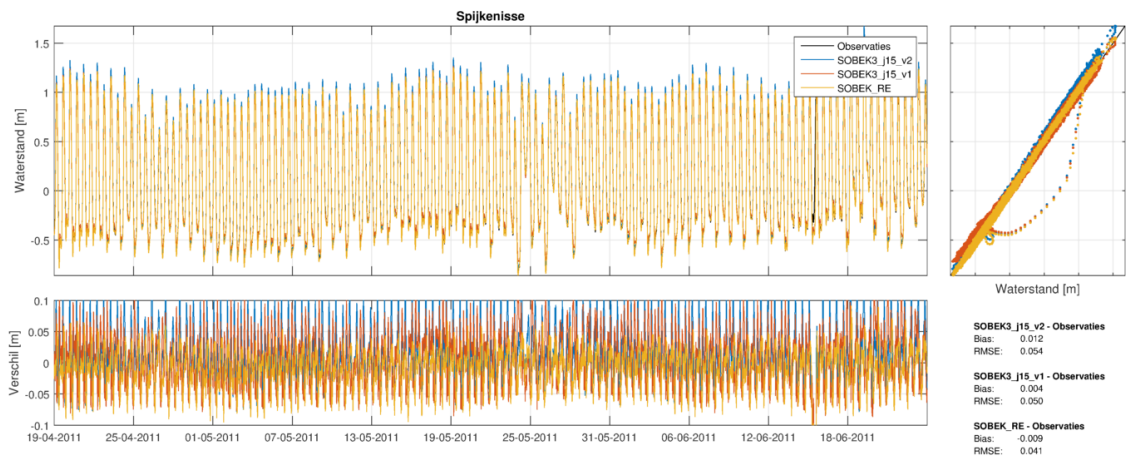
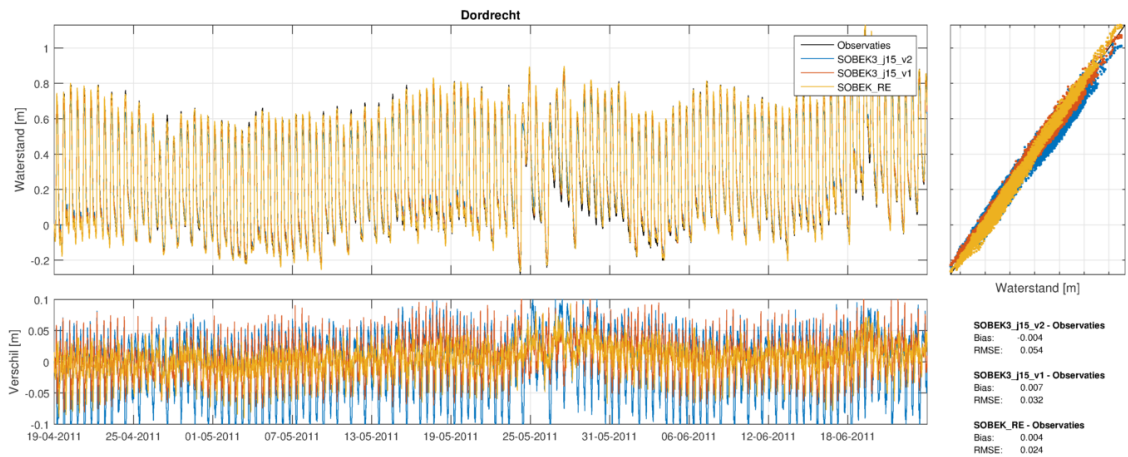


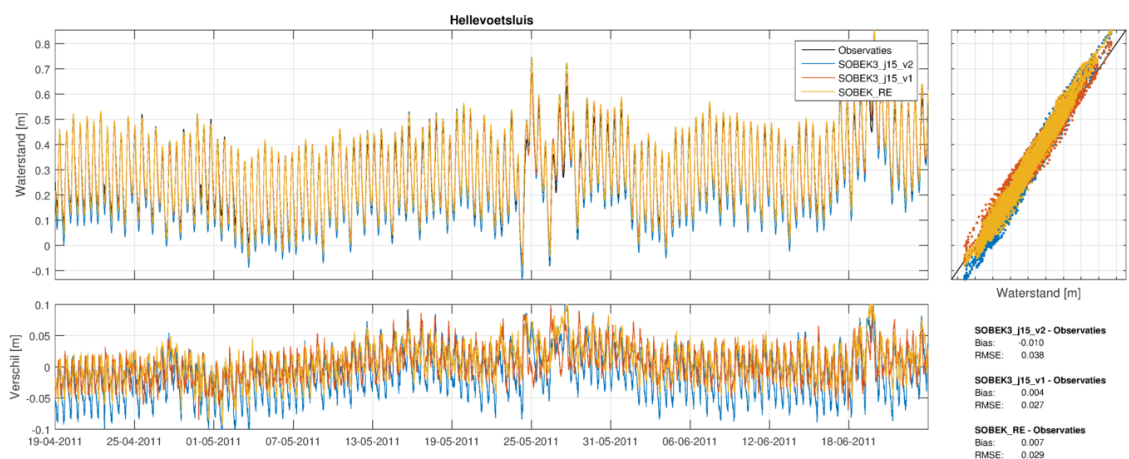
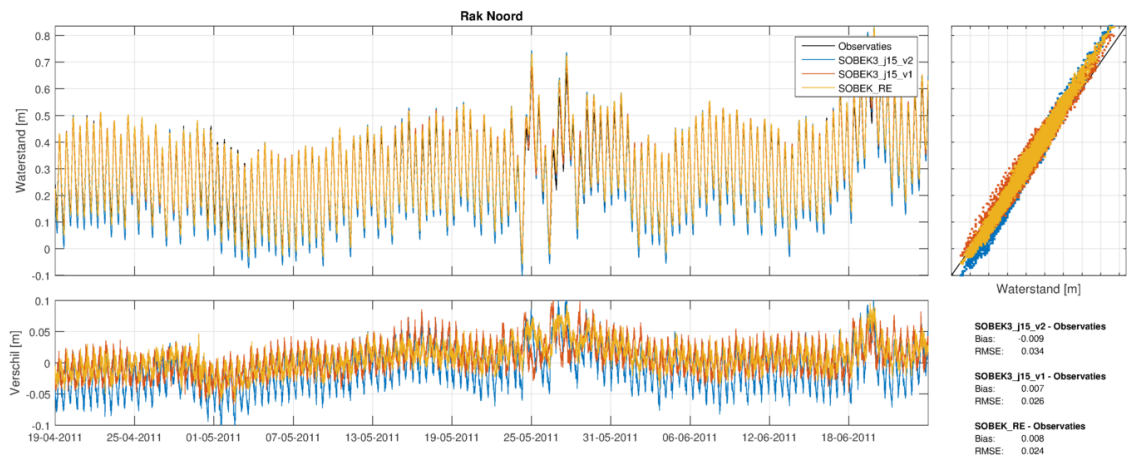
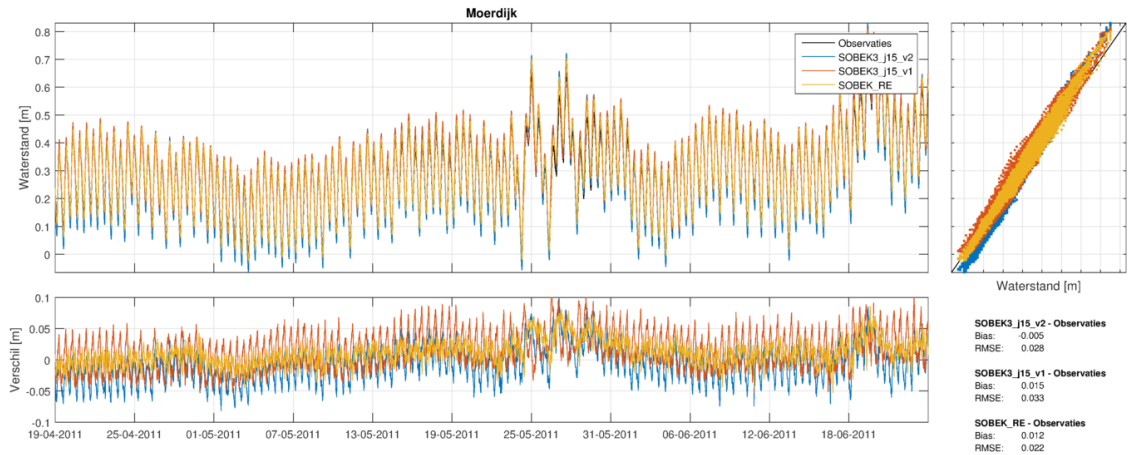


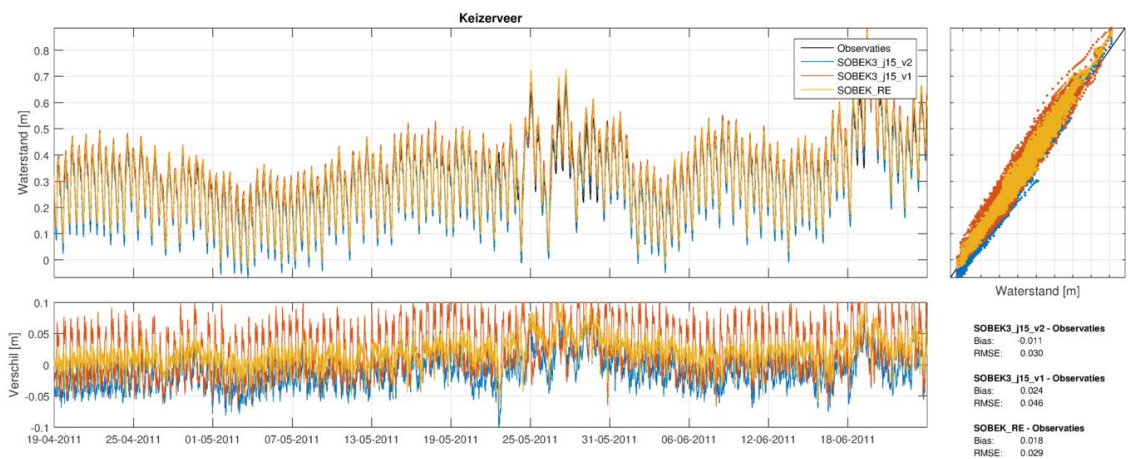
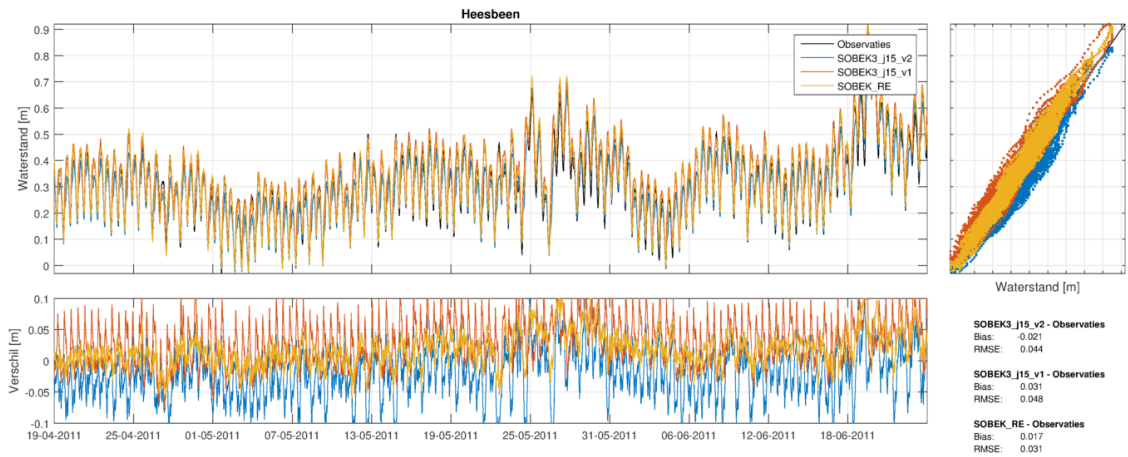
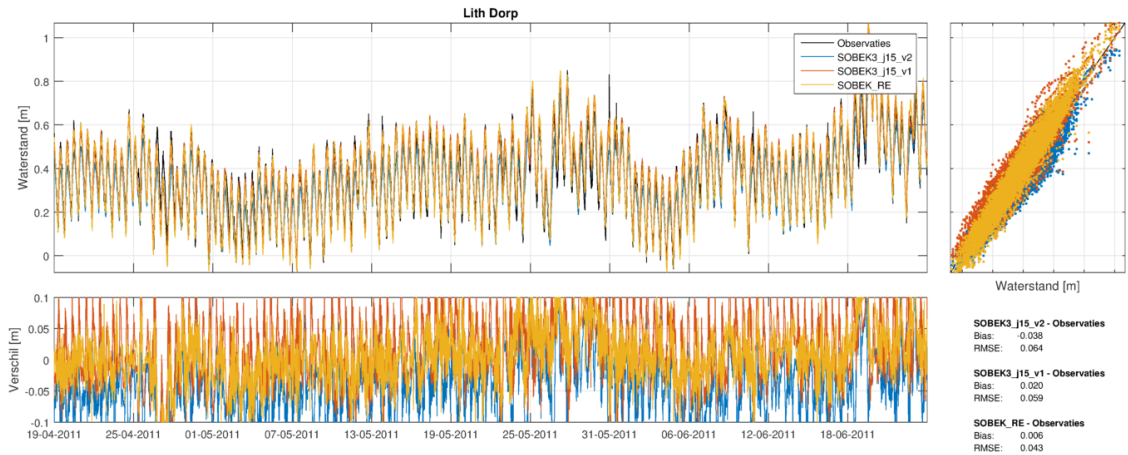
F.1.2 Voorjaar 2011

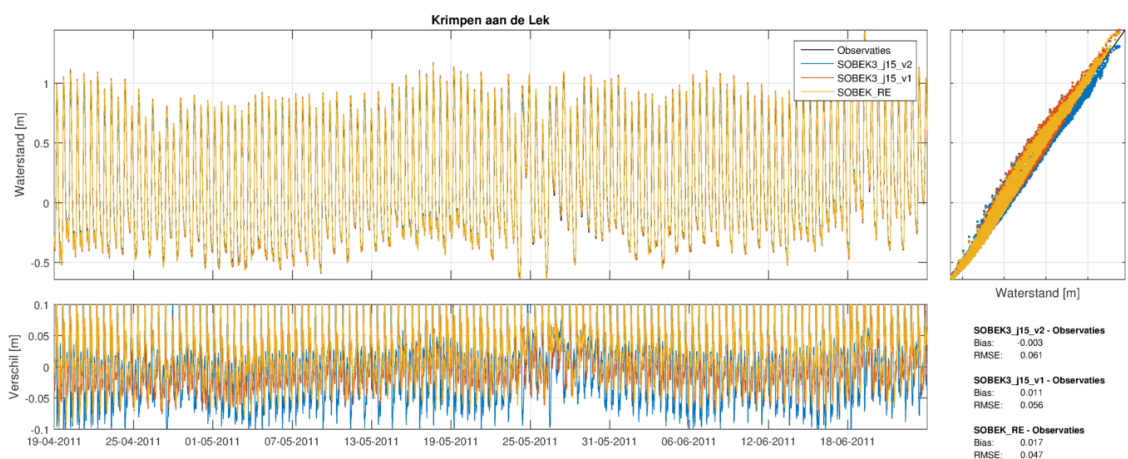
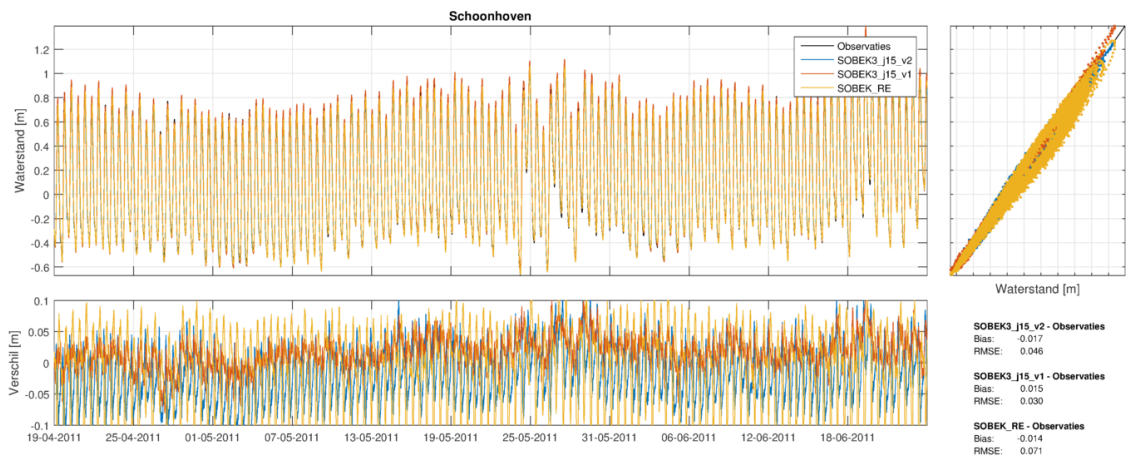
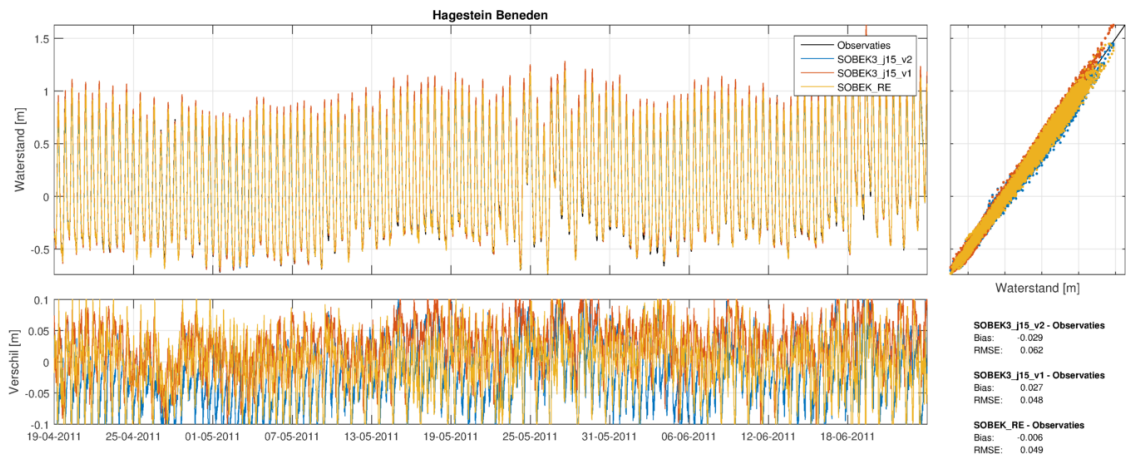


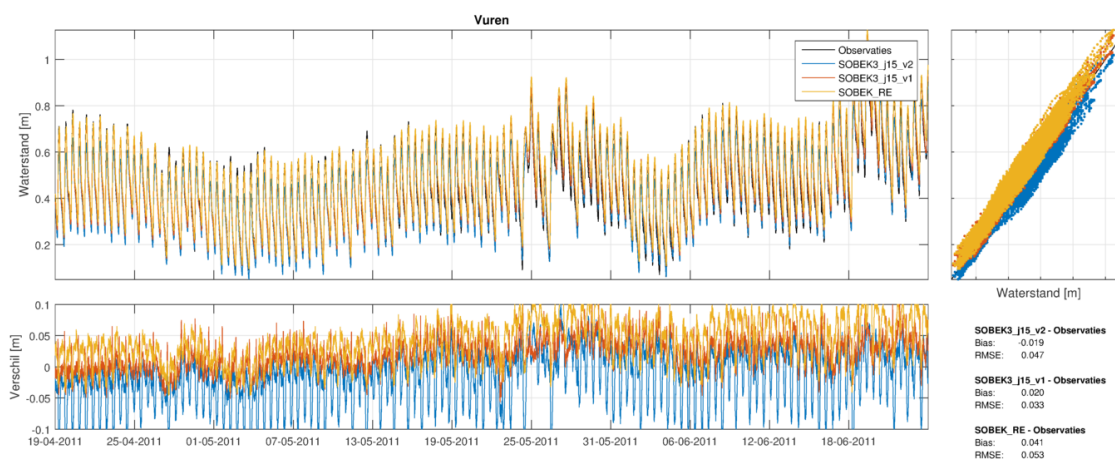
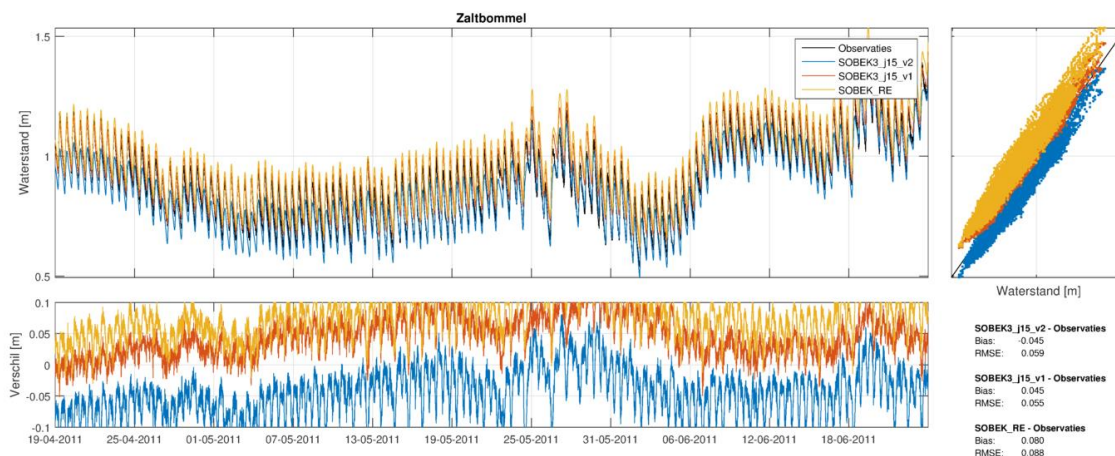
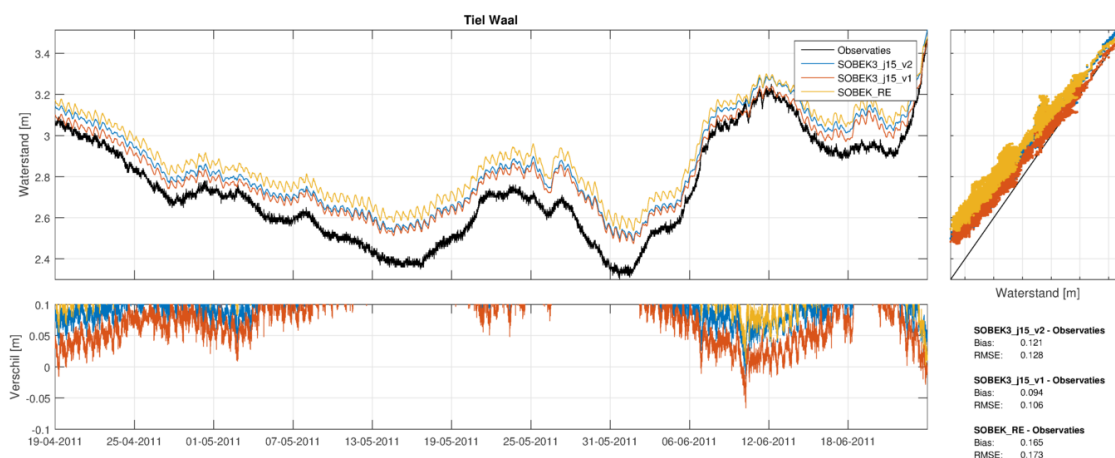


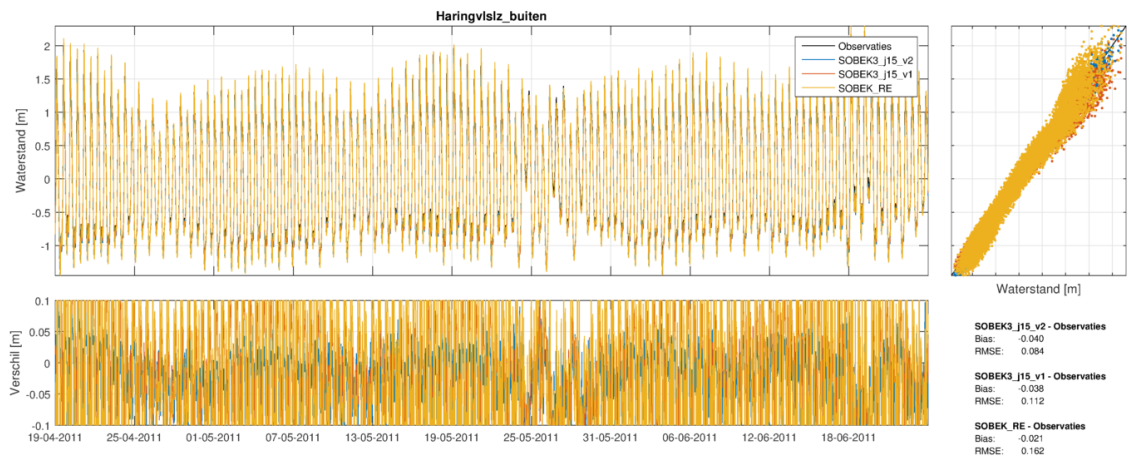
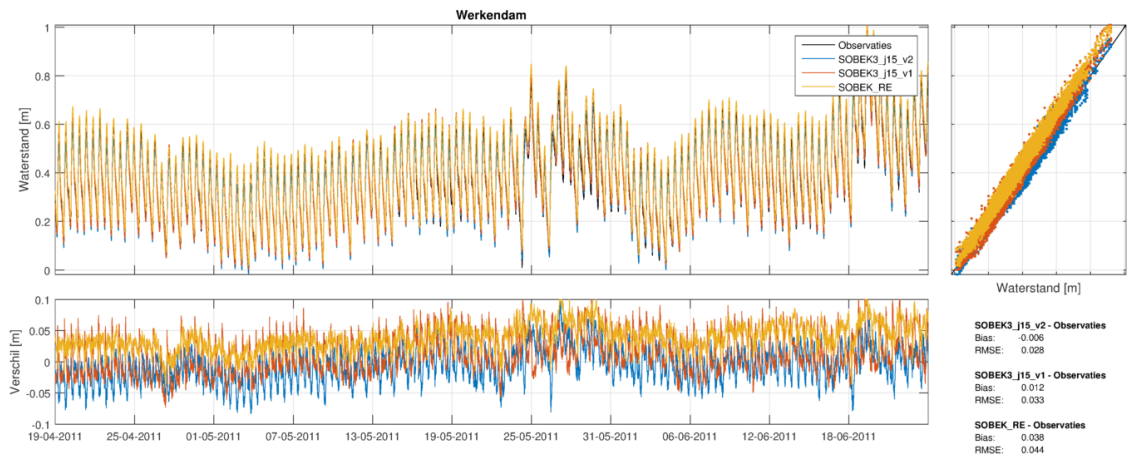




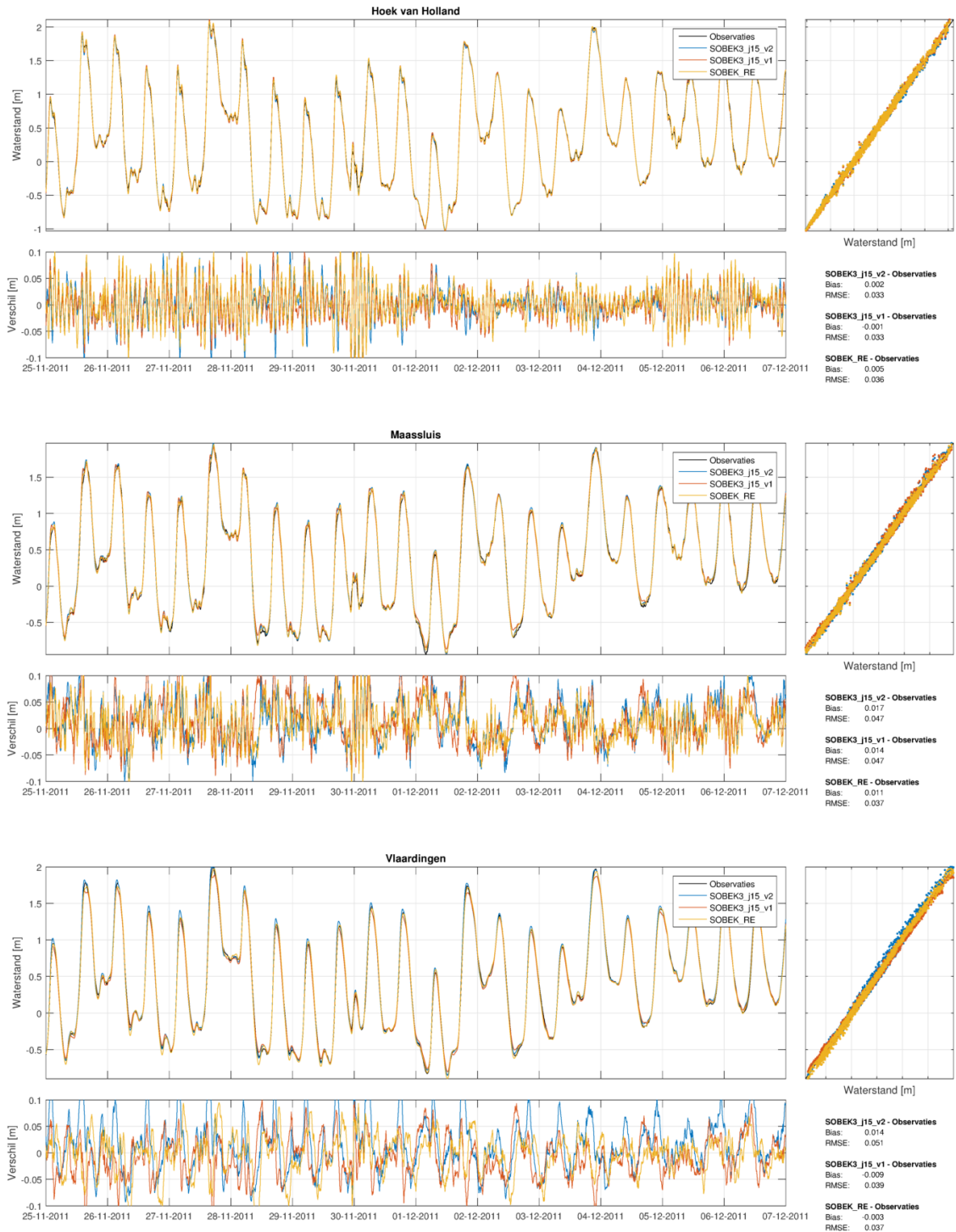


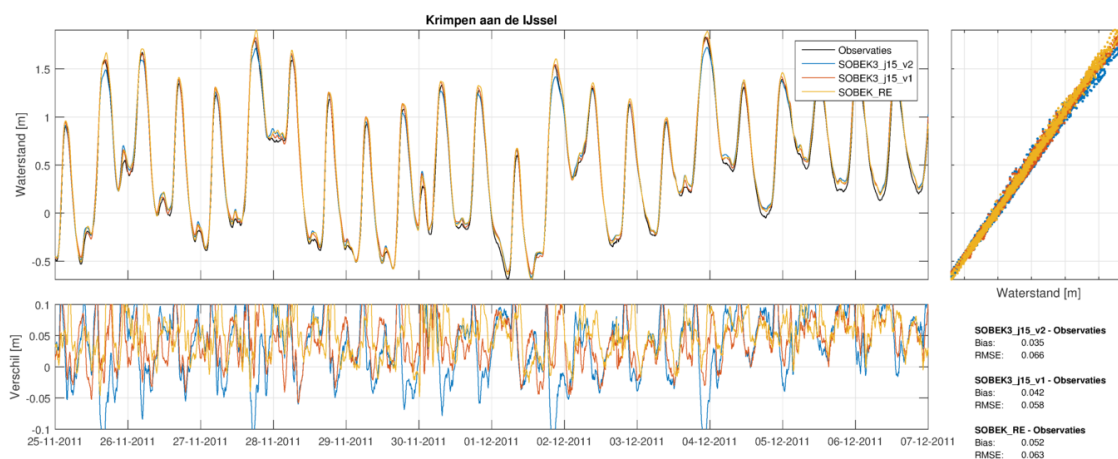
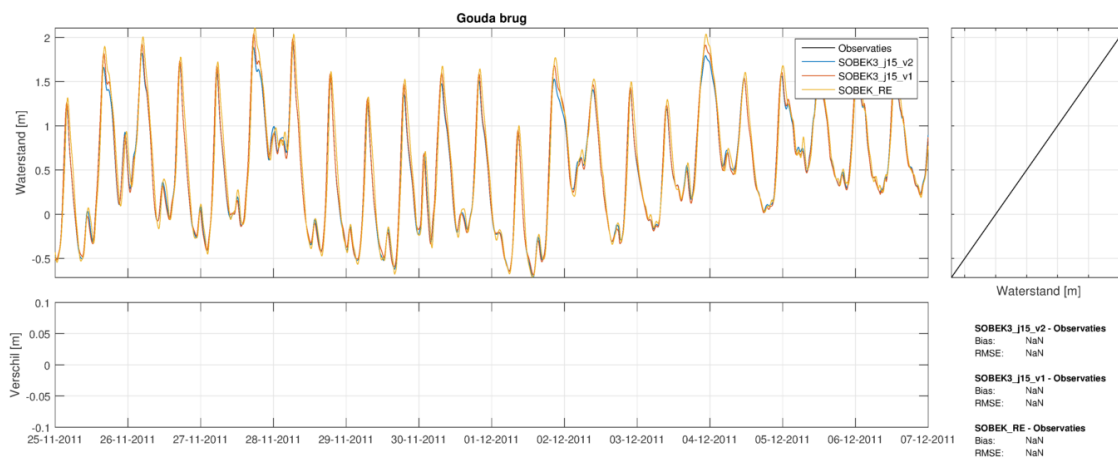
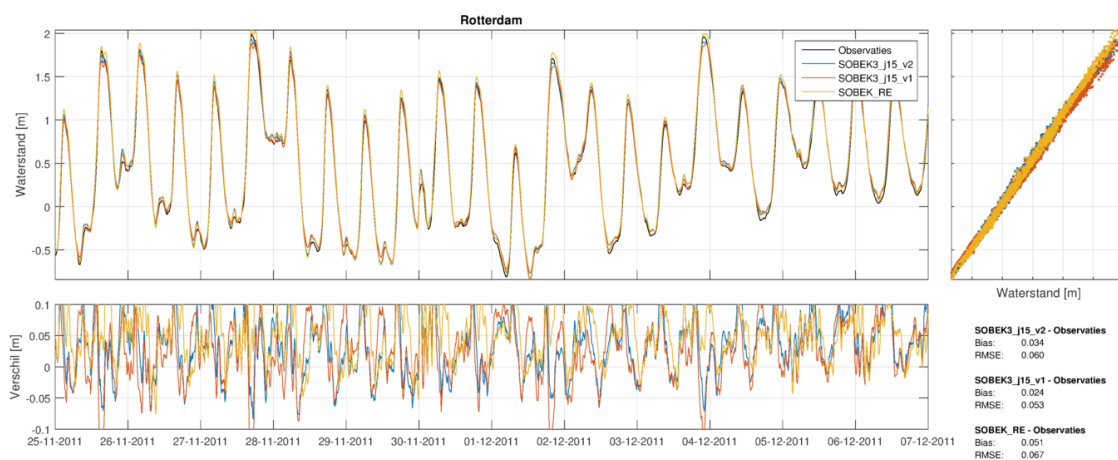


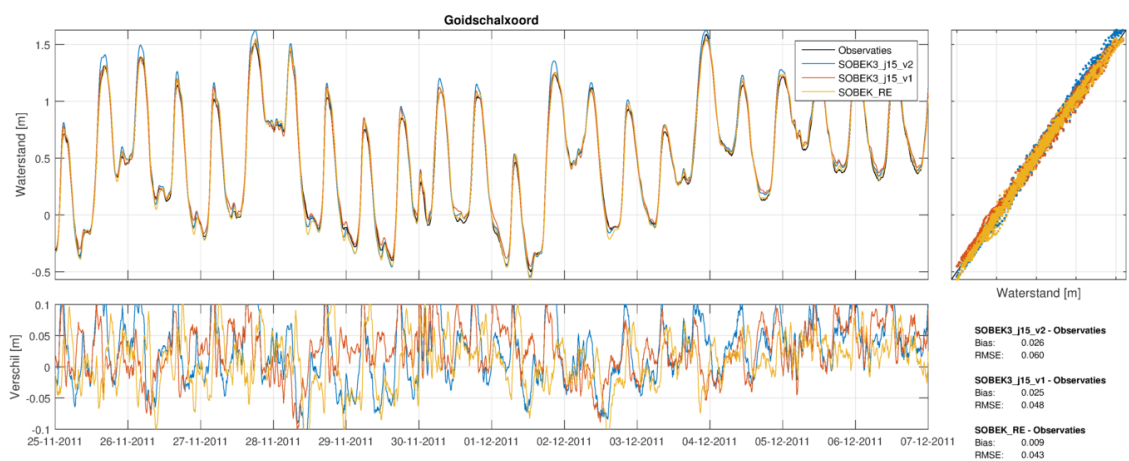
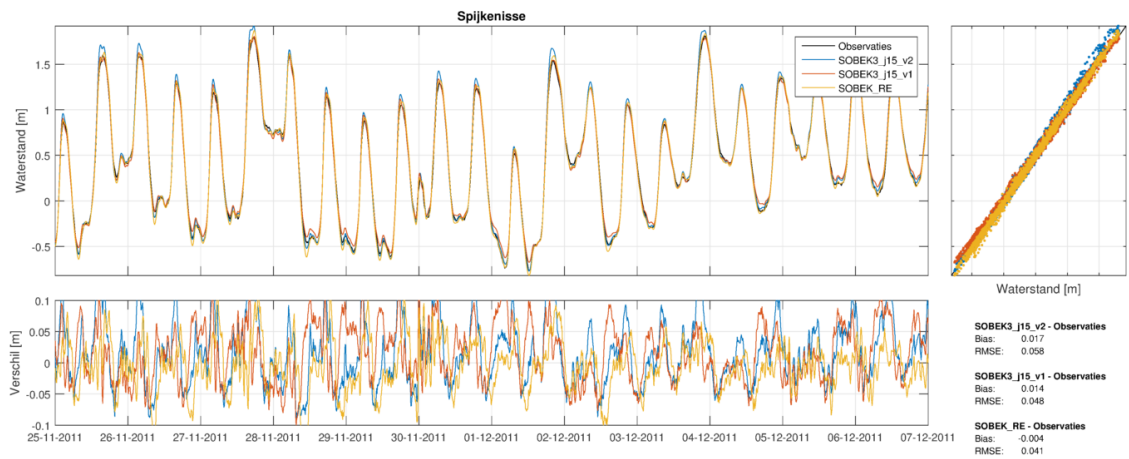
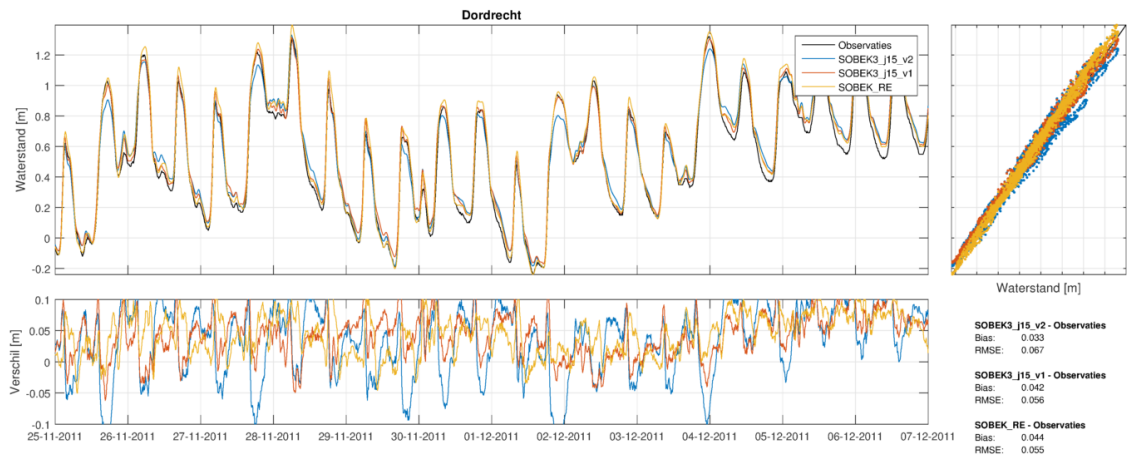


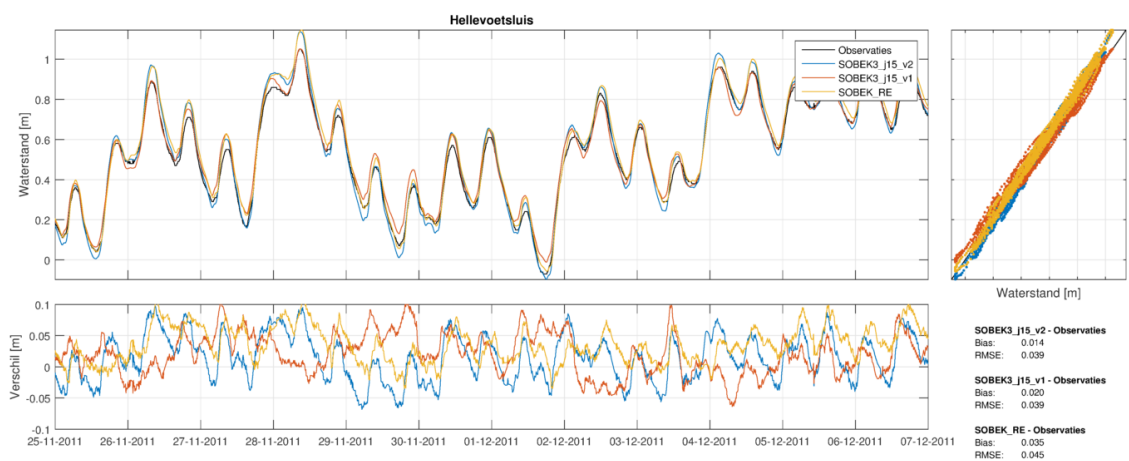
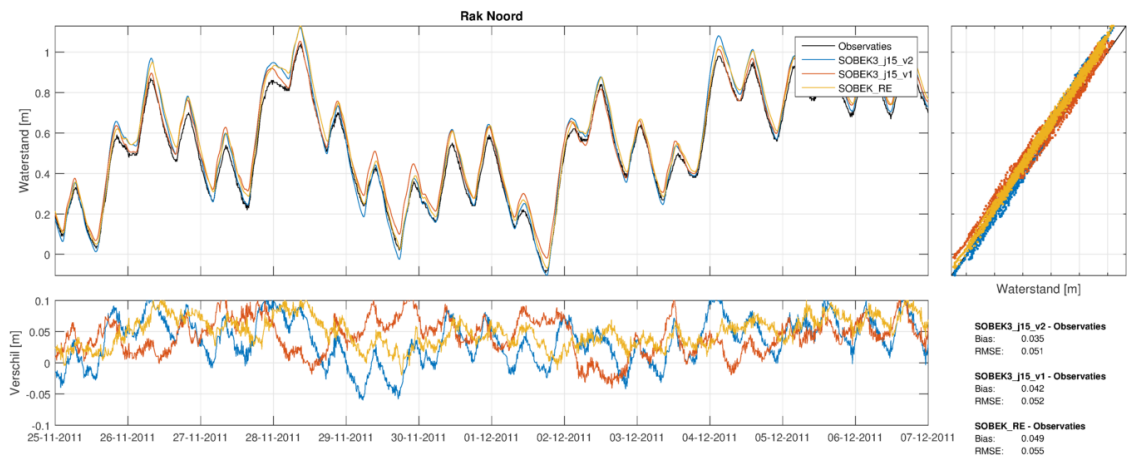
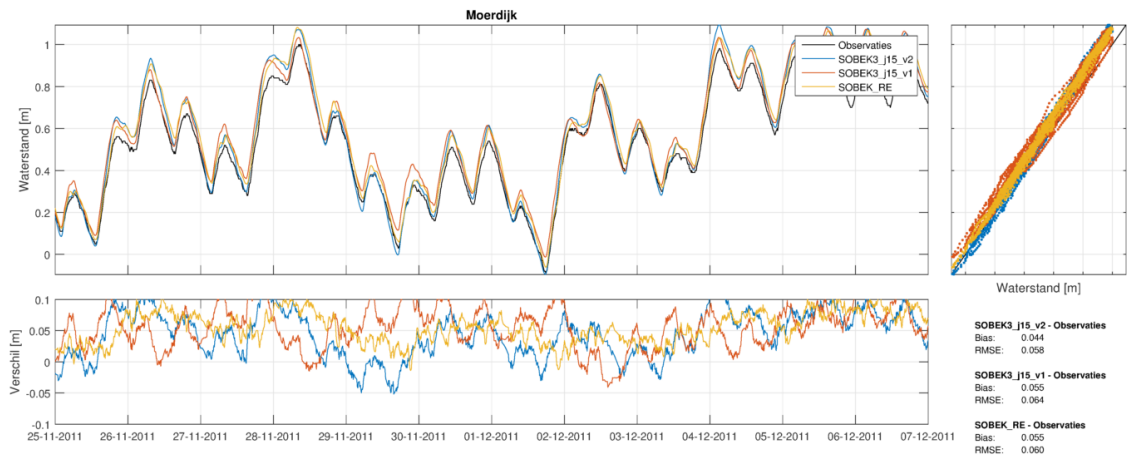


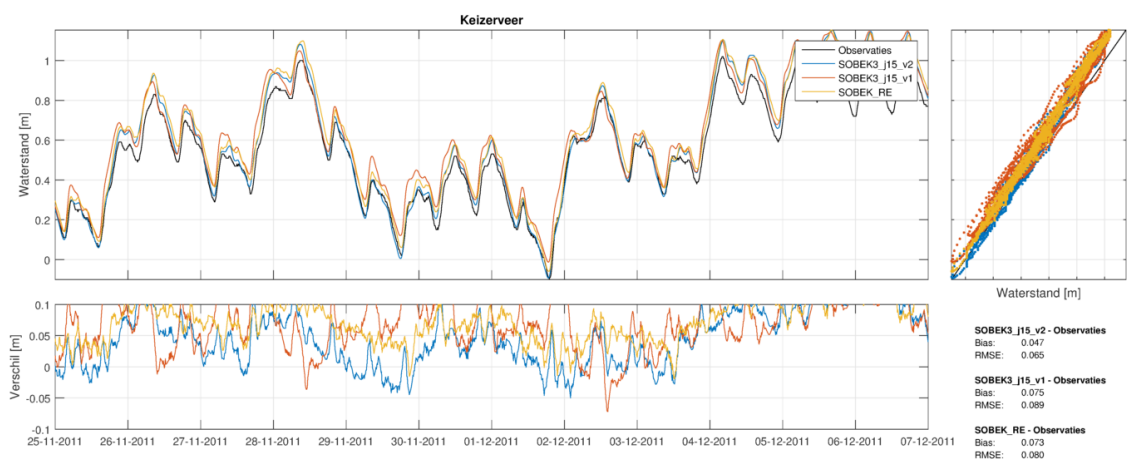
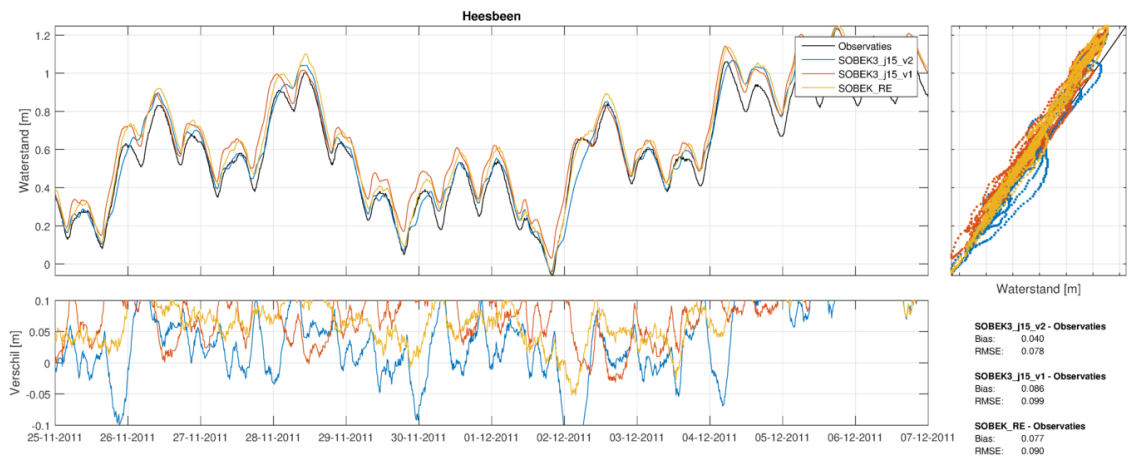
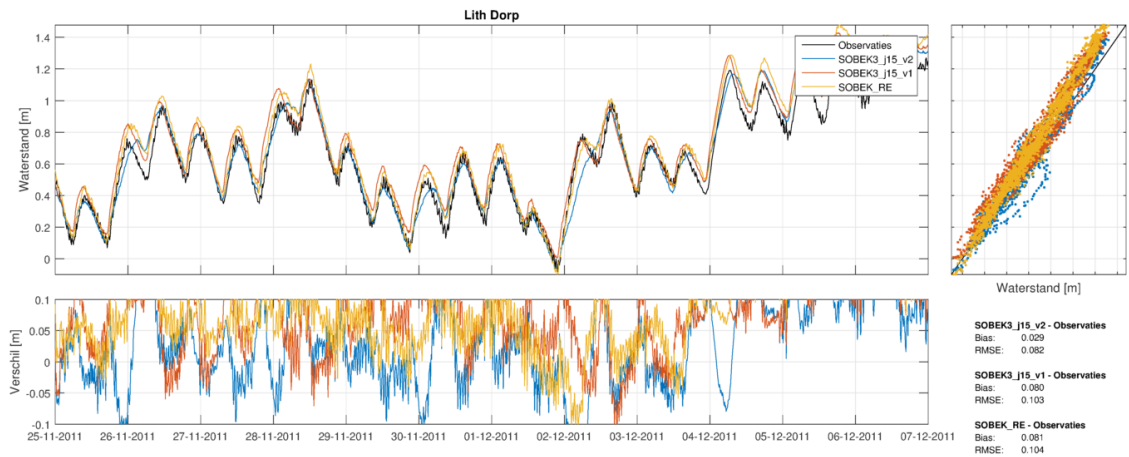
F.1.3 Periode 25 november- 7 december 2011

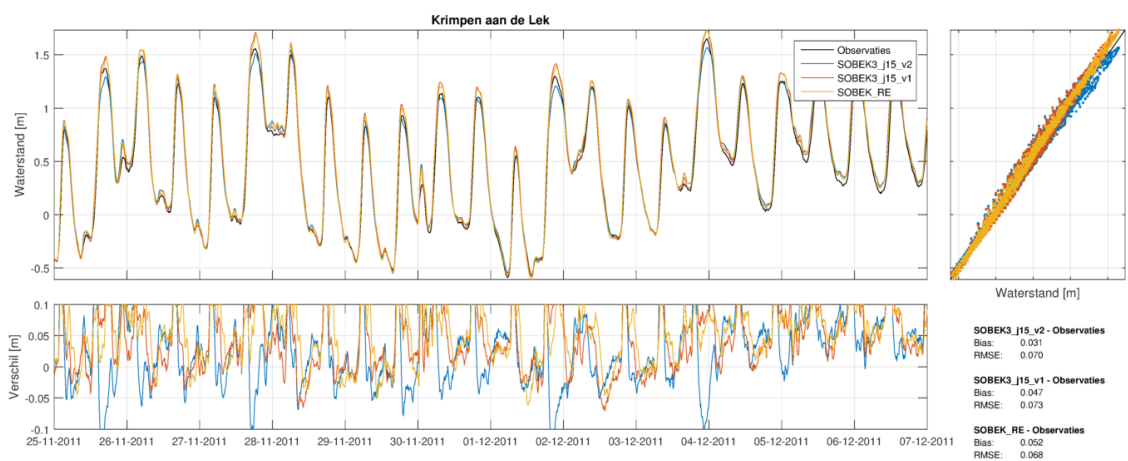
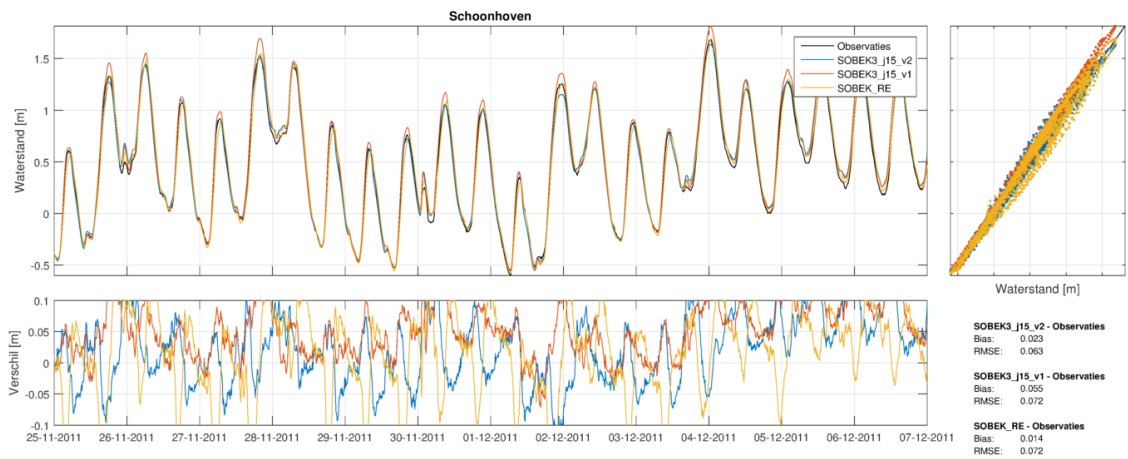
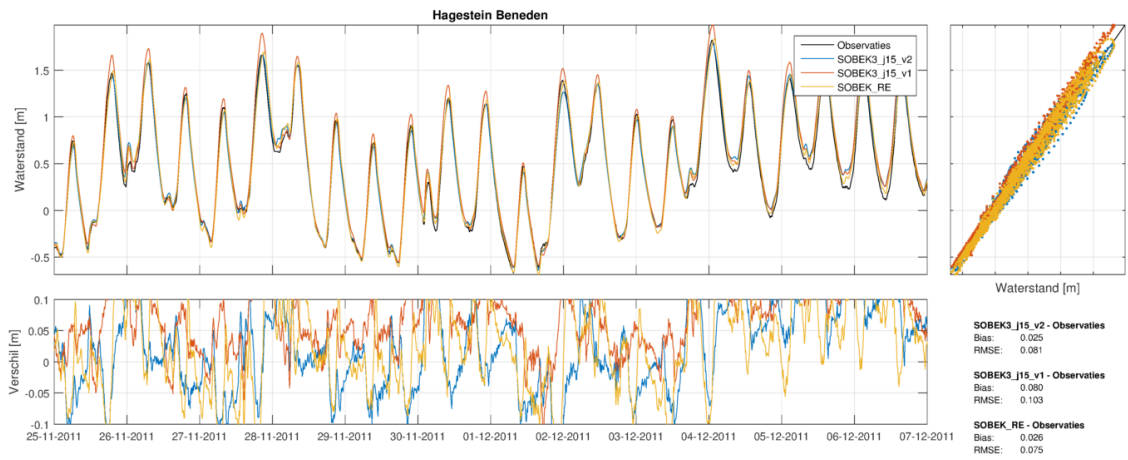


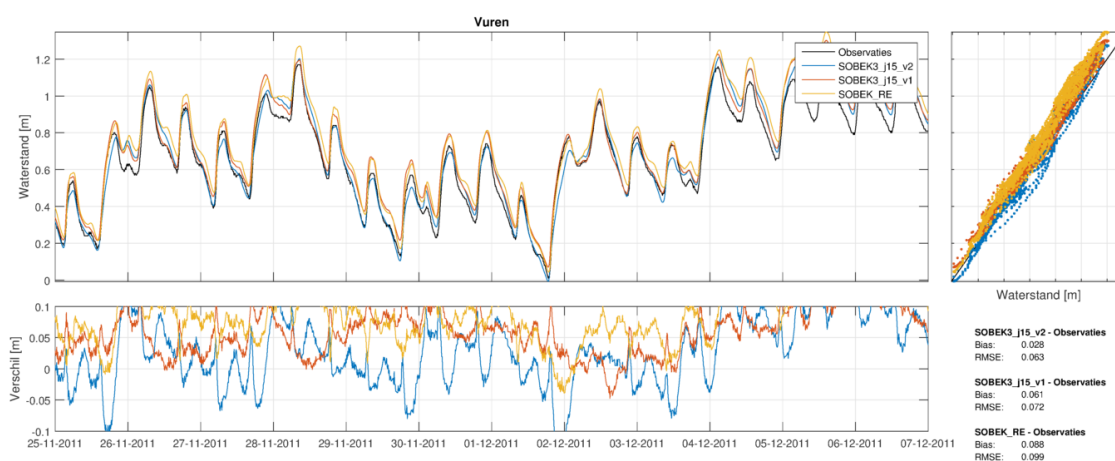
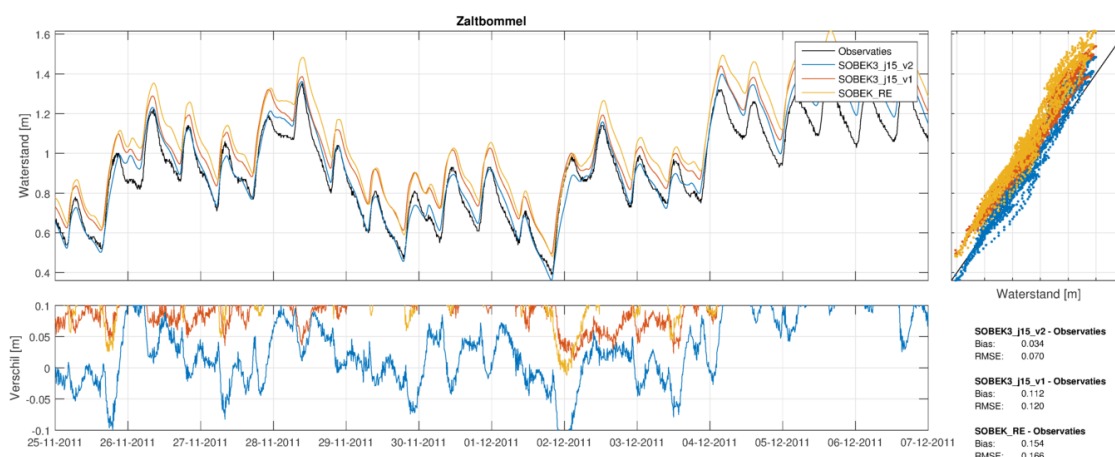
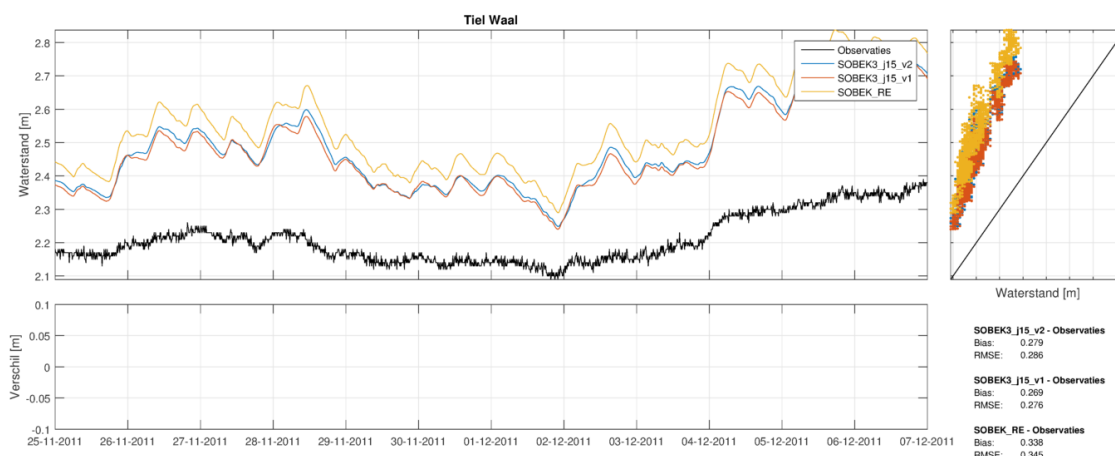


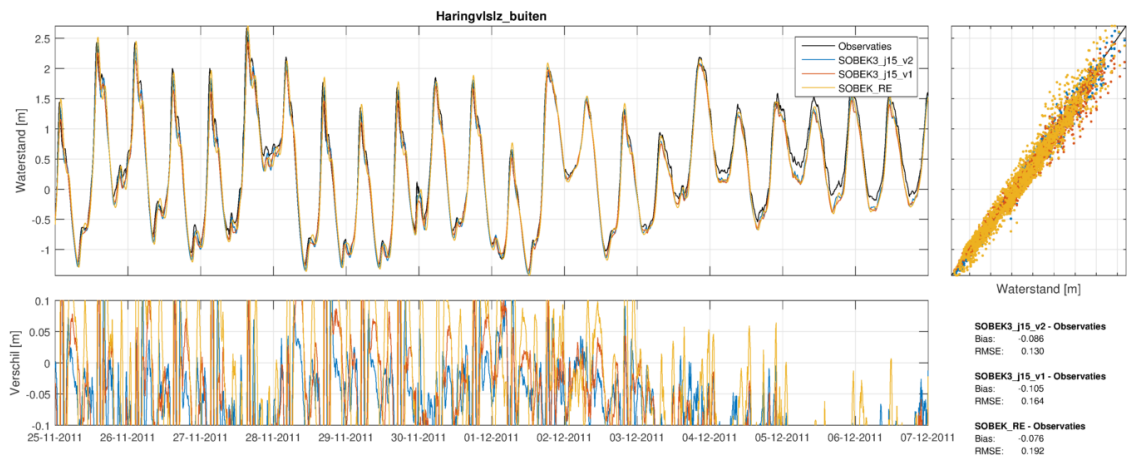
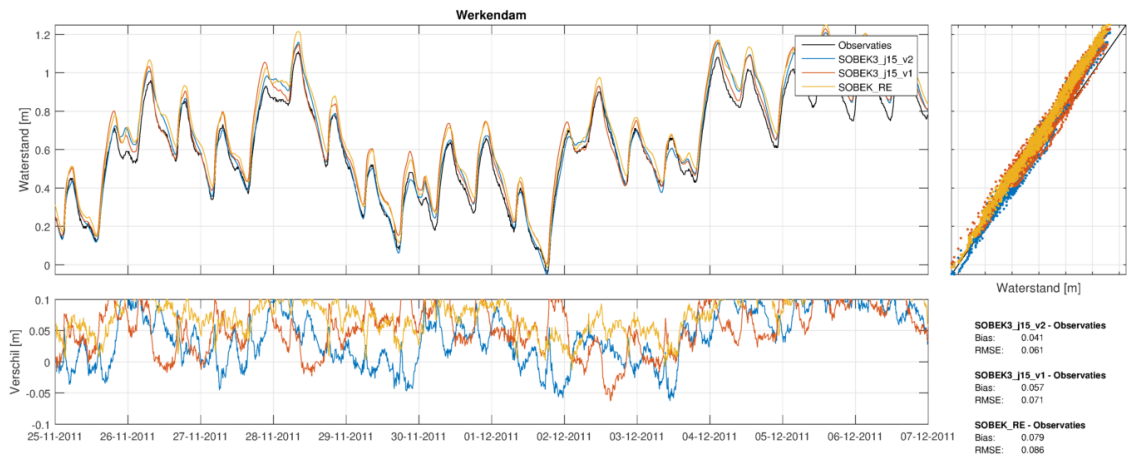




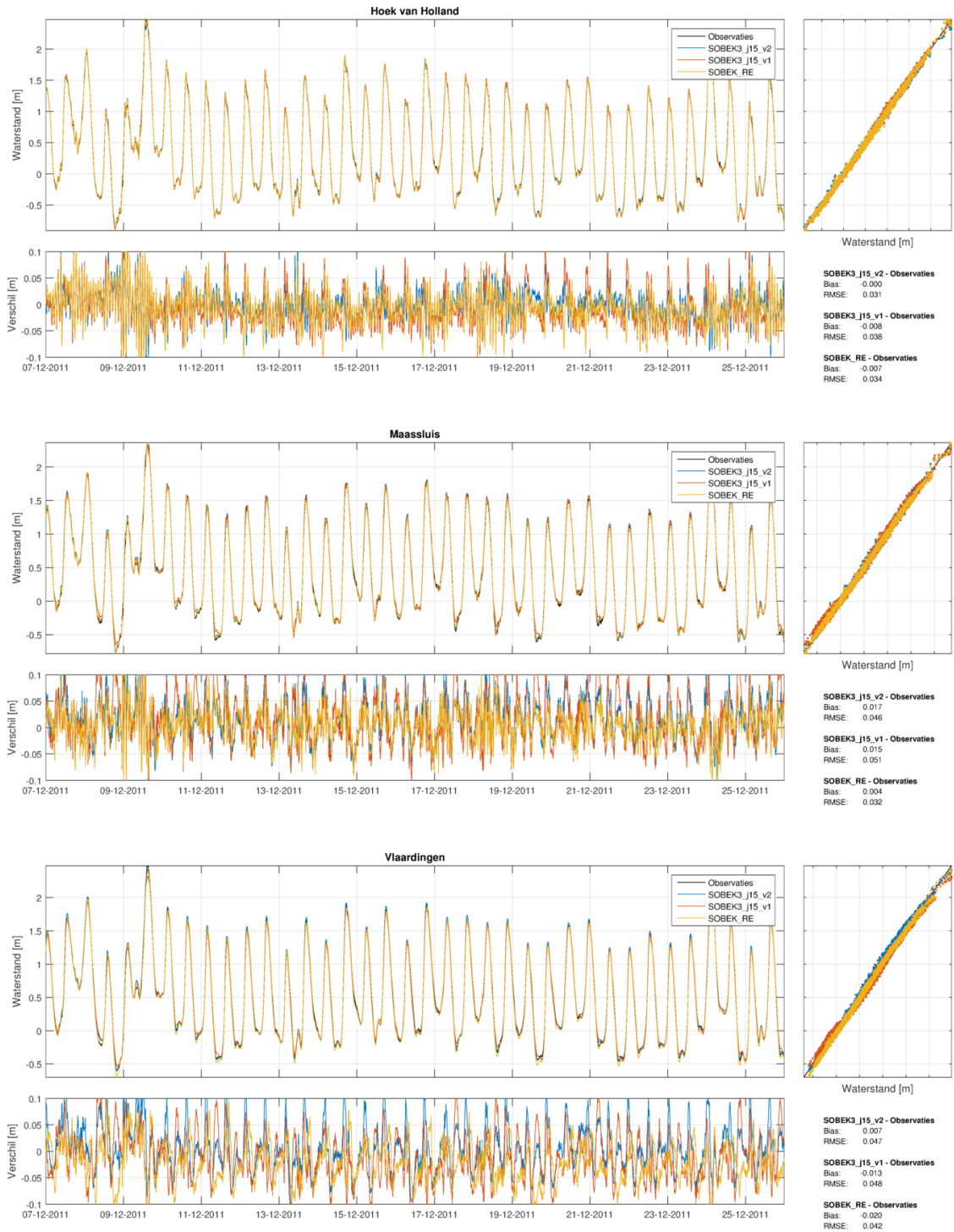


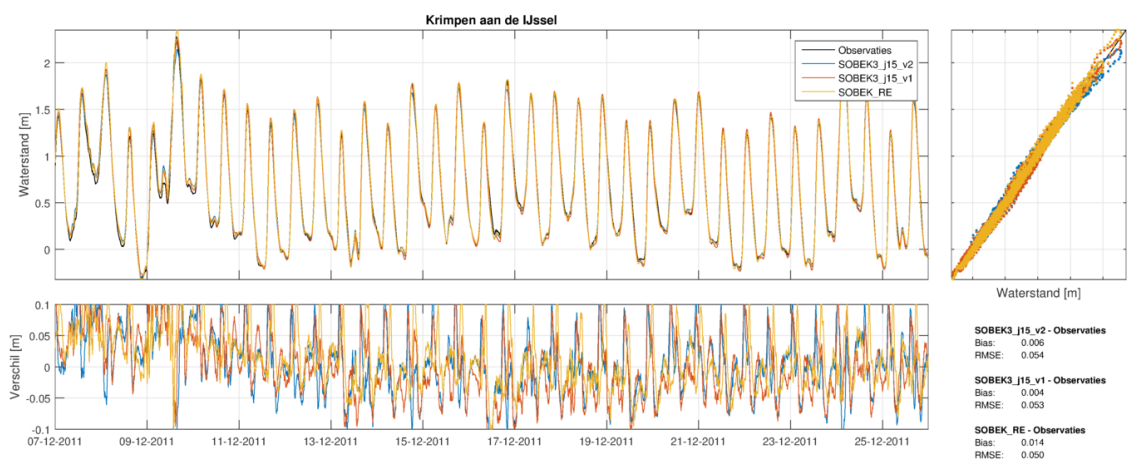
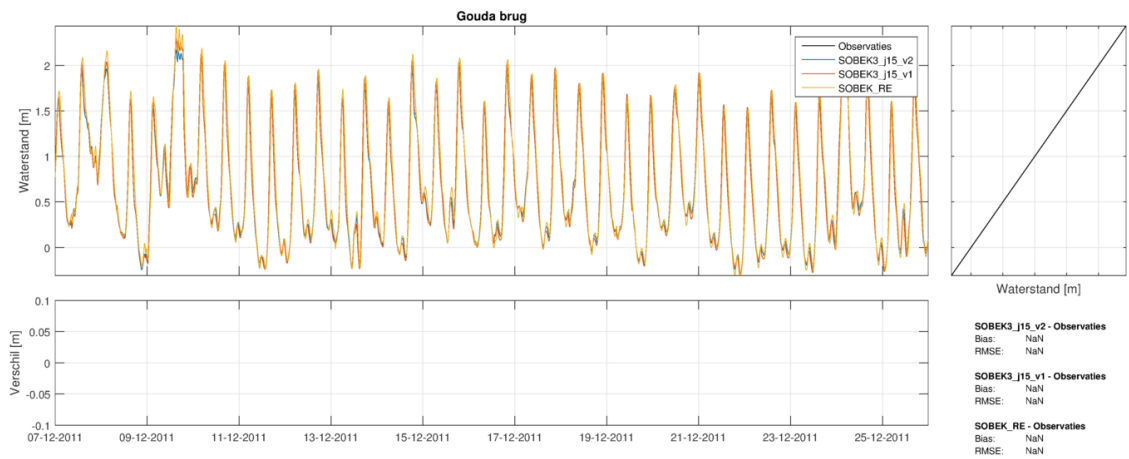
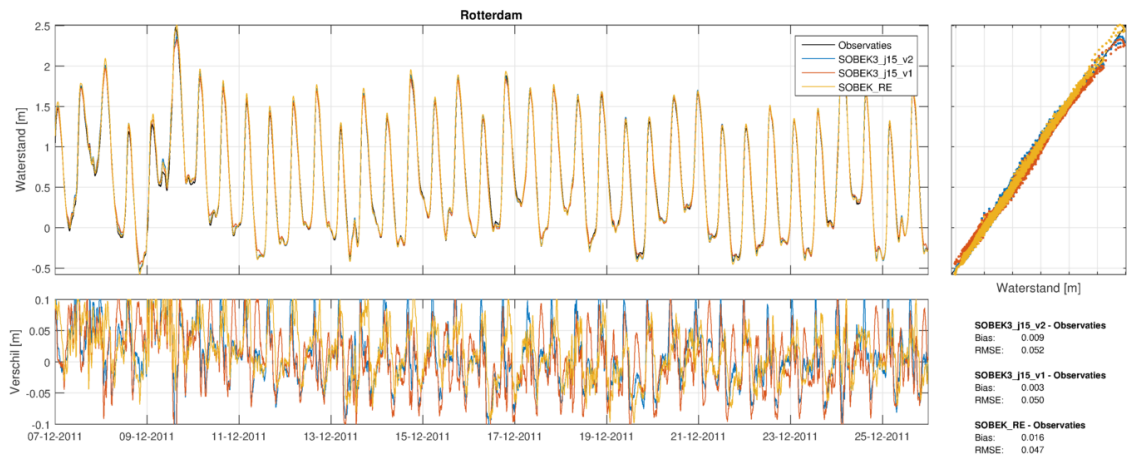


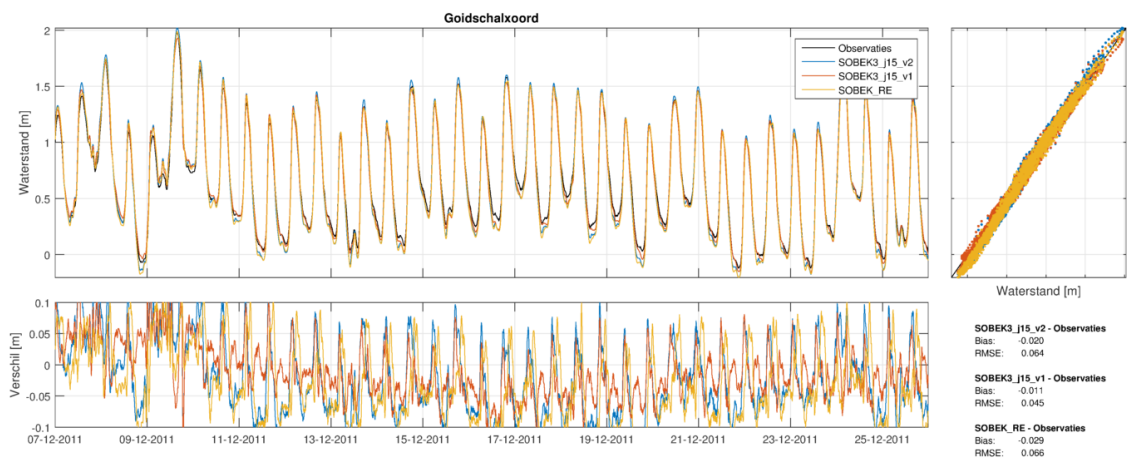
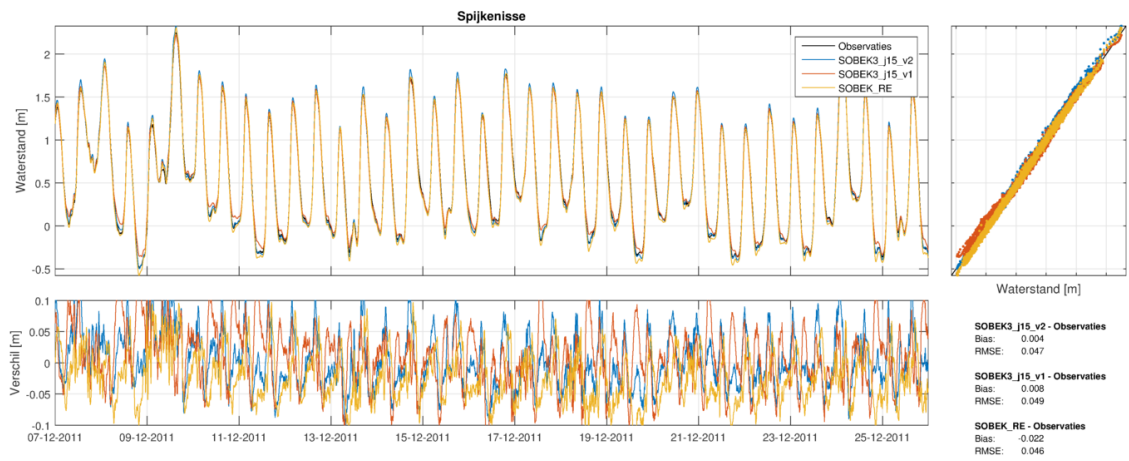
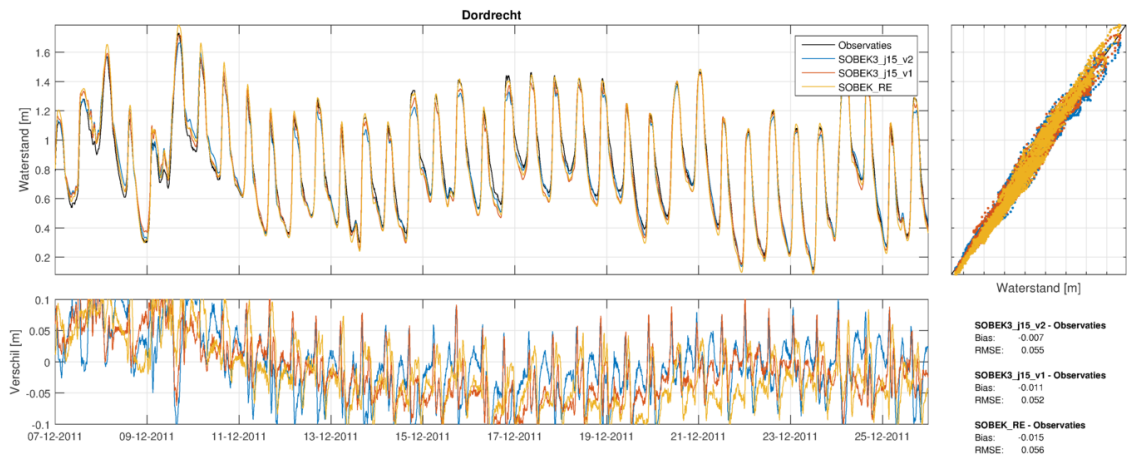


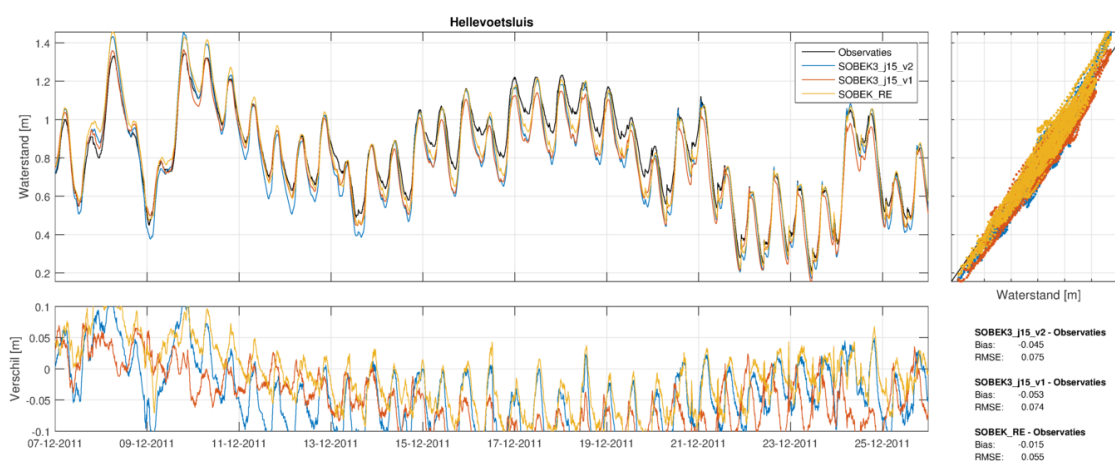
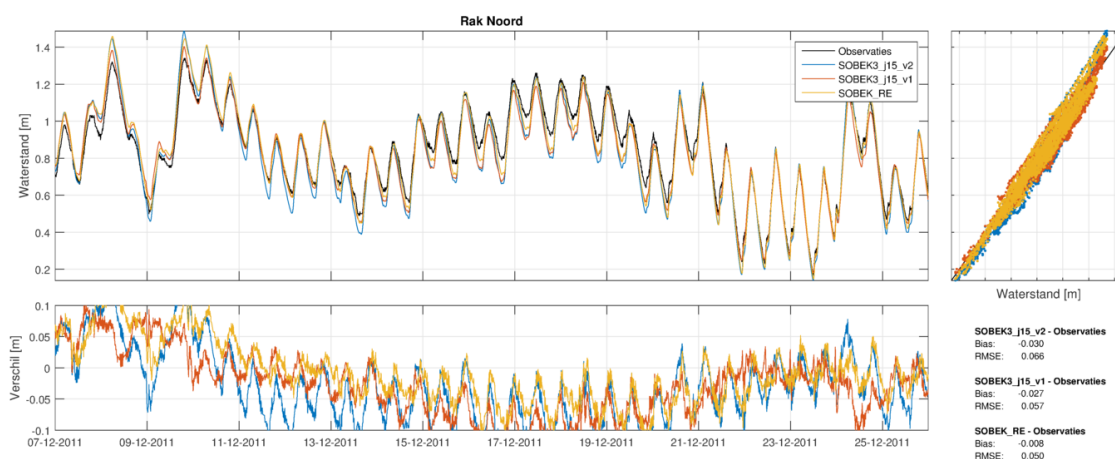
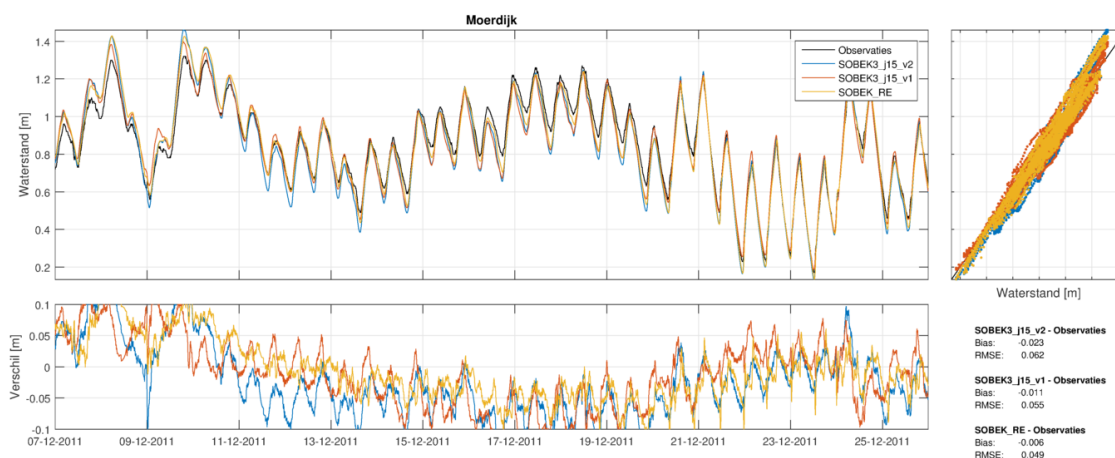


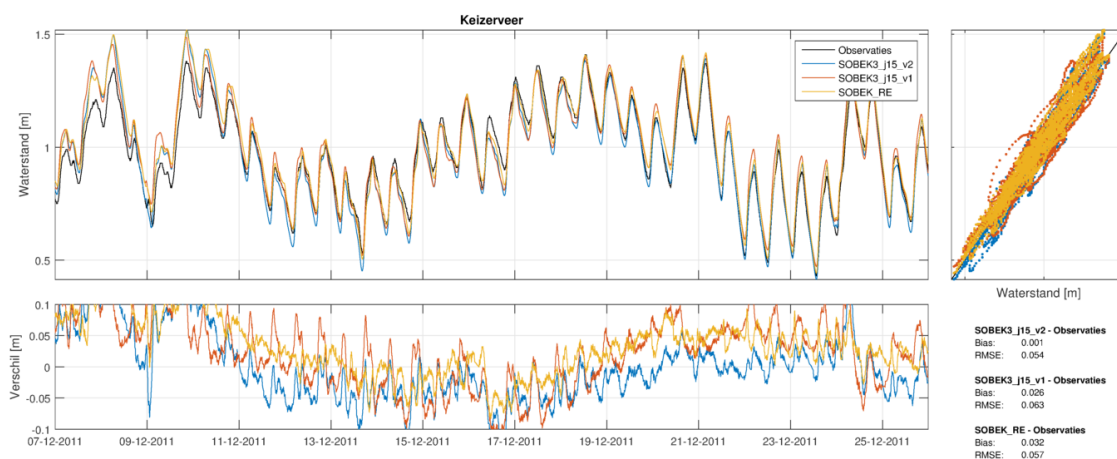
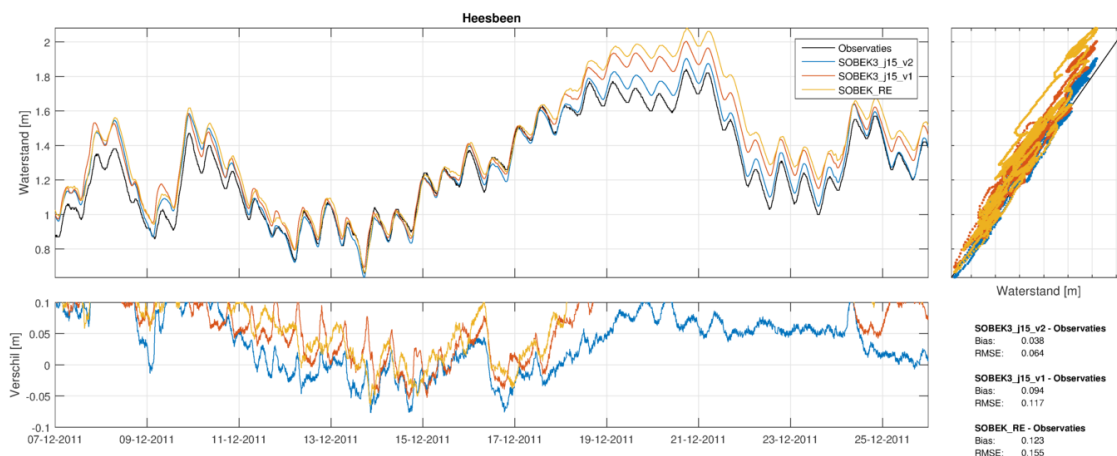
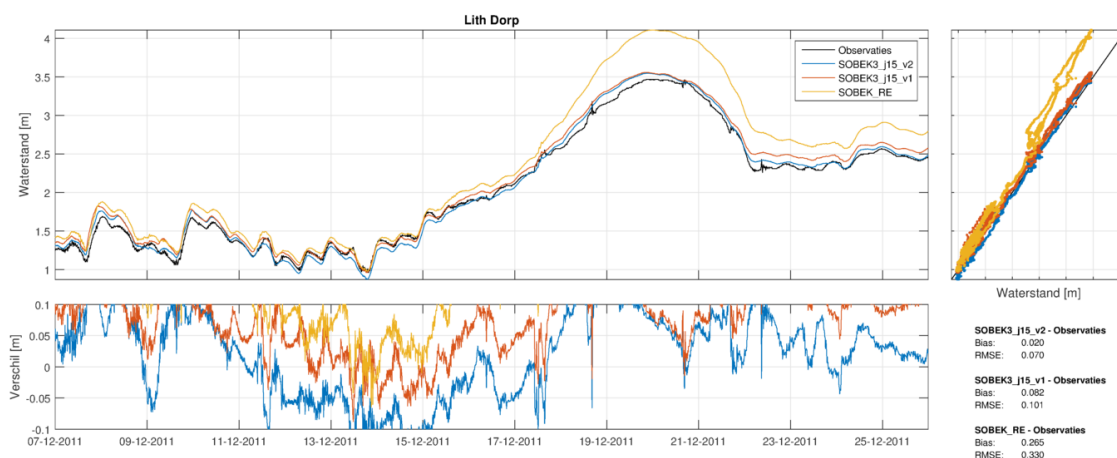
F.1.4 Periode december 2011

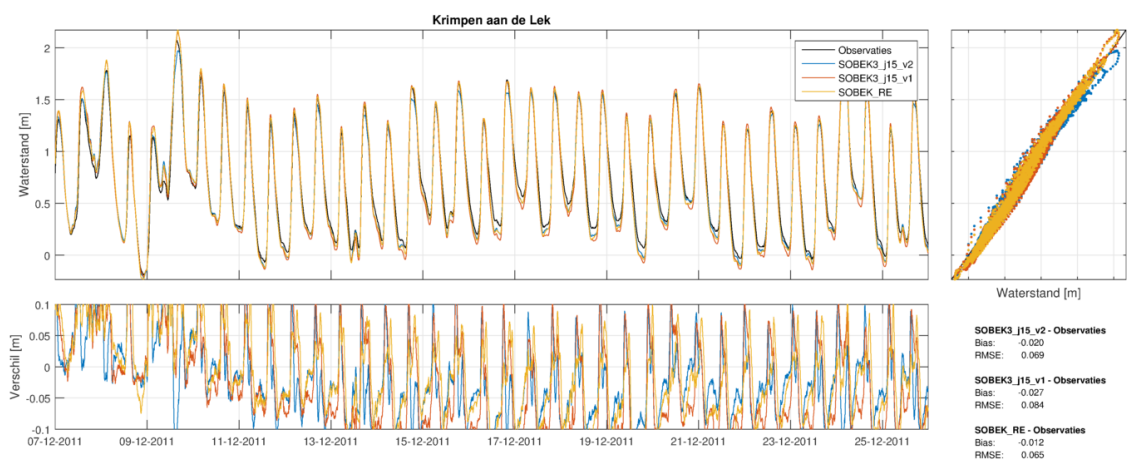
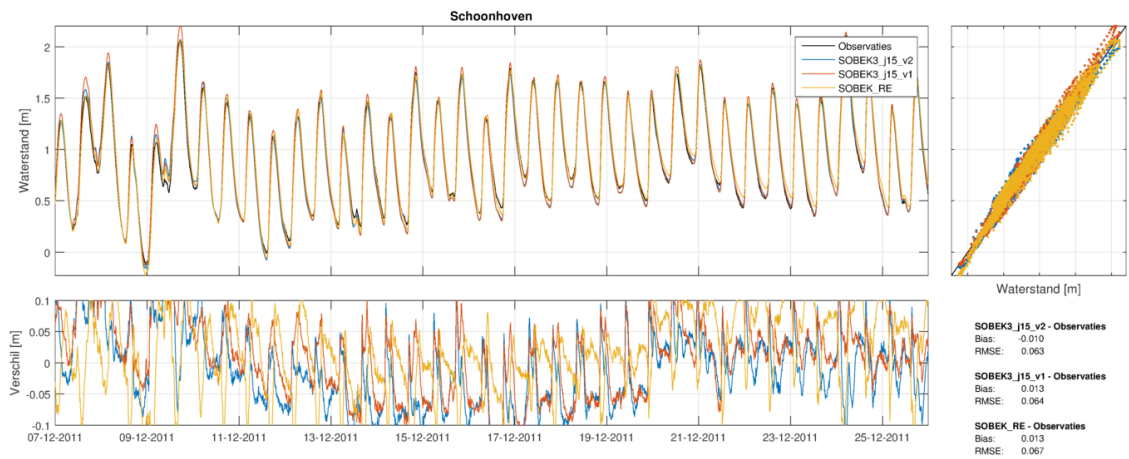
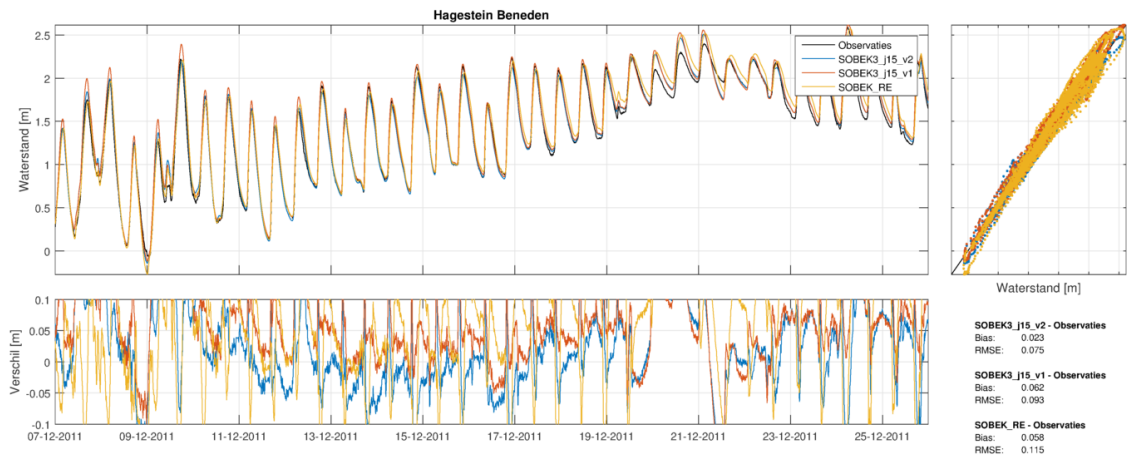


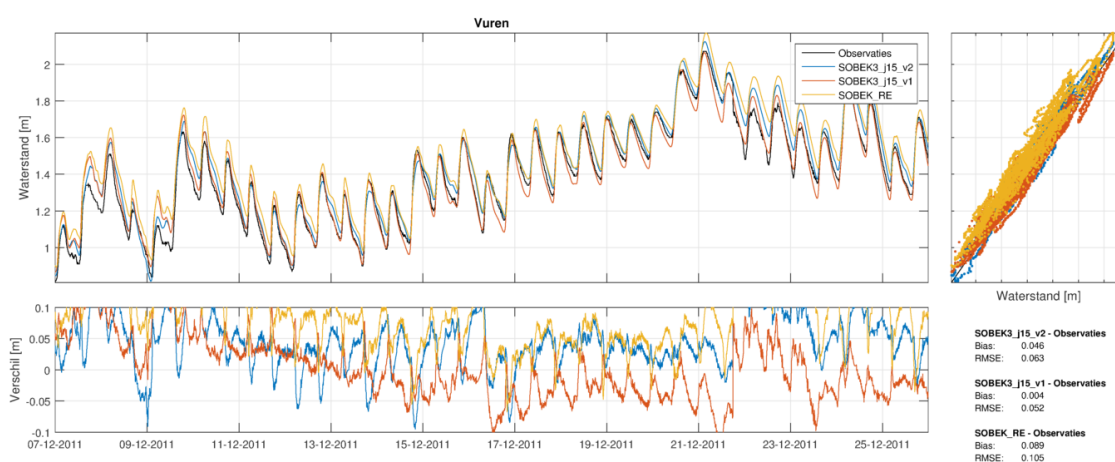
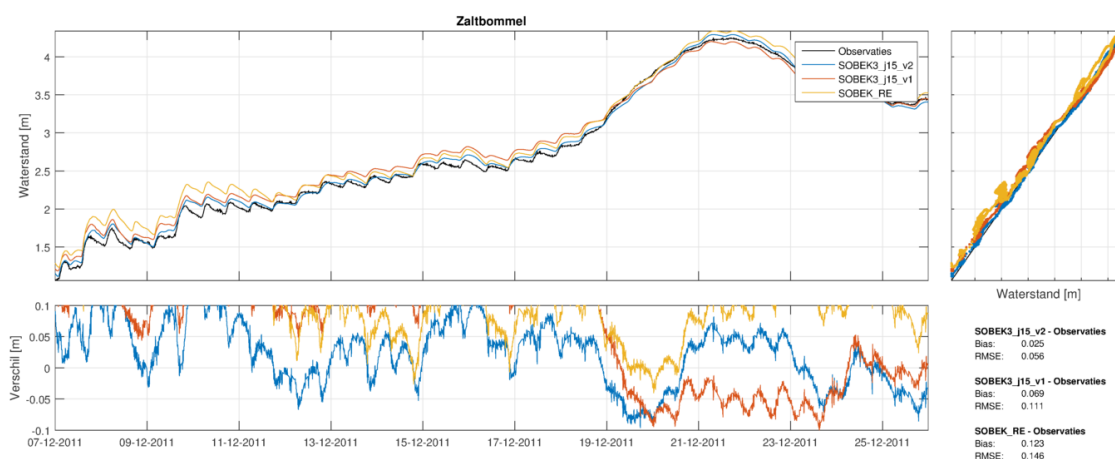
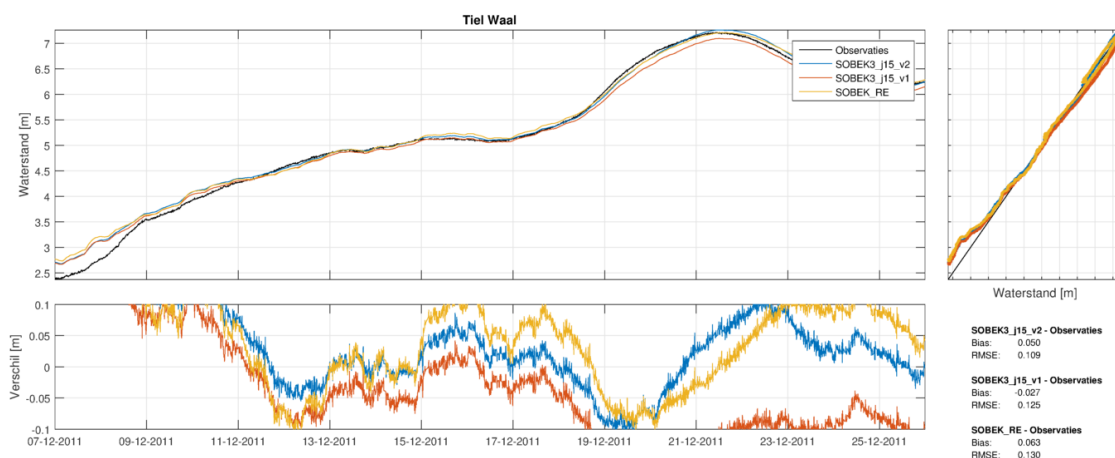


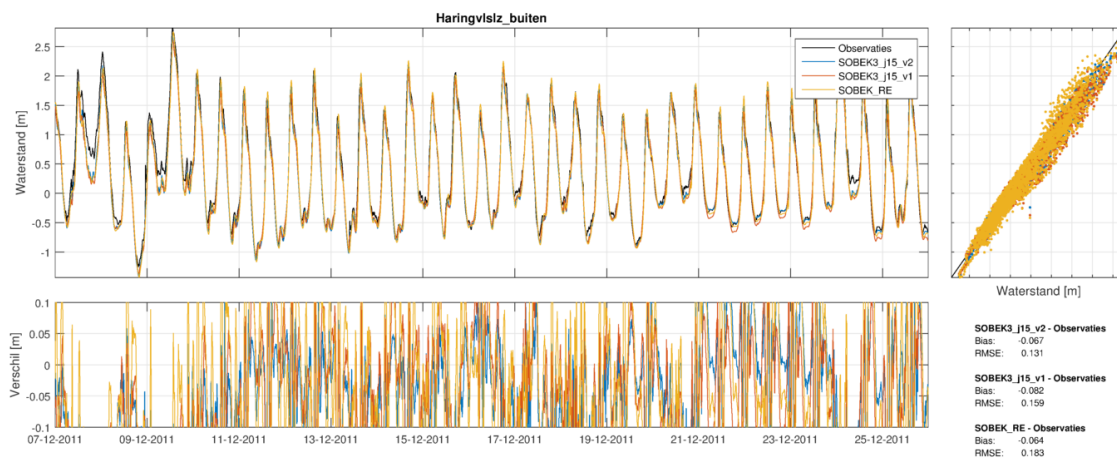
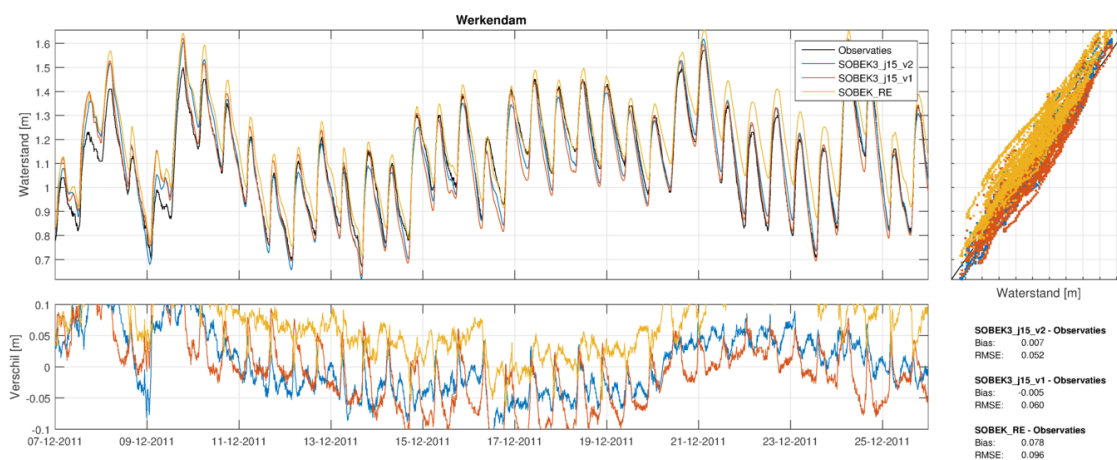






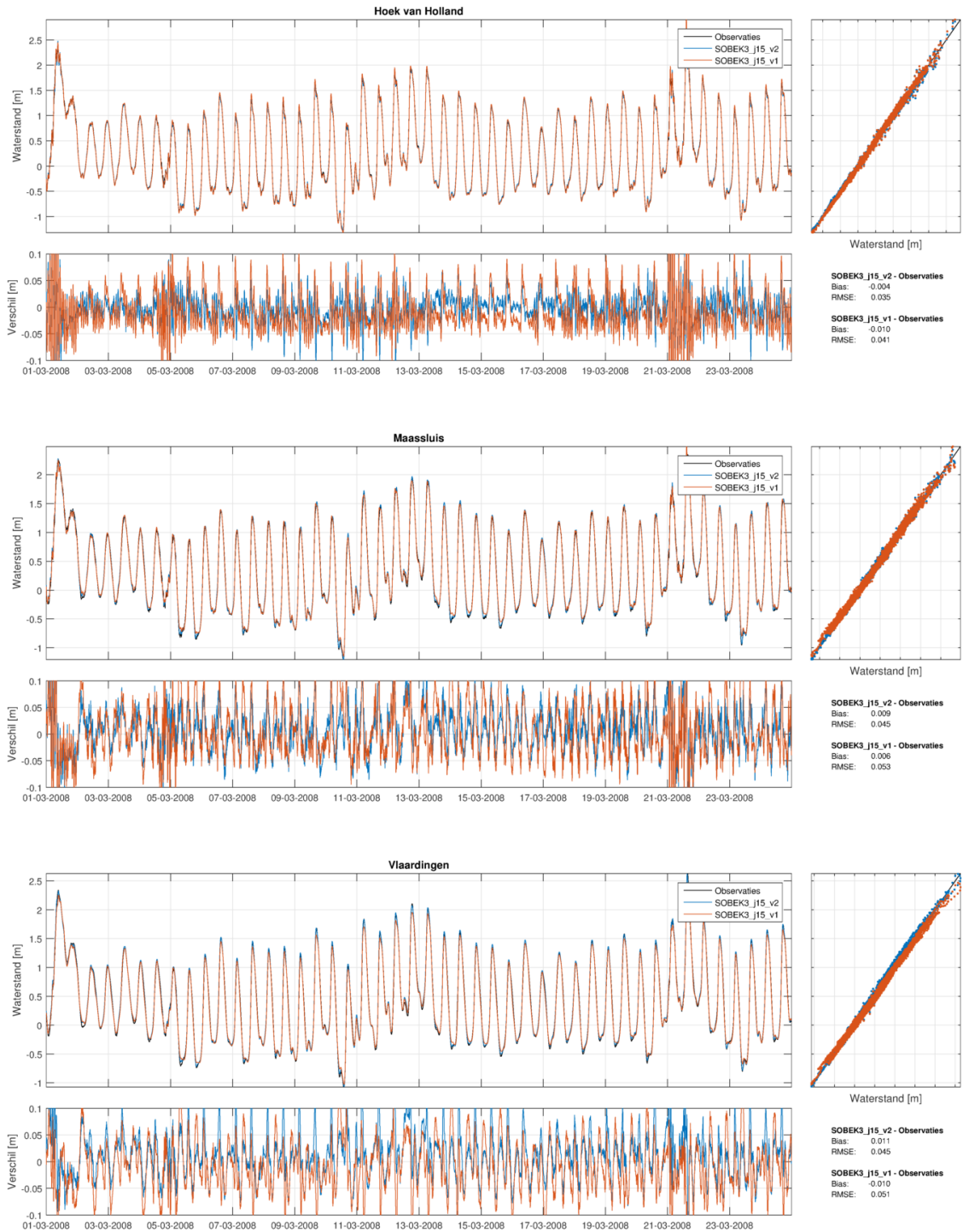


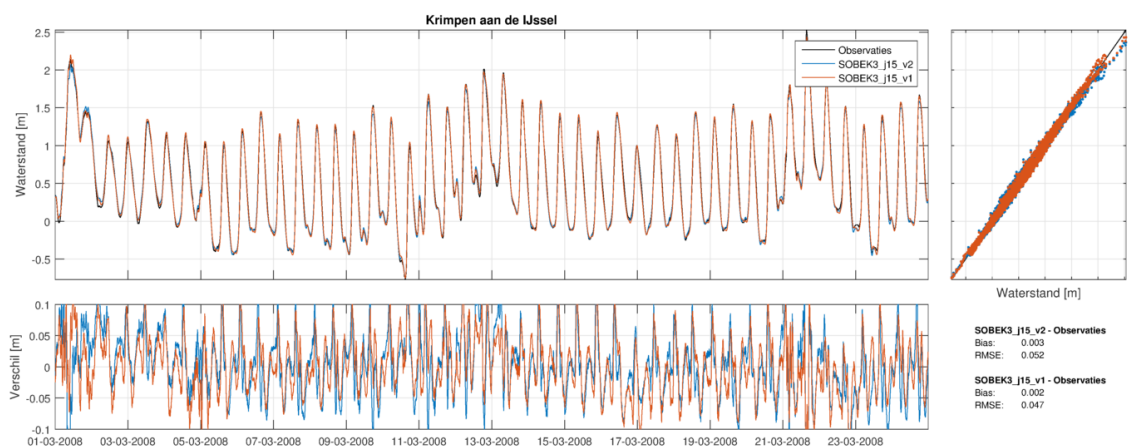
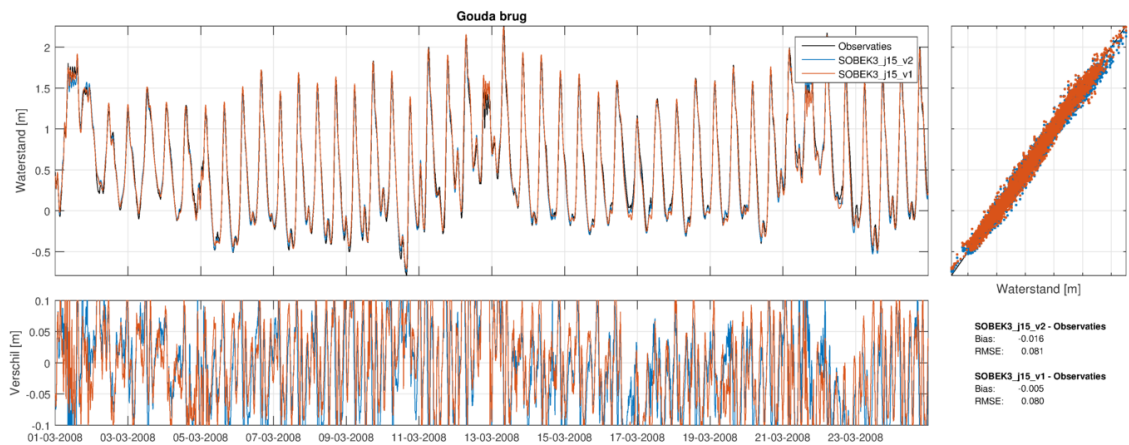
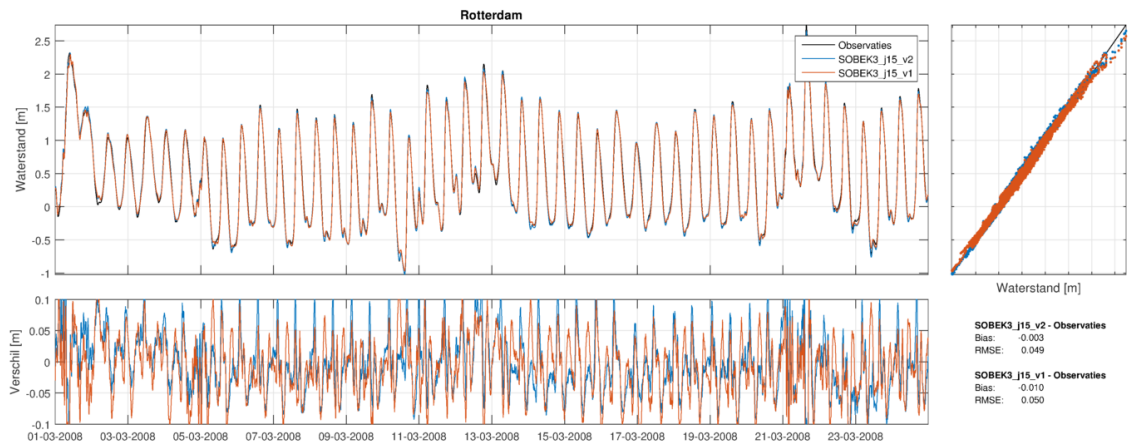


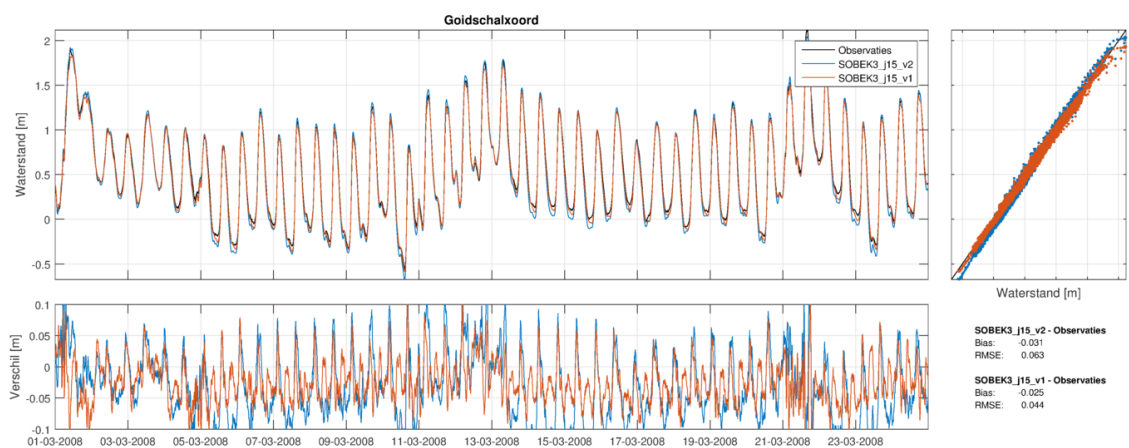
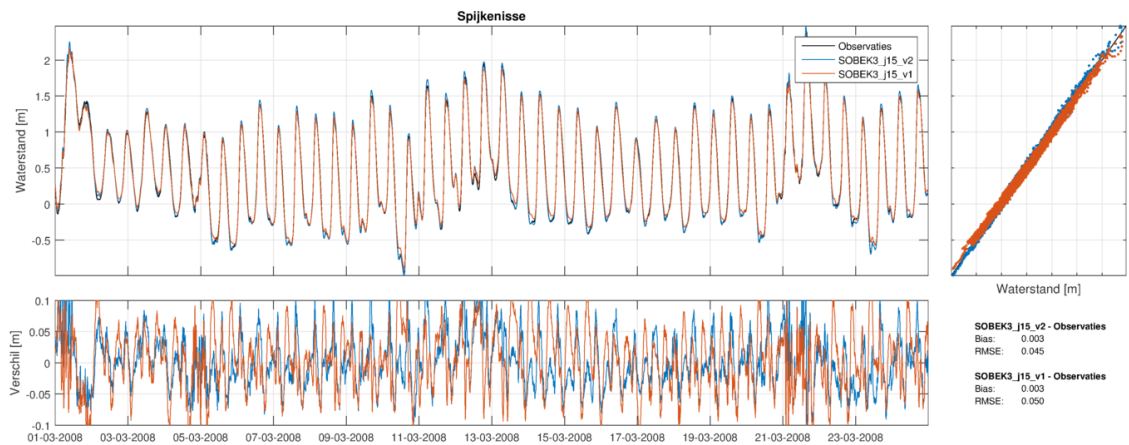
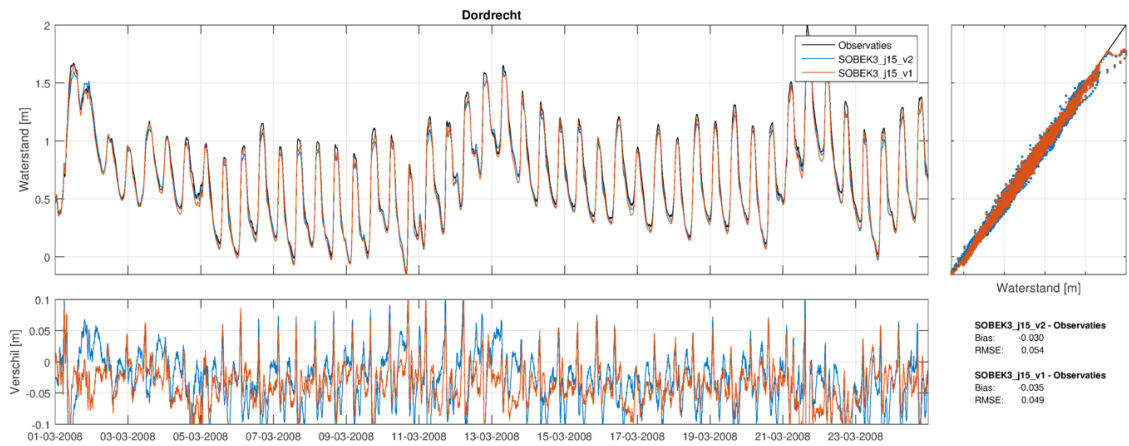


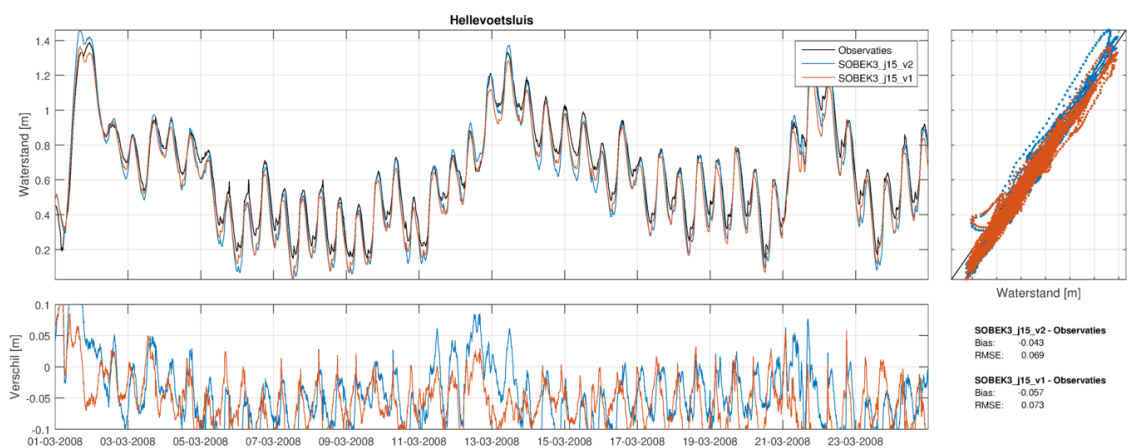
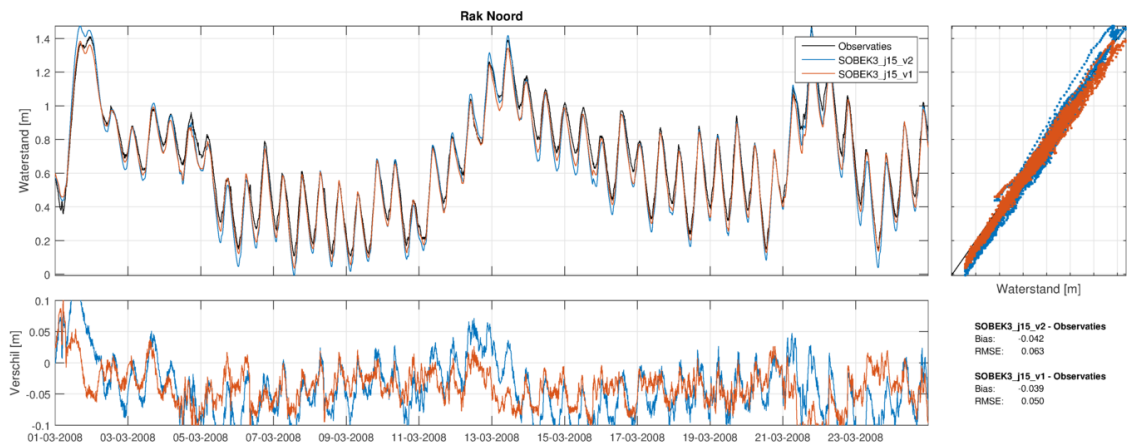
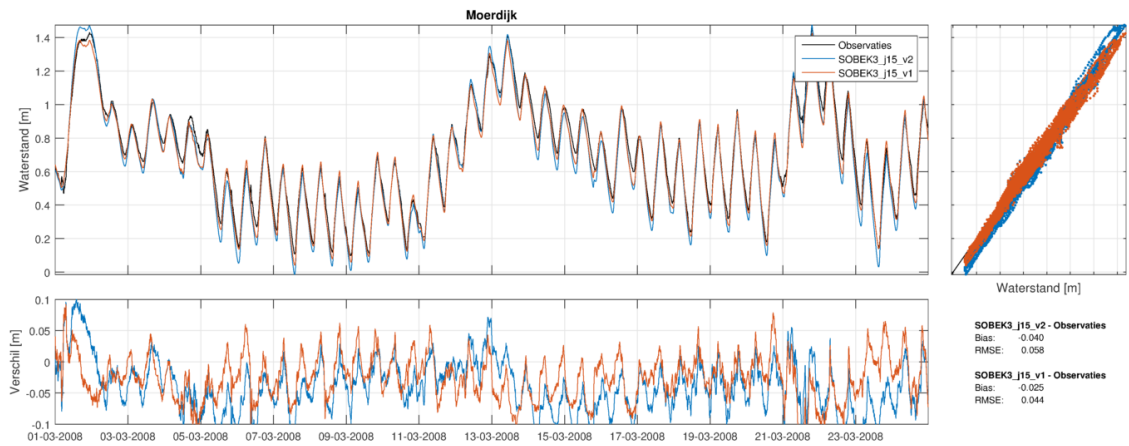
F.2 Verificatie

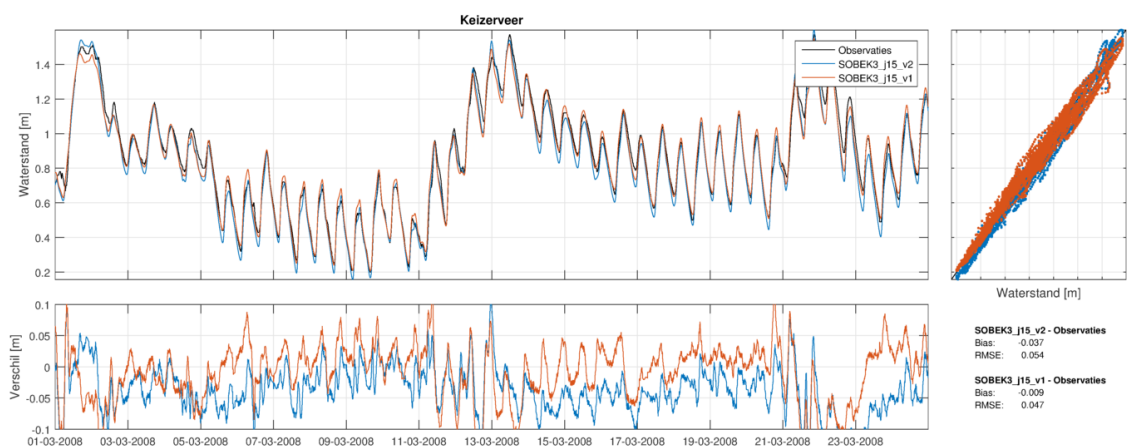
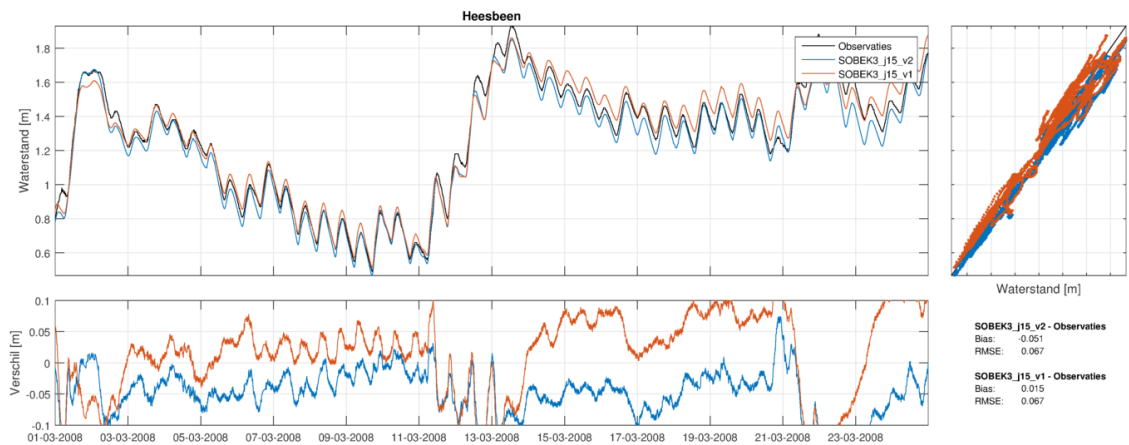
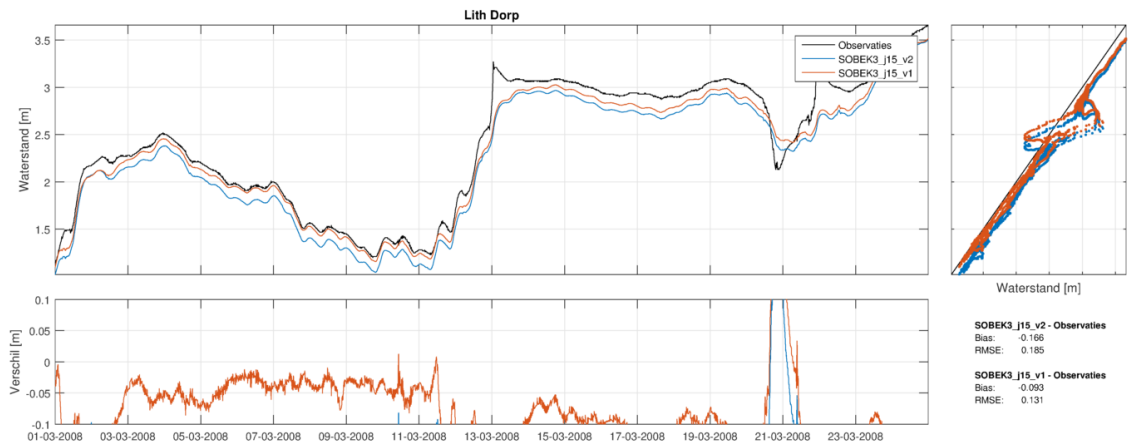
F.2.1 Maart 2008

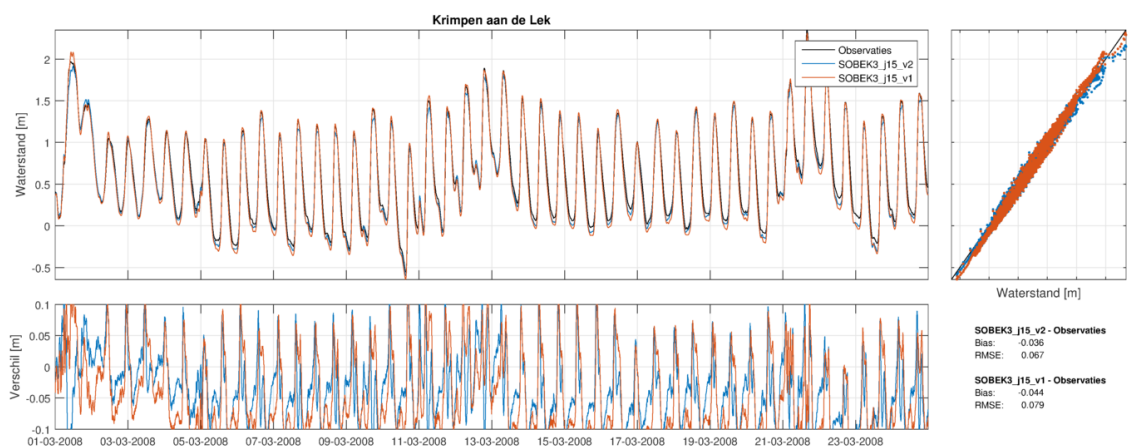
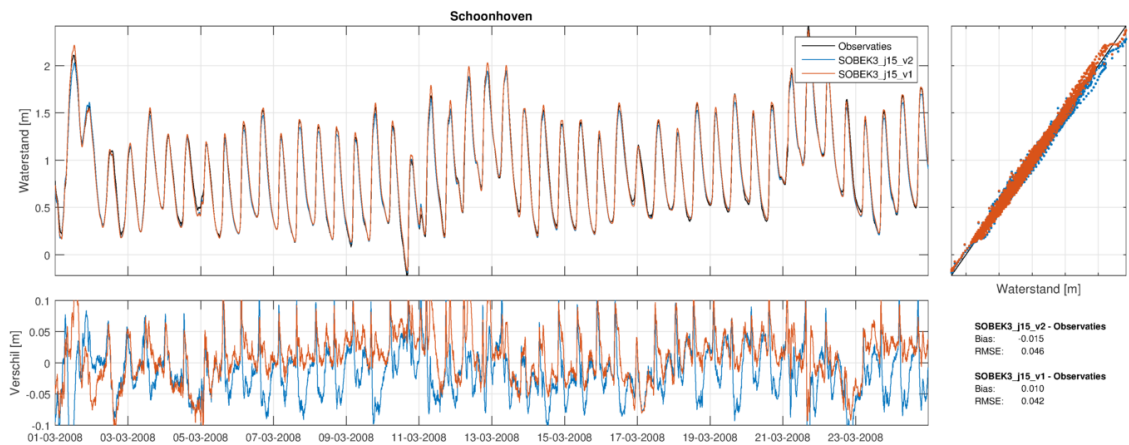
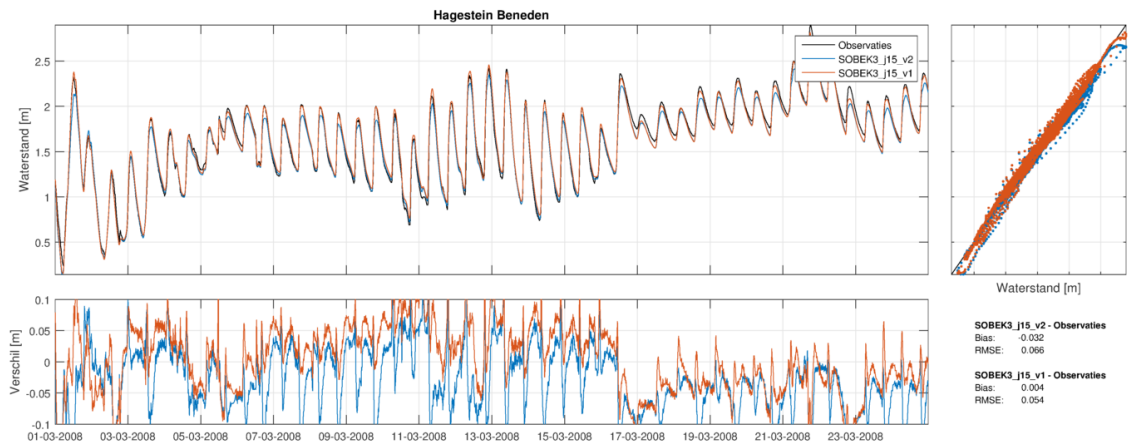


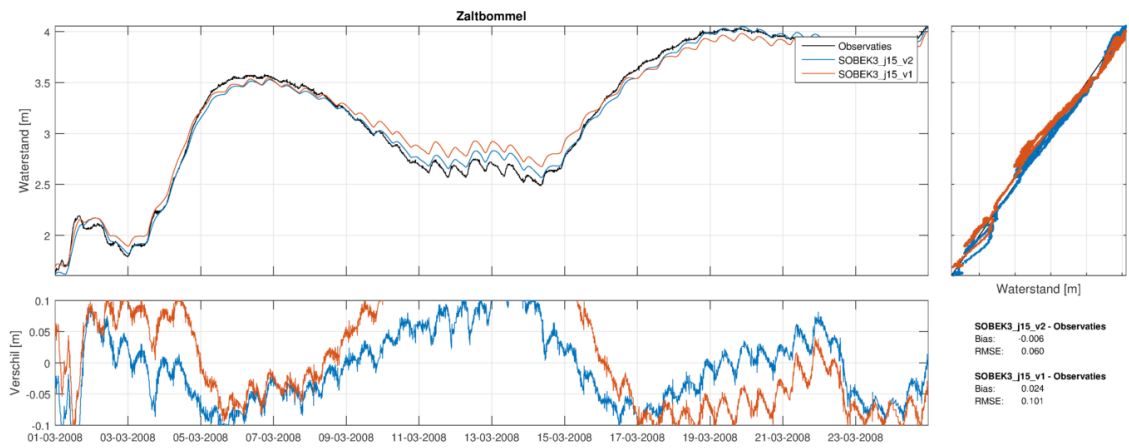
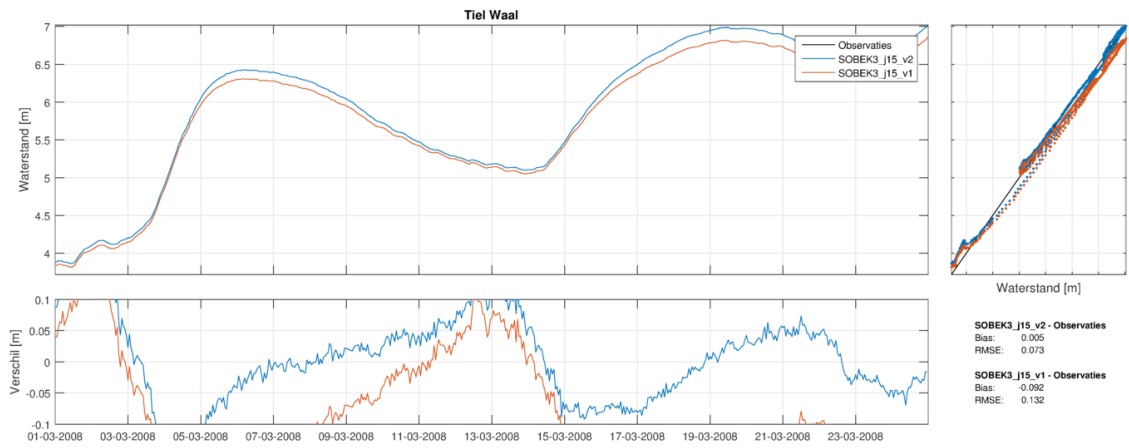


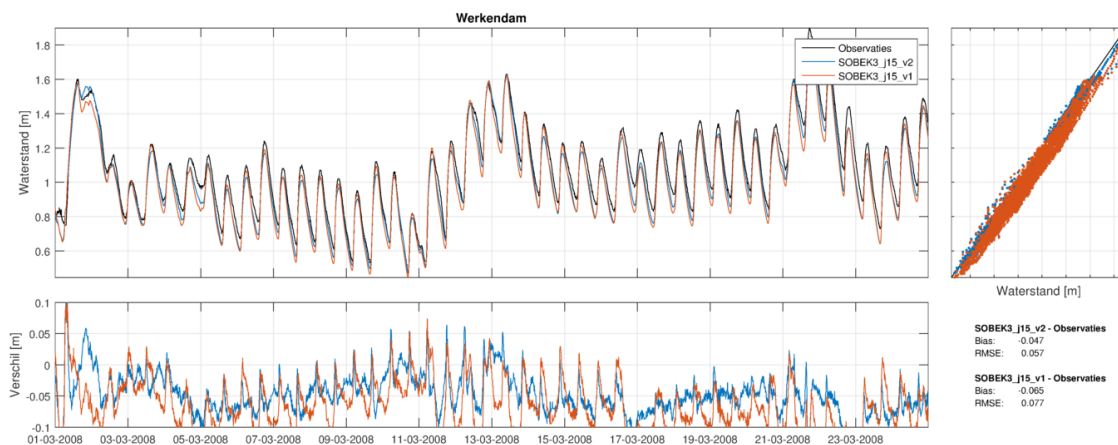
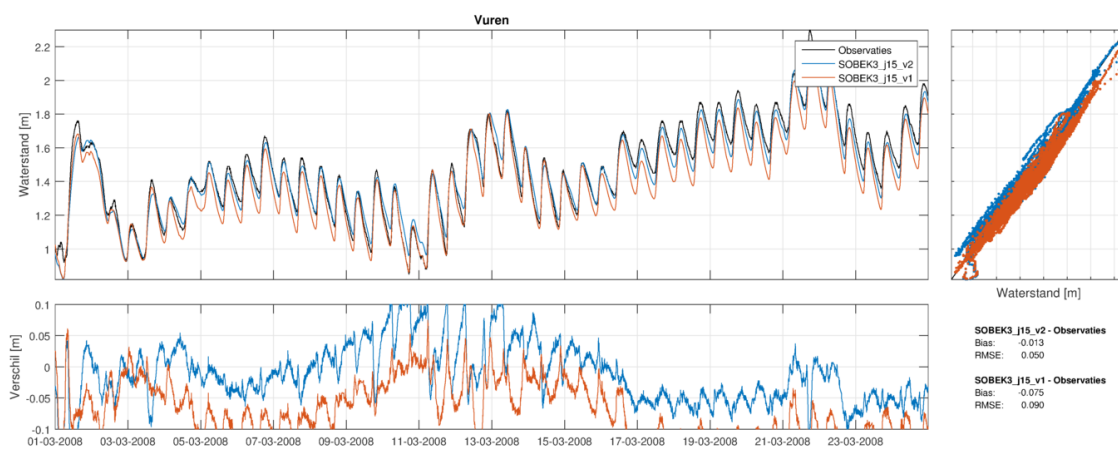




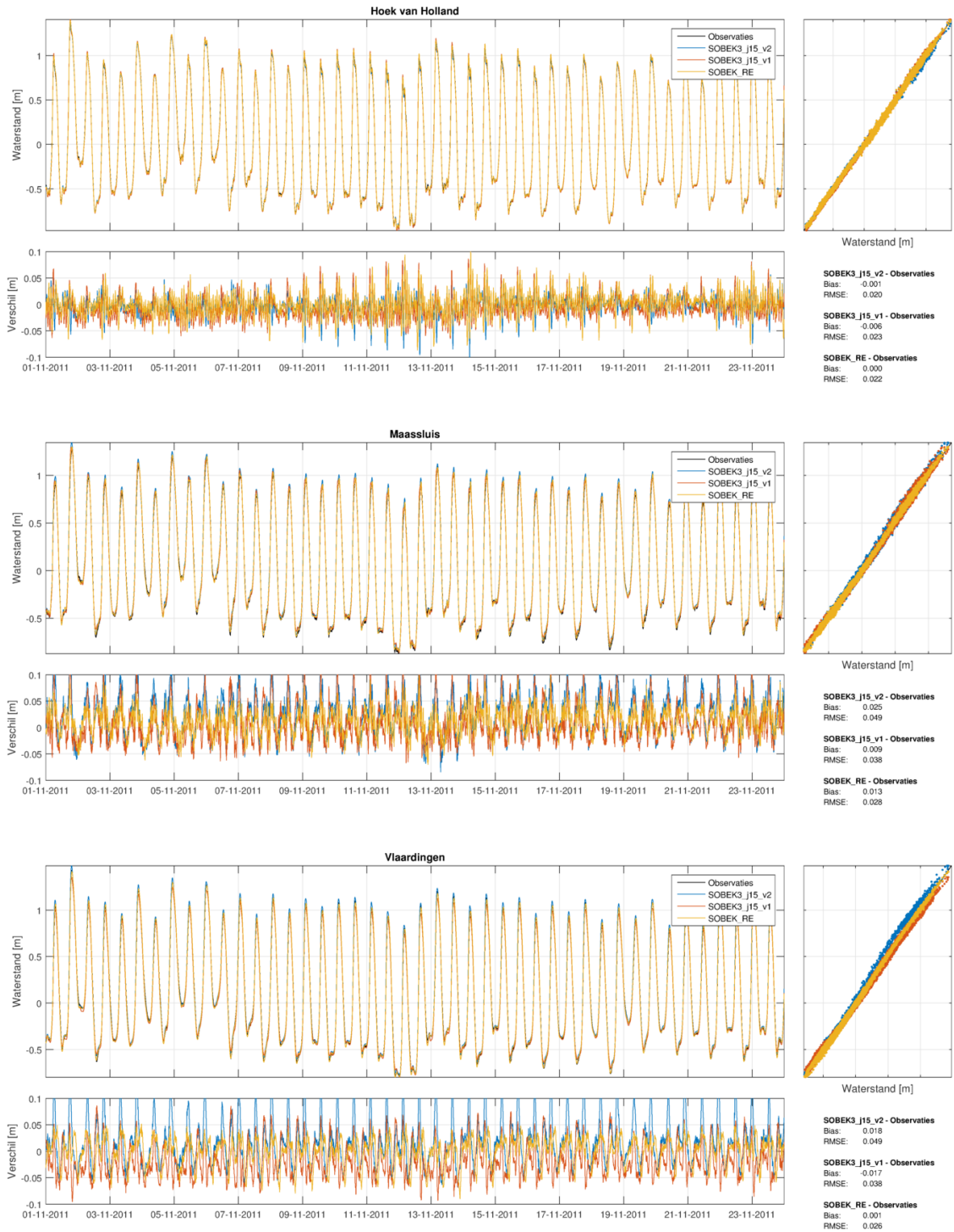


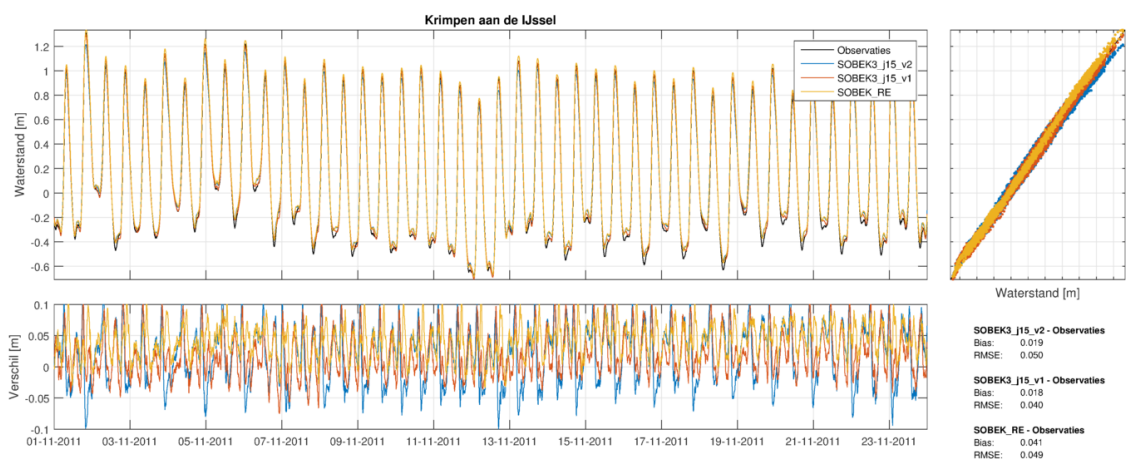
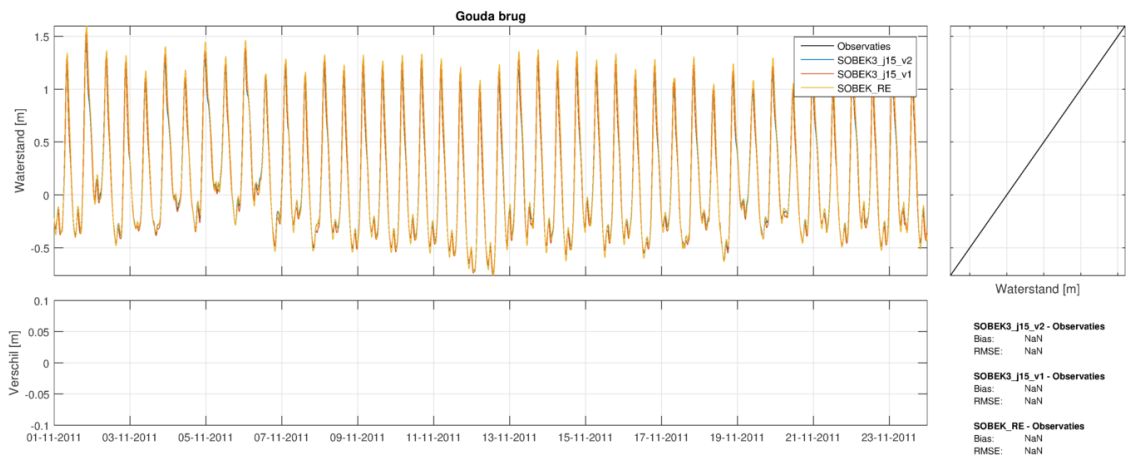
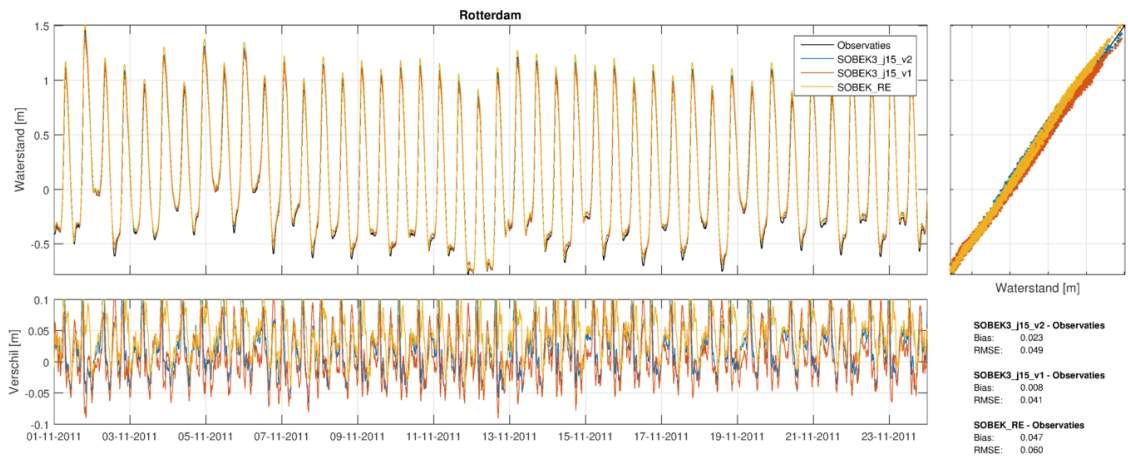


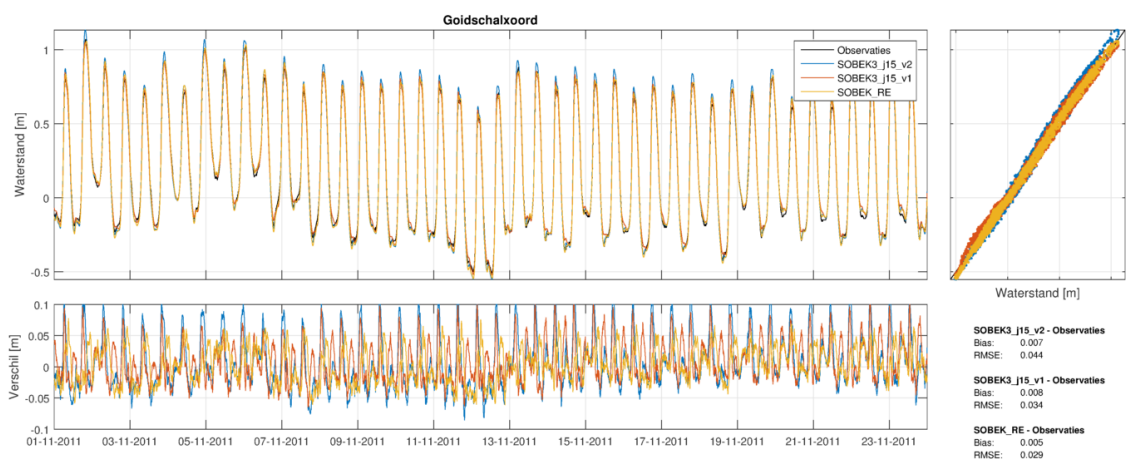
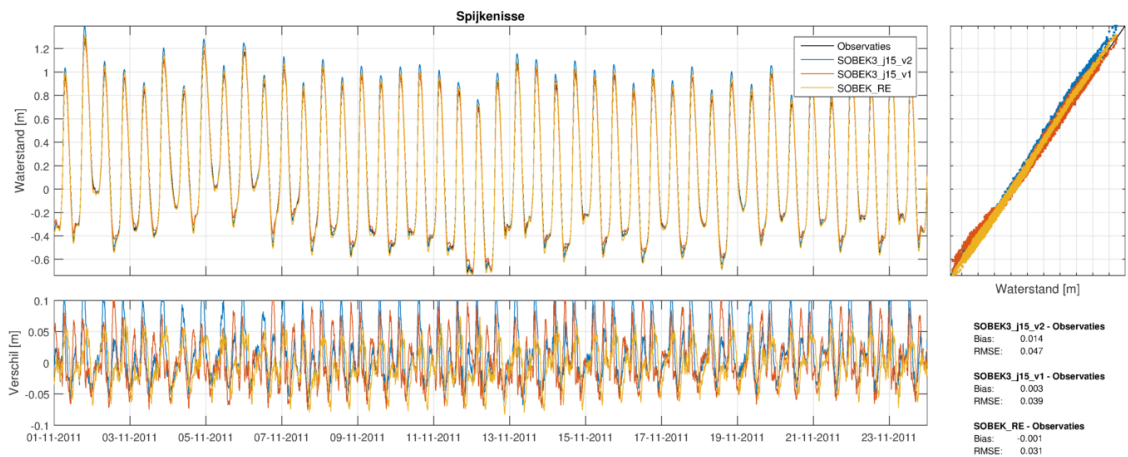
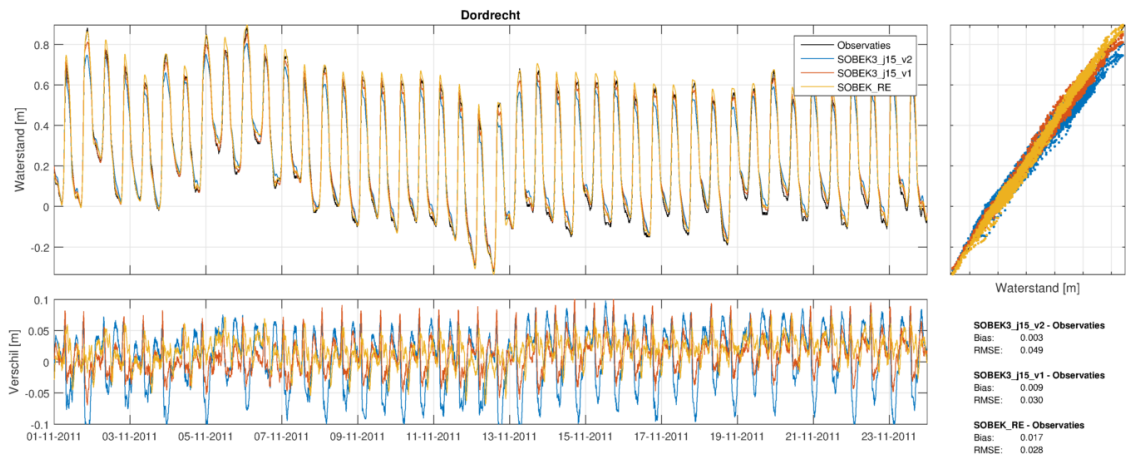


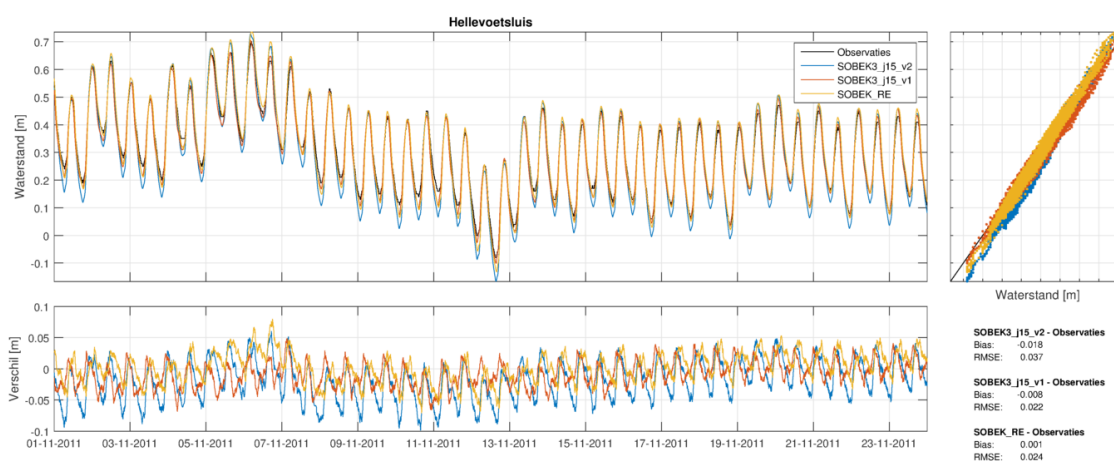
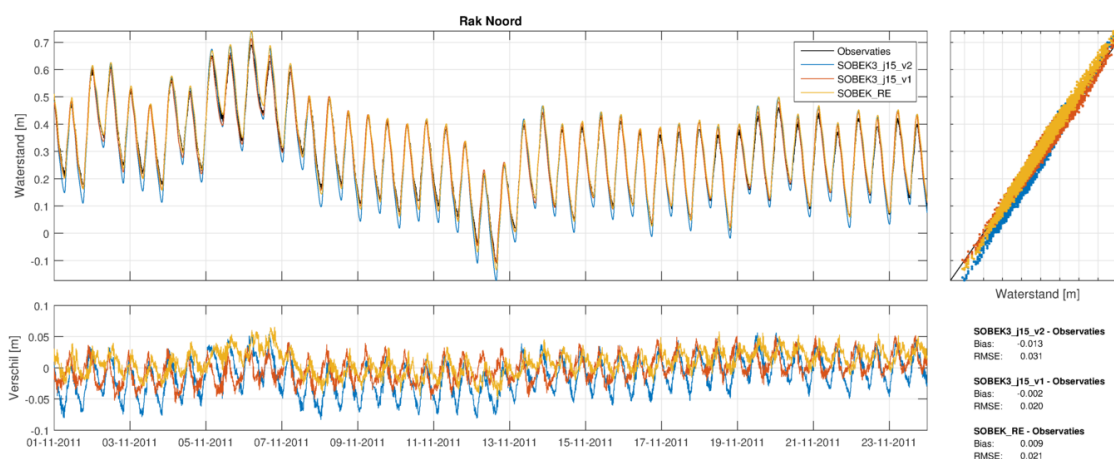
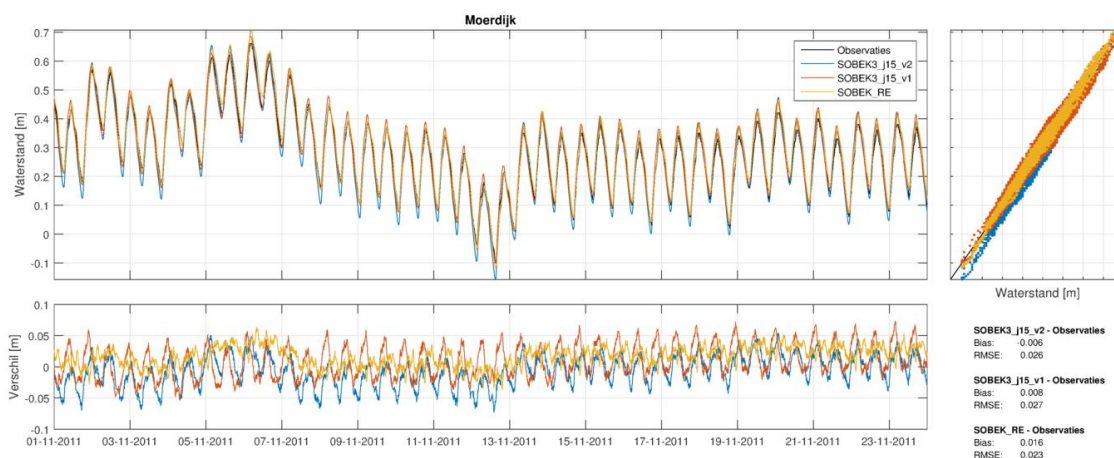


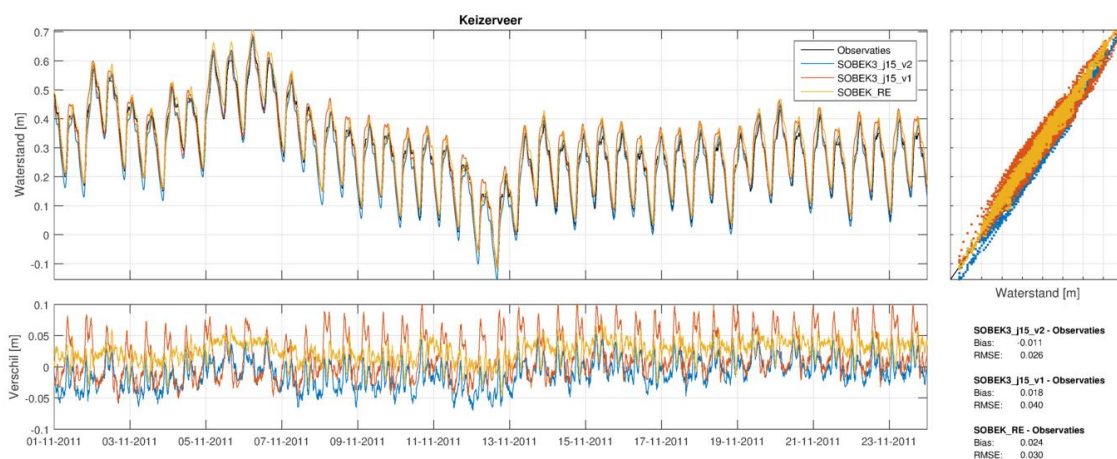
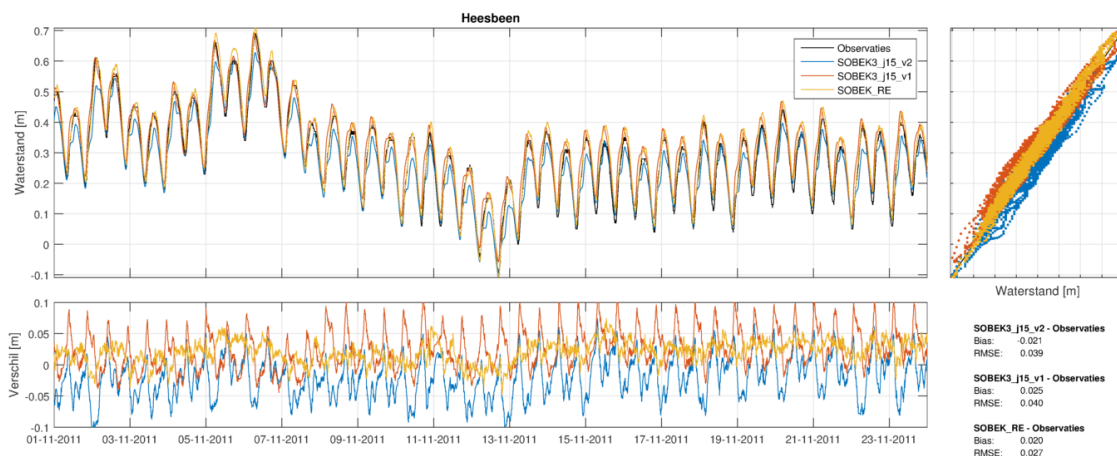
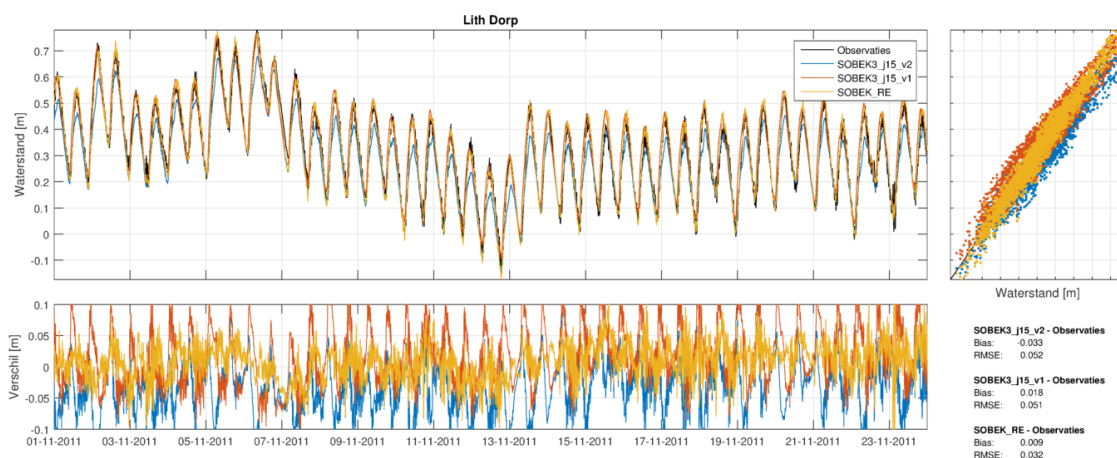
F.2.2 November 2011

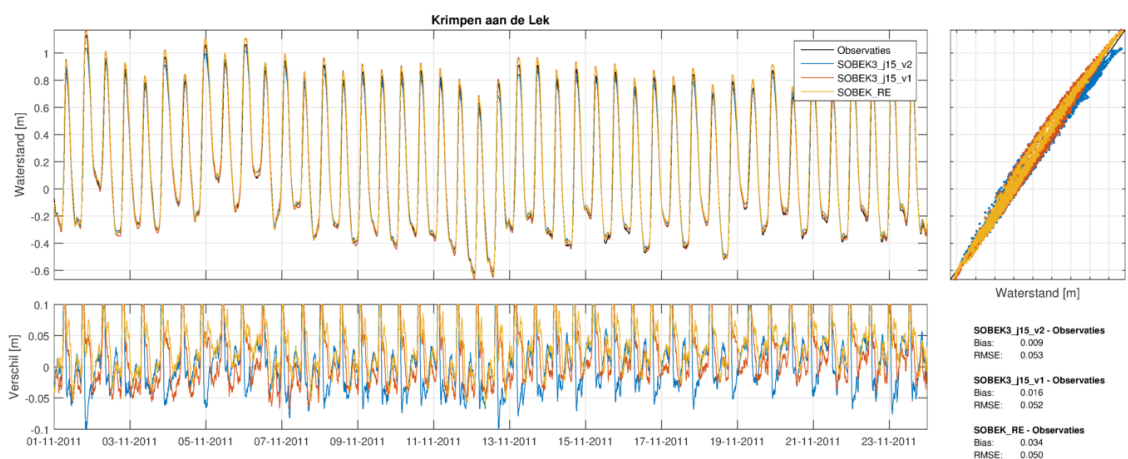
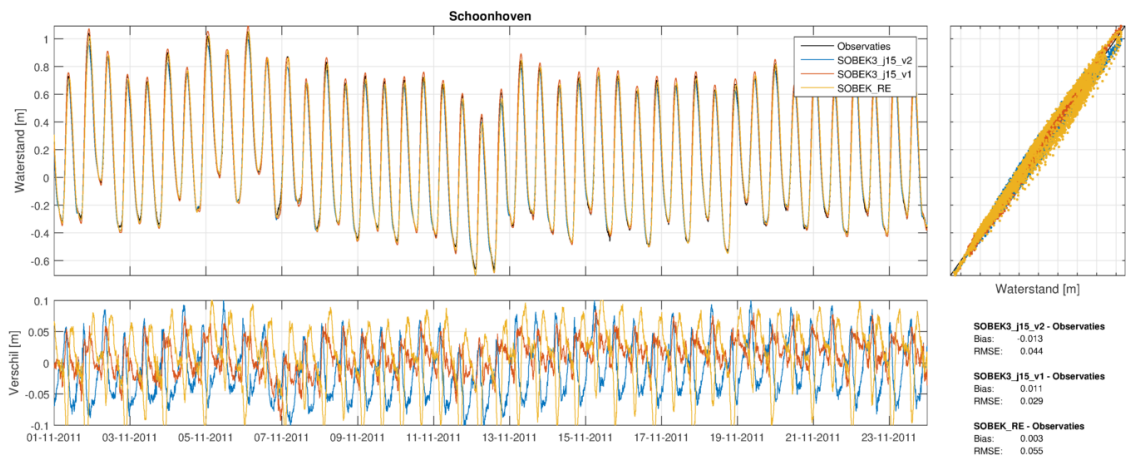
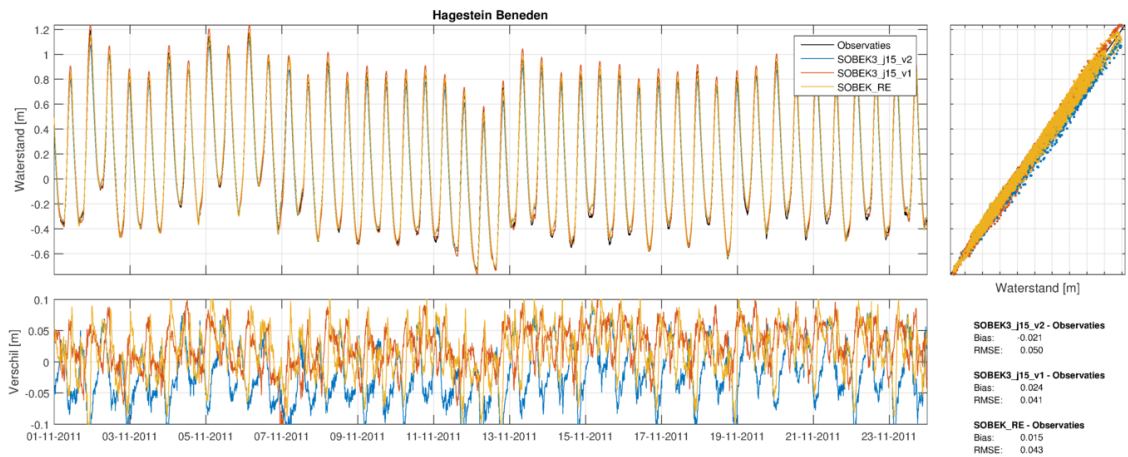


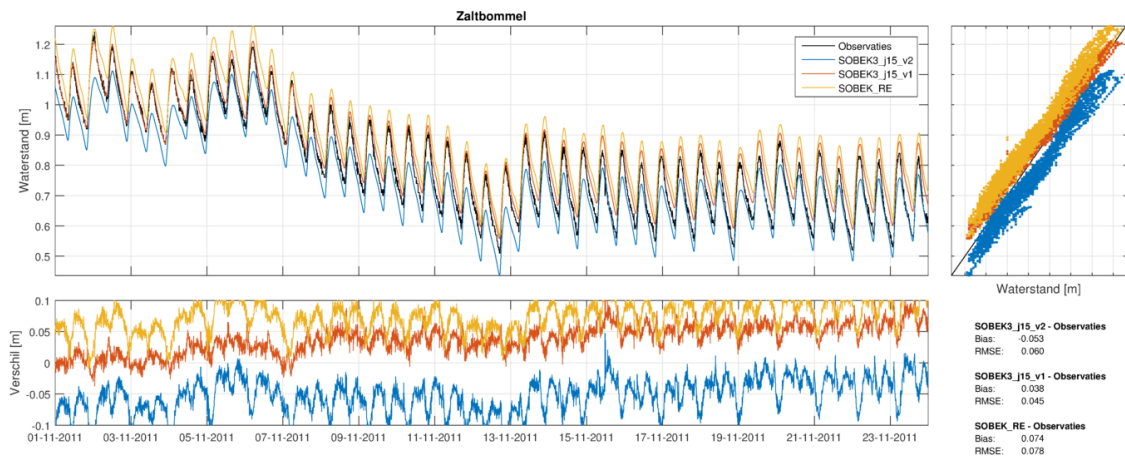
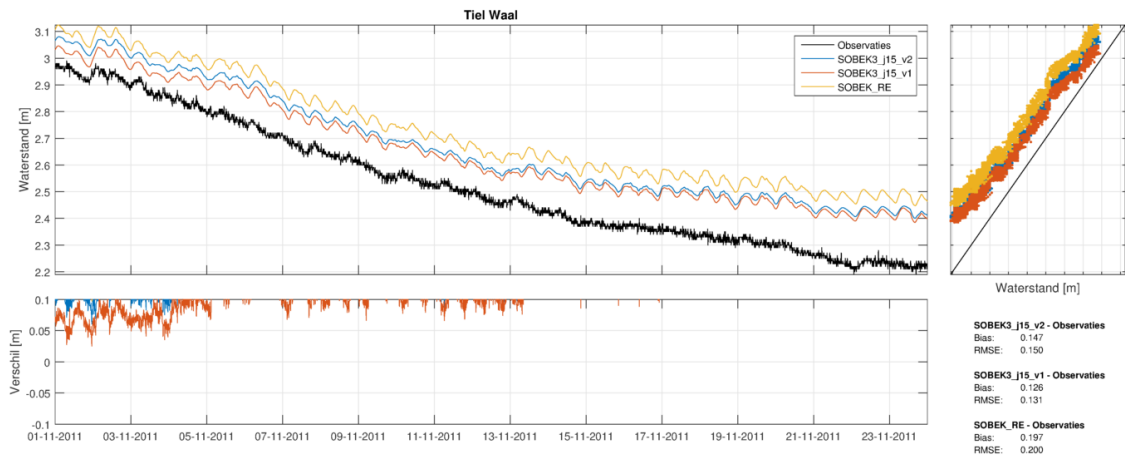


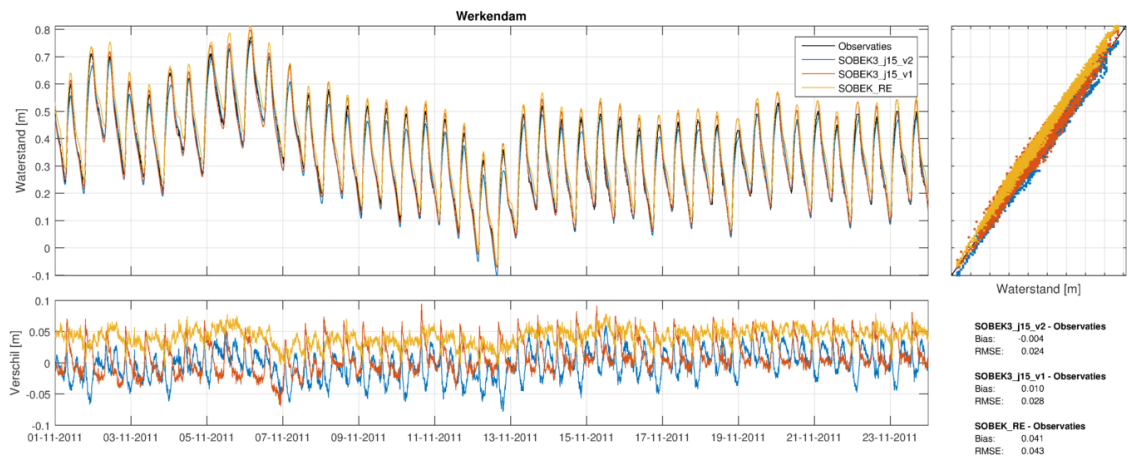
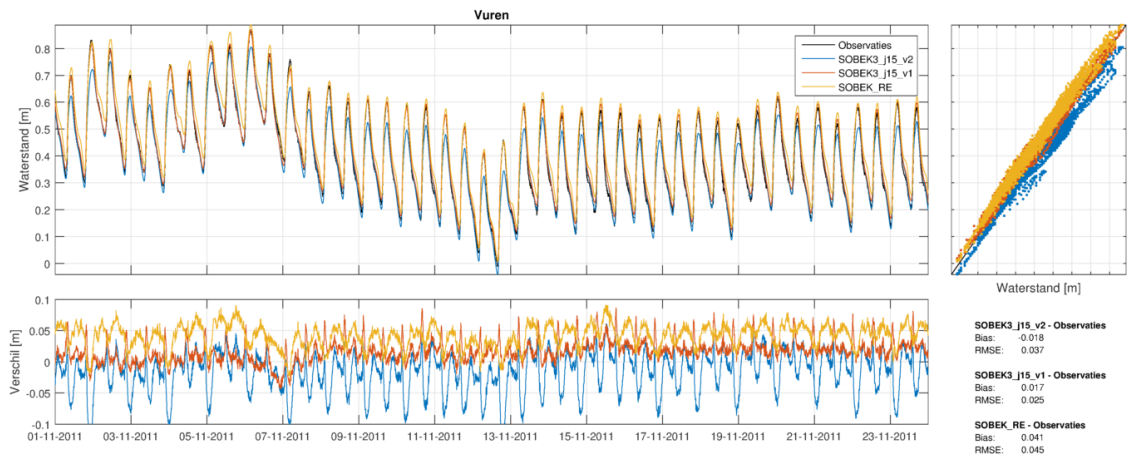




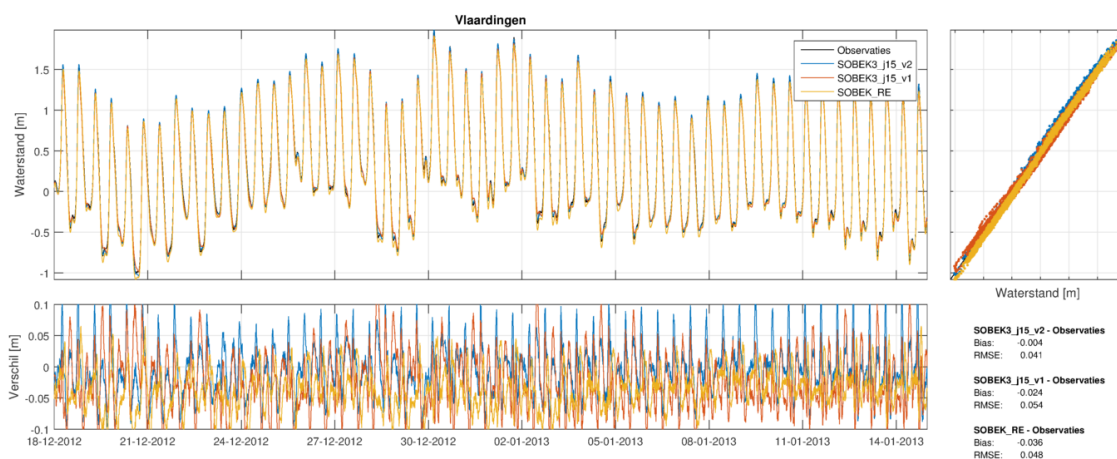
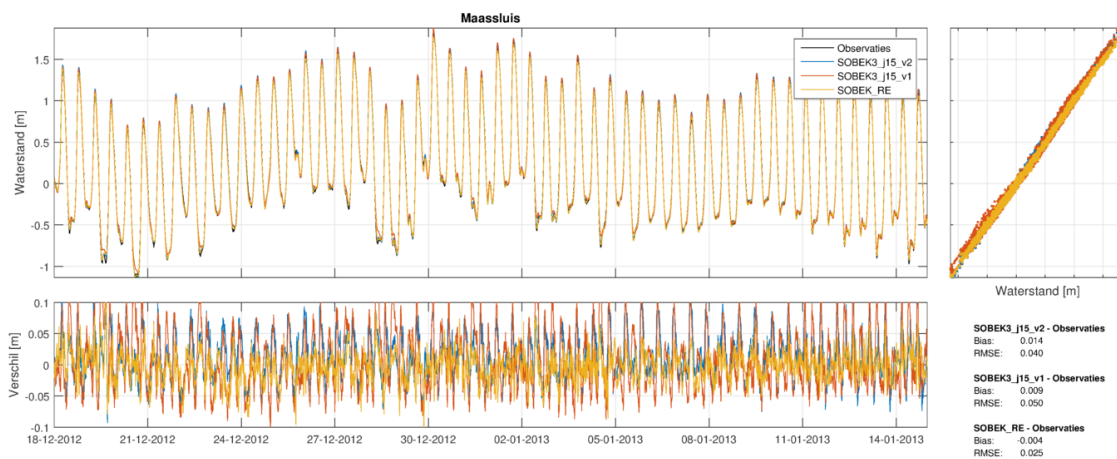
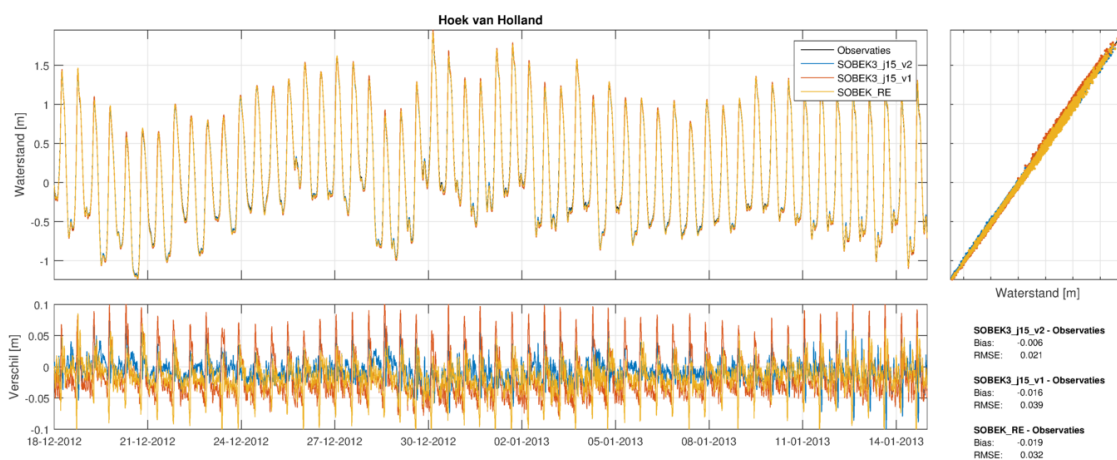


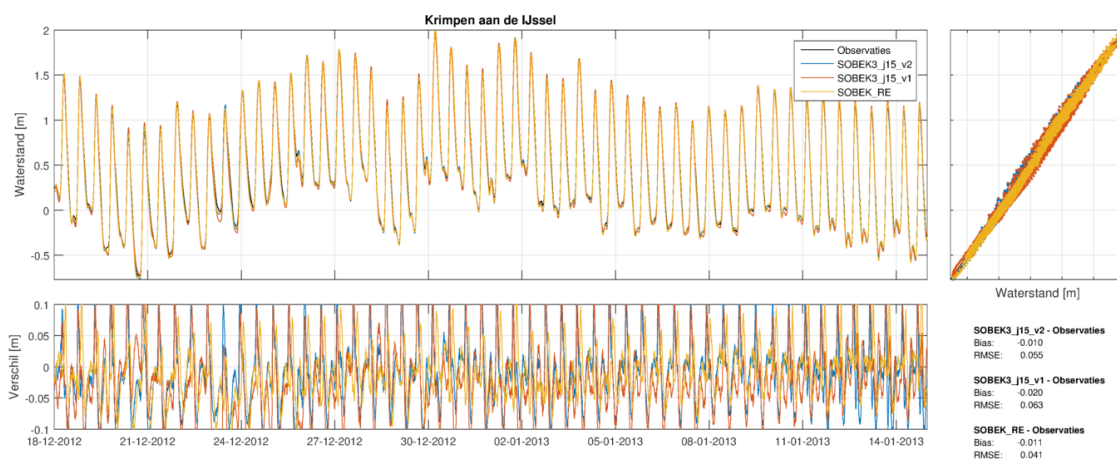
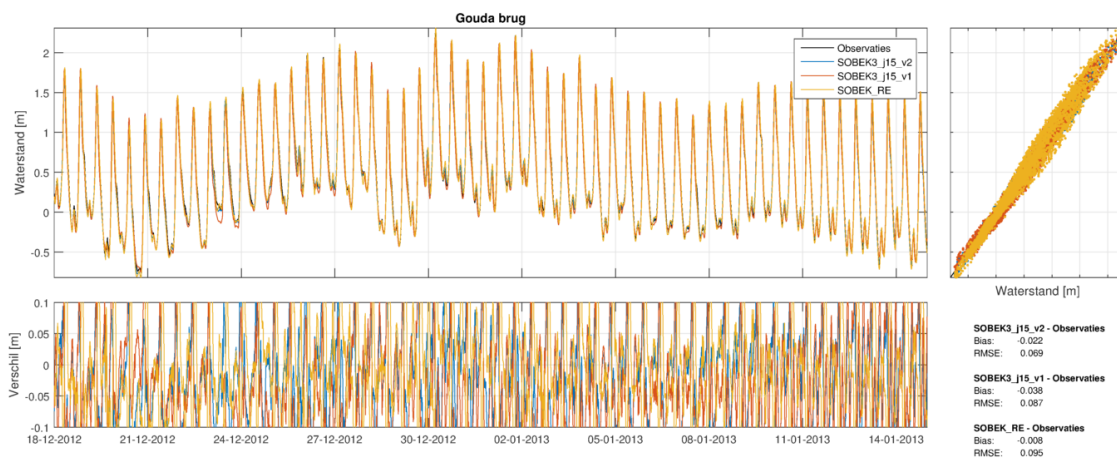
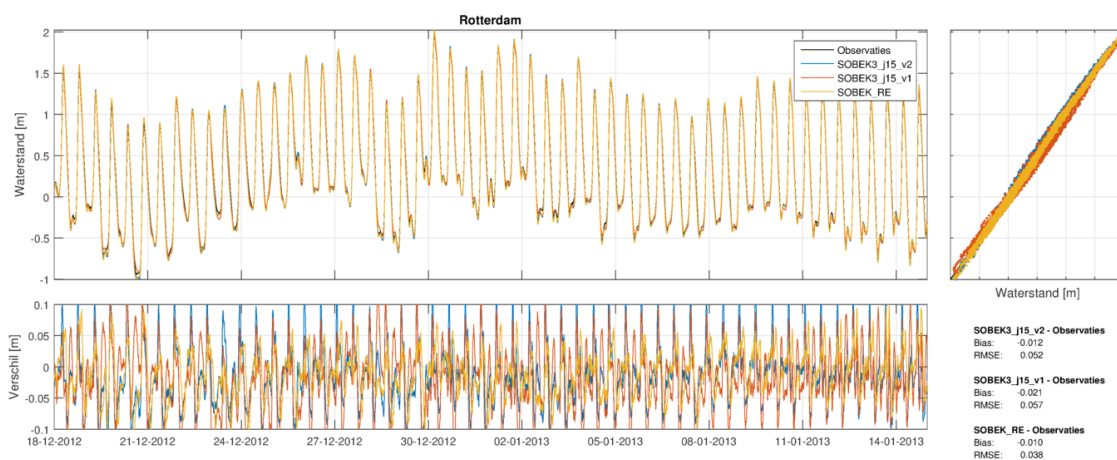


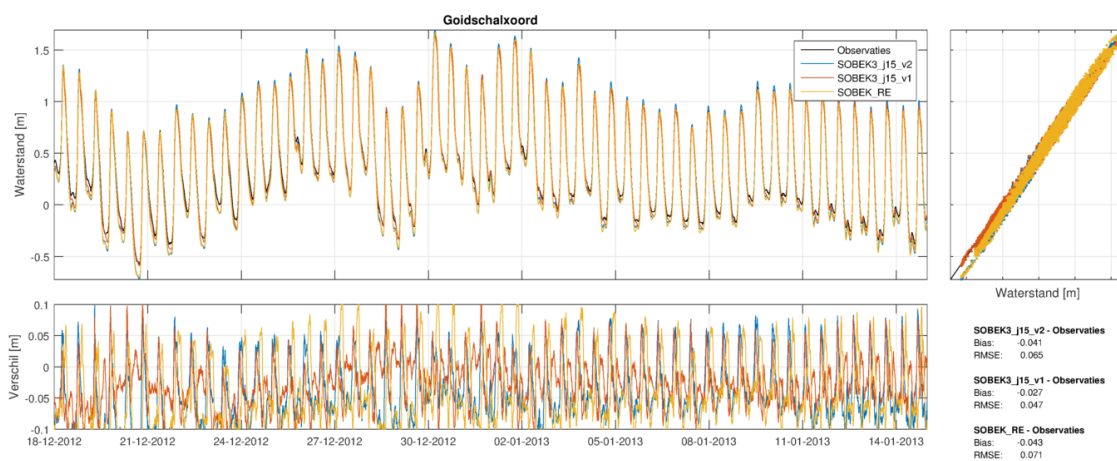
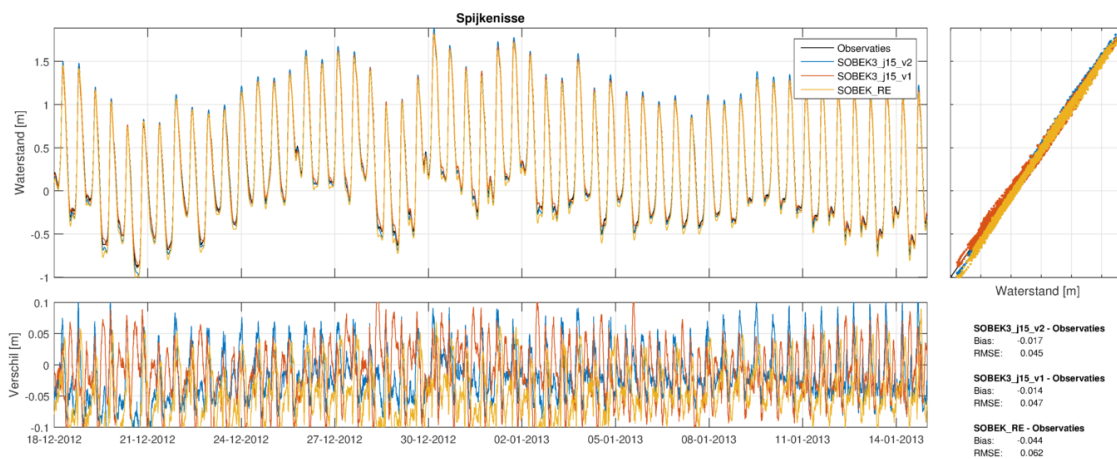
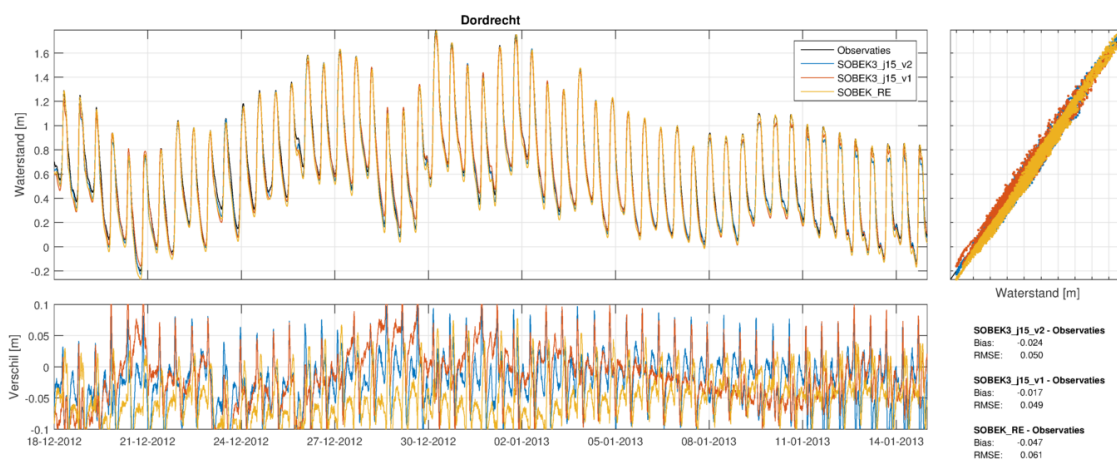


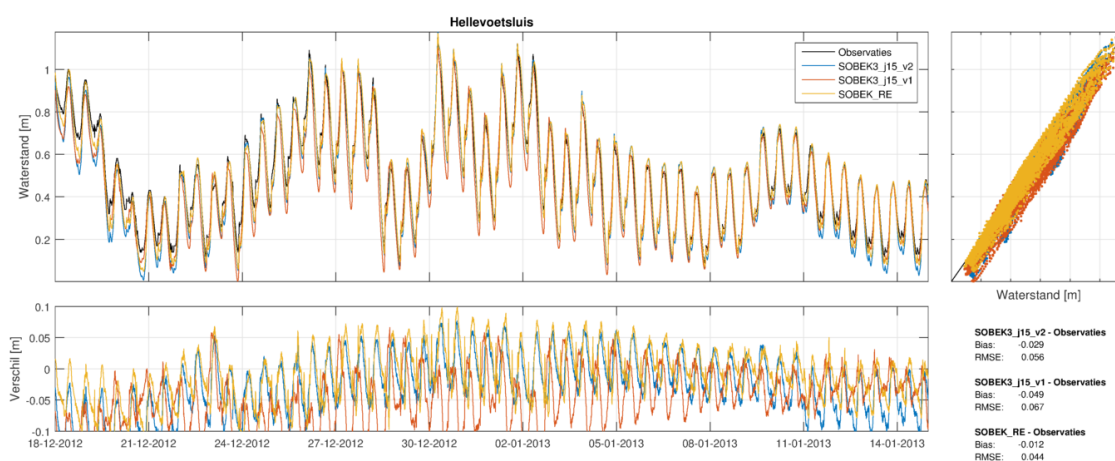
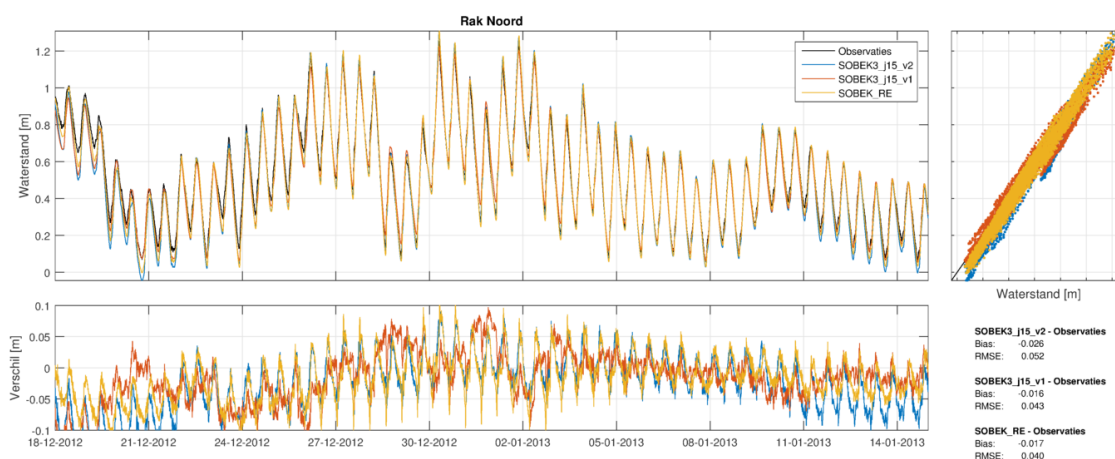
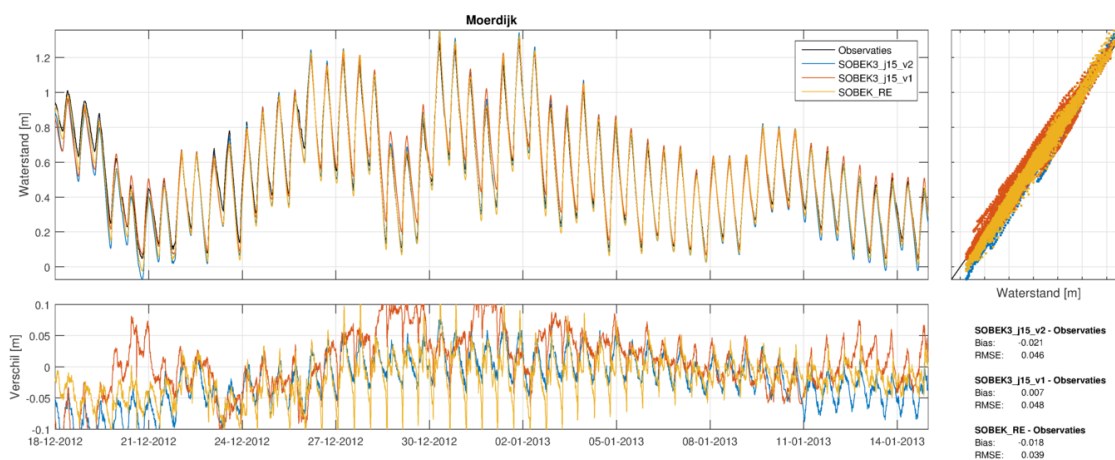


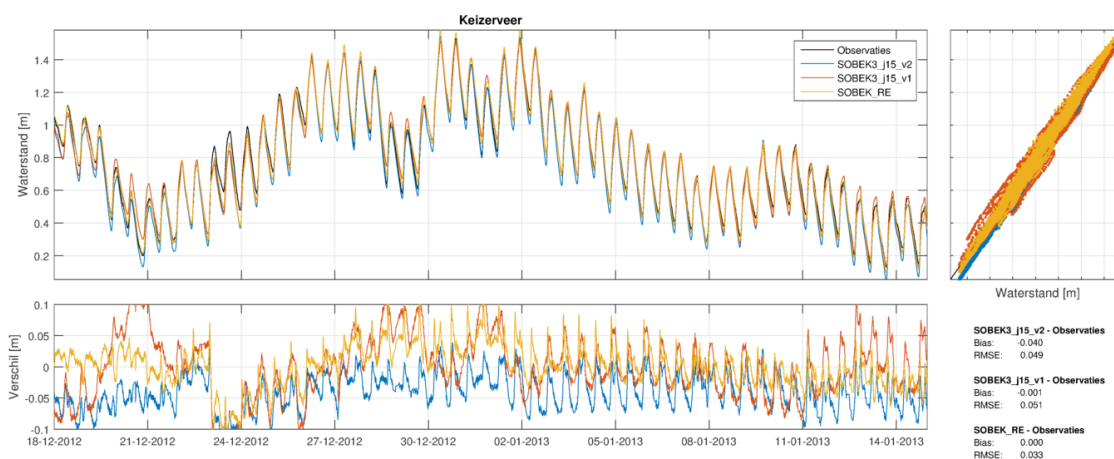
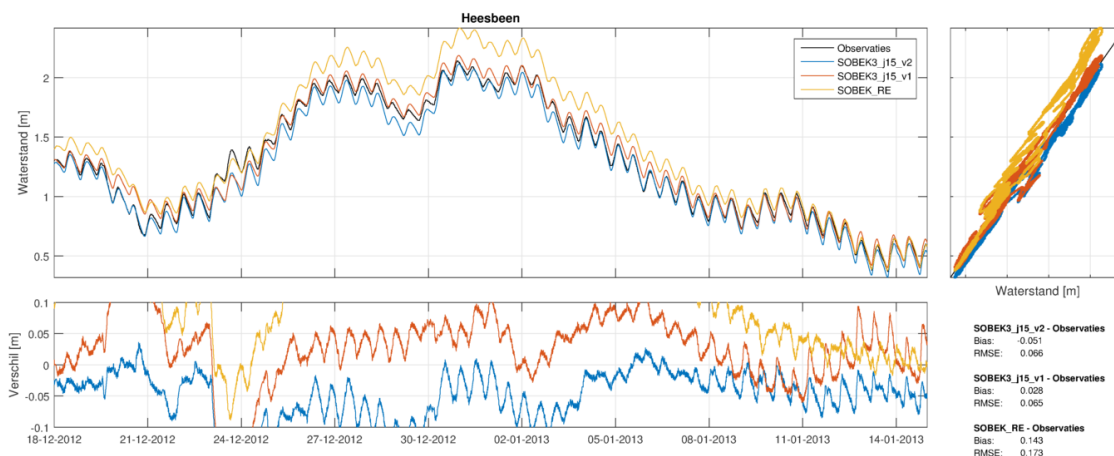
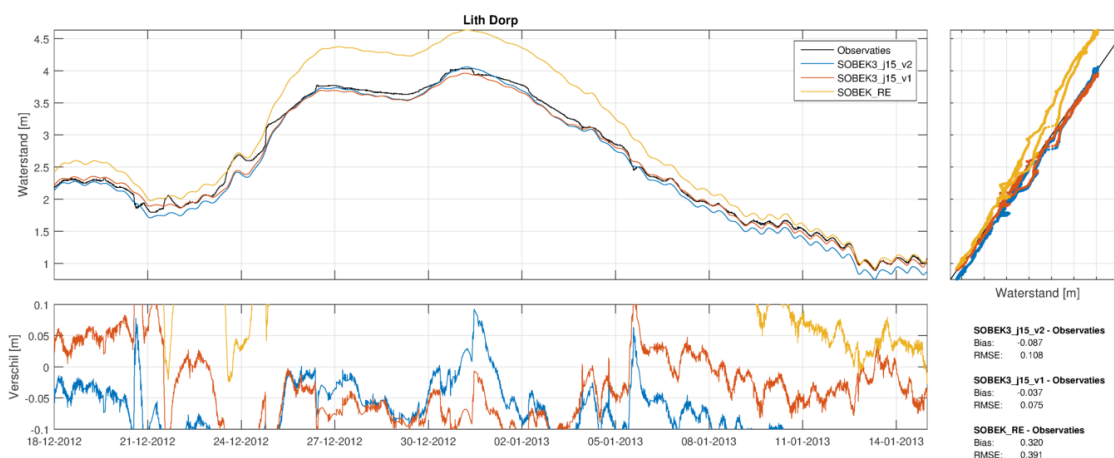
F.2.3 Januari 2013

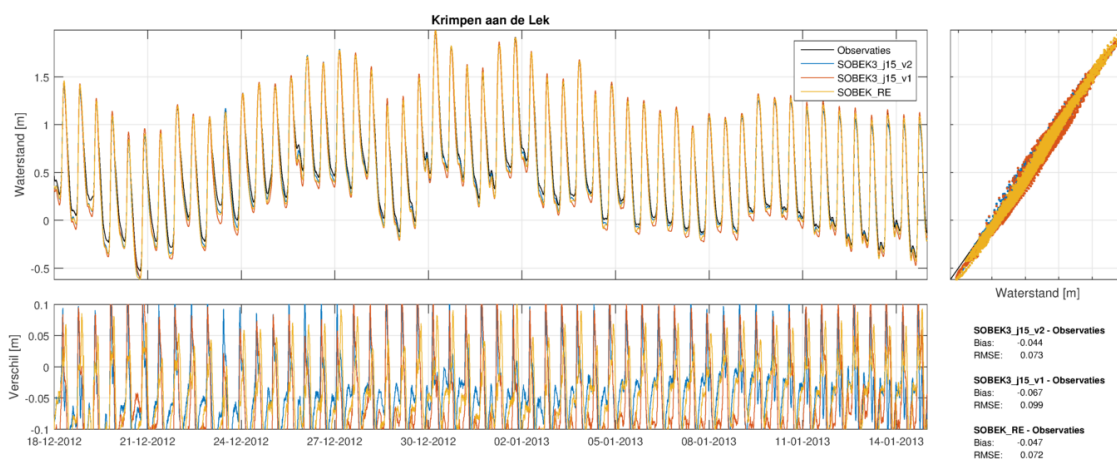
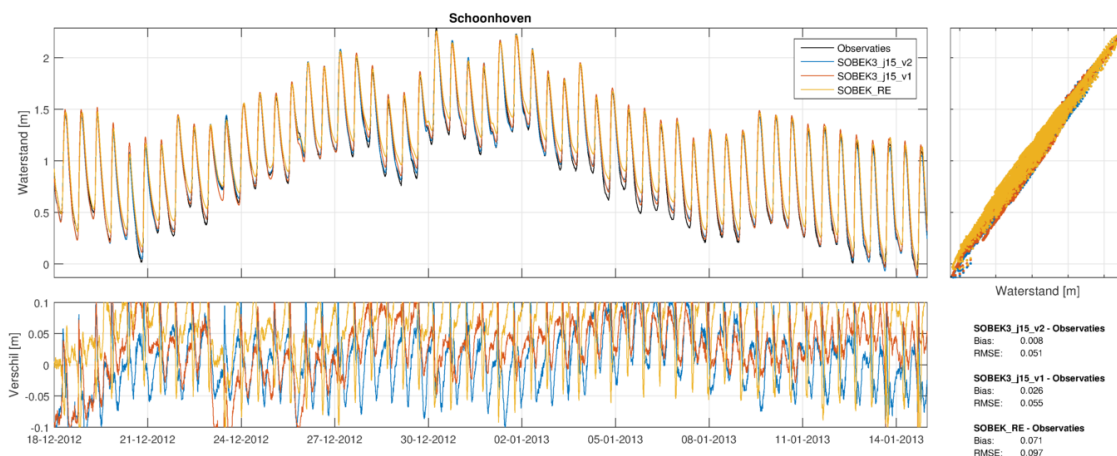
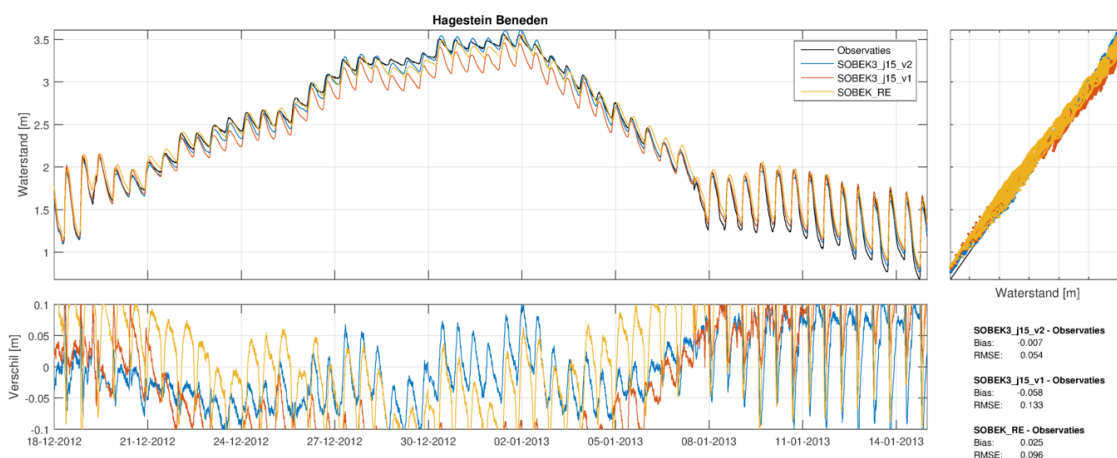


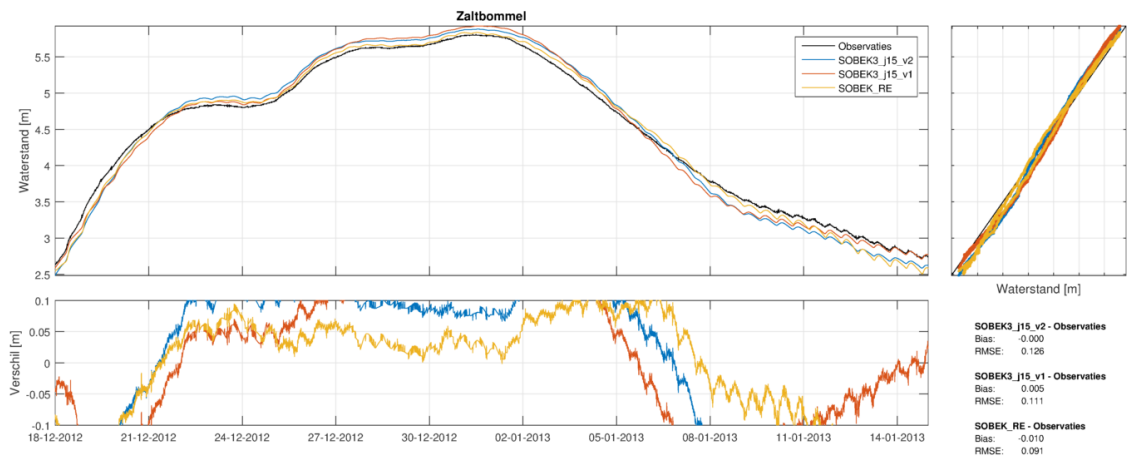
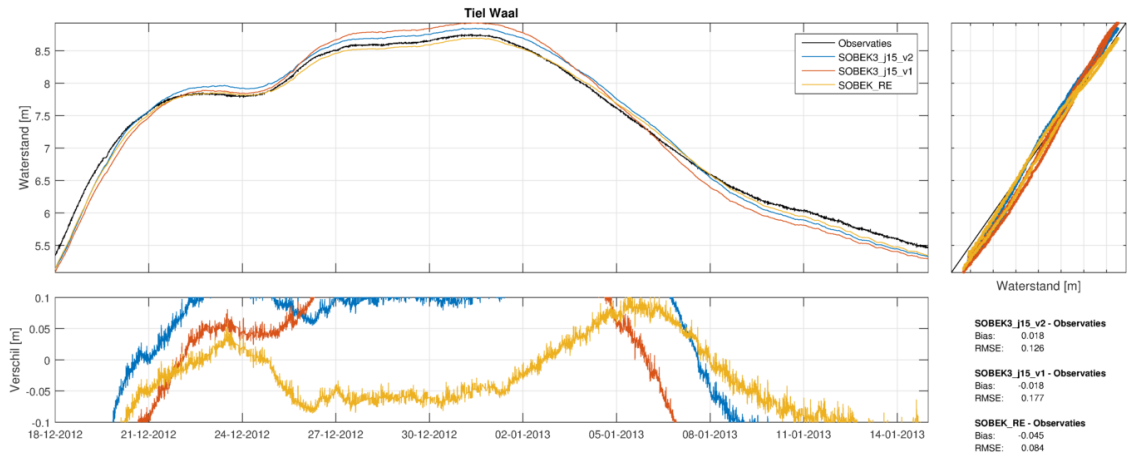


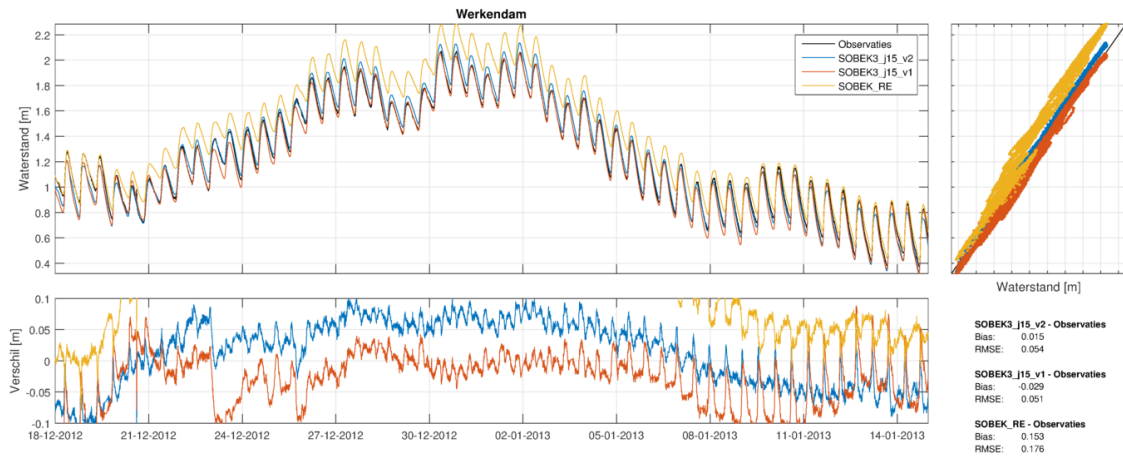
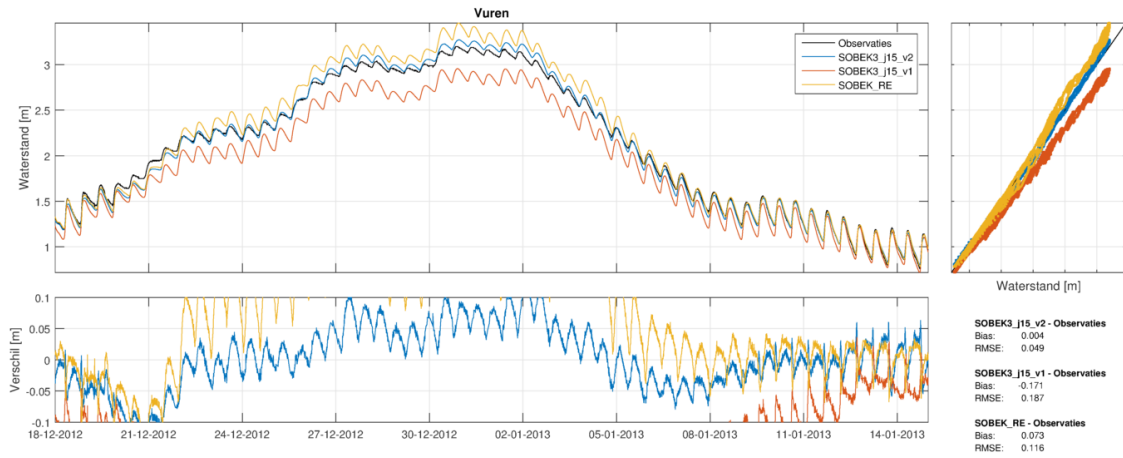




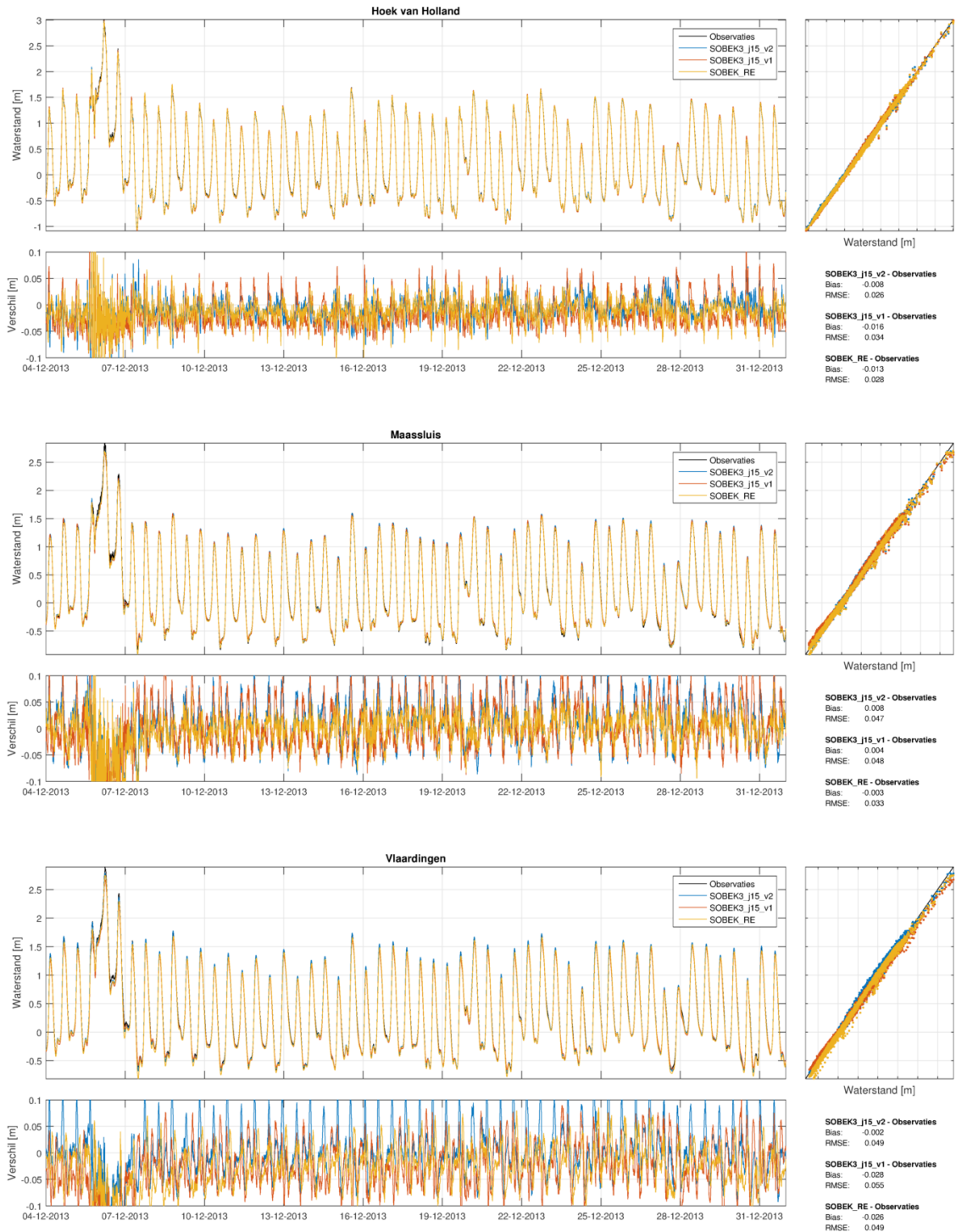


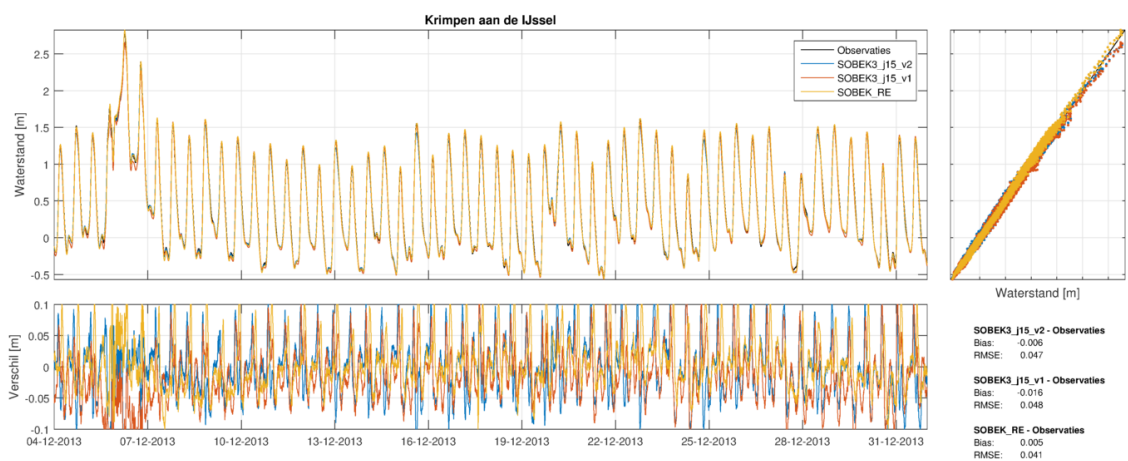
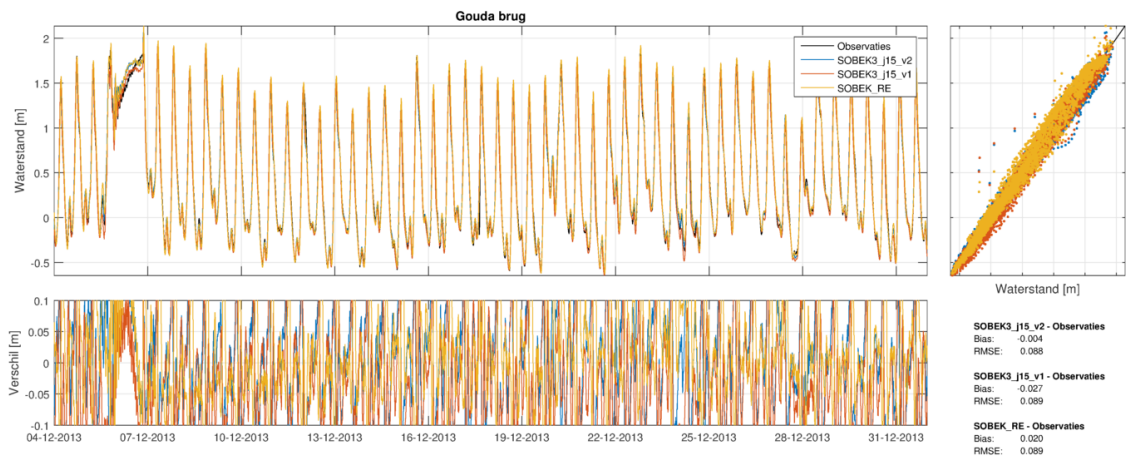
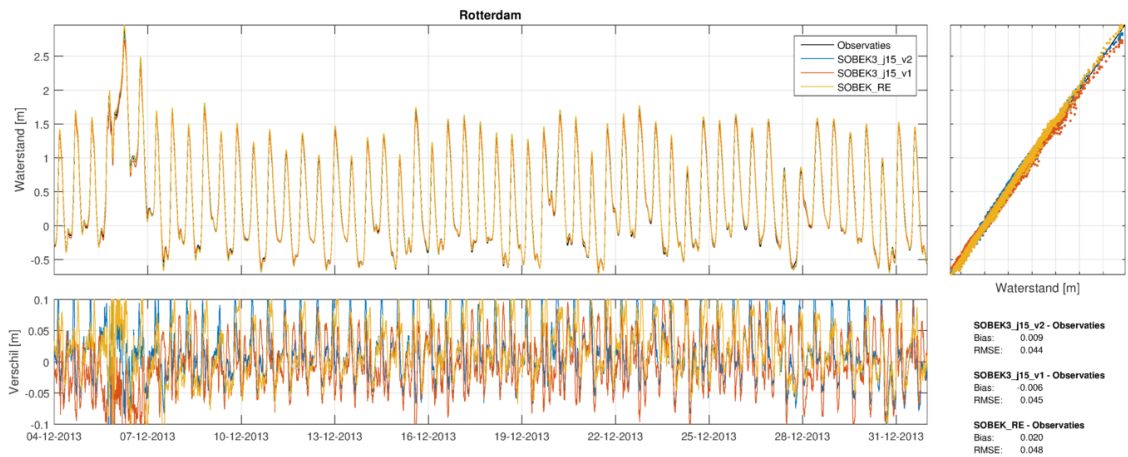


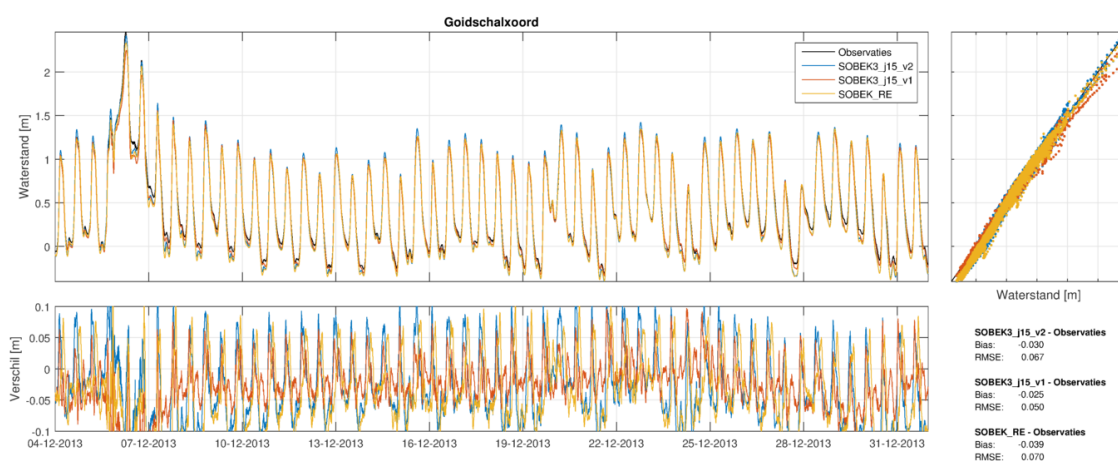
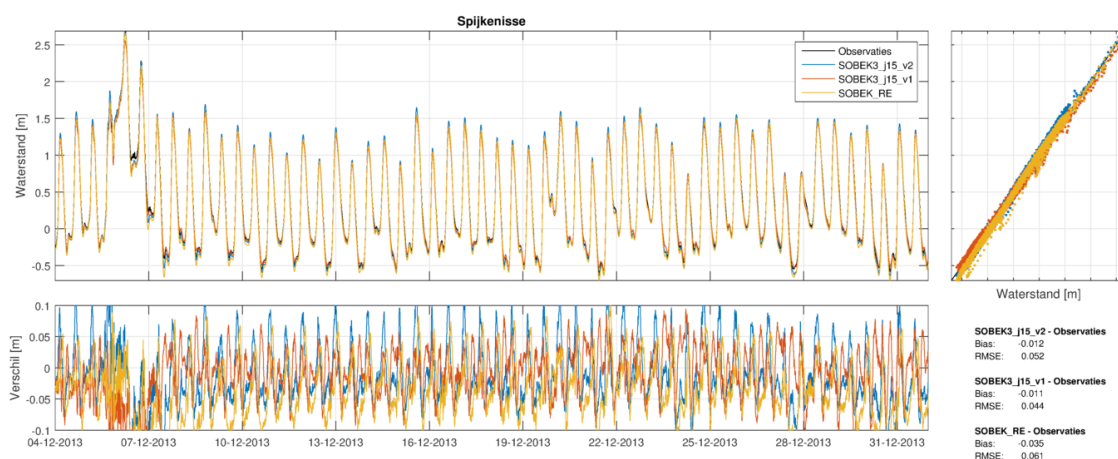
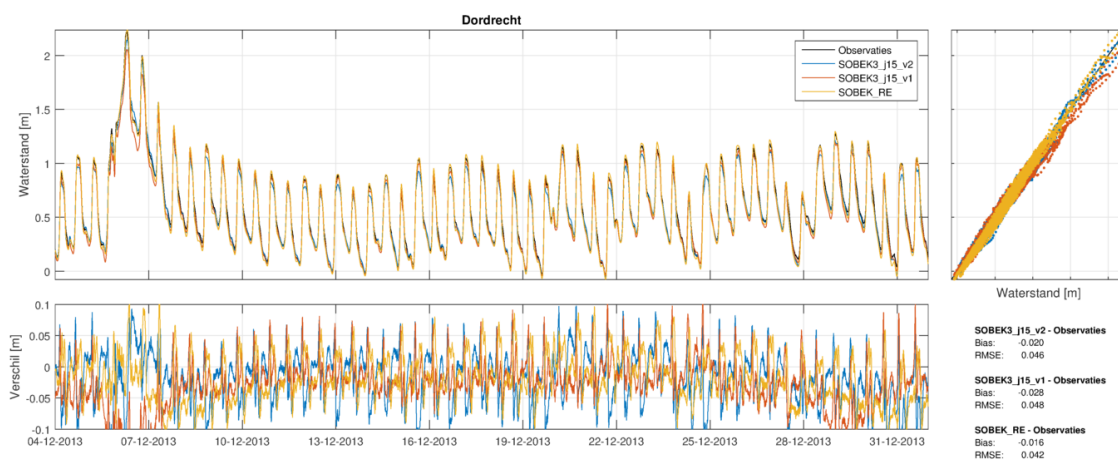


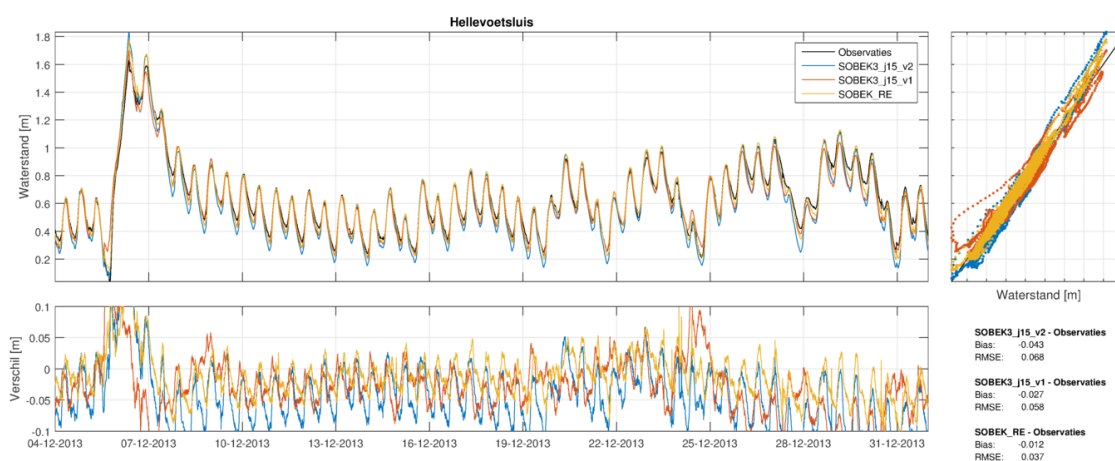
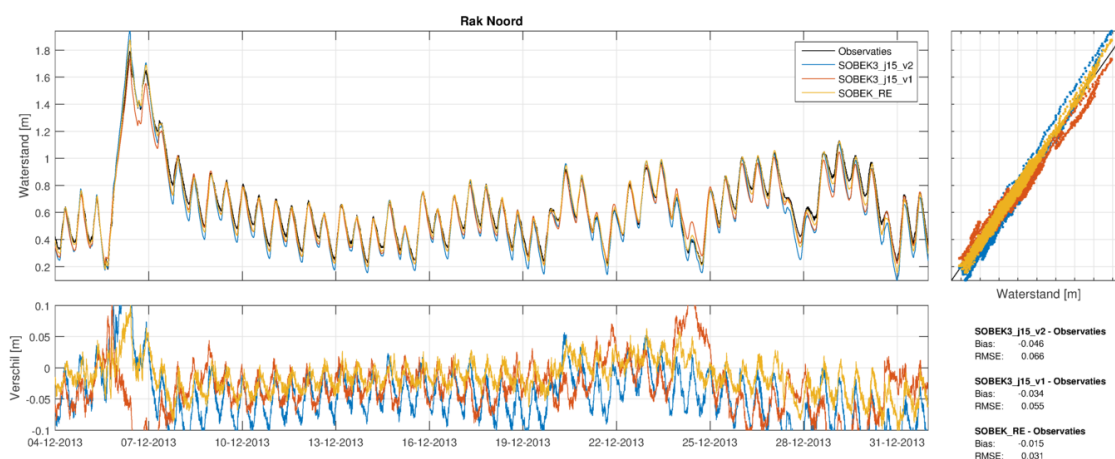
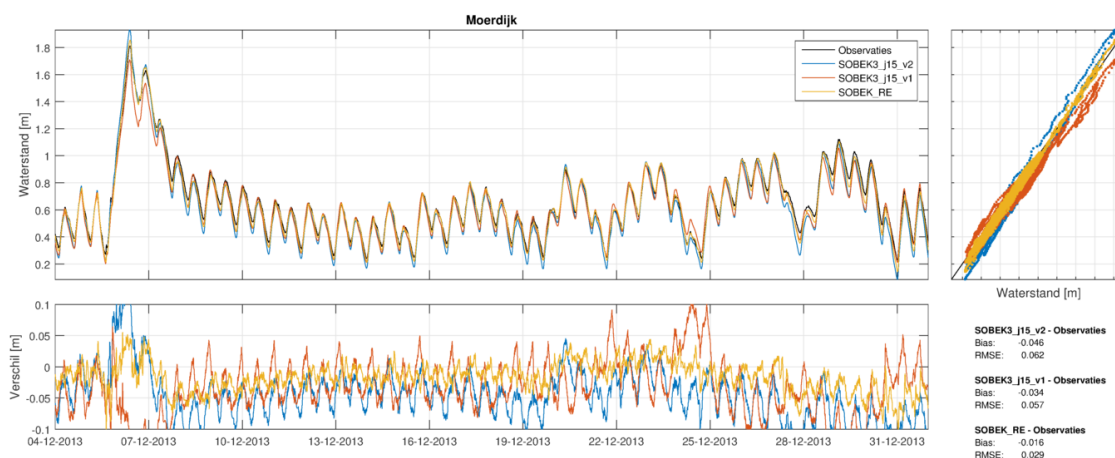


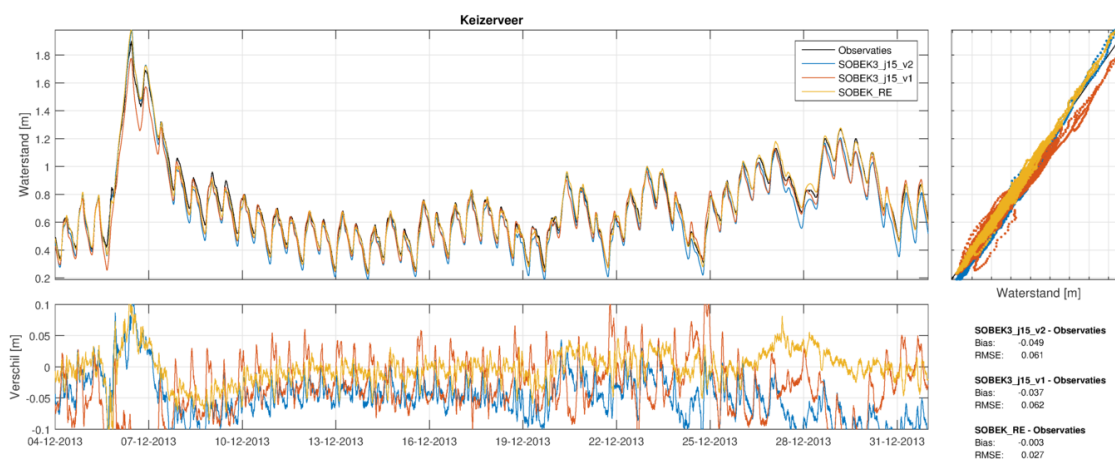
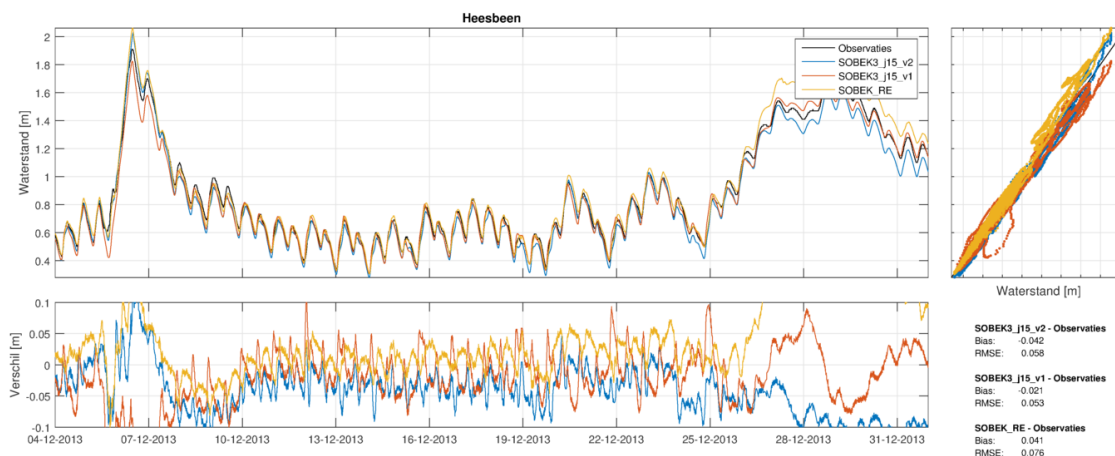
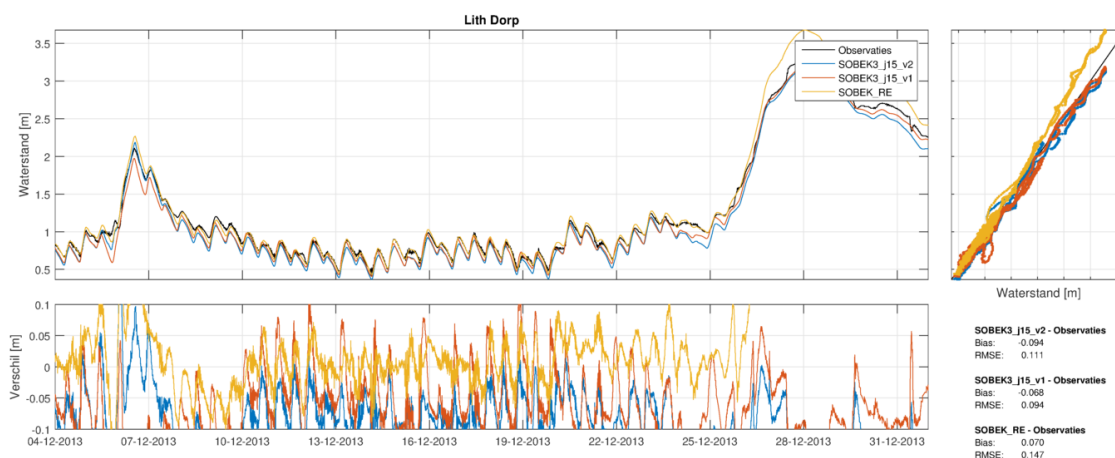
F.2.4 December 2013

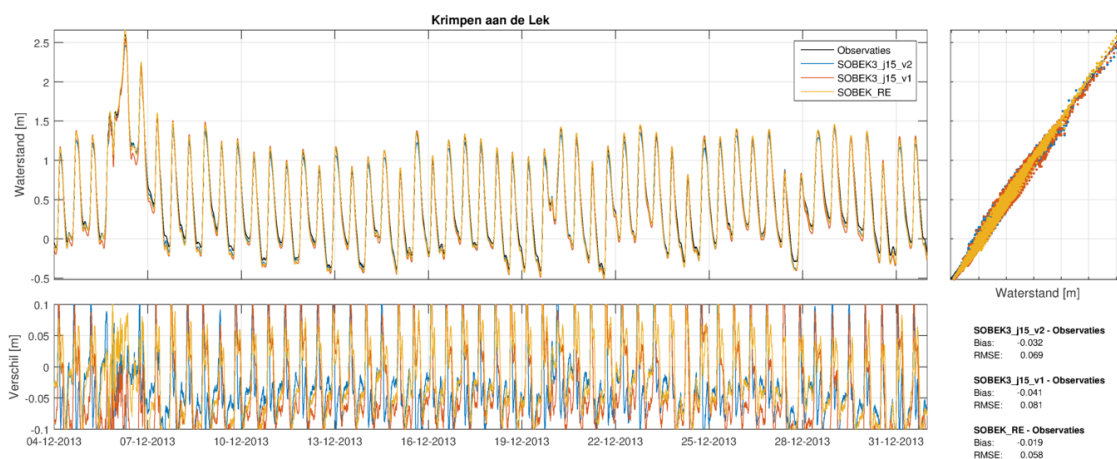
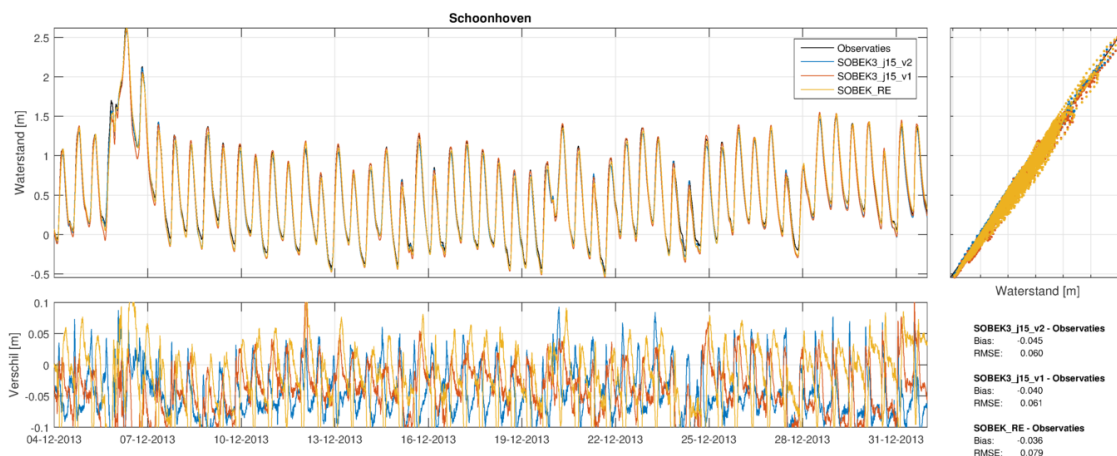
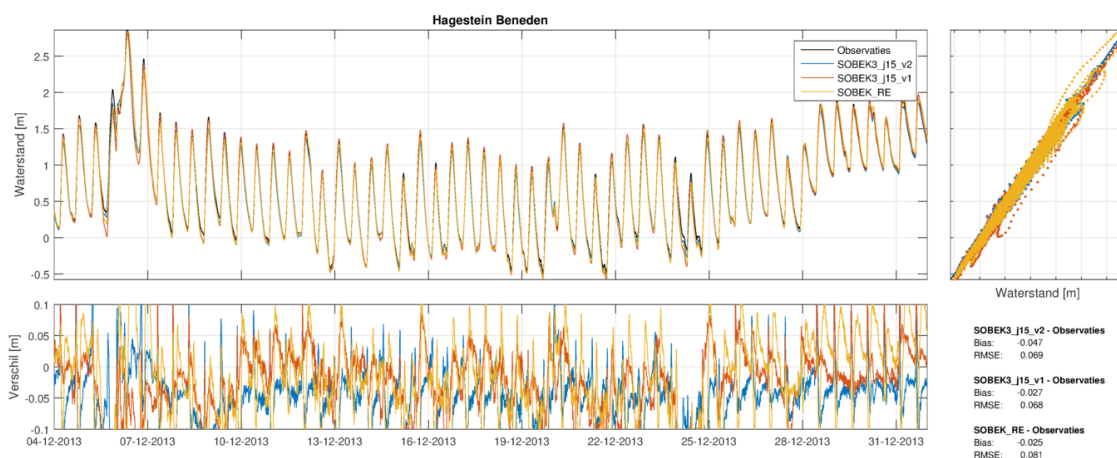


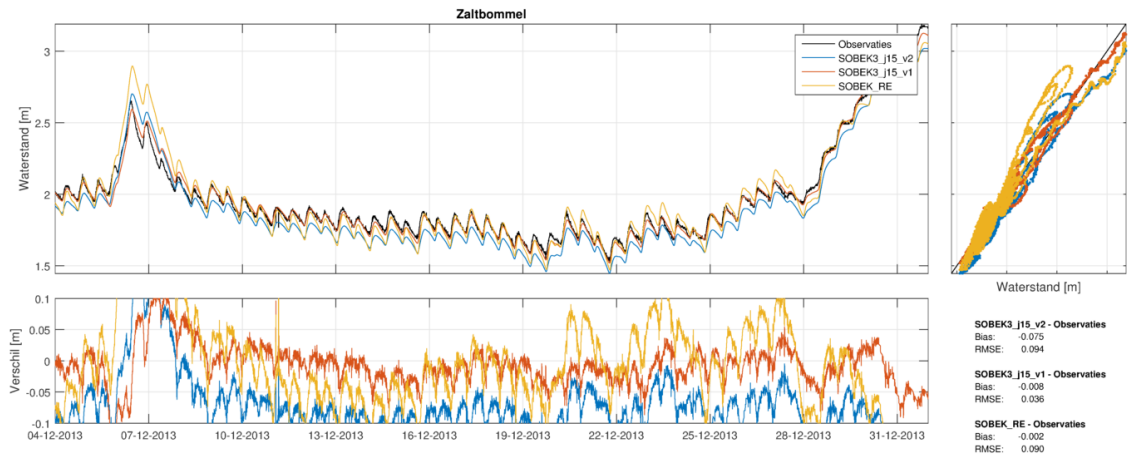
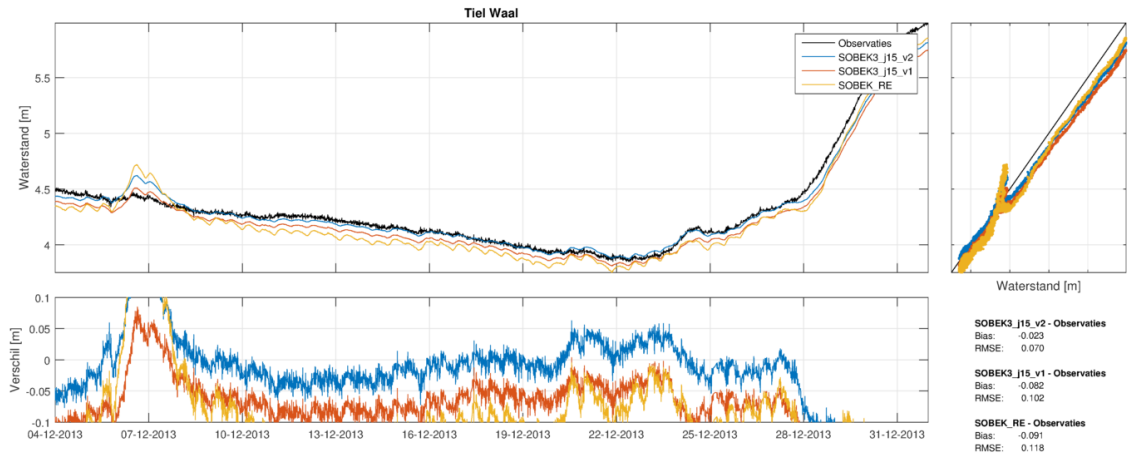


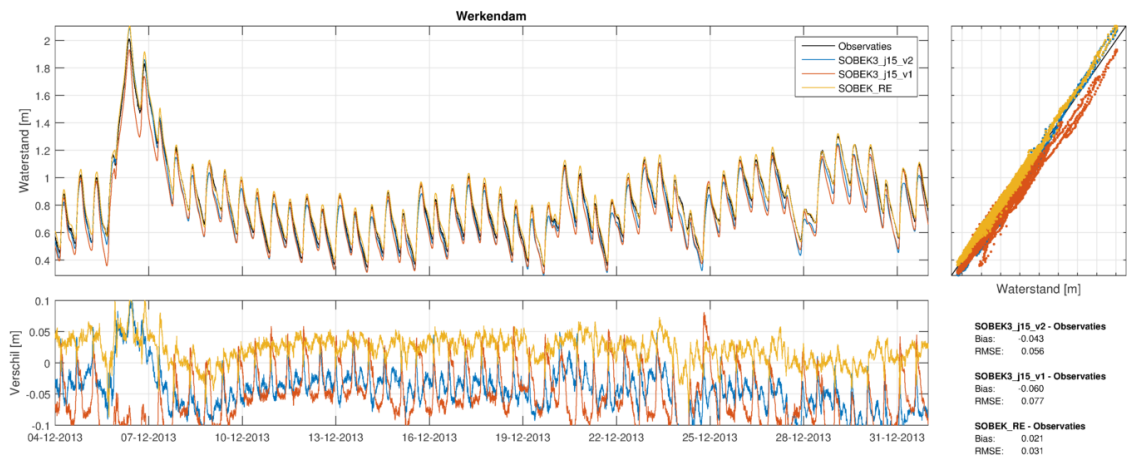
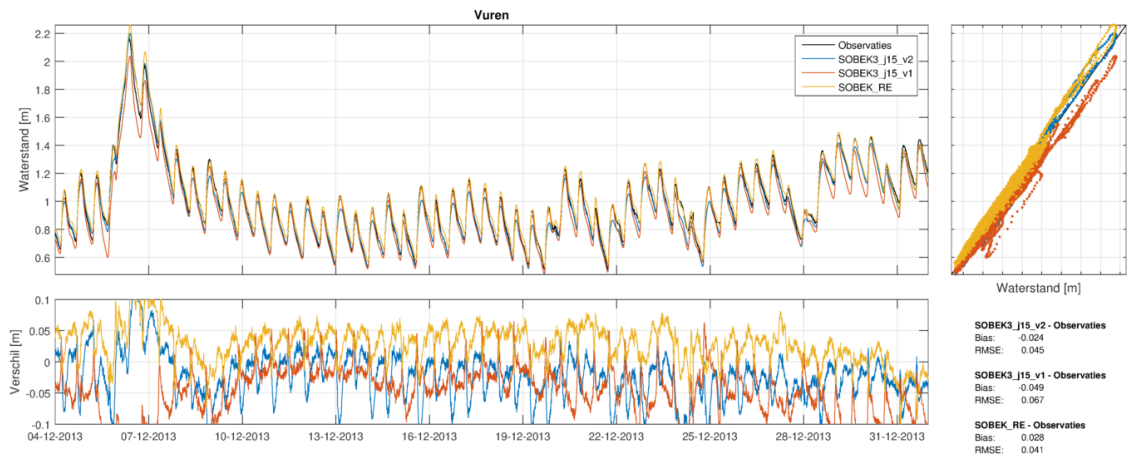




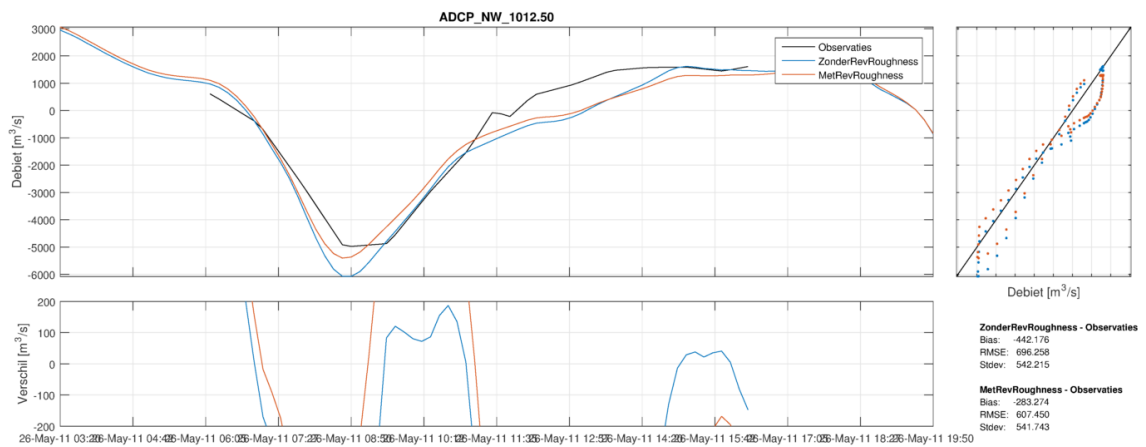
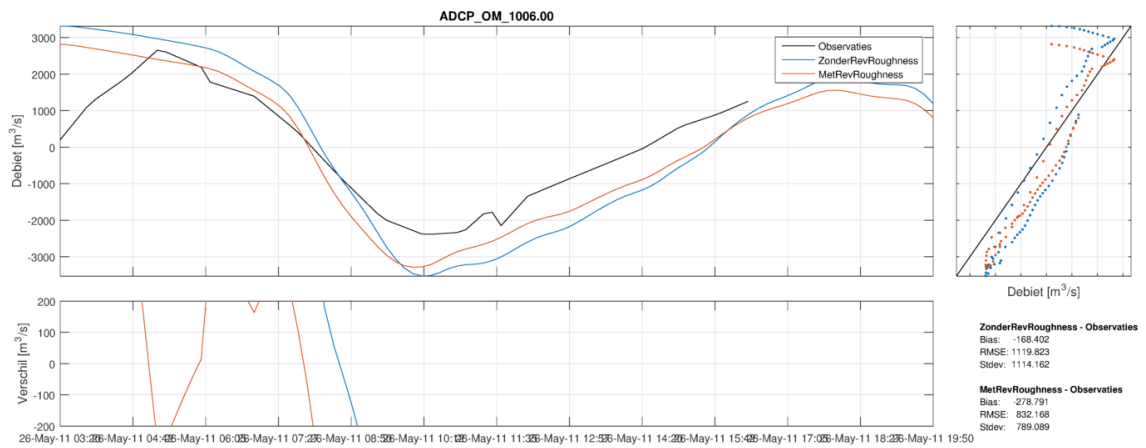
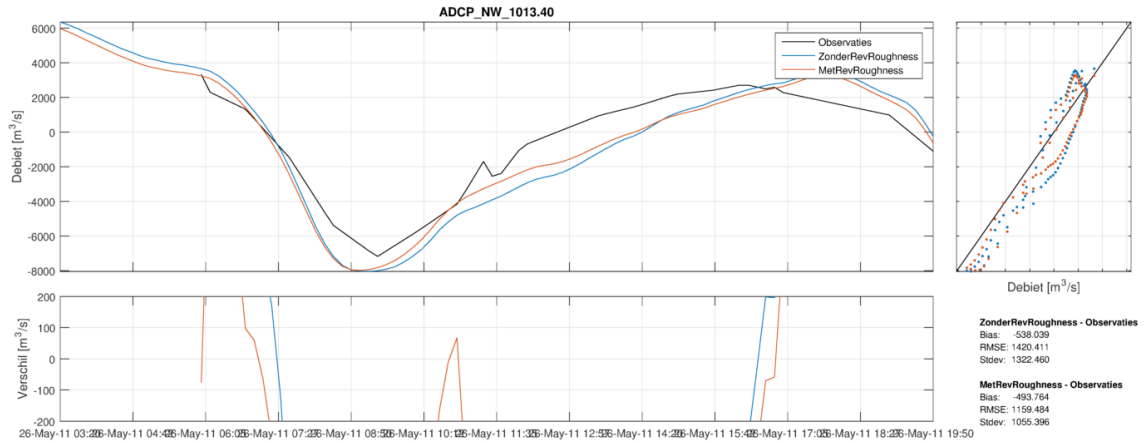


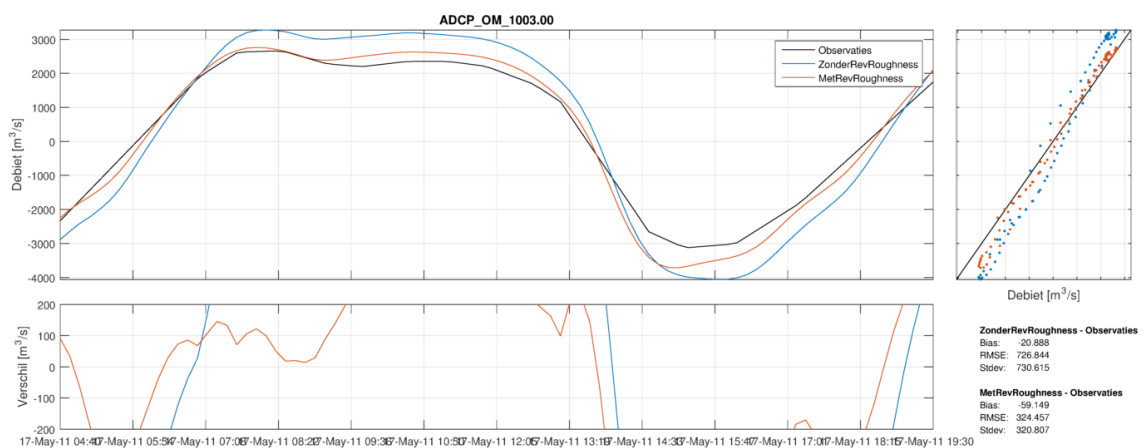
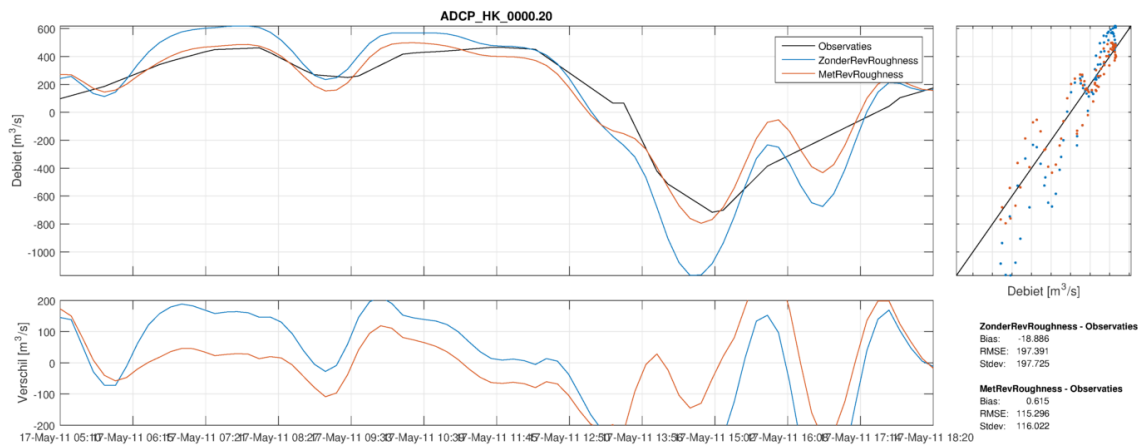
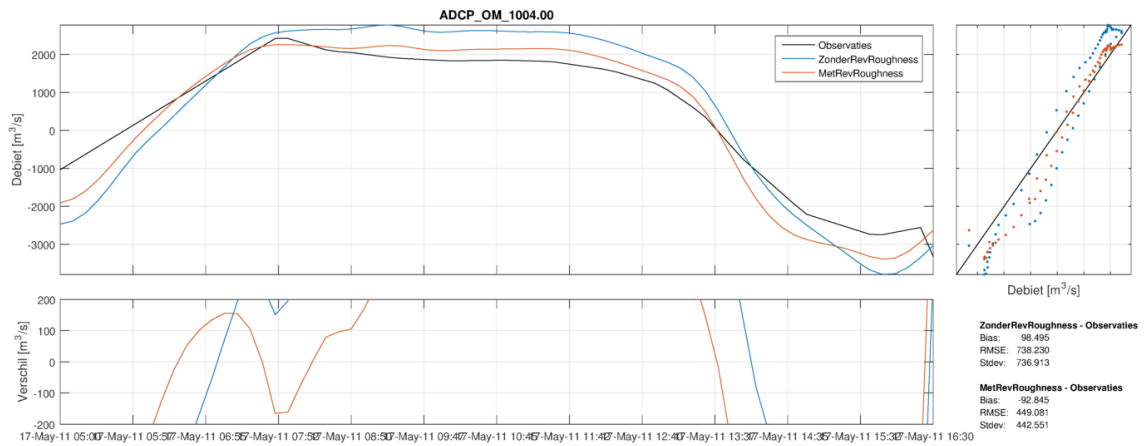


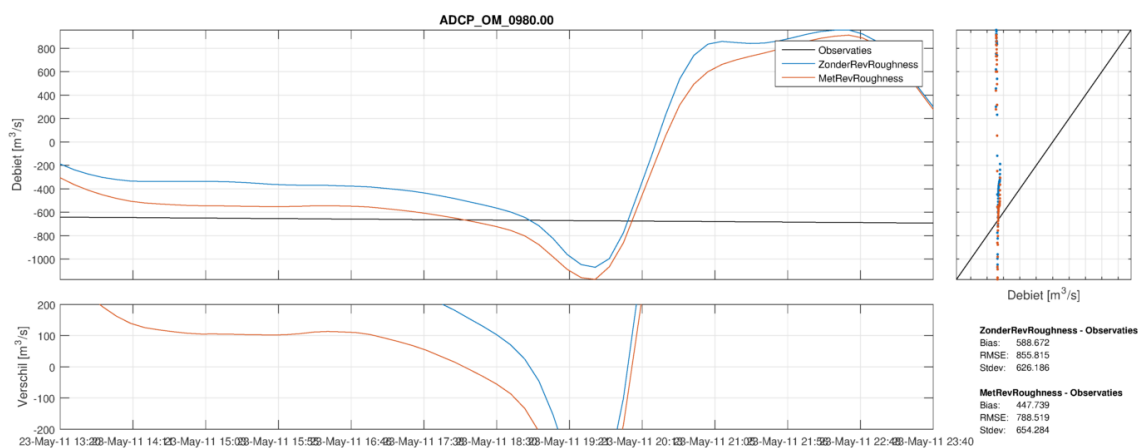
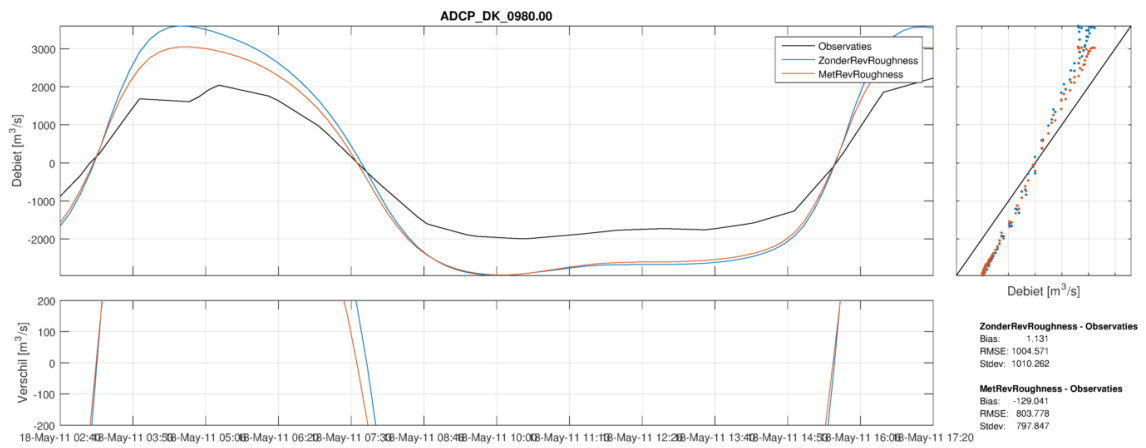
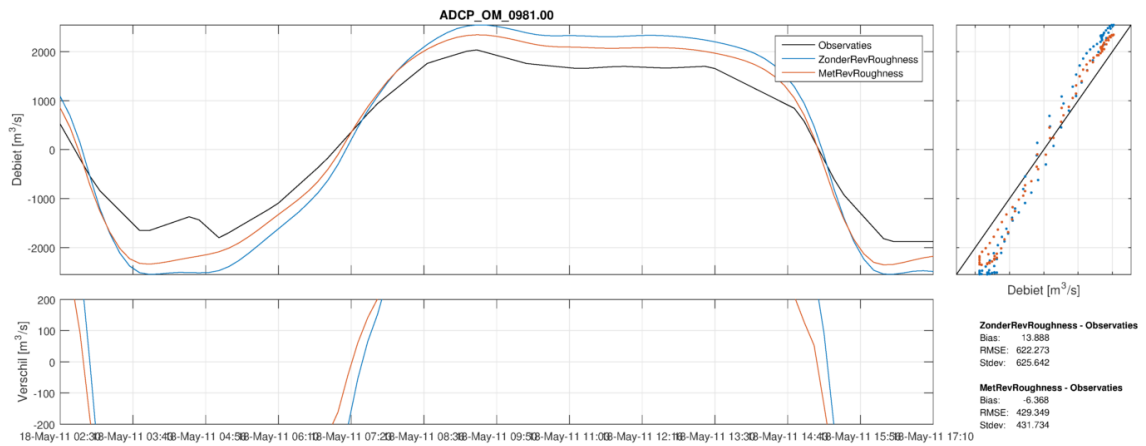




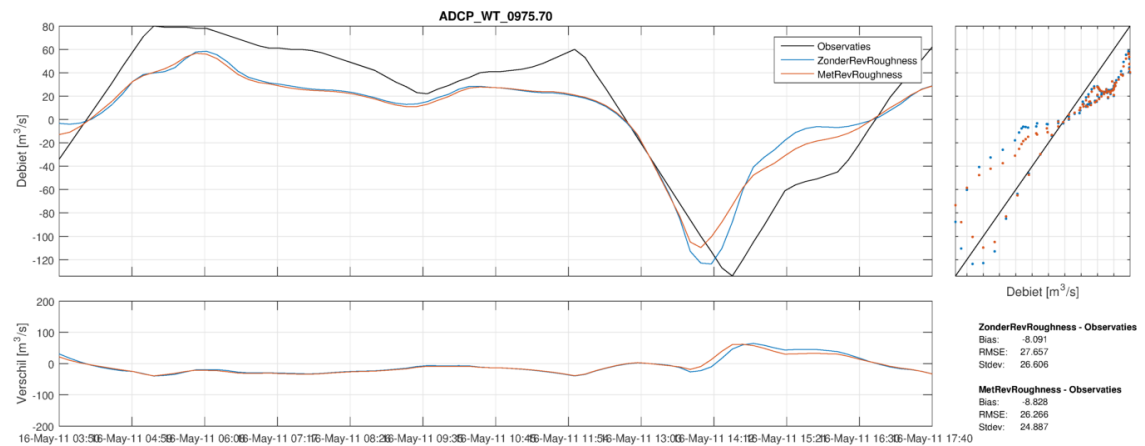
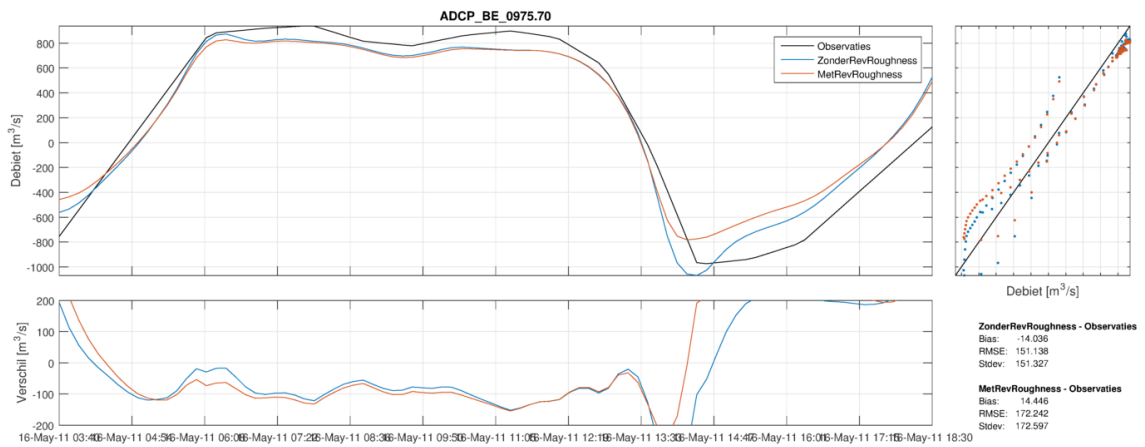
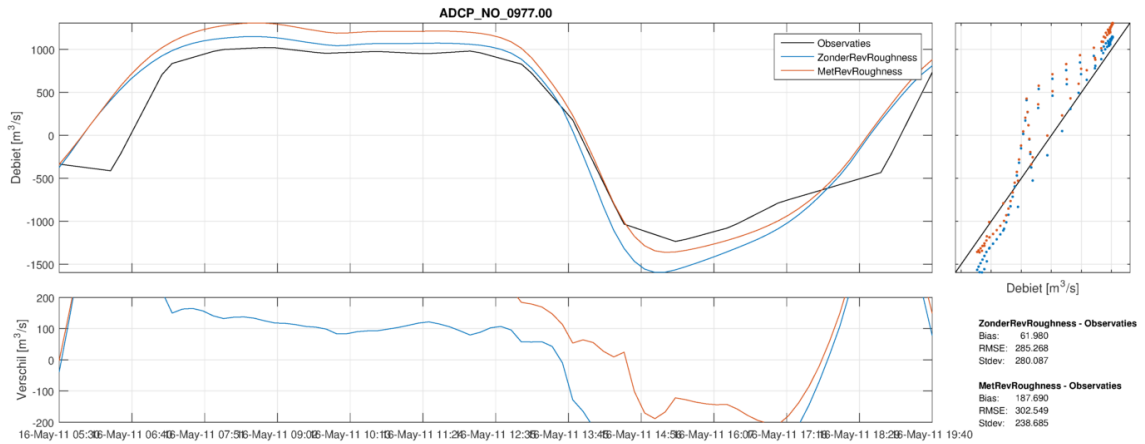
G Afvoervergelijking voor mei 2011

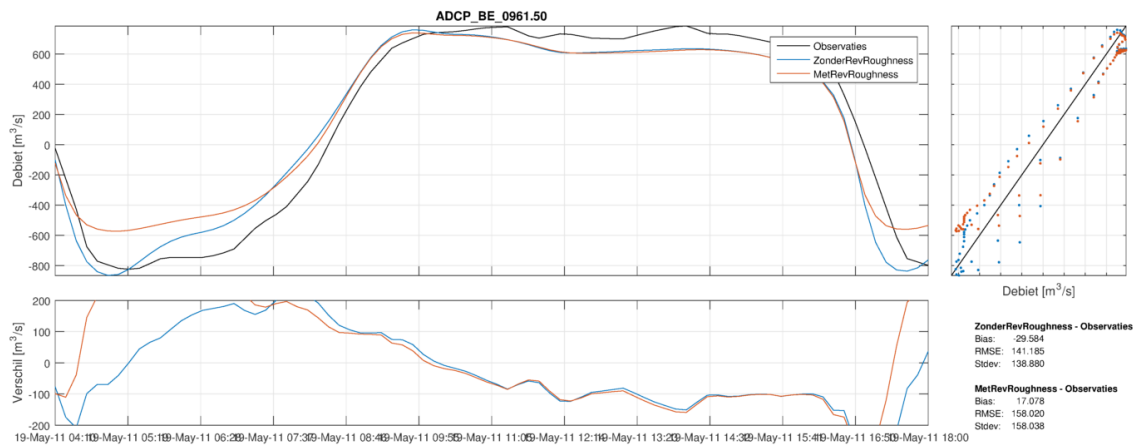
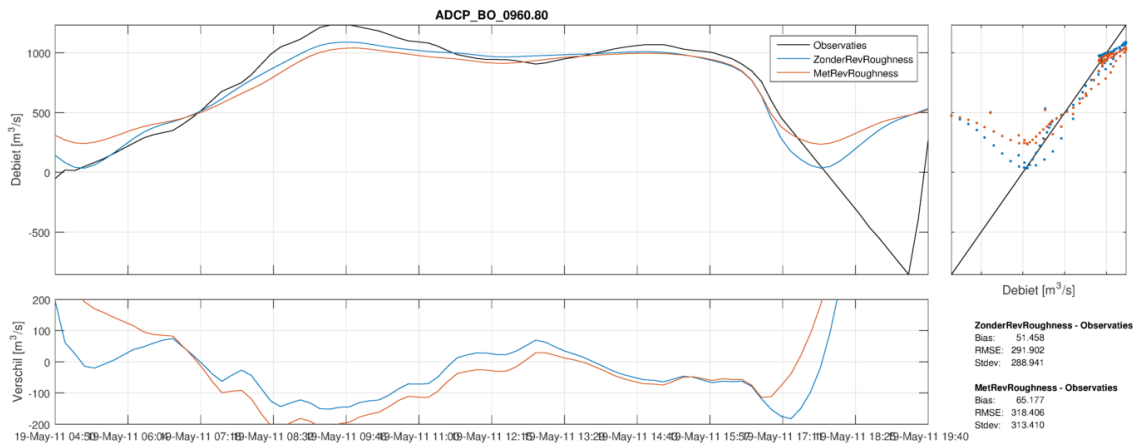


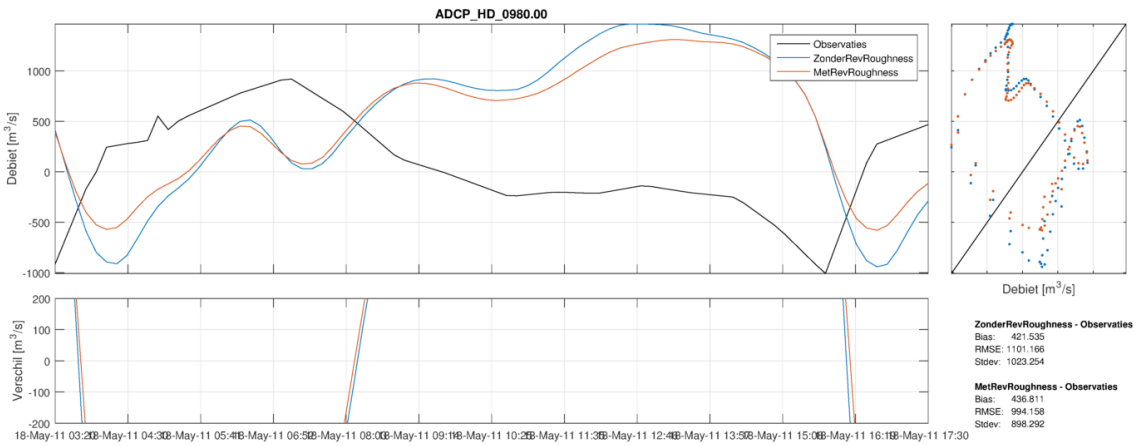
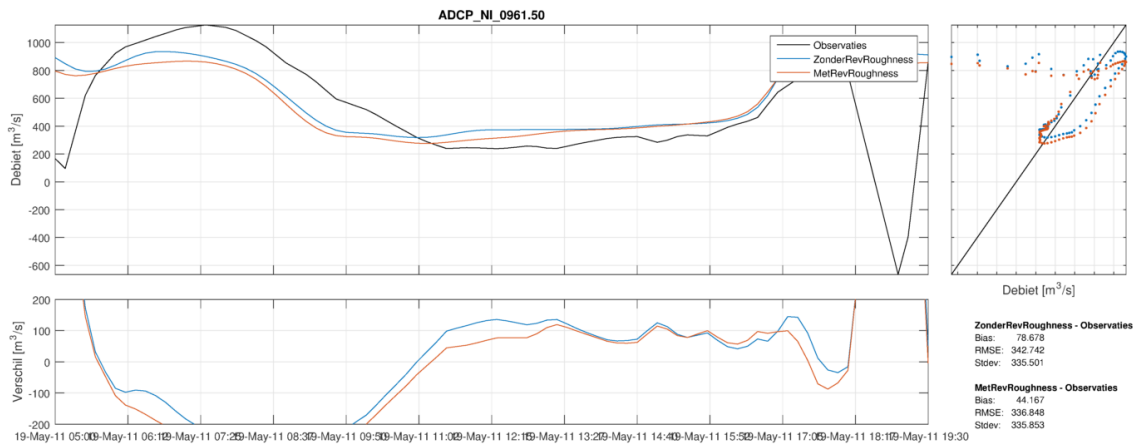




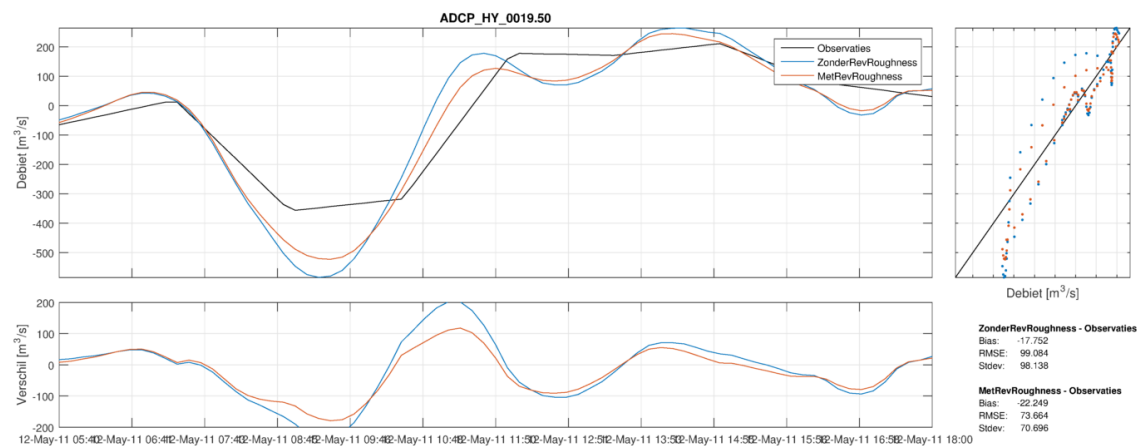
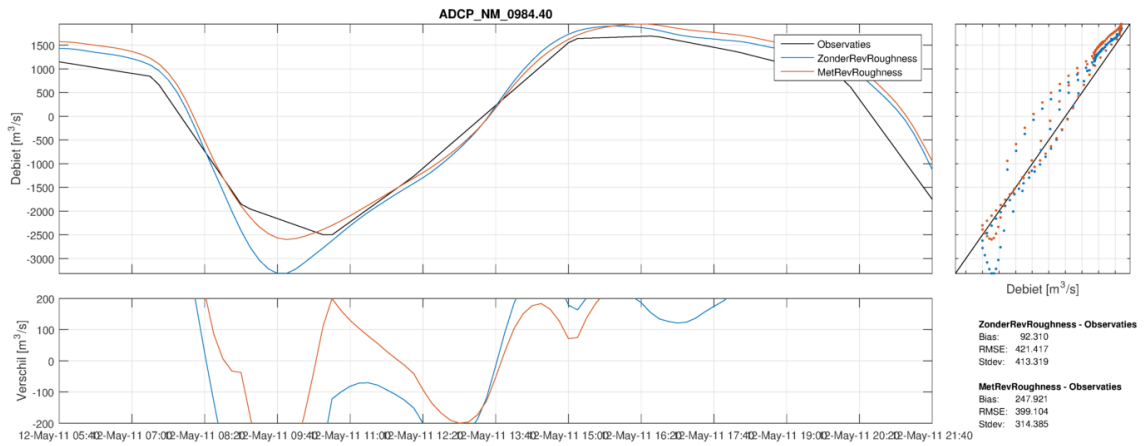
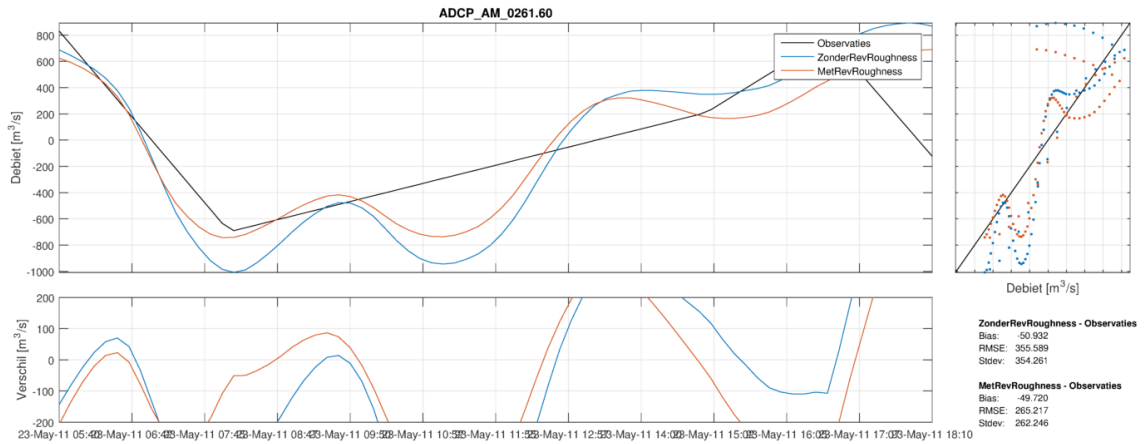
De meting bij Oude Maas km 980 is minder betrouwbaar of onjuist (van der Wijk & Fujisaki, 2016).

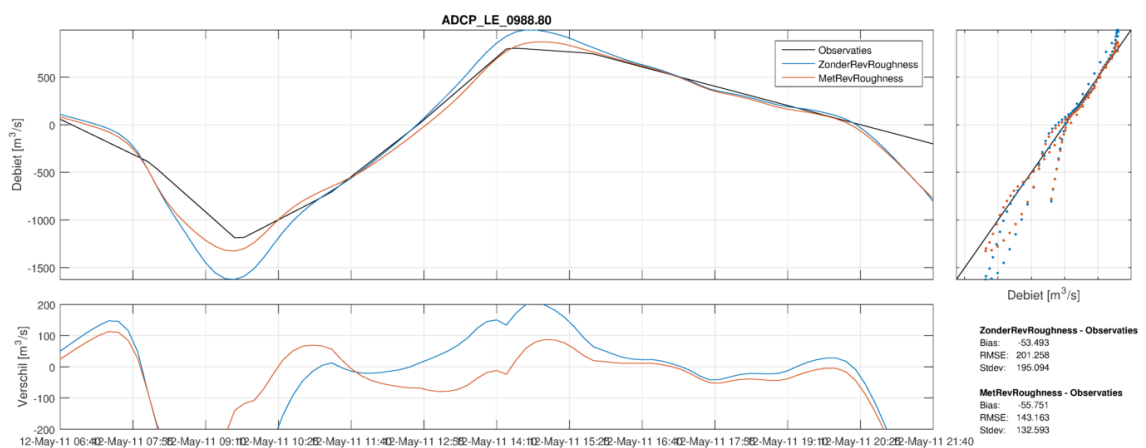
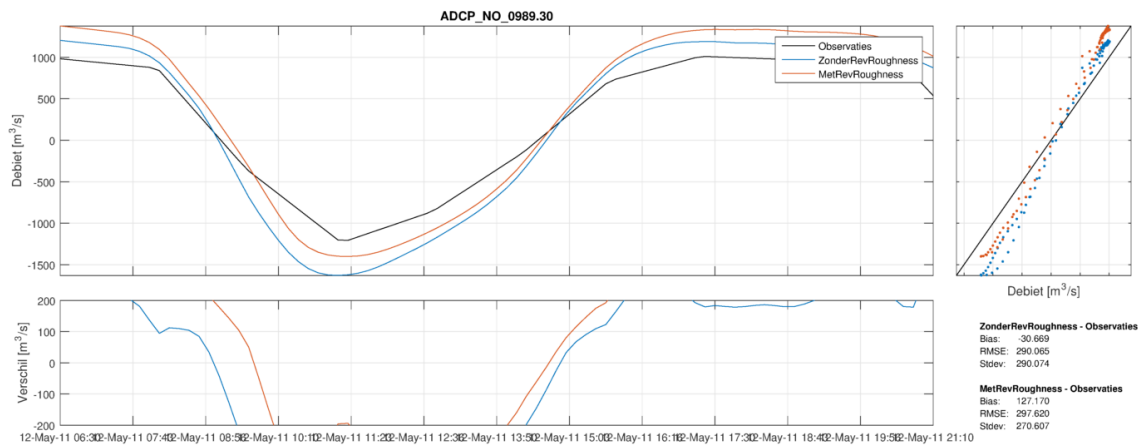
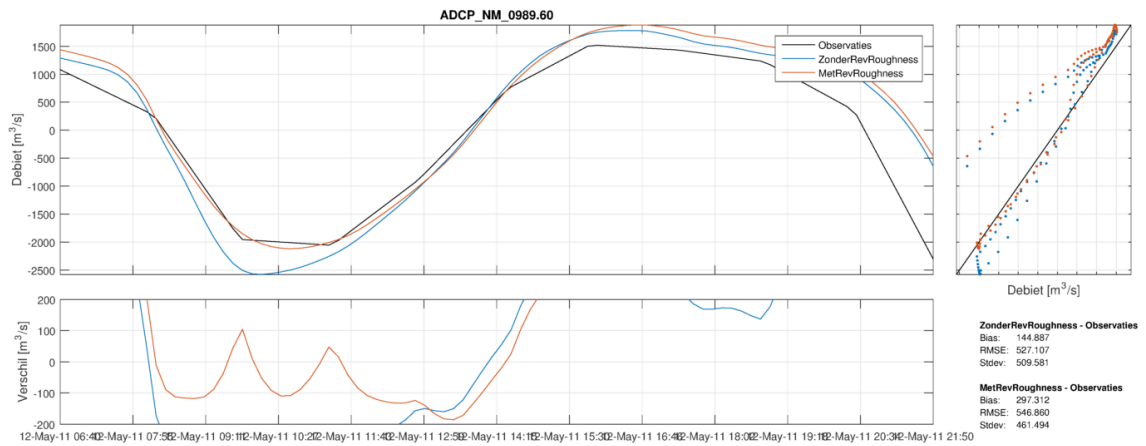


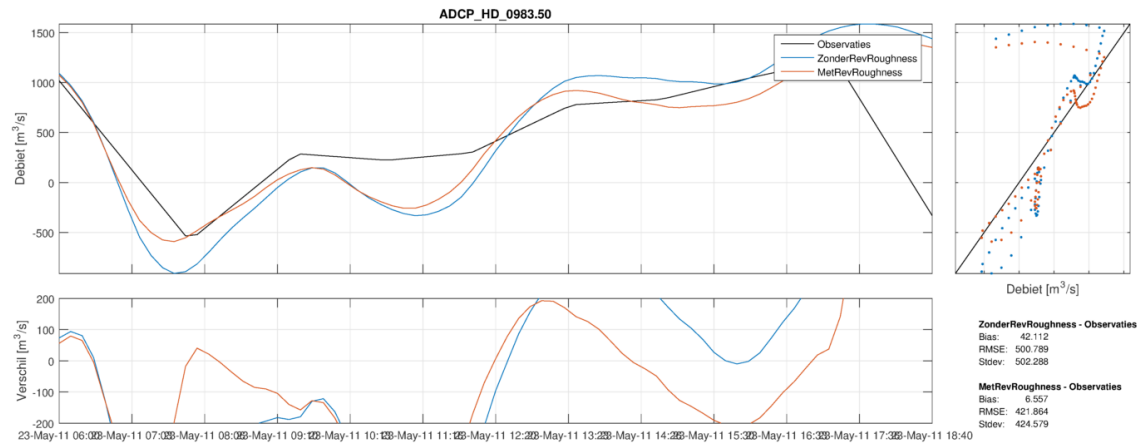
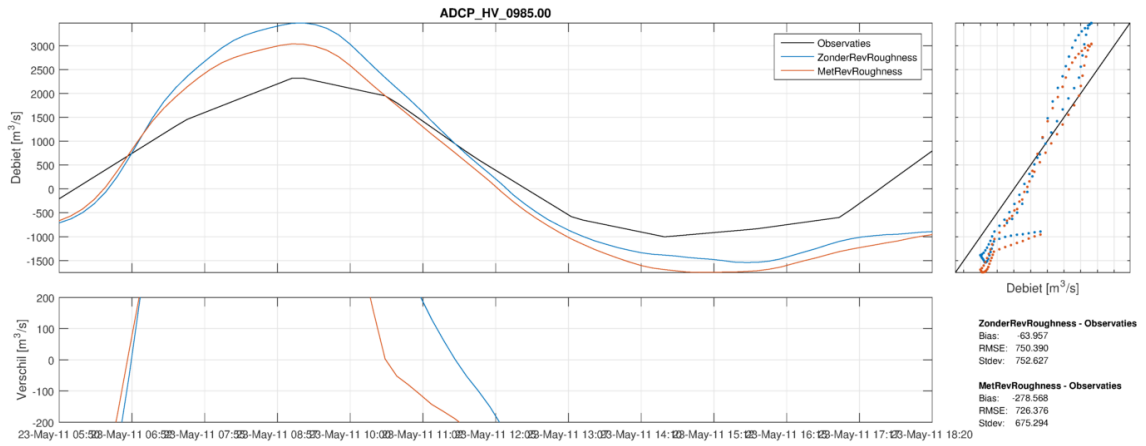


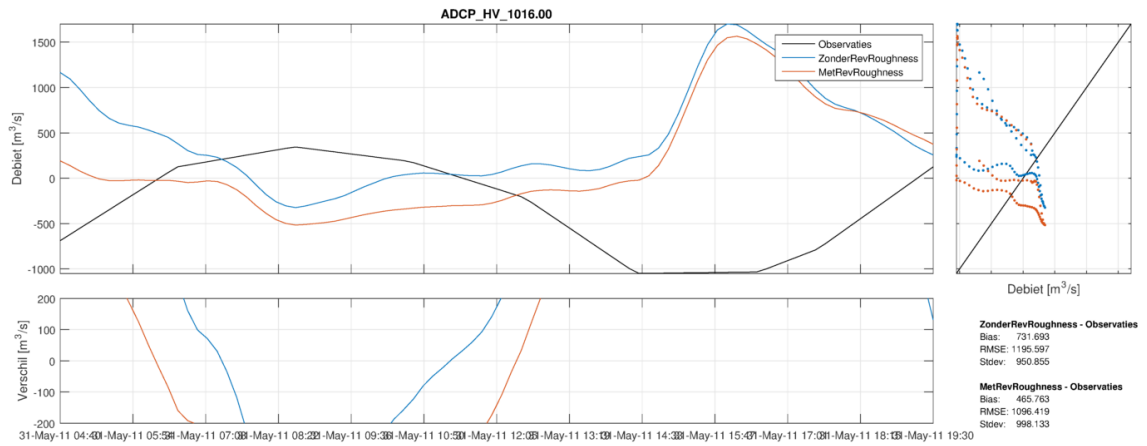
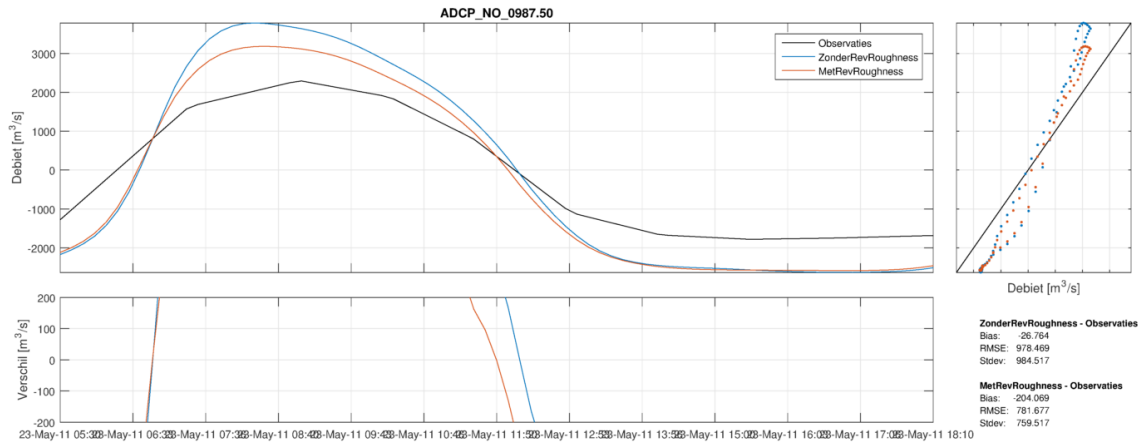


De meting bij Hollands Diep km 980 is minder betrouwbaar of onjuist (van der Wijk & Fujisaki, 2016).

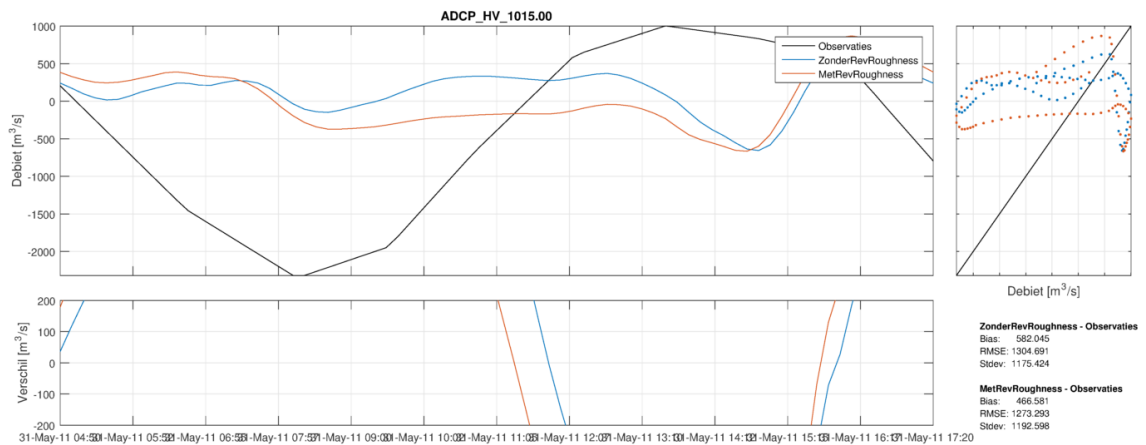
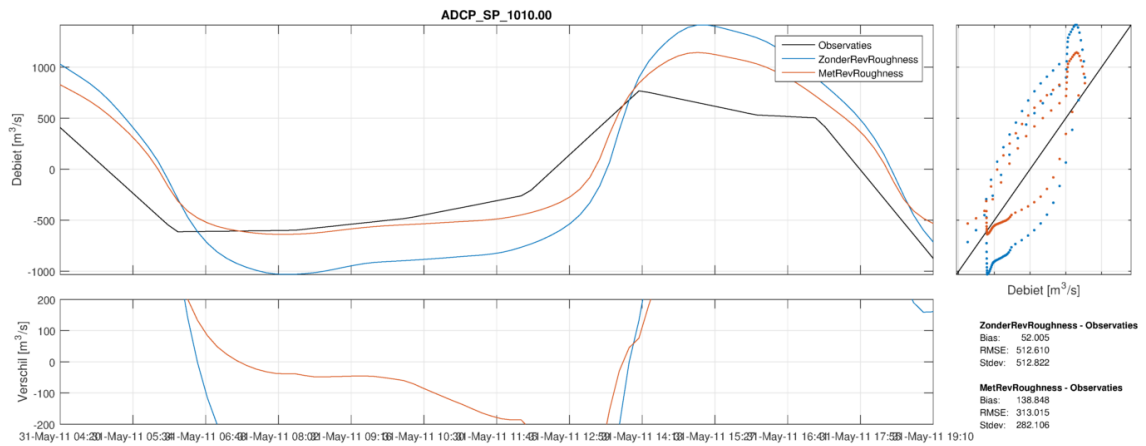








De meting bij Haringvliet km 1016 is onjuist, vanwege een foutief tijdstempel (van der Wijk & Fujisaki, 2016).



De meting bij Haringvliet km 1015 is onjuist vanwege een foutief tijdstempel (van der Wijk & Fujisaki, 2016).