

RMM 3D, een nieuw 3D model van de RijnMaasMonding in D-HYDRO

Vergelijking met zout- en debietmetingen najaar 2018



RMM 3D, een nieuw 3D model van de RijnMaasMonding in D-HYDRO
Vergelijking met zout- en debietmetingen najaar 2018

Auteur(s)

Theo van der Kaaij

Victor Chavarrias

Wouter Kranenburg

RMM 3D, een nieuw 3D model van de RijnMaasMonding in D-HYDRO

Vergelijking met zout- en debietmetingen najaar 2018

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M. Scholten
Referenties	KPP zoet 2021 / 2022; Werkplan KPP2021 RMM-3D (11206813-007-ZWS-0004)
Trefwoorden	Rijn Maas Monding; RMM; Waterstand; Debiet; Zout; Verzilting; Zoutindringing; D-Hydro; 6 ^e generatie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	19-12-2022
Projectnummer	11208053-005
Document ID	11208053-005-ZWS-0002
Pagina's	88
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Theo van der Kaaij	
	Victor Chavarrias	
	Wouter Kranenburg	

Samenvatting

In de voorafgaande jaren is in opdracht van Rijkswaterstaat gewerkt aan de ontwikkeling van RMM 3D, een driedimensionale modelschematisatie voor de Rijn-Maasmonding (RMM) draaiend onder D-HYDRO. Na een eerste vergelijking van modelresultaten met data in 2020, is het doel van deze studie RMM 3D nader te toetsen, met bijzondere aandacht voor de modelprestaties in de Hollandsche IJssel. Dit om zo te komen tot een beeld van de geschiktheid van het model voor beoogde toepassingen, waaronder onderzoek naar effecten van ingrepen en maatregelen op verzilting in de RMM.

De in dit rapport beschreven data-modelvergelijking richt zich op het najaar van 2018. Dit omdat in die droge periode problematische zoutindringing is opgetreden en in die periode intensief is gemeten, in het bijzonder in de Hollandsche IJssel. Voor deze periode zijn om te beginnen berekende waterbewegingsgrootheden, waterstanden en debieten vergeleken met metingen. Deze vergelijkingen lieten een goede reproductie van de metingen zien. Vervolgens zijn zoutmetingen op de vaste meetlocaties van Rijkswaterstaat, de LMW-locaties, vergeleken met berekeningsresultaten. Ook voor deze metingen wordt een goede overeenstemming tussen metingen en berekening gevonden. In vergelijking met saliniteitsprofielmetingen rondom de monding van de Hollandsche IJssel laat het model vergelijkbaar gedrag, maar lagere waarden zien. De reproductie van de vaste metingen is vergelijkbaar met reproductie in ander perioden zoals gerapporteerd in (Kaaij & Chavarrias, 2020). Dit betekent dat de modelreproductie van zoutmetingen *onafhankelijk* is van de gesimuleerde periode.

Voor de Hollandsche IJssel zijn twee verziltingsgebieden te onderscheiden. De nabijheid van de monding waar verzilting een direct gevolg is van verzilting van de monding. Deze verzilting reageert instantaan op verandering in condities als getijfase, rivierafvoer en opzet op zee. Dit type verzilting wordt in dit rapport *directe* verzilting genoemd. Verder stroomopwaarts in de Hollandsche IJssel is verzilting enkel *indirecte* een gevolg van verandering in condities, zoals verzilting in de monding. Wat betreft de *directe* verzilting van Hollandsche IJssel wordt geconcludeerd dat de momenten van verzilting goed worden voorspeld door het model. De berekende zoutgehalten zijn wel iets kleiner dan de gemeten waarden. De *indirecte* verzilting van de Hollandsche IJssel is niet zichtbaar in het model.

Op basis van de vergelijking tussen metingen en berekening wordt geconcludeerd dat het model toepasbaar is voor het bepalen van effecten van ingrepen in het systeem, zoals bijvoorbeeld verdiepen van de Nieuwe Waterweg, en van veranderingen in de forcering van het systeem, bijvoorbeeld door zeespiegelstijging en/of verandering van afvoeren als gevolg van klimaatverandering, op *directe* verzilting. Gegeven de goede reproductie van zoutmetingen, zou ook het operationeel voorspellen van zoutgehalte, waar het *directe* verzilting betreft, in de toekomst mogelijk moeten zijn.

Het gebruik van het model, voor effectstudies en mogelijke toekomstige operationele toepassing, wordt belemmerd door de grote rekenkracht die nodig is om het model te runnen. Aanbevolen wordt te onderzoeken of het mogelijk is de benodigde rekeninspanning te beperken met behoud van de reproductiekwaliteit van het model. Naast toepassing voor verziltingsvraagstukken is een beoogde toepassing van het model scheepvaartbegeleiding van en naar het Rotterdamse Havengebied. De geschiktheid van het model voor deze toepassing is momenteel nog niet getoetst. Aanbevolen wordt bij een volgende toetsingsmogelijkheid meer aandacht te geven aan reproductie van de stroomsnelheden, met name in de Maasgeul. De in 2019 en 2020 uitgevoerde zout- en snelheidsprofielmetingen in de Maasgeul zijn bij uitstek geschikt om toepasbaarheid van het model voor scheepvaartbegeleiding vast te stellen.

Inhoud

	Samenvatting	5
	Inhoud	6
	Lijst met Figuren	8
1	Inleiding	10
1.1	Achtergrond	10
1.2	Doel van deze studie	11
1.3	Aanpak	11
1.4	Opzet rapport	11
1.5	Organisatorische opmerkingen	11
2	Gebruikte meetgegevens en omstandigheden	12
2.1	Bodemligging	12
2.2	Gegevens vaste meetnet	12
2.3	Specifieke meetgegevens Hollandsche IJssel en Lek; Droge periode 2018	14
2.3.1	Beschikbare metingen	14
2.3.2	Overzicht ruimtelijke en temporele dekking	15
2.3.3	Samenvatting meetresultaten Hollandsche IJssel	15
2.4	Debietmetingen Splitsingspunten 2018	16
2.5	Omstandigheden 2 ^e helft 2018	17
3	Modelopzet	19
3.1	Algemeen	19
3.2	Rooster/netwerk	19
3.2.1	Horizontale rekennetwerk	19
3.2.2	Het verticale rekenrooster	20
3.3	Randvoorwaarden van het model	20
3.4	Aanpassingen ten opzichte van de modelschematisatie gebruikt in 2020	21
3.4.1	“j19” versus “j11”	21
3.4.2	Aanpassing bodemschematisatie (verdieping Nieuwe Waterweg)	21
3.4.3	Overige modelinstellingen	22
4	Resultaten simulatie najaar 2018	23
4.1	Simulatieperiode, soft- en hardware	23
4.1.1	Simulatieperiode	23
4.1.2	Randvoorwaarden voor de simulatieperiode	23
4.1.3	Software	24
4.1.4	Hardware	24
4.2	Waterstanden in het gehele RMM-gebied	24

4.2.1	Tijdreeksen	24
4.2.2	Ruimtelijke reproductie gemiddelde waterstand en ruimtelijke reproductie getij	25
4.3	Waterstanden in de Hollandsche IJssel	26
4.4	Debieten op splitsingspunten	28
4.5	Zoutgehalten in het gehele RMM-gebied (Vaste Meetlocaties, LMW-stations)	29
4.5.1	Tijdreeksen	29
4.5.2	Vergelijking met eerdere berekeningen (genormaliseerde kentallen)	33
4.5.2.1	Definitie targetdiagrammen	33
4.5.2.2	Targetdiagrammen 2018 simulatie	34
4.5.2.3	Consistentie 2011 en 2018 simulaties	34
4.6	Zoutindringing in de Hollandsche IJssel	35
4.7	Zoutprofielen splitsingspunt Hollandsche IJssel/Nieuwe Maas	39
5	Discussie	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Evaluatie aanpak	41
5.3	Interpretatie resultaten	41
5.3.1	Onderscheid directe en indirecte verzilting	41
5.3.2	Weergave directe zoutindringing/verzilting	42
5.3.3	Weergave indirecte zoutindringing/verzilting	42
5.4	Implicatie resultaten: mogelijkheden en beperkingen voor toepassingen	42
6	Conclusies en aanbevelingen	44
6.1	Conclusies	44
6.1.1	Conclusies met betrekking tot reproductie van metingen	44
6.1.2	Conclusies met betrekking tot gebruik van het model	44
6.2	Aanbevelingen	45
7	Referenties	46
A	Berekende en gemeten waterstanden 2018	47
B	Debieten bij Splitsingspunten	57
C	Tijdreeksen Saliniteit 2018, Landelijk Meetnet Water (LMW) stations	62
D	Tijdreeksen Saliniteit 2018, Hollandsche IJssel	78
E	Profielmetingen monding Hollandsche IJssel	83

Lijst met Figuren

Figuur 1-1: Vergelijking gemeten met berekend stratificatie Nieuwe Waterweg; 5 december 2011	10
Figuur 2-1: Locaties waterstandmetingen (tijdreeksen; RWS, Rijkswaterstaat meetlocaties; HbR. Havenbedrijf Rotterdam meetlocaties)	13
Figuur 2-2: Locaties saliniteitsmetingen (tijdreeksen)	13
Figuur 2-3: Beschikbaarheid saliniteitsmetingen 2 ^e helft 2018	14
Figuur 2-4: Overzichtskaart van de meetlocaties op de Hollandsche IJssel en Lek	15
Figuur 2-5: (Getijgemiddelde) Chlorideconcentratie en netto afvoer op de Hollandsche IJssel inclusief hulplijnen voor de verziltingsperiodes.	16
Figuur 2-6: 2018 a) Gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland; b) Bovenrijnafvoer te Lobith; c) waterstand te Hoek van Holland, en de opsplitsing daarvan in en getij en windopzet (d); allen voor periode april – december 2018.	18
Figuur 3-1: Rekenrooster/netwerk RMM-model	19
Figuur 3-2: Rekenrooster/netwerk RMM-model (detail splitsing Nieuwe Waterweg, Oude Maas, nieuwe Maas)	20
Figuur 3-3: Typen laagverdeling (schematisch); Blauw: Water; Oranje: Bodem; Links sigma (σ -) lagen; Midden vaste (z-)lagen; Rechts een combinatie van sigma (σ -) en vaste (z-)lagen.	20
Figuur 3-4: Bodemligging 2018 (bovenste Figuur) en de aanpassingen ten opzichte van de 2019 bodem (onderste Figuur); Links gehele Nieuwe Waterweg, rechts gebied met grootste aanpassingen. Positief verschil is een verdieping, i.e. diepte 2019 groter dan diepte 2018.	22
Figuur 4-1: Waterstandsreproductie Hoek van Holland 1 ^e helft augustus 2018.	24
Figuur 4-2: Waterstandsreproductie Hoek van Holland 1 ^e helft mei 2011.	24
Figuur 4-3: (Links) Ruimtelijk beeld van de kwaliteit van de middenstandsreproductie: bias (gemiddelde waarde van berekening minus meting; en (rechts) ruimtelijke weergave van de standaardafwijking van het verschil tussen meting en berekening als parameter voor de getijreproductie.	25
Figuur 4-4: Waterstandsreproductie Krimpen aan den IJssel 1 ^e helft augustus 2018	27
Figuur 4-5: Waterstandsreproductie Krimpen aan den IJssel 1 ^e helft van mei 2011	27
Figuur 4-6: Waterstandsreproductie Gouda Brug 1 ^e helft augustus 2018	27
Figuur 4-7: Waterstandsreproductie Gouda Brug 1 ^e helft van mei 2011	27
Figuur 4-8: “Gemeten” en berekende debieten; Splitsingspunt Nieuwe Waterweg, Oude Maas, Nieuwe Maas; 17 augustus 2018	28

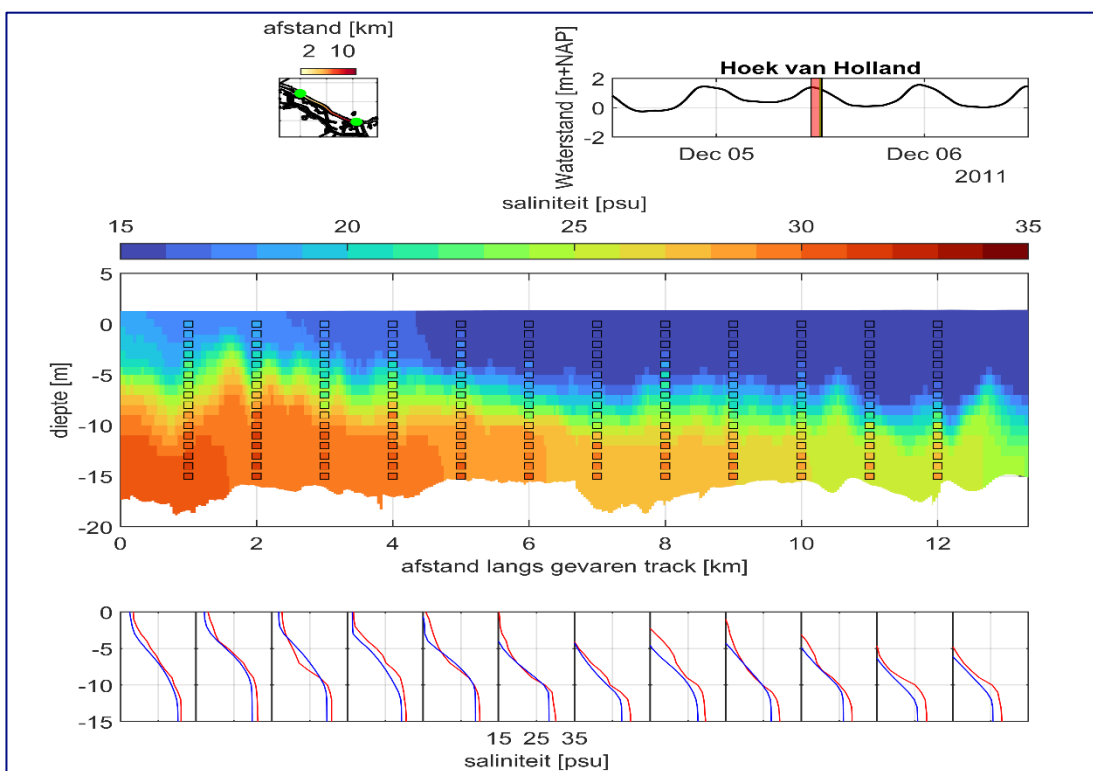
Figuur 4-9: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Brienoordbrug; Diepte -2.5 m NAP	30
Figuur 4-10: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Brienoordbrug; Diepte -2.5 m NAP	31
Figuur 4-11: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Kinderdijk aan de Lek; Diepte -4.0 m NAP	31
Figuur 4-12: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Kinderdijk aan de Lek; Diepte -4.0 m NAP	32
Figuur 4-13: Target diagrammen 2018 simulatie; links gehele analyseperiode (20 juli 2018 – 8 november 2018); rechts periode met grootste zoutindringing (19 oktober 2018 - 26 oktober 2018)	34
Figuur 4-14: Links 1 ^e week december 2011, Midden mei 2011, Rechts 2018 periode met grootste zoutindringing (19 oktober 2018 - 26 oktober 2018)	35
Figuur 4-15: Vergelijking gemeten tegen berekende zoutindringing Hollandsche IJssel	36
Figuur 4-16: Gemeten tegen berekende zoutgehalte, meetlocatie Krimpen aan den IJssel, 2,5 km stroomopwaarts van de monding,, periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018).	37
Figuur 4-17: Gemeten tegen berekende zoutgehalte, diverlocatie Rood-12 (afstand tot monding 8,5 km), periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018).	38
Figuur 4-18: Gemeten tegen berekende zoutgehalte, diverlocatie Groen-26 (afstand tot monding 12,5 km), periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018).	38
Figuur 4-19: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 21 augustus 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan). Snelheid: vloedsnelheid is positief, eb negatief. B, Berekende profiel; M, Gemeten profiel	40

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de voorafgaande jaren is in het kader van het KPP-programma Hydraulica Schematisaties Zoet en Zout in opdracht van Rijkswaterstaat gewerkt aan de ontwikkeling van een driedimensionale modelschematisatie voor de Rijn-Maasmonding (RMM) draaiend onder D-HYDRO. Deze schematisatie is bedoeld om stroomsnelheid en saliniteit in de Rijn-Maasmonding¹ en het verloop daarvan onder invloed van getij, wind en windopzet, rivierafvoer, lozingen en onttrekkingen te kunnen voorspellen. Ook is een beoogd doel van deze schematisatie hiermee het effect van ingrepen in het systeem en veranderingen van forcering door bijvoorbeeld klimaatverandering te kunnen onderzoeken. Een van de eerste beoogde/verwachte toepassingen is onderzoek naar zoutindringing in droge zomers en eventuele maatregelen daartegen, met het oog op zoetwaterinname in bijvoorbeeld de Hollandsche IJssel en Lek.

In 2020 is de tot dan toe ontwikkelde schematisatie getest en zijn modelresultaten vergeleken met onder andere varende metingen van saliniteit op een langdoorsnede in de Nieuwe Waterweg, zie Figuur 1-1 (Kaaij & Chavarrias, 2020). Daarbij is gebleken dat in het bijzonder het gebruik van gecombineerde vaste (z-) lagen nabij de bodem en variabele (sigma-) lagen nabij het oppervlak goede resultaten opleverde voor de stratificatie in de Nieuwe Waterweg.



Figuur 1-1: Vergelijking gemeten met berekend stratificatie Nieuwe Waterweg; 5 december 2011

Dit rapport beschrijft de activiteiten die in het kader van het KPP 2021 zijn uitgevoerd en de update daarvan in het kader van KPP 2022. Het betreft een vervolg op de 2020 werkzaamheden en kan gezien worden als een verdere toetsing van het model.

¹ Het model wordt natuurlijk ook geacht met een zekere nauwkeurigheid waterstanden te kunnen voorspellen. Maar voorspelling daarvan is niet het doel van deze modelschematisatie. Daarvoor zijn andere instrumenten beschikbaar.

1.2 Doel van deze studie

Om de 3D schematisatie van de Rijn-Maasmonding te brengen tot het niveau van een Product dat in Beheer en Onderhoud kan worden opgenomen en kan worden toegepast voor onderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat, is het noodzakelijk een goed beeld te hebben van de modelprestaties en de geschiktheid van het model voor beoogde toepassingen.

Om die reden is het doel van de werkzaamheden in 2021 en 2022: nadere toetsing van de 3D modelschematisatie voor de Rijn-Maasmonding, met bijzondere aandacht voor de modelprestaties in het toepassingsgebied van de Hollandsche IJssel. Dit laatste omdat de Hollandsche IJssel ten tijde van droogte een knelpunt is voor zoutindringing.

1.3 Aanpak

Er is voor gekozen bij deze nadere toetsing van het RMM 3D model een data-modelvergelijking uit te voeren voor de periode najaar 2018. Deze periode is gekozen vanwege de beschikbaarheid van metingen in het bijzonder voor de Hollandsche IJssel, en de voor zoutindringing kritische omstandigheden in deze periode.

Het uitgangspunt waar het de modelschematisatie betreft is de schematisatie zoals gebruikt in 2020. De in 2020 uitgevoerde berekeningen hadden echter betrekking op 2011. De gebruikte modelschematisatie is een zogenaamde “j12” schematisatie en heeft waar het geometrie en bodemligging betreft betrekking op 2012.

In dit project is achtereenvolgens:

- een update gedaan van de modelschematisatie. De “j12” schematisatie is vervangen door een “j19” schematisatie die betrekking heeft op 2019;
- de bodemligging in de Nieuwe Waterweg aangepast om zo goed als mogelijk overeen te komen met de bodemligging in het najaar van 2018;
- een berekening uitgevoerd voor het najaar van 2018;
- de berekeningsresultaten vergeleken met metingen;
- op basis van de overeenkomsten en de verschillen tussen meting en berekening bediscussieerd wat de toepasbaarheid en de beperkingen van het model zijn.

1.4 Opzet rapport

De in deze studie gebruikte meetgegevens en omstandigheden met betrekking tot afvoer, wind en opzet op zee worden besproken in Hoofdstuk 2. Het gebruikte rekenmodel, het 3D model van de RijnMaasMonding in D-HYDRO, wordt besproken in Hoofdstuk 3. Berekeningsresultaten van het model in combinatie met de vergelijking met metingen worden gegeven in Hoofdstuk 4, en bediscussieerd in het licht van de toepasbaarheid van het model in Hoofdstuk 5. Tenslotte worden de conclusies en aanbevelingen gegeven in Hoofdstuk 6.

1.5 Organisatorische opmerkingen

De in dit rapport beschreven werkzaamheden zijn uitgevoerd door Victor Chavarrias (berekeningen, processing), Theo van der Kaaij (interpretatie en grootste deel rapportage) en Wouter Kranenburg (interpretatie, bijdrage rapportage, projectleiding). Namens Rijkswaterstaat is het project begeleid door Martin Scholten en Yann Friocourt, beiden van de dienst Waterveiligheid en Leefomgeving.

Het model, de resultaten en de toepasbaarheid van het model zijn besproken/bediscussieerd met de stakeholders tijdens een workshop gehouden op 3 november 2021.

2 Gebruikte meetgegevens en omstandigheden

2.1 Bodemligging

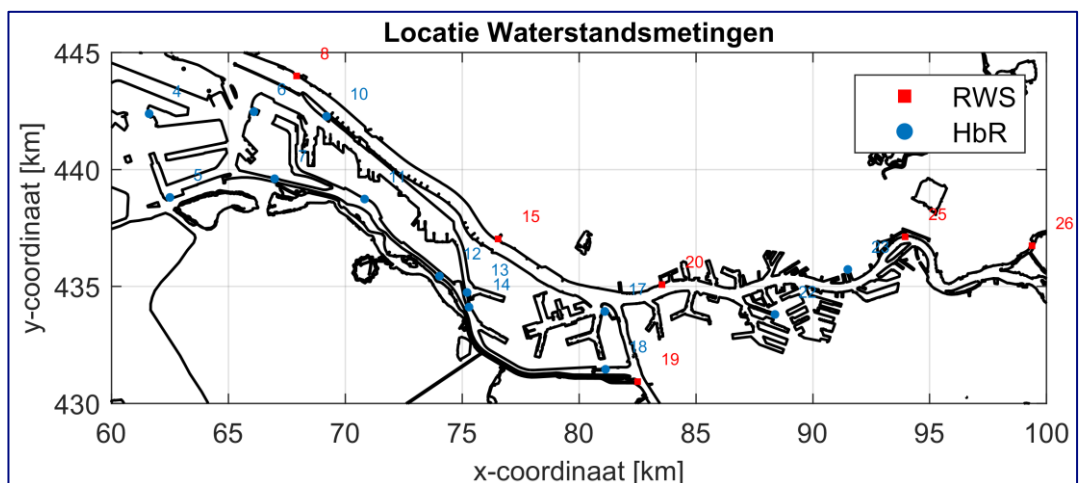
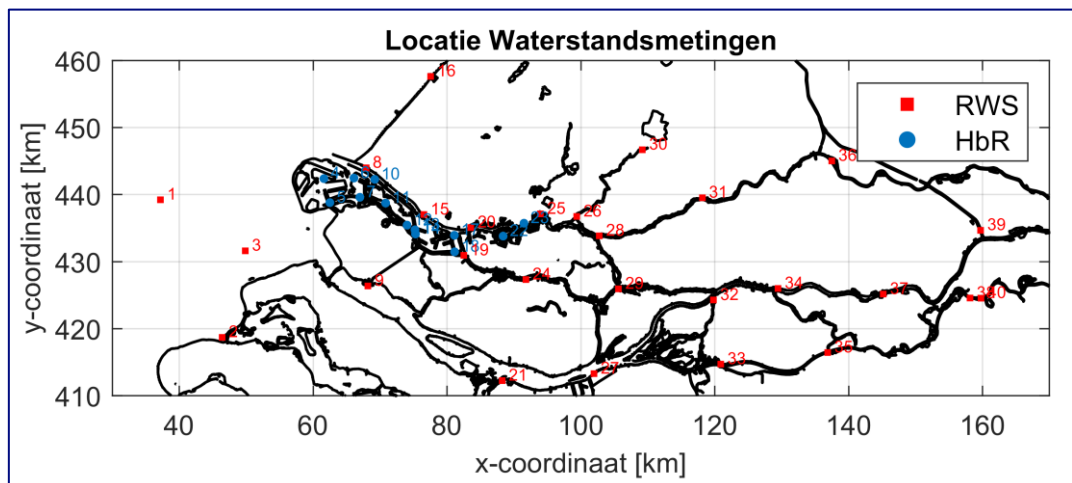
In 2018 is de Nieuwe Waterweg verdiept om de toegankelijkheid van het Rotterdamse Havengebied te vergroten. Gedurende de baggerwerkzaamheden is de bodemligging regelmatig gemeten door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR). Deze meetgegevens, meer specifiek de metingen van de bodemligging op 4 augustus 2018, zijn gebruikt in deze studie (voor de update van de modelbathymetrie).

2.2 Gegevens vaste meetnet

Uit de vaste meetnetten van zowel Rijkswaterstaat als het Havenbedrijf Rotterdam (HbR), zijn gebruikt in deze studie:

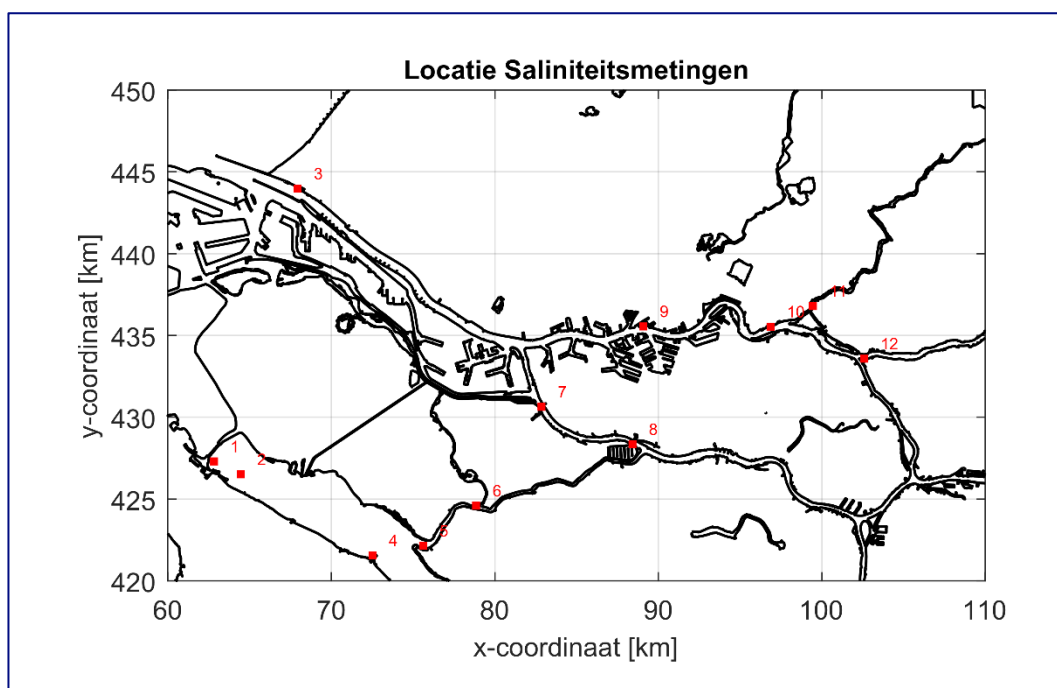
- tijdreeksen van gemeten waterstanden uit het vaste meetnet van Rijkswaterstaat,
- tijdreeksen van gemeten waterstanden uit het meetnet van het HbR, en
- tijdreeksen van gemeten saliniteit uit het vaste meetnet van Rijkswaterstaat.

De locaties van in dit rapport gebruikte waterstandsmetingen worden getoond in Figuur 2-1. Figuur 2-2 toont de locaties waar saliniteit wordt gemeten.



StationNr.	Naam	Bron	StationNr.	Naam	Bron
1	Lichteiland-Goeree	RWS	21	Rak-noord	RWS
2	Brouwershavense-Gat-8-meetpaal	RWS	22	Eemhaven	HbR
3	Haringvliet-10	RWS	23	Parkhaven	HbR
4	Europahaven	HbR	24	Goidschalxoord	RWS
5	Hartelhaven	HbR	25	Rotterdam	RWS
6	Tennesseehaven	HbR	26	Krimpen-ad-IJssel	RWS
7	Suurhoffbrug	HbR	27	Moerdijk	RWS
8	Hoek-van-Holland	RWS	28	Krimpen-aan-de-Lek	RWS
9	Hellevoetsluis	RWS	29	Dordrecht	RWS
10	Scheurhaven	HbR	30	Gouda-brug	RWS
11	Hartelkanaal	HbR	31	Schoonhoven	RWS
12	Harmsenbrug	HbR	32	Werkendam-buiten	RWS
13	Rozenburgsesluis (Caland Kanaal)	HbR	33	Keizersveer	RWS
14	Rozenburgsesluis (Hartel Kanaal)	HbR	34	Vuren	RWS
15	Maassluis	RWS	35	Heesbeen	RWS
16	Scheveningen	RWS	36	Hagestein-beneden	RWS
17	Geulhaven	HbR	37	Zaltbommel	RWS
18	Hartelsluis	HbR	38	Lith-dorp	RWS
19	Spijkenisse	RWS	39	Tiel-Waal	RWS
20	Vlaardingen	RWS	40	Lith-boven	RWS

Figuur 2-1: Locaties waterstandmetingen (tijdreeksen; RWS, Rijkswaterstaat meetlocaties; HbR. Havenbedrijf Rotterdam meetlocaties)

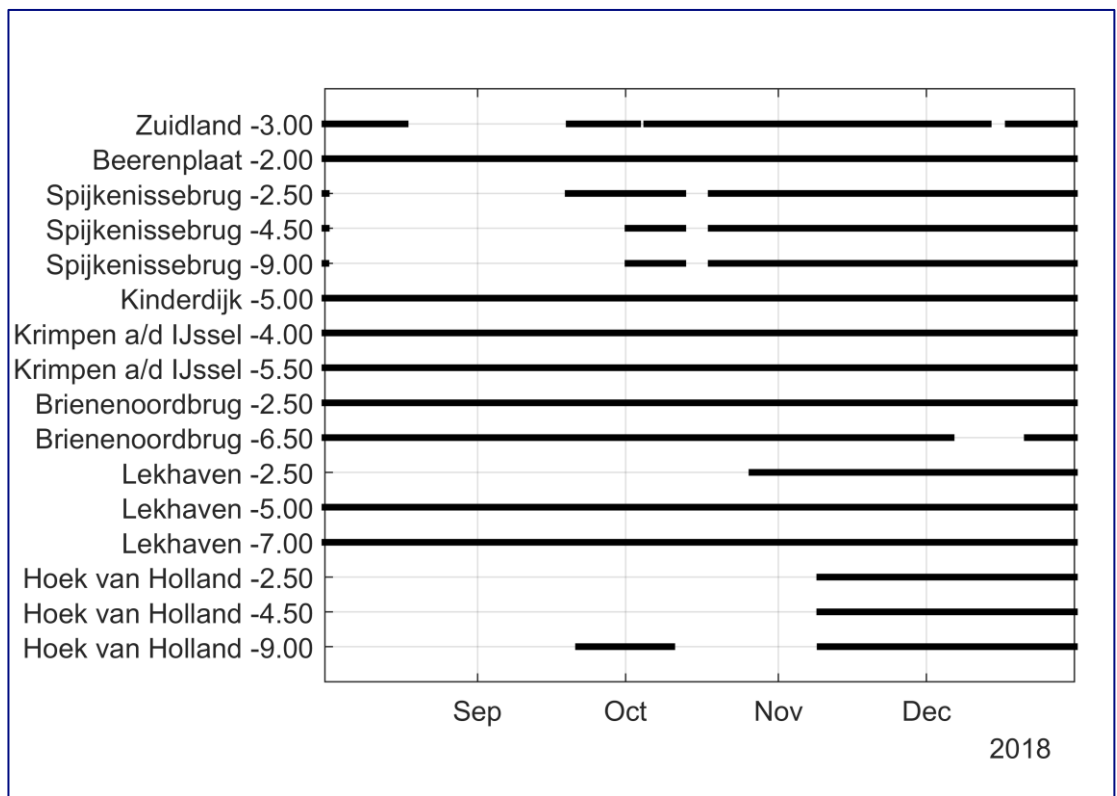


StationNr.	Naam	StationNr.	Naam
1	Beerenplaat	7	Kinderdijk-ad-Lek
2	Bernisse-Zuidland	8	Krimpen-ad-IJssel
3	Brienoordbrug	9	Lekhaven
4	Haringvlietboei	10	Middelharnis
5	Hoek-van-Holland	11	Spijkenisse
6	Beningen		

Figuur 2-2: Locaties saliniteitsmetingen (tijdreeksen)

Voor de beschikbaarheid van saliniteitsmetingen uit het vaste meetnet in 2018 geldt dat deze, in ieder geval voor de 2^e helft van het jaar, minder is dan voor 2011, zie Figuur 2-3. Met name voor meetlocaties Hoek van Holland, Lekhaven en Spijkenissebrug geldt dat veel metingen

ontbreken. Het ontbreken van Hoek van Holland bemoeilijkt de analyse van berekeningen omdat deze meest stroomafwaarts gelegen meetlocatie gezien kan worden als verificatie van de “rand” waar het zoutindringing in de Nieuwe Waterweg betreft.



Figuur 2-3: Beschikbaarheid saliniteitsmetingen 2^e helft 2018

2.3 Specifieke meetgegevens Hollandsche IJssel en Lek; Droge periode 2018

2.3.1 Beschikbare metingen

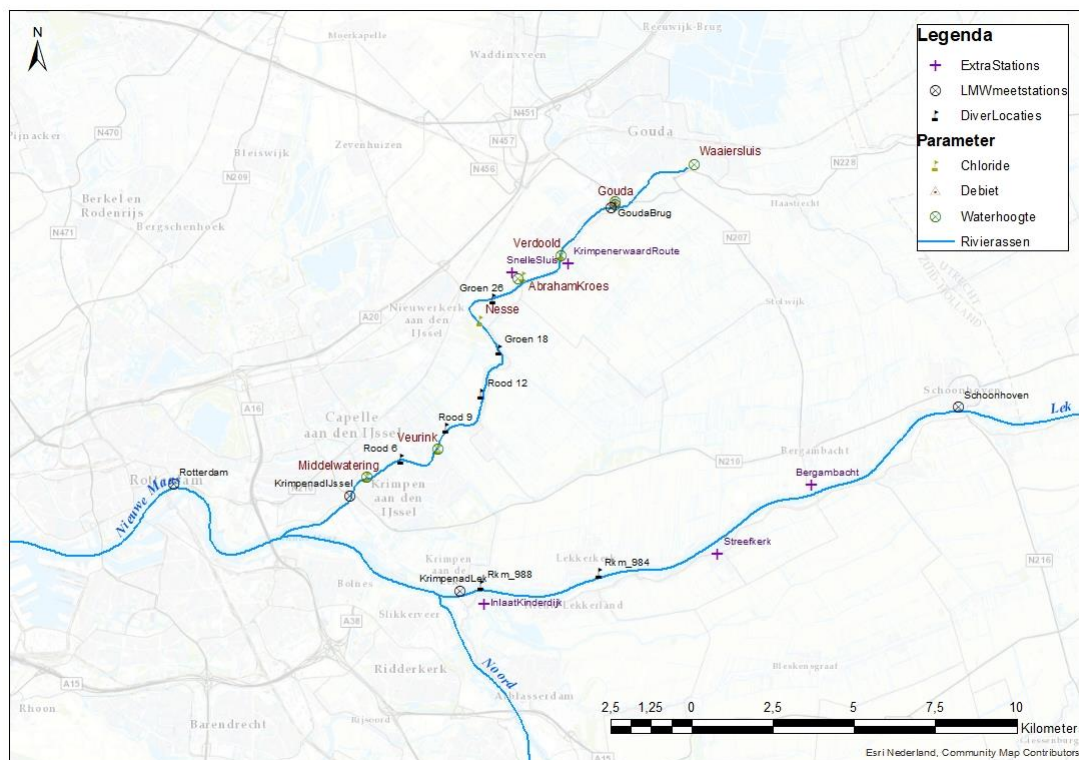
Gedurende de droge periode in 2018 zijn zowel de Hollandsche IJssel als de Lek intensief bemeten waarbij het accent lag op de zoutindringing op/in deze riviertakken. De in deze studie gebruikte metingen betreffen:

- metingen van Rijkswaterstaat:
 - 7 divermetingen² Hollandsche IJssel en Lek, en
 - varende zoutprofielmetingen.
- metingen beschikbaar via Slim Watermanagement informatiescherm Hollandsche IJssel:
 - waterstanden op de Hollandsche IJssel, en
 - debieten van gemaal Gouda.
- aanvullende gegevens vanuit de regio:
 - aanvullende lozingen en onttrekkingen Hollandsche IJssel en Lek.

² Een diver is een meetinstrument dat, na installatie, continu de geleidbaarheid van elektriciteit in water. Uit deze geleidbaarheid kan, in combinatie met de watertemperatuur, het zoutgehalte worden afgeleid. Uiteindelijk resulteert dus een tijdreeks van saliniteit of chloridegehalte ter plaatse van de diver.

2.3.2 Overzicht ruimtelijke en temporele dekking

In Figuur 2-4 is de positie te vinden van de meetlocaties (de divers) op de Hollandsche IJssel en de Lek. Deze vaste metingen zijn vanaf halverwege juli tot en met december beschikbaar.



Figuur 2-4: Overzichtskarta van de meetlocaties op de Hollandsche IJssel en Lek

De varende metingen zijn tussen juli en begin oktober uitgevoerd.

2.3.3 Samenvatting meetresultaten Hollandsche IJssel

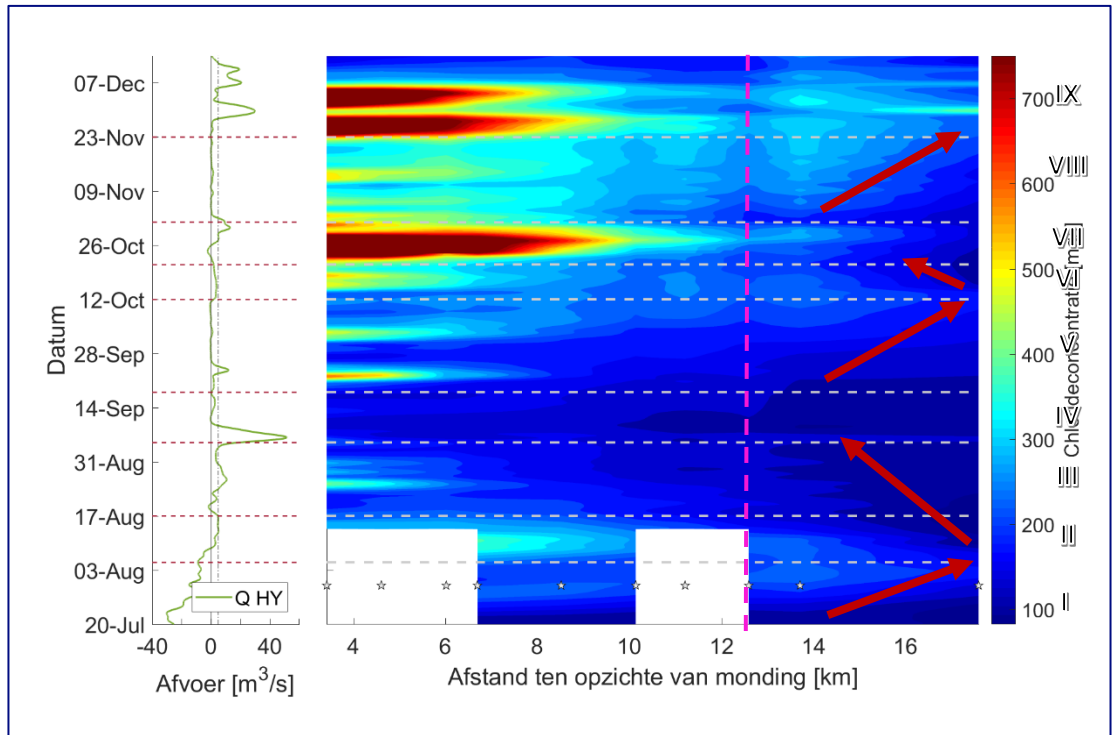
De uitgevoerde metingen zijn uitgebreid geanalyseerd in (Wijk, Kaaij, & Kranenburg, 2019). Een samenvatting van de meetresultaten wordt getoond in Figuur 2-5.

De figuur laat zien dat gedurende drie perioden de monding van de Hollandsche IJssel ernstig verzilt is geweest. Het betreft:

- de laatste week van oktober 2018,
- de laatste week van november 2018, en
- de eerste week van december 2018.

Gedurende deze perioden zijn geen varende zoutprofielmetingen uitgevoerd.

In Figuur 2-5 zijn 2 “gebieden” te onderscheiden. Van de monding van de Hollandsche IJssel tot km 10 à 12 (**rode gebied**) en het gebied verder stroomopwaarts (**blauwe gebied**) waar verzilting veel langzamer optreedt (naar rechts wijzende dikke rode pijlen in Figuur 2-5). Het **rode** verziltingsgebied heeft een lengte ongeveer gelijk aan de getijweg in de Hollandsche IJssel. Verzilting van de monding heeft **direct** verzilting tot gevolg. Het overige deel van de Hollandsche IJssel wordt “**indirect**” beïnvloed door de monding.



Figuur 2-5: (Getijgemiddelde) Chlorideconcentratie en netto afvoer op de Hollandsche IJssel inclusief hulplijnen voor de verziltingsperiodes.

Toename van **indirecte** verzilting, naar rechts wijzende rode pijlen, zijn een gevolg van directe verzilting van de monding. Afname van indirecte verzilting, naar links wijzende rode pijlen, is een gevolg van:

- verzoeten van de monding, al dan niet in combinatie met,
- het in het najaar van 2018 gevoerde actieve beheer, i.e. om indirecte verzilting tegen te gaan is door de gemalen boezemwater uitgeslagen op de Hollandsche IJssel om zo verder oprukken van zout tegen te gaan.

Directe verzilting kan gezien worden als een instantaan gevolg van verandering in condities, een directe, bijna instantane, respons op een verandering in getijfase (eb/vloed), rivierafvoer of opzet op zee. Voor indirecte verzilting geldt dit veel minder. Het is, deels althans, een gevolg van langdurige direct verzilting van de monding. Dit geeft het zout de kans geleidelijk op te trekken richting Gouda. Merk op dat het een enkele keer het geval lijkt dat het zout in het stroomopwaartse deel van de Hollandsche IJssel hoofdzakelijk afkomstig is van de instroom bij Gouda of lozing vanuit de polders (zie bv. eind november).

2.4 Debietmetingen Splitsingspunten 2018

In de 2^e helft van 2018 zijn op een 3-tal splitsingspunten in het gebied het “debiet”³ en chlorideconcentraties (profielen) gemeten. Deze metingen zijn toegeleverd door Rijkswaterstaat (Dienst WNZ; Marlous van Herten). Een overzicht van deze metingen wordt gegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

³ Betreft eigenlijk snelheidsmetingen (ADCP). Toegeleverd zijn de tot debiet bewerkte gegevens.

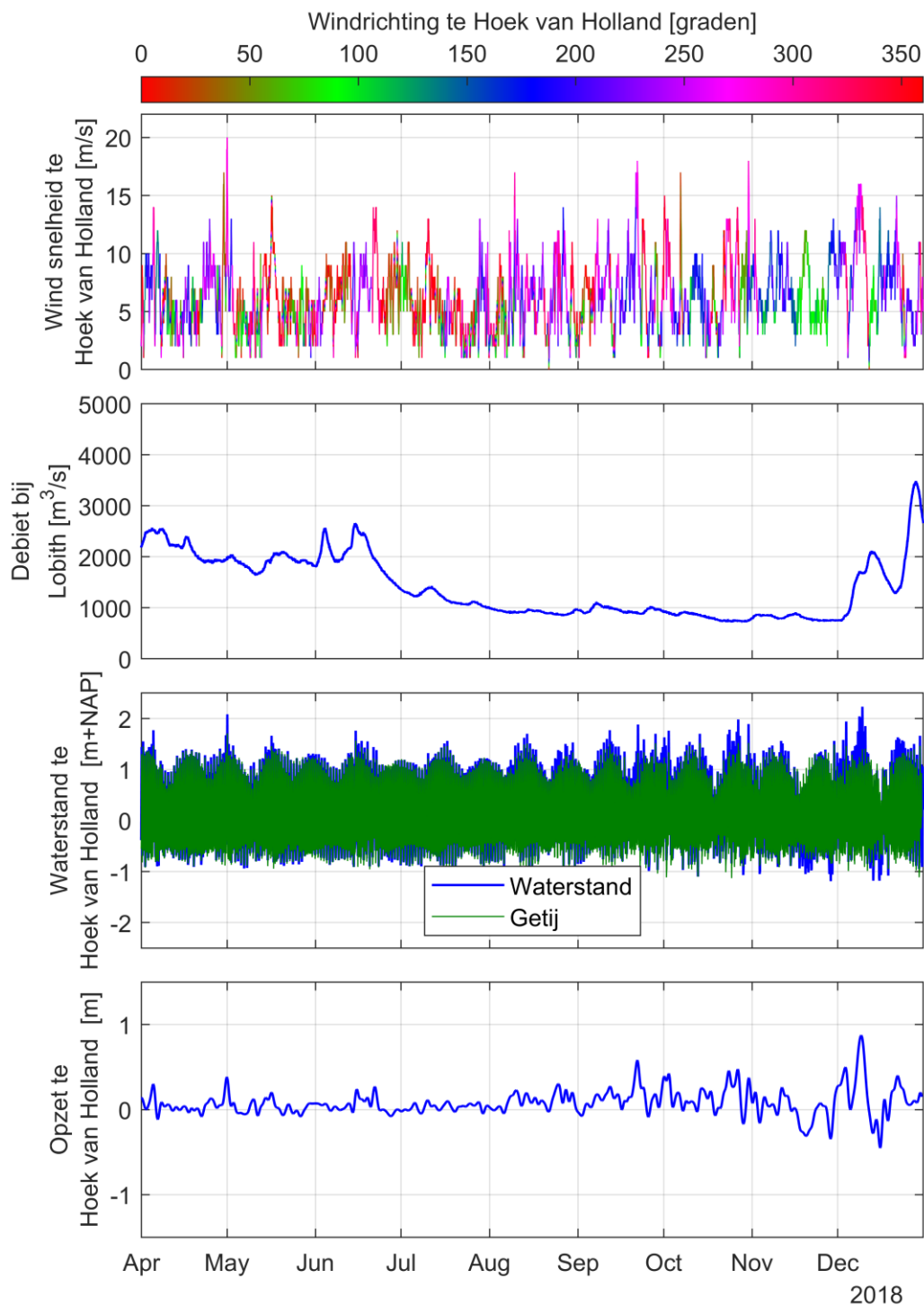
2.5 Omstandigheden 2^e helft 2018

Figuur 2-6 toont de gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland, de Bovenrijnafvoer te Lobith, de gemeten waterstand te Hoek van Holland, en de opsplitsing daarvan in getij en windopzet, allen voor de 2^e helft van 2018.

Verzilting treedt met name op bij lage Bovenrijnafvoeren en/of bij een grote windopzet op zee. Voor de 2^e helft van 2018 geldt dat Bovenrijnafvoer in de maanden augustus tot en met november lager was dan 1000 m³/s. Opzetcondities zijn voorgekomen met name in de maanden oktober en december 2018.

Tabel 2-1: Overzicht splitsingspuntmetingen 2018

Splitsingspunt	Datum	Grootheid	Datahouder
Oude Maas - Hartelkanaal	1 augustus 2018	Chloride	RWS
Nieuwe Waterweg – Oude Maas – Nieuwe Maas	2 augustus 2018	Chloride	RWS
Nieuwe Maas - Hollandsche IJssel	14 augustus 2018	Debiet/Chloride	HbR
Nieuwe Maas - Lek - Noord	16 augustus 2018	Debiet/Chloride	HbR
Oude Maas - Hartelkanaal	16 augustus 2018	Debiet/Chloride	RWS
Nieuw Waterweg – Oude Maas – Nieuwe Maas	17 augustus 2018	Debiet/Chloride	RWS



Figuur 2-6: 2018 a) Gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland; b) Bovenrijnafvoer te Lobith; c) waterstand te Hoek van Holland, en de opsplitsing daarvan in en getij en windopzet (d); allen voor periode april – december 2018.

3 Modelopzet

3.1 Algemeen

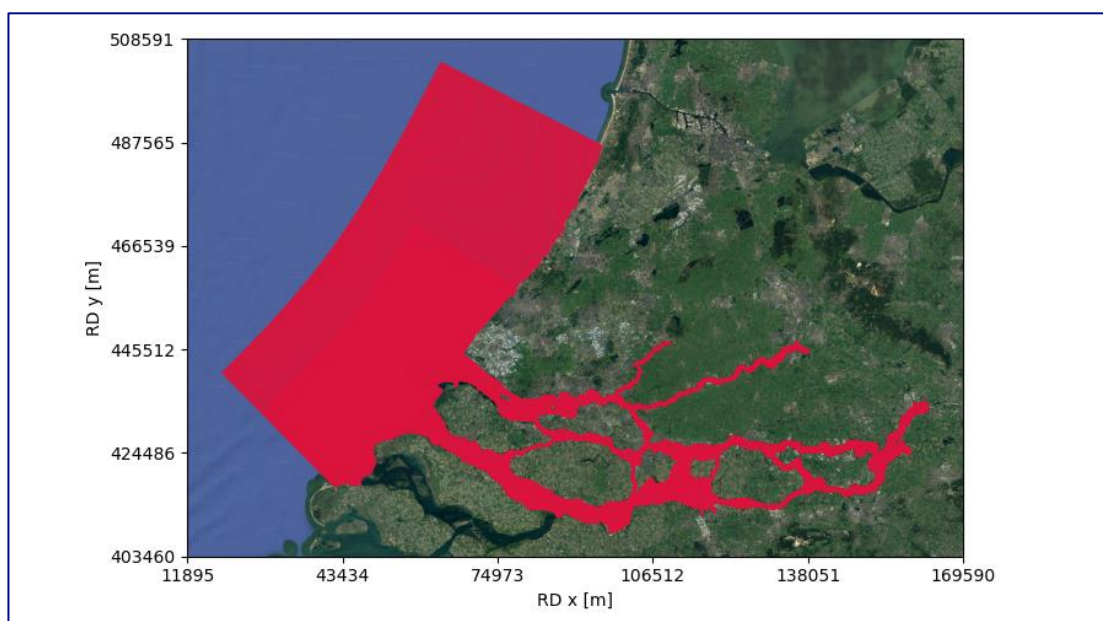
Het uitgangspunt voor het driedimensionale D-HYDRO model van het RMM-gebied is het dieptegemiddelde model van dit gebied, RMM 2D. De RMM 2D schematisatie en de kalibratieresultaten, de waterstanden en de debieten op de splitsingspunten in het RMM-gebied, zijn uitgebreid beschreven in (Veenstra, Becker, Kaaij, & Yossef, 2020).

De RMM 3D modelschematisatie gebruikt in deze studie is nagenoeg gelijk aan de schematisatie gebruikt voor berekeningen uitgevoerd in 2020 voor droge perioden in 2011, te weten december 2011 en mei 2011. Voor een uitgebreide beschrijving van het driedimensionale RMM-model en de resultaten van 2020 wordt verwezen naar (Kaaij & Chavarrias, 2020). Hieronder volgt een beknopte samenvatting van de modelopzet en overzicht van de aanpassingen ten opzichte van de modelschematisatie gebruikt in 2020.

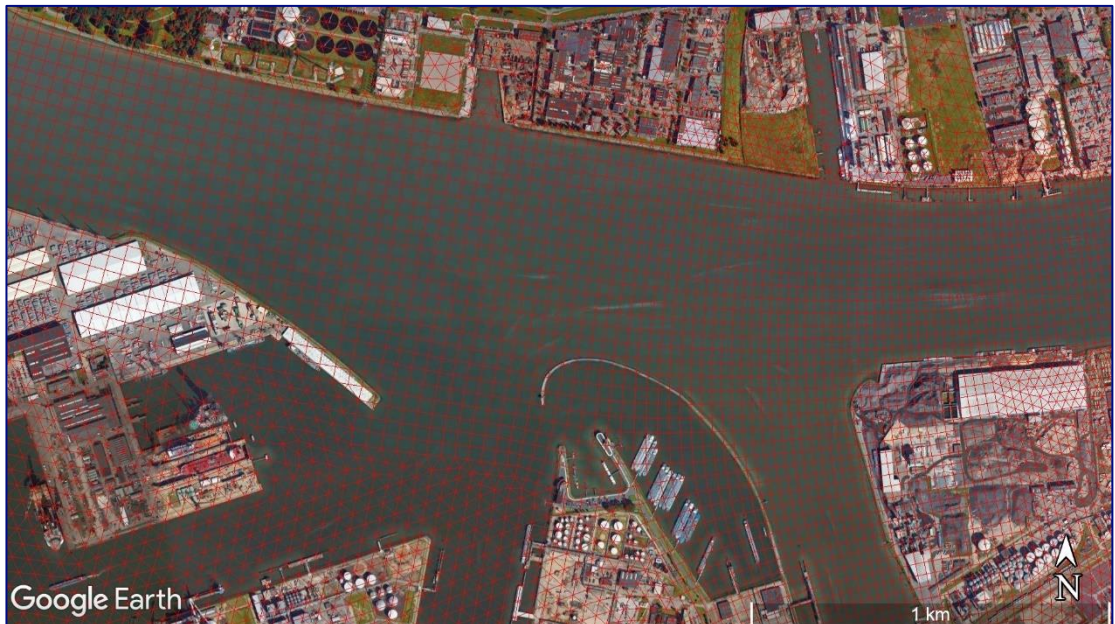
3.2 Rooster/netwerk

3.2.1 Horizontale rekennetwerk

Het horizontale rekenrooster wordt getoond in Figuur 3-1 en Figuur 3-2. De essentie van het netwerk is dat op zee en voor de hoofdgeulen/riviertakken (curvilineaire) vierhoekige rekencellen worden gebruikt. Resolutieovergangen, havenbekkens en uiterwaarden worden gemodelleerd middels driehoekige rekencellen.



Figuur 3-1: Rekenrooster/netwerk RMM-model

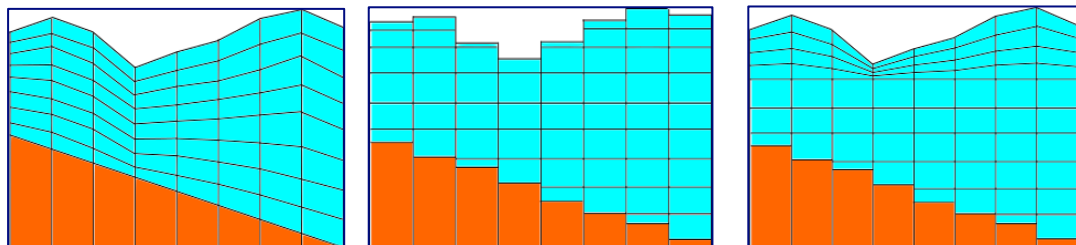


Figuur 3-2: Rekenrooster/netwerk RMM-model (detail splitsing Nieuwe Waterweg, Oude Maas, nieuwe Maas)

3.2.2 Het verticale rekenrooster

In een driedimensionaal model wordt de verticaal verdeeld in een aantal rekenlagen. In elk van de rekenlagen worden stroomsnelheden, saliniteit en eventueel temperatuur berekend. Voor een diepte-gemiddeld model geldt dat in de verticaal slechts met 1 laag, met een dikte gelijk aan de lokale waterdiepte, wordt gerekend.

De in dit rapport gepresenteerde berekeningen zijn waar het de verticale laagverdeling betreft gebaseerd op een combinatie van zogenaamde vaste (z-)lagen nabij de bodem met variabele (sigma-)lagen nabij het oppervlak, zie Figuur 3-3, rechter paneel. Deze laagverdeling bleek noodzakelijk om de in de Nieuwe Waterweg optredende stratificatie te kunnen reproduceren (Kaaij & Chavarrias, 2020).



Figuur 3-3: Typen laagverdeling (schematisch); Blauw: Water; Oranje: Bodem; Links sigma (σ -) lagen; Midden vaste (z-)lagen; Rechts een combinatie van sigma (σ -) en vaste (z-)lagen.

3.3 Randvoorwaarden van het model

Op de open zeeranden van het model worden waterstanden voorgeschreven op een groot aantal randsteunpunten (“*pli-punten*”). Op deze punten worden ook profielen van saliniteit voorgeschreven.

Het RMM-model heeft open randen op zee en een drietal riviertakken waar het Rijn- en Maaswater het estuarium instroomt (Figuur 3-1) te Tiel, Lith en Hagestein.

Ter plaatse van de riviertakken worden debieten voorgeschreven, in combinatie met de bij dit instromende water behorende saliniteit. Deze informatie is afkomstig uit de DONAR database van Rijkswaterstaat.

Naast open randen is een aantal lateralen (lozingen en onttrekkingen) in de schematisatie opgenomen. Voor de Hollandsche IJssel betreft dit gemalen die boezemwater uitslaan op de Hollandsche IJssel.⁴

3.4 **Aanpassingen ten opzichte van de modelschematisatie gebruikt in 2020**

3.4.1 **“j19” versus “j11”**

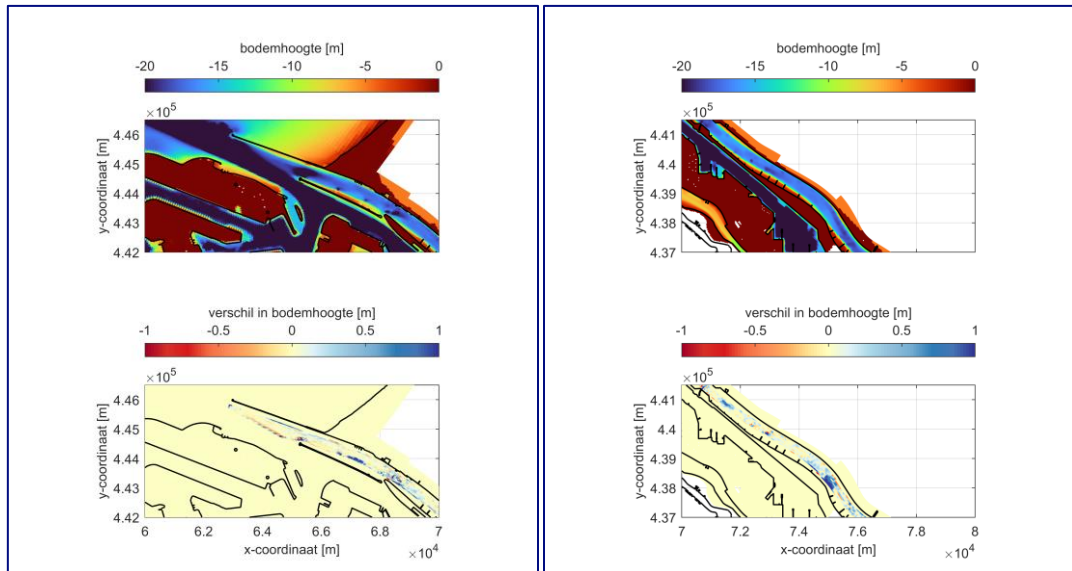
De berekening gepresenteerd in dit rapport heeft betrekking op 2018. De onderliggende schematisatie is een “j19” schematisatie en heeft betrekking op het jaar 2019.

De “j19” modelschematisatie is aangemaakt met baseline projectie j19_6_v2. De naam van de gegenereerde schematisatie is: dflowfm3d-rmm-j19_nw18_6-v2a. De aanduiding “nw18” refereert aan enige aanpassing van de bodemschematisatie ten opzichte van de baseline projectie, zie volgende paragraaf.

3.4.2 **Aanpassing bodemschematisatie (verdieping Nieuwe Waterweg)**

De bodemschematisatie in de “j19” schematisatie hoort bij het jaar 2019. Echter, gedurende 2018 zijn verdiepingswerkzaamheden ten behoeve van de bereikbaarheid van de Rotterdamse havens uitgevoerd. Deze verdieping zit volledig in de “j19” schematisatie maar was in 2018 nog niet volledig afgerond. De “j19” bodem is in de Nieuwe Waterweg enigszins aangepast om, voor zover als mogelijk, consistent te zijn met de simulatie periode. Hiervoor zijn lodinggegevens zoals toegeleverd door het Havenbedrijf Rotterdam gebruikt. De uiteindelijk resulterende 2018 bodem in combinatie met de aanpassingen ten opzichte van de “j19” bodem worden getoond in Figuur 3-4.

⁴ Merk op dat het model ook watertemperatuur berekent, met op dit moment een constante waarde (9 °C) als randvoorwaarde op de rivierranden en lateralen, profielen op de zeerland en geen uitwisseling met de atmosfeer. Dit is momenteel onvoldoende voor onderzoek naar temperatuur en het nauwkeurig meenemen van de invloed daarvan op stroming, maar is gedaan in voorbereiding op eventuele latere toepassing van het model voor onderzoek naar verspreiding van warmwaterlozingen. In dit rapport wordt verder niet ingegaan op temperatuur.



Figuur 3-4: Bodemligging 2018 (bovenste Figuur) en de aanpassingen ten opzichte van de 2019 bodem (onderste Figuur); Links gehele Nieuwe Waterweg, rechts gebied met grootste aanpassingen. Positief verschil is een verdieping, i.e. diepte 2019 groter dan diepte 2018.

3.4.3 Overige modelinstellingen

De overige modelinstellingen zijn identiek aan de instellingen zoals gebruikt in 2020 voor de december en mei 2011 berekeningen (Kaaij & Chavarrias, 2020).

4 Resultaten simulatie najaar 2018

4.1 Simulatieperiode, soft- en hardware

4.1.1 Simulatieperiode

Met het model zoals beschreven in Hoofdstuk 3 is de periode van 2 april 2018 tot 8 november 2018 gesimuleerd. Berekeningsresultaten worden geanalyseerd van 20 juli 2018 tot 8 november 2018. Het eerste gedeelte van de berekening (2 april tot 19 juli) wordt dus gezien als inspelen van het model.

Voor de resultaten wordt ook specifiek gekeken naar de periode waarin de grootste zoutindringing optreedt. Dit betreft de week van 19 tot 26 oktober 2018. De grote zoutindringing in deze periode was een gevolg van de relatief lage Rijnafvoer in combinatie met windopzet op zee.

4.1.2 Randvoorwaarden voor de simulatieperiode

Randvoorwaarden op open zee

De open zeerandvoorwaarden voor het RMM 3D model voor het najaar van 2018 zijn gegenereerd met het 3D DCSM-FM model zoals beschreven in (Zijl, Laan, & Groenenboom, 2021). De randvoorwaarden voor de waterbeweging zijn berekende waterstanden ter plaatse van de open zeeranden. Voor saliniteit worden met het 3D-DCSM-FM model ter plaatse van de open zeeranden berekende saliniteitsprofielen voorgeschreven. Hiermee wordt eventuele stratificatie op zee ter plaatse van de randen van het RMM 3D modeldomein ook meegenomen in de RMM 3D berekeningen.

Merk op dat de met het 3D DCSM-FM model berekende waterstanden nog niet goed zijn gerefereerd aan NAP, wat een verschil tussen gemeten en berekend gemiddeld zeeniveau van 5 cm tot gevolg heeft, zie (Zijl, Laan, & Groenenboom, 2021). Op de in dit rapport gepresenteerde berekeningen is een middenstandscorrectie van 5 cm toegepast om dit verschil te compenseren.

Rivierrandvoorwaarden

Ter plaatse van de open rivierranden wordt zowel de “gemeten” afvoer als de gemeten saliniteit voorgeschreven. De gebruikte informatie is afkomstig uit de database DONAR.

Lozingen en onttrekkingen (Lateralen)

De lozingen op en onttrekkingen uit het model zijn gebaseerd op:

- lozingen en onttrekkingen zoals opgenomen in de SOBEK3-jaarsom voor 2018 (Deijl & Wijk, 2019). Voor de Hollandsche IJssel betreft dit alleen een lozing/onttrekking te Gouda. Vandaar dat de lozings-/onttrekkingsinformatie is uitgebreid met:
- de lozingen en onttrekkingen op de Hollandsche IJssel, voornamelijk poldergemalen, zoals verzameld/toegeleverd in/voor (Wijk, Kaaij, & Kranenburg, 2019).

Voor de saliniteit⁵ van de lozing te Gouda (die niet wordt gemeten) en voor de overige gemalen uitslaand op de Hollandsche IJssel is 0,2 PSU aangenomen.

⁵ Zoutgehalte kan uitgedrukt worden als saliniteit met als eenheid PSU of chloridegehalte in mg Cl/l. In deze studie is als omrekening gebruikt: Sal = 1.80655*Chl/1000 (Kuijper, 1990)

Meteorologische forcering

Windsnelheid en -richting en atmosferische druk op het wateroppervlak worden ruimtelijk variërend en in de tijd variërend voorgeschreven. Deze forcering van het model voor 2018 is afkomstig uit het meteorologische HiRLAM model van het KNMI (v7.2).

Haringvlietsluizen

De hefhoogten van de Haringvlietsluizen zijn identiek aan de hefhoogten zoals gebruikt in de SOBEK3-jaarberekening voor 2018 (Deijl & Wijk, 2019). Voor de gesimuleerde periode zijn, als gevolg van de relatief lage Bovenrijnafvoer, de sluisen grotendeels gesloten.

4.1.3 Software

De in dit rapport beschreven berekeningen zijn uitgevoerd met het simulatiepakket D-HYDRO, versienummer: 2022.04_Inx64_sif1032. Deze versie is nieuwer dan die gebruikt voor de in 2020 uitgevoerde berekeningen met het model.

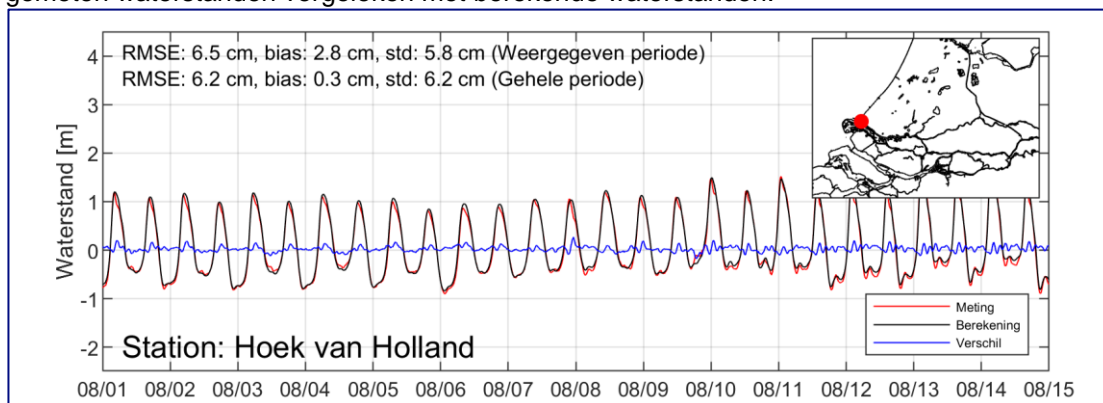
4.1.4 Hardware

Vanwege de benodigde rekenkracht is gerekend bij het rekencentrum SURF op de Snellius supercomputer. De doorlooptijd van één enkele berekening is 5 dagen waarbij 768 cores (rekenkernen) worden gebruikt.

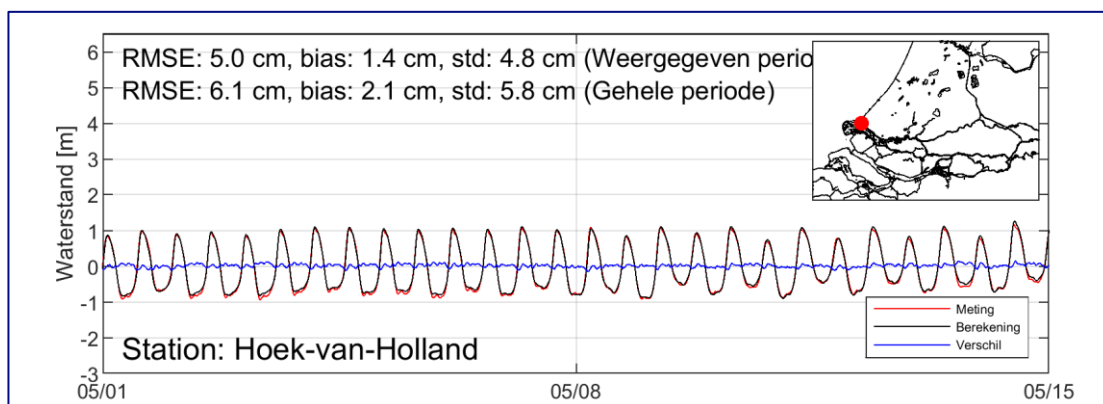
4.2 Waterstanden in het gehele RMM-gebied

4.2.1 Tijdreeksen

Als voorbeeld van de waterstandsreproductie op individuele meetstations toont Figuur 4-1 de gemeten en de berekende waterstanden te Hoek van Holland voor de 1^e helft van augustus 2018. In Appendix A worden voor alle in het RMM-gebied gelegen waterstandmeetlocaties gemeten waterstanden vergeleken met berekende waterstanden.



Figuur 4-1: Waterstandsreproductie Hoek van Holland 1^e helft augustus 2018.



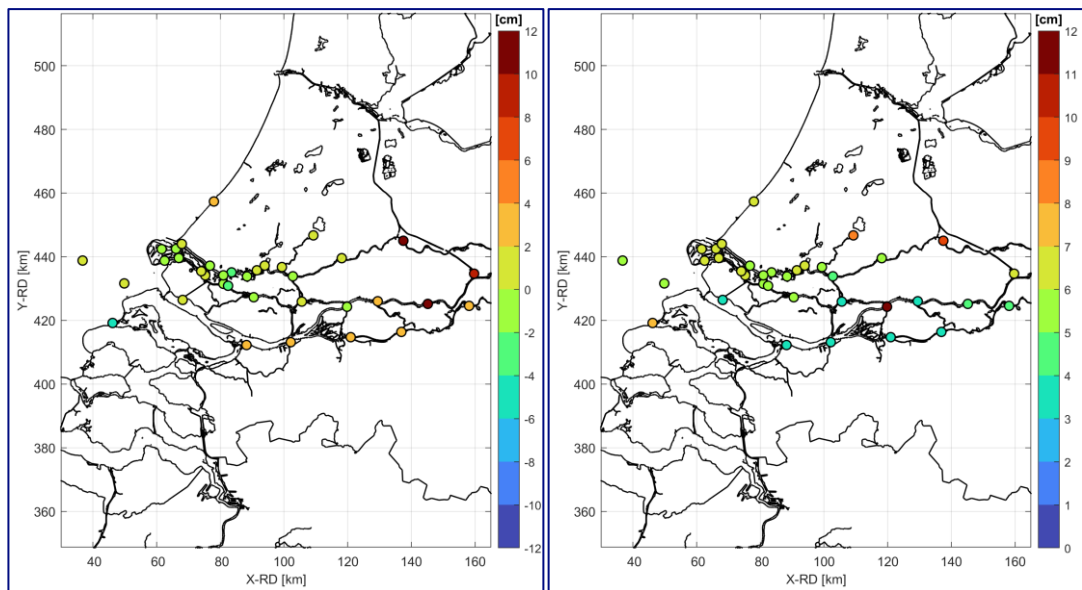
Figuur 4-2: Waterstandsreproductie Hoek van Holland 1^e helft mei 2011.

Op het ruimtelijke beeld van de overeenkomsten en verschillen tussen berekende en gemeten waterstanden wordt in paragraaf 4.2.2 nader ingegaan.

De waterstandsreproductie te Hoek van Holland voor mei 2011 wordt getoond in Figuur 4-2. Voor beide gepresenteerde perioden geldt dat het rustige perioden waren zonder windopzet op zee. De kwaliteit van de reproductie van het getij, zichtbaar in de standaardafwijking van het verschil tussen meting en berekening, is vergelijkbaar voor beide perioden. Ook de reproductie van de gemiddelde waterstand is goed vergelijkbaar voor beide perioden, wat zichtbaar is aan de vergelijkbare bias⁶.

4.2.2 Ruimtelijke reproductie gemiddelde waterstand en ruimtelijke reproductie getij

Figuur 4-3 toont de reproductie van de gemiddelde waterstand (links) in combinatie met de reproductie van het getij (rechts) over het RMM-gebied. In het grootste deel van het domein, het getij-gedomineerde deel van het gebied, geldt dat zowel het middenstandsverschil als de standaardafwijking van het verschil tussen meting en berekening, i.e. de getijreproductie, vergelijkbaar is. Stroomopwaarts op de rivieren, in de nabijheid van de open rivieranden van het model, is het gemiddeld waterstandsverschil aanmerkelijk groter. Met name voor meetlocatie Hagestein beneden is het middenstandverschil erg groot (ongeveer 30 cm). De berekende waterstanden zijn structureel hoger dan de gemeten waterstanden. Voor locatie Schoonhoven, de meetlocatie juist stroomafwaarts van Hagestein beneden geldt dit niet. De schematisatie zelf is *niet* de oorzaak van de verschillen te Hagestein. Een dieptegemiddelde “j19” berekening voor de kalibratieperiode december 2013 met het RMM 2D model laat *geen* verschil in middenstand tussen meting en berekening zien⁷.



Figuur 4-3: (Links) Ruimtelijk beeld van de kwaliteit van de middenstandsreproductie: bias (gemiddelde waarde van berekening minus meting; en (rechts) ruimtelijke weergave van de standaardafwijking van het verschil tussen meting en berekening als parameter voor de getijreproductie.

⁶ De bias is bepaald als de gemiddelde waarde van de berekende waterstand minus de gemeten waterstand. Een positieve bias betekent dus een berekende waterstand hoger dan de gemeten waterstand.

⁷ De verschillen zouden ook verklaard kunnen worden door onnauwkeurigheden in de opgelegde debieten. Het is vaker geconstateerd (ook voor andere modelschematisaties, bijvoorbeeld in de SOBEK3-jaarsom 2018, (Deijl & Wijk, 2019) dat de waterstandsreproductie stroomopwaarts op de rivieren afhankelijk is van de gesimuleerde periode. Dit impliceert dat de opgelegde debieten voor de ene periode beter voldoen dan voor de andere periode.

De standaardafwijking van het verschil tussen de berekende en de gemeten waterstanden kan gezien worden als indicator voor de getijreproductie van het model. Voor bijna alle stations geldt dat de standaardafwijking ongeveer 5 cm bedraagt. De uitzonderingen zijn Werkendam Buiten, Brouwershavense Gat op zee, Gouda Brug in de Hollandsche IJssel en Hagestein-beneden. Voor Werkendam Buiten, waar de getij reproductie het minste is, geldt dat de fasering van het getij beduidend minder is dan voor andere meetlocaties. Meetlocaties stroomop- en afwaarts van Werkendam Buiten laten een veel betere getijreproductie zien.

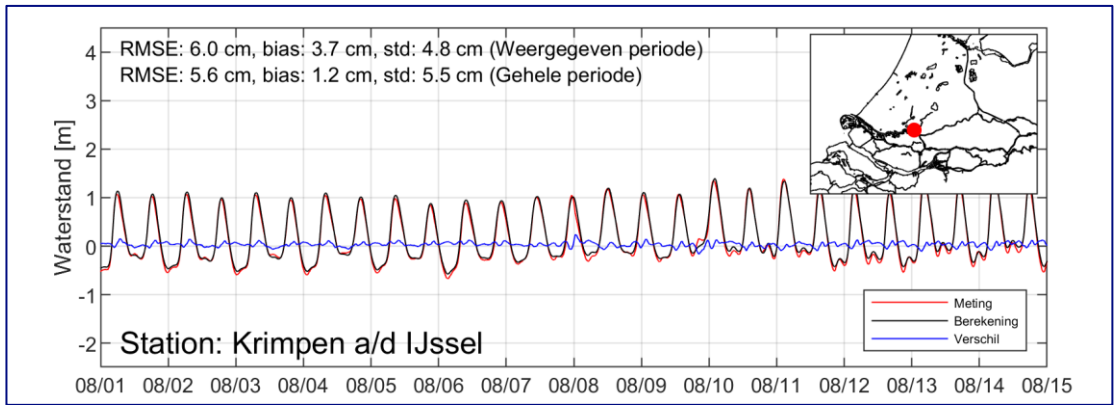
De ruimtelijk uniforme, en goede, getijreproductie impliceert dat zowel de voortplanting van het getij als de demping van het getij, de afname van de getijenergie, goed wordt weergegeven door het model.

4.3 Waterstanden in de Hollandsche IJssel

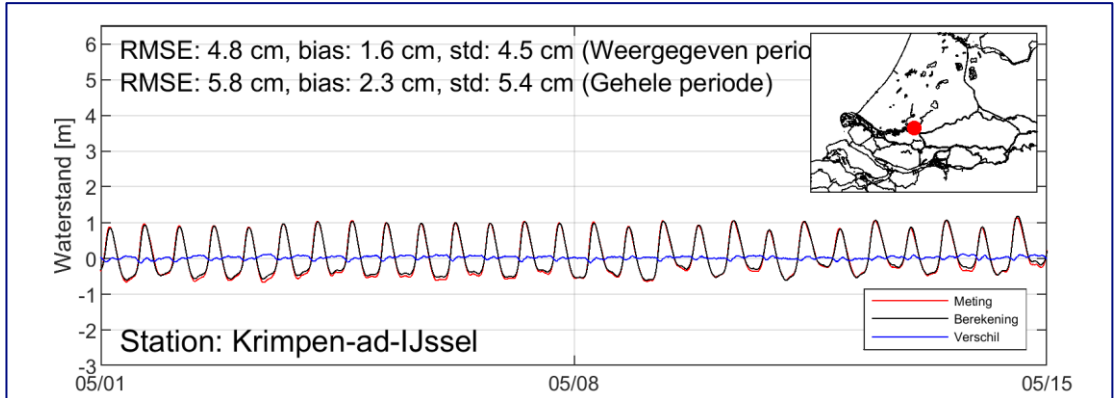
De berekende waterstanden in de Hollandsche IJssel, zowel in de monding (Krimpen aan den IJssel) als te Gouda Brug aan het einde van de Hollandsche IJssel, worden getoond in Figuur 4-4 - Figuur 4-7. Uit deze figuren, en de in de figuren benoemde kentallen, valt het volgende op te maken:

1. De weergave van het getij is vergelijkbaar, maar,
2. De weergave van het getij te Gouda Brug, het einde van de Hollandsche IJssel, is minder dan de weergave van het getij in de monding te Krimpen aan den IJssel.

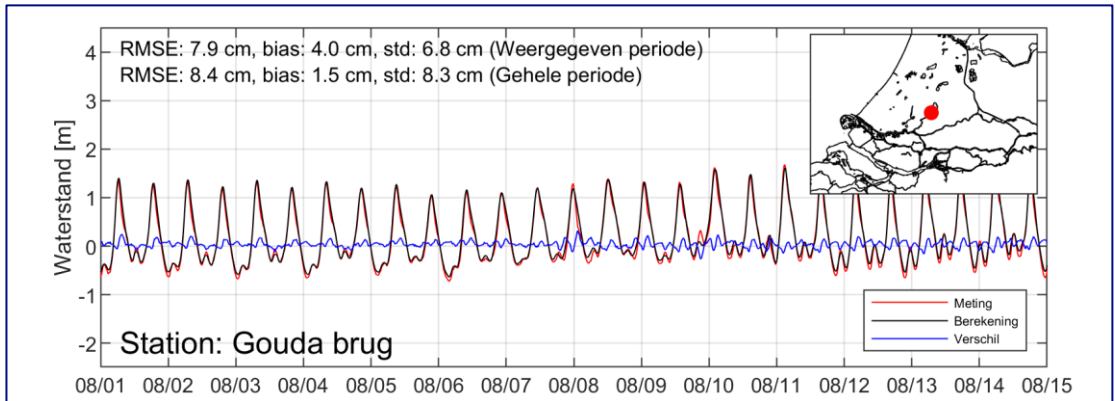
De voorplanting van het getij in de Hollandsche IJssel wordt dus minder goed gereproduceerd dan in de rest van het RMM-gebied.



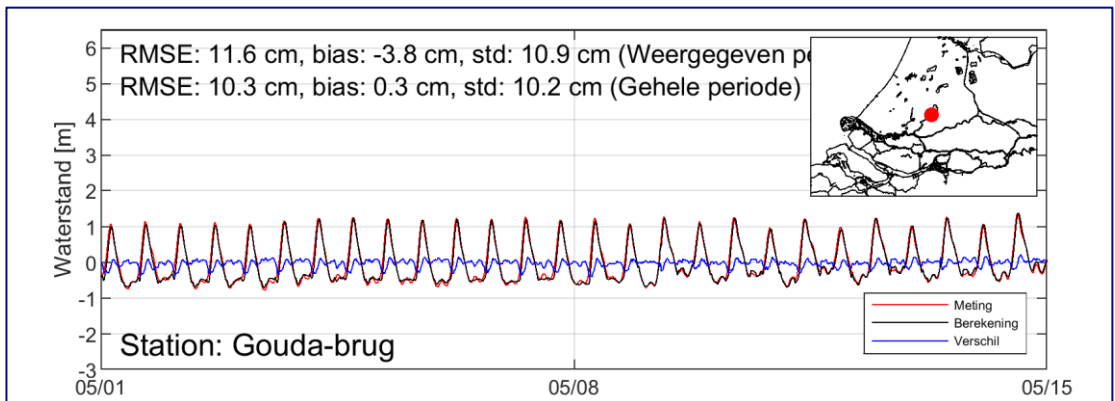
Figuur 4-4: Waterstandsreproductie Krimpen aan den IJssel 1^e helft augustus 2018



Figuur 4-5: Waterstandsreproductie Krimpen aan den IJssel 1^e helft van mei 2011



Figuur 4-6: Waterstandsreproductie Gouda Brug 1^e helft augustus 2018



Figuur 4-7: Waterstandsreproductie Gouda Brug 1^e helft van mei 2011

4.4 Debieten op splitsingspunten

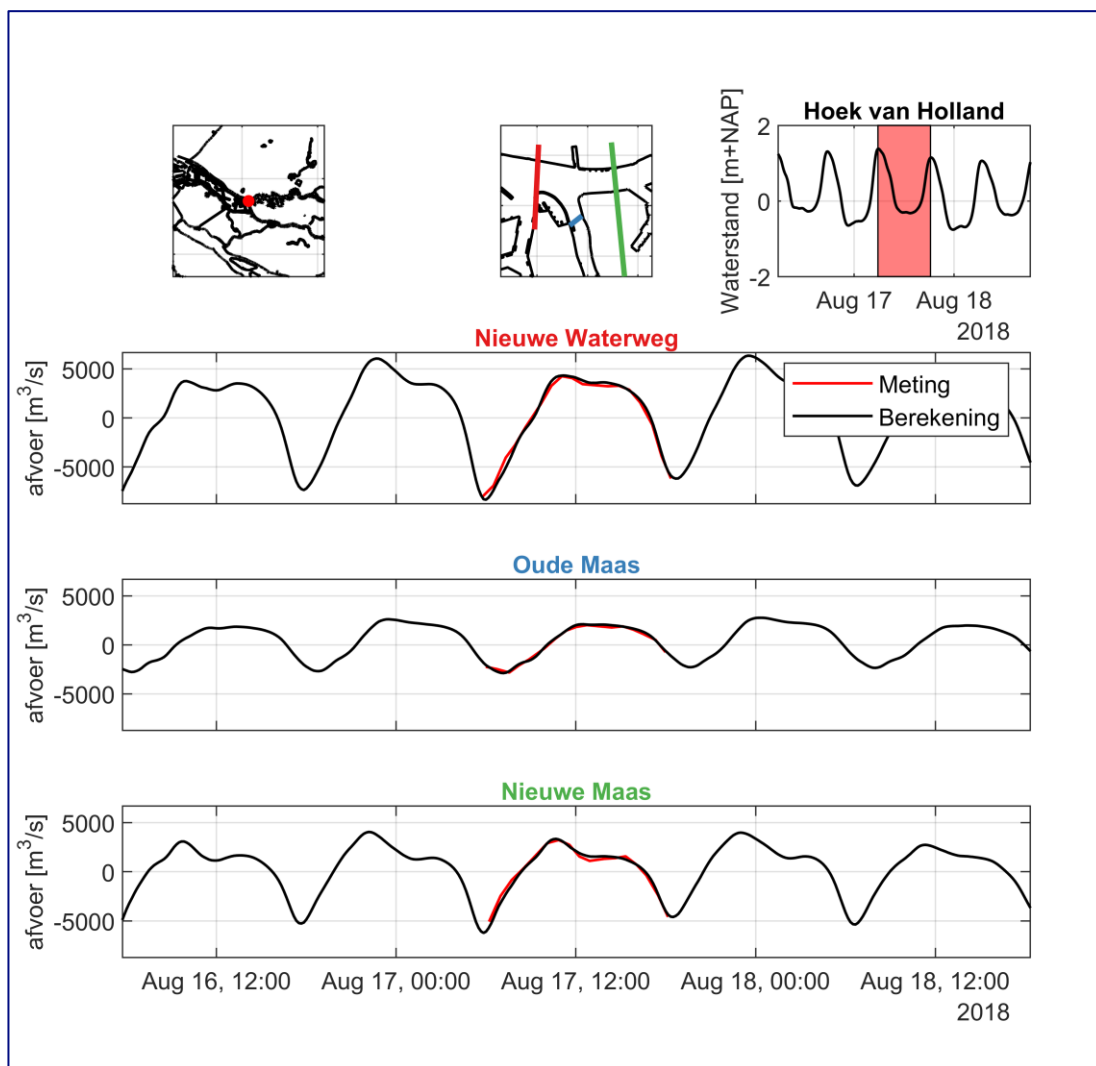
In 2018 is op een viertal splitsingspunten het debiet door de afzonderlijke takken “gemeten”⁸ voor één enkel getij (13-uurs meting).

Het betreft de splitsingspunten:

- Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas,
- Hollandsche IJssel, Nieuwe Maas,
- Nieuwe Maas, Lek, Noord,
- Oude Maas, Hartelkanaal.

Het splitsingspunt Oude Maas, Hartelkanaal is tweemaal bemeten.

Als voorbeeld van de debietreproductie, toont Figuur 4-8 de “gemeten” en berekende debieten op het splitsingspunt Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas, Oude Maas. De overige splitsingspunten worden getoond in Appendix B.



Figuur 4-8: “Gemeten” en berekende debieten; Splitsingspunt Nieuwe Waterweg, Oude Maas, Nieuwe Maas; 17 augustus 2018

⁸ Betreft eigenlijk snelheidsmetingen (ADCP). Toegeleverd zijn de tot debiet bewerkte gegevens.

Voor alle riviertakken, zowel de takken getoond in het figuur hierboven als die getoond in de figuren in de Bijlage, geldt dat de overeenkomst tussen de “gemeten” debieten en de berekende debieten zeer goed is. Dit is des te meer vermeldenswaardig als we in aanmerking nemen dat een debiet niet daadwerkelijk wordt gemeten maar geschat uit snelheidsmetingen (ADCP-metingen) waar aannames met betrekking tot het snelheidsverloop nabij oppervlak en nabij bodem moeten worden gedaan wat een nauwkeurigheid in geschat debiet van 5% à 10% tot gevolg heeft.

De goede reproductie van de “gemeten” debieten zegt vooral iets over het getij en kan op zichzelf niet gezien worden als een bevestiging van de juiste restdebietverdeling in het RMM-gebied. Een meting van 13 uur is onvoldoende lang om iets over het restdebiet te kunnen zeggen. De goede reproductie van de “gemeten” debieten geeft vooral aan dat behalve het verticale getij (de getijgerelateerde waterstandsuitwijkingen) ook het horizontale getij (de getijsnelheden) door de verschillende riviertakken goed wordt weergegeven in het model. Dit geldt zowel voor de fase als de magnitude. Een goede reproductie van de getijdebieten door de diverse armen van de RMM is essentieel voor een goede berekening van de zouttransporten in de RMM.

4.5 Zoutgehalten in het gehele RMM-gebied (Vaste Meetlocaties, LMW-stations)

4.5.1 Tijdreeksen

De locaties waar zoutgehalten worden gemeten in het RMM-gebied zijn getoond in Figuur 2-2. Voor meetlocaties Brienoord en Kinderdijk worden gemeten reeksen vergeleken met berekende reeksen van saliniteit in Figuur 4-9 - Figuur 4-12 voor zowel de gehele analyseperiode als de periode met grootste zoutindringing.

Waar het zoutindringing vanuit zee betreft is meetlocatie Kinderdijk het moeilijkste te reproduceren omdat dit de meest stroomopwaarts gelegen meetlocatie betreft. Voor deze locatie geldt dat het gemeten zoutgehalte zeer goed wordt gereproduceerd door het model. Zowel de momenten van de piek in zoutgehalte als de grootte van de piek wordt erg goed weergegeven. Dit vertaalt zich in een hoge correlatie tussen de gemeten zoutgehalten en het berekende zoutgehalte, een correlatieparameter $\rho=0,967$ voor de gehele periode en zelfs nog iets hoger voor de periode van grootste zoutindringing. Dit impliceert dat de processen die zout het estuarium inbrengen goed worden weergegeven.

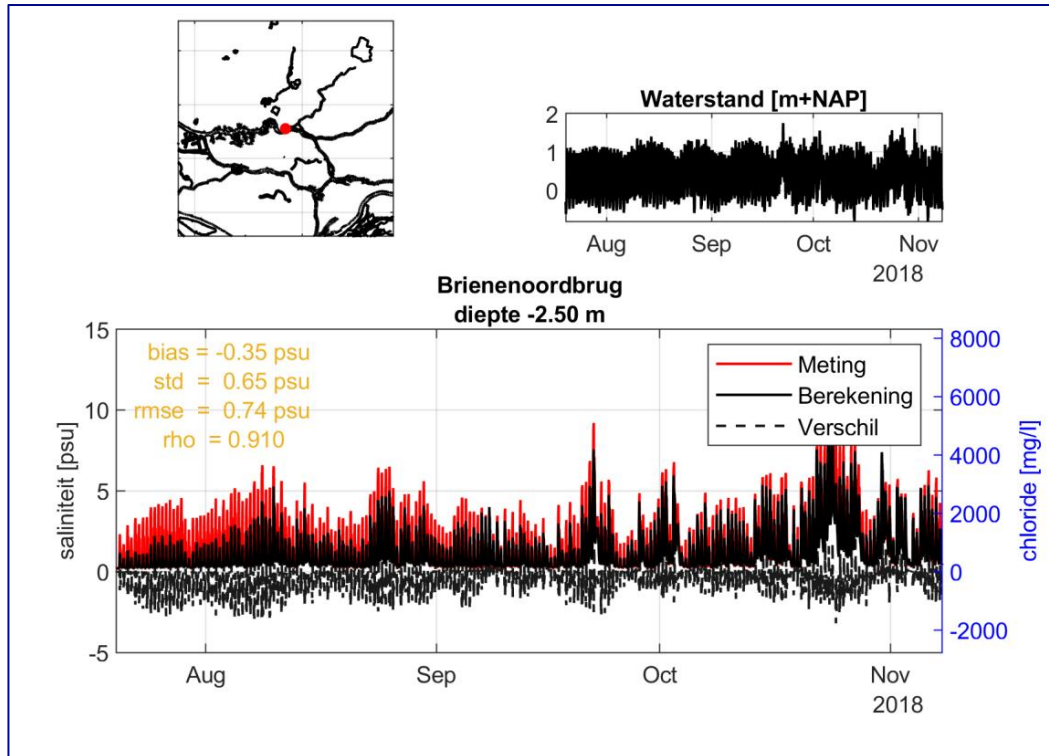
Gemeten zoutgehalten worden vergeleken met berekende waarden voor alle LMW-stations in Appendix C. Deze figuren laten zien dat de overeenstemming tussen de gemeten en berekende zoutgehalten goed is. Wel geldt dat voor het begin van de analyseperiode de gemeten zoutgehalten in het algemeen iets hoger zijn dan berekende waarden, zie bijvoorbeeld ook Figuur 4-9. Bij eerdere vergelijkingen weten we dit aan mogelijk te korte inspeelperiode. In de huidige simulatie is de inspeelperiode meer dan drie maanden, dus kan dat eigenlijk geen reden meer zijn.

Statistische kentallen behorende bij de gehele analyseperiode worden gegeven in Tabel 4-1. Uit deze tabel kan het volgende worden opgemaakt:

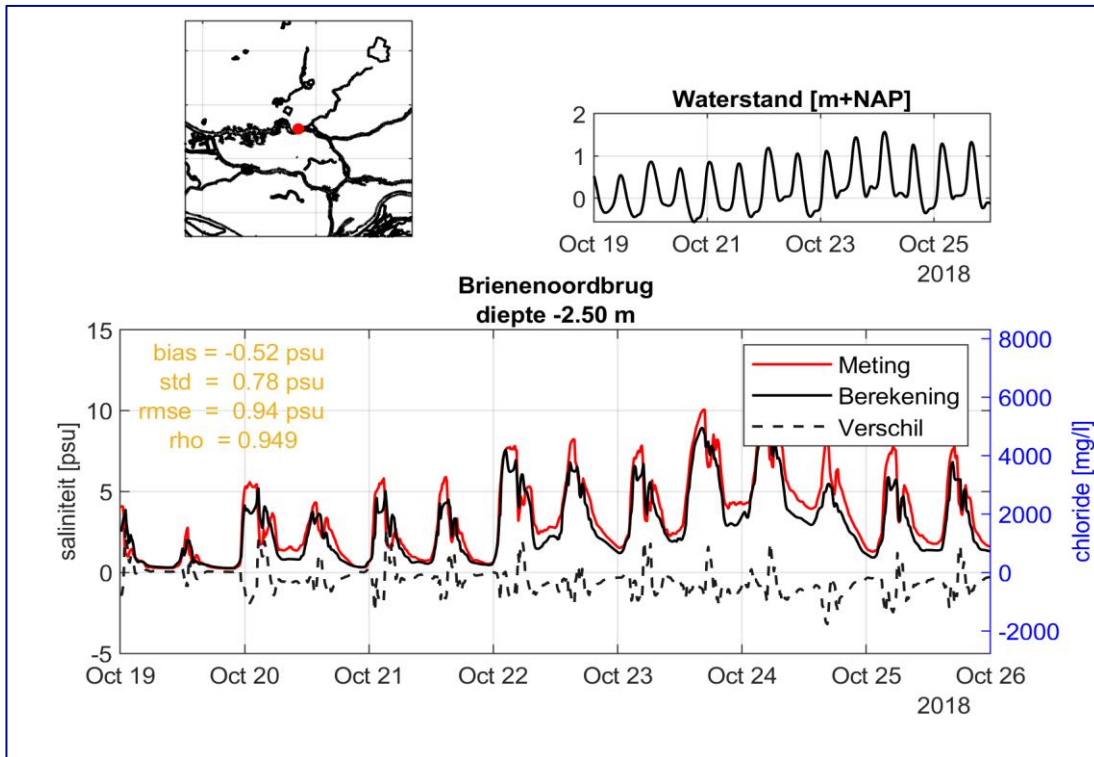
- De correlatie tussen berekening en meting is erg hoog. Dit zegt dat de verandering in gemeten zoutgehalte sterk samenhangt met de verandering in het berekende zoutgehalte. Dit is een indicatie dat de processen die zoutindringing bepalen goed worden weergegeven in het model.
- Met name voor Hoek van Holland geldt dat de berekende stratificatie wat sterker is dan de gemeten stratificatie. Nabij het oppervlak is het gemiddelde verschil tussen meting en berekening, de bias, negatief wat betekent dat het model te zoet is. Nabij de

bodem is de bias positief wat betekent dat het model te zout is. Dit gecombineerd geeft een groter saliniteitsverschil tussen het oppervlak en dieper in de verticaal in de berekening dan waargenomen, i.e. de stratificatie wordt overschat in de modelberekening. Opgemerkt moet worden dat deze conclusie gebaseerd is op een beperkt aantal metingen (Figuur 2-3).

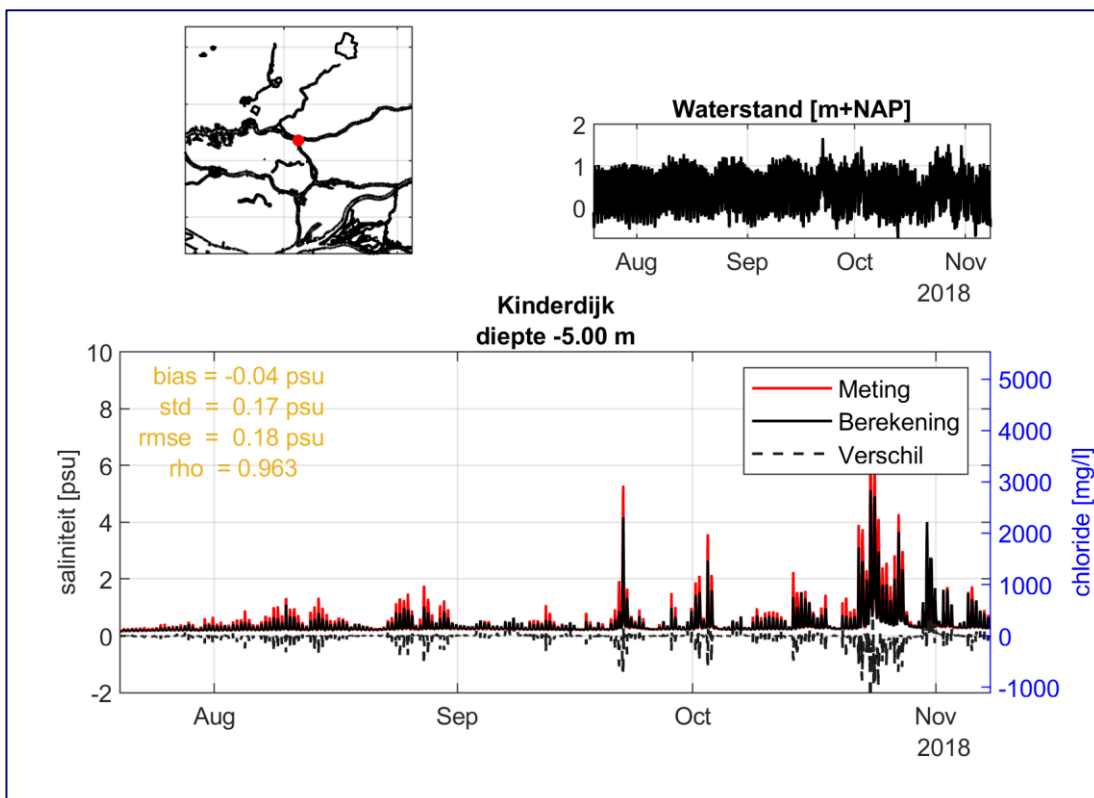
- Het verloop van de bias over de diepte geeft ook voor meetlocaties Lekhaven en Spijkenissebrug aan dat ook voor deze locaties geldt dat de berekende stratificatie wat sterker is dan de gemeten stratificatie.



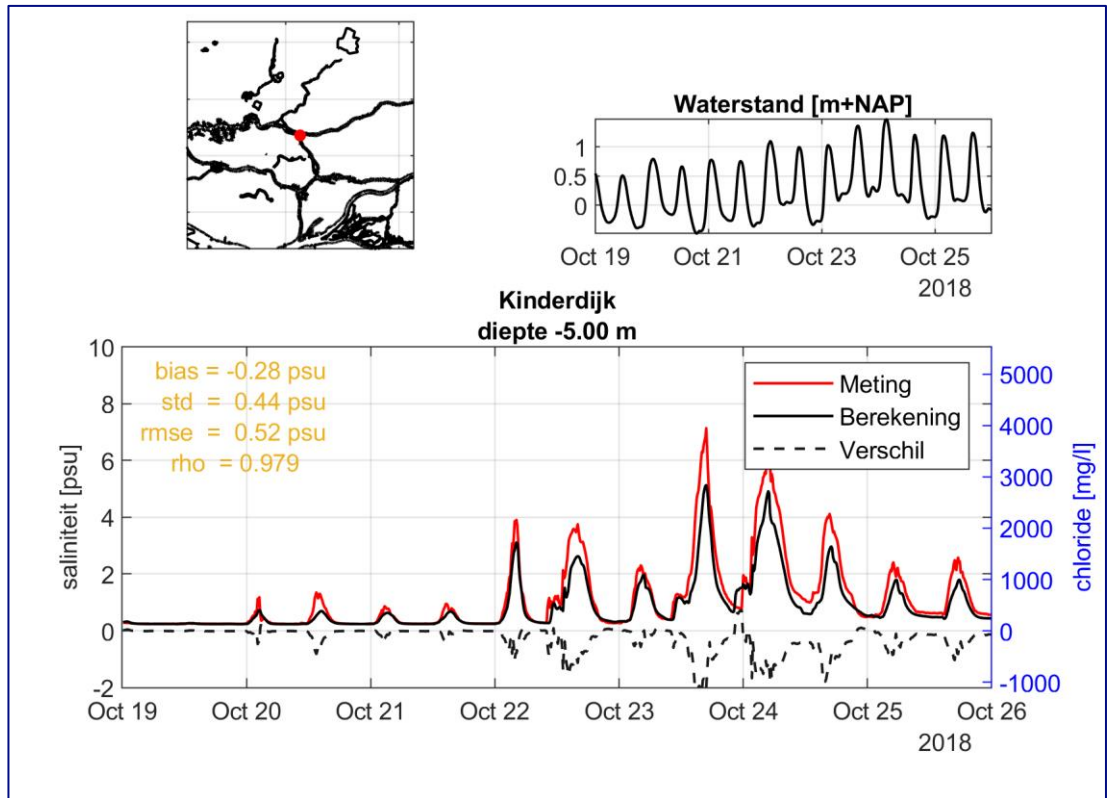
Figuur 4-9: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Brienenoordbrug; Diepte -2.5 m NAP



Figuur 4-10: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Brienoordbrug; Diepte -2.5 m NAP



Figuur 4-11: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Kinderdijk aan de Lek; Diepte -4.0 m NAP



Figuur 4-12: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Kinderdijk aan de Lek; Diepte -4.0 m NAP

Statistische kentallen behorend bij de periode met grootste zoutindringing, van 19 tot 26 oktober 2018, worden gegeven in Tabel 4-2. Op basis van het gemiddelde verschil, de standaardafwijking en de RMS-waarde van het verschil tussen meting en berekening is, gemiddeld over alle meetlocatie, de saliniteitsreproductie voor deze periode vergelijkbaar met de saliniteitsreproductie voor de gehele periode. De correlatie tussen gemeten en berekende waarde geeft echter aan dat de reproductie wat minder is voor deze periode. Deze wat mindere reproductie wordt vooral veroorzaakt door meetlocaties Lekhaven (-2.5 m NAP en -7.0 m NAP) en Bernisse/Zuidland.

Tabel 4-1: Statistische kentallen gehele analyseperiode

	Analyseperiode: 20-Jul-2018 - 08-Nov-2018				
	Meetdiepte [m]	Bias [PSU]	STD [PSU]	RMS [PSU]	R(ho) [-]
Hoek van Holland	z = -2.50[m]				
	z = -4.50[m]				
	z = -9.00[m]	0.49	2.14	2.20	0.89
Lekhaven	z = -2.50[m]	-1.65	0.98	1.92	0.84
	z = -5.00[m]	-1.88	0.93	2.10	0.87
	z = -7.00[m]	-1.25	1.13	1.68	0.86
Brienoordbrug	z = -2.50[m]	-0.35	0.65	0.74	0.91
	z = -6.50[m]	-0.39	0.84	0.92	0.90
Krimpen aan de IJssel	z = -4.00[m]	-0.22	0.31	0.39	0.92
	z = -5.50[m]	-0.25	0.43	0.50	0.87
Kinderdijk aan de Lek	z = -5.00[m]	-0.04	0.17	0.18	0.96
Spijkenisserbrug	z = -2.50[m]	-1.70	1.73	2.43	0.96
	z = -4.50[m]	-1.20	1.47	1.89	0.96
	z = -9.00[m]	1.17	1.72	2.08	0.95
Beerenplaat	z = -2.00[m]	-0.19	0.98	0.99	0.88
Bernisse/Zuidland	z = -3.00[m]	-0.04	0.27	0.27	0.88
Gemiddeld		-0.54	0.98	1.31	0.90

Tabel 4-2: Statistische kentallen Periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018)

	Analyseperiode: 19-Oct-2018 - 26-Oct-2018				
	Meetdiepte [m]	Bias [PSU]	STD [PSU]	RMS [PSU]	R(ho) [-]
Hoek van Holland	z = -2.50[m]				
	z = -4.50[m]				
	z = -9.00[m]				
Lekhaven	z = -2.50[m]				
	z = -5.00[m]	-2.39	1.05	2.61	0.88
	z = -7.00[m]	-0.73	1.43	1.60	0.75
Brienoordbrug	z = -2.50[m]	-0.52	0.78	0.94	0.95
	z = -6.50[m]	-0.59	0.98	1.15	0.94
Krimpen aan de IJssel	z = -4.00[m]	-0.78	0.67	1.03	0.91
	z = -5.50[m]	-1.00	0.98	1.40	0.81
Kinderdijk aan de Lek	z = -5.00[m]	-0.28	0.44	0.52	0.98
Spijkenisserbrug	z = -2.50[m]	-2.35	1.68	2.89	0.98
	z = -4.50[m]	-1.81	1.51	2.36	0.97
	z = -9.00[m]	1.63	2.02	2.60	0.94
Beerenplaat	z = -2.00[m]	-0.67	1.56	1.70	0.91
Bernisse/Zuidland	z = -3.00[m]	-0.19	0.61	0.64	0.75
Gemiddeld		-0.81	1.14	1.62	0.90

4.5.2 Vergelijking met eerdere berekeningen (genormaliseerde kentallen)

4.5.2.1 Definitie targetdiagrammen

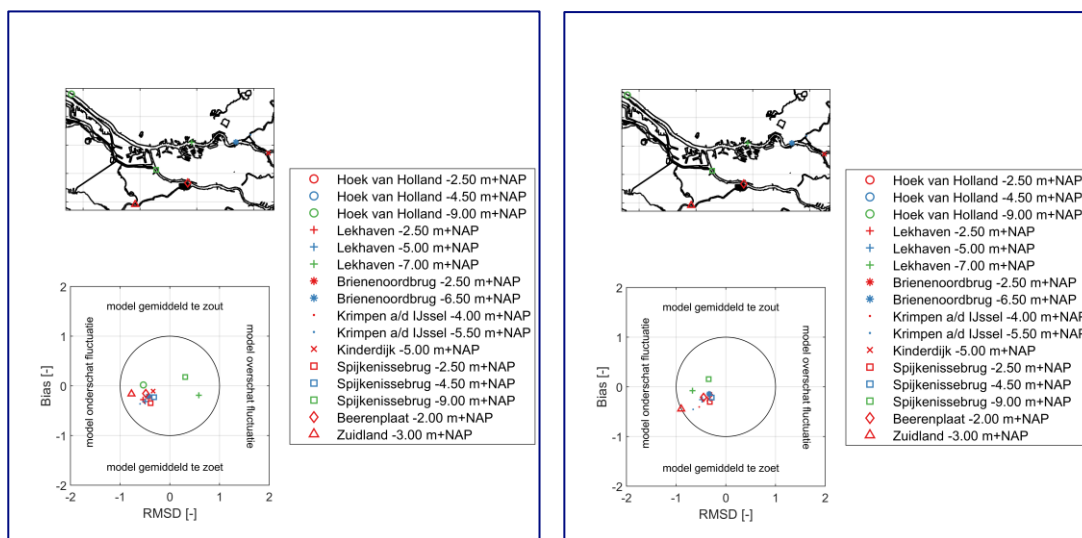
Een vergelijking van de mate van reproductie van gemeten saliniteit tussen verschillende stations en tussen verschillende berekeningen is niet eenvoudig. Een gemiddeld saliniteitsverschil tussen meting en berekening van 1 PSU bij Hoek van Holland betekent iets anders dan een gemiddeld saliniteitsverschil van 1 PSU te Kinderdijk. Een gemiddeld saliniteitsverschil van 1 PSU te Brienoord voor een droge periode betekent iets anders dan een saliniteitsverschil van 1 PSU voor een natte periode met een hoge afvoer.

Een manier om de reproductie voor verschillende stations en perioden te vergelijken is middels genormaliseerde kentallen. Dit kan door middel van zogenaamde targetdiagrammen (Jolliff, et al., 2009). In een targetdiagram wordt een genormaliseerd gemiddeld verschil in combinatie met een genormaliseerde RMSE waarde in 1 figuur weergegeven. Voor de in deze paragraaf gepresenteerde targetdiagrammen wordt het gemiddelde verschil genormaliseerd met de gemiddelde waarde van de gemeten saliniteit. Een waarde gelijk aan 0 betekent dan een exacte modelweergave van de gemiddelde saliniteit. Een waarde gelijk aan 1 betekent een “fout” in gemiddelde saliniteit gelijk aan het gemiddelde van de gemeten saliniteit, i.e. een “fout van 100%”. De RMSE waarde wordt genormaliseerd met de standaardafwijking van het gemeten zoutgehalte.

Met targetdiagrammen kun je meetlocaties onderling vergelijken, en berekeningen en/of simulatieperioden onderling vergelijken. Dit geeft een relatief beeld. Maar het geeft geen objectief waardeoordeel over de reproductiekwaliteit van het model, een rapportcijfer of een indicatie als “goed/slecht”.

4.5.2.2 Targetdiagrammen 2018 simulatie

Figuur 4-13 toont de targetdiagrammen voor de gehele analyse periode en de periode met de grootste zoutindringing. Met uitzondering van de diepste meetpunten te Hoek van Holland en Spijkenissebrug is het modelresultaat steeds iets zoeter dan de meting. Voor de gehele meetperiode geldt dat het model de fluctuaties vaker onderschat dan overschat. Voor het diepste meetpunten te Spijkenissebrug worden de fluctuaties overschat. Voor de periode met grootste zoutindringing, van 19 oktober tot 26 oktober 2018, zijn de fluctuaties voor alle locaties in de modelresultaten kleiner dan in de metingen.



Figuur 4-13: Target diagrammen 2018 simulatie; links gehele analyseperiode (20 juli 2018 – 8 november 2018); rechts periode met grootste zoutindringing (19 oktober 2018 - 26 oktober 2018)

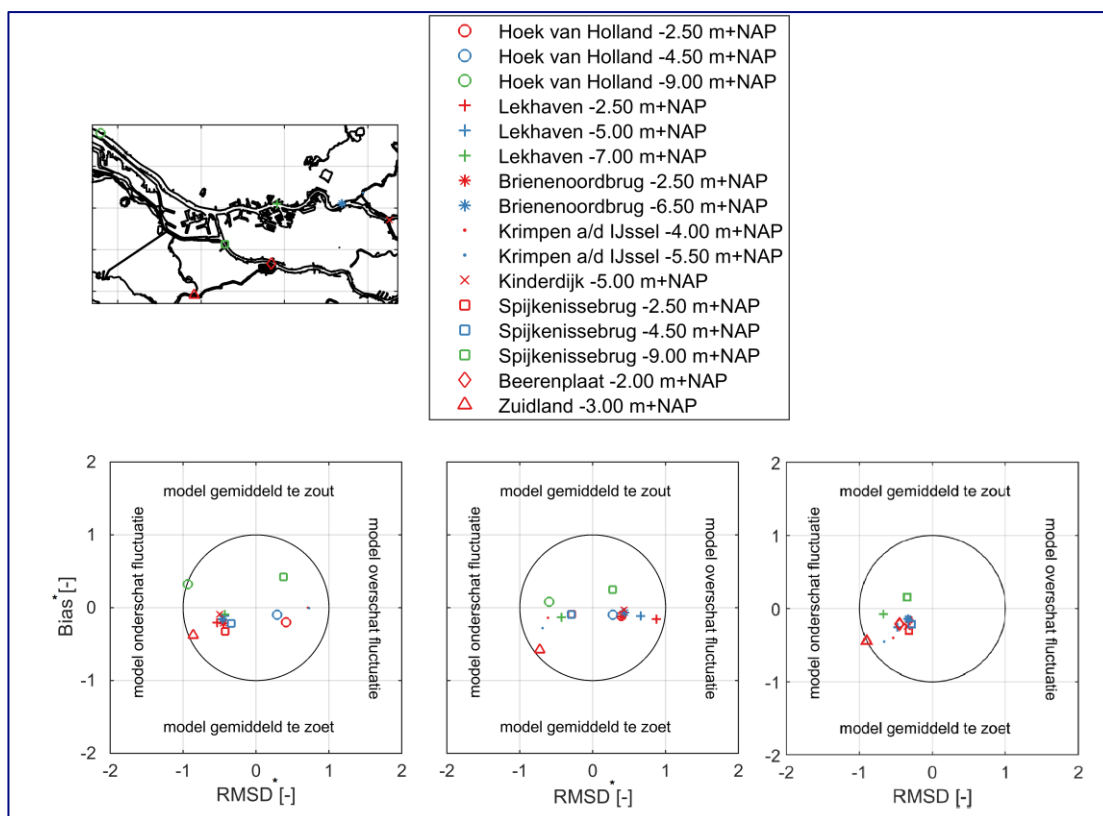
4.5.2.3 Consistentie 2011 en 2018 simulaties

Figuur 4-14 toont target diagrammen voor de in 2020 uitgevoerde berekeningen, die betrekking hebben op december 2011 en mei 2011, en het diagram dat is bepaald voor de periode met grootste zoutindringing in 2018.

Uit deze diagrammen volgt dat:

- Voor alle perioden geldt dat het model zoet is ten opzichte van de metingen met uitzondering van de diepste meetlocaties te Hoek van Holland en Spijkenissebrug.

- Waar het fluctuaties in zoutgehalte betreft is de periode met grootste zoutindringing in 2018 een uitzondering. Voor deze periode geldt dat fluctuaties worden onderschat. Voor beide 2011 perioden geldt dit niet en is het aantal locaties waar fluctuaties worden onderschat vergelijkbaar met het aantal locaties waar fluctuaties worden overschat.
- Een eenduidige relatie tussen de positie van de meetlocatie en het onder dan wel overschatten van fluctuaties bestaat niet. Dit betekent dat er geen stelselmatige onderdan wel overschatting van fluctuaties is.
- Waar het de grootte van het verschil tussen meting en berekening betreft, dat is de afstand tot het midden (0,0) in de targetdiagrammen, geldt dat de drie perioden vergelijkbaar zijn. Dit impliceert dat de reproductie van zoutgehalten ter plaatse van de vaste meetlocatie onafhankelijk is van de simulatieperiode.

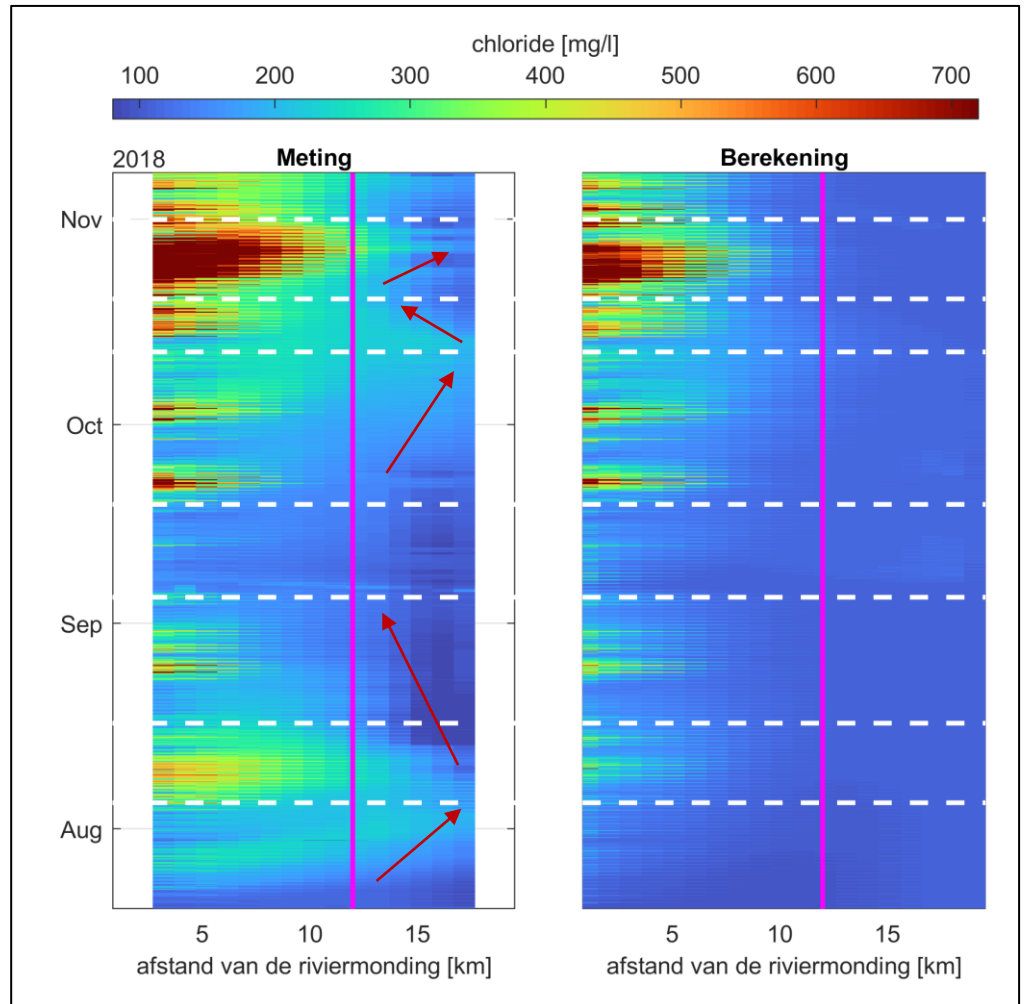


Figuur 4-14: Links 1^e week december 2011, Midden mei 2011, Rechts 2018 periode met grootste zoutindringing (19 oktober 2018 - 26 oktober 2018)

4.6 Zoutindringing in de Hollandsche IJssel

De grootste zoutindringing op de Hollandsche IJssel treedt op in de periode van 19 – 26 oktober 2018. Deze zoutindringing is een gevolg van de combinatie van een lage rivierafvoer en een windopzet op zee.

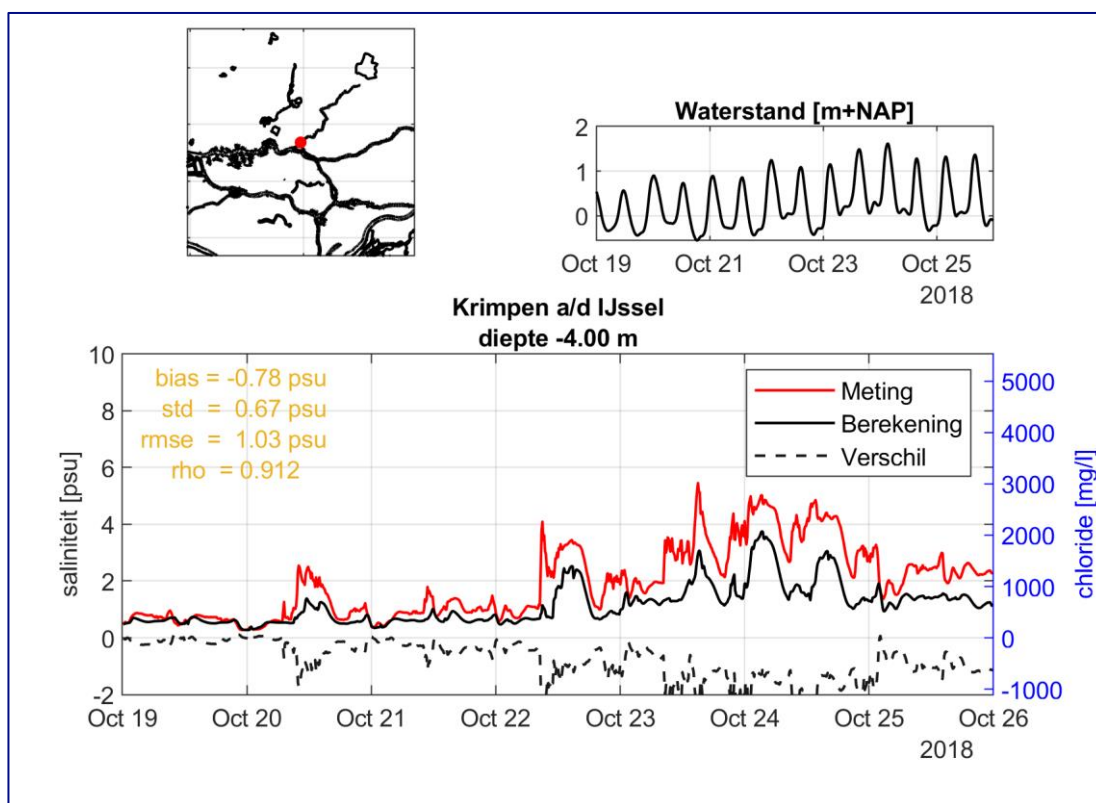
De vergelijking tussen de gemeten en berekende zoutindringing op de Hollandsche IJssel wordt getoond in Figuur 4-15. Kwalitatief zijn de berekeningsresultaten in overeenstemming met de metingen. De momenten van verzilting van de Hollandsche IJssel worden door het model goed voorspelt. Waar het grootte van berekende zoutgehalten betreft geldt dat:



Figuur 4-15: Vergelijking gemeten tegen berekende zoutindringing Hollandsche IJssel

- de “directe” zoutindringing (rode gebied, zie paragraaf 2.3.3) iets wordt onderschat. Dit geldt voor de periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018) maar ook voor andere perioden waarvoor geldt dat de Hollandsche IJssel verzilt. De monding van de Hollandsche IJssel fungeert als “randvoorwaarde” met betrekking tot de “directe” zoutindringing op de Hollandsche IJssel. Het zouttransport van de Nieuwe Maas naar de Hollandsche IJssel is hoofdzakelijk het product van het debiet door de monding van de Hollandsche IJssel en het zoutgehalte. Voor het debiet geldt dat dit, althans op 14 augustus 2018, goed wordt gereproduceerd, zie Figuur B-2. Voor de zoutgehalten in de monding, meetlocatie Krimpen aan den IJssel (Figuur 4-16) geldt dat de gemeten zoutgehalten ongeveer 1 PSU hoger zijn dan berekende waarden. Het zouttransport van de Nieuw Maas naar de Hollandsche IJssel wordt als gevolg hiervan iets onderschat.
- voor het “indirecte” gebied (blauwe gebied) het op- dan wel terugtrekken van zout (rode pijlen) wel in de meting maar niet in de berekening te herkennen zijn. Berekeningsresultaten in het indirecte gebied lijken vooral bepaald te worden door het zoutgehalte dat is toegekend aan de lozingen, Gouda en de op de Hollandsche IJssel uitslaande gemalen. Het lichtblauw stroomopwaarts volgt uit het overal toegekende zoutgehalte van 0,2 PSU. Dit zoutgehalte (overeenkomend met ongeveer 100 mg/l chloride) is bepaald op basis van een vergelijking tussen meting en berekening. Nog beter zou zijn de zoutgehalten van het uitgeslagen water daadwerkelijk te meten en op te leggen aan de berekening.

De reproductie van de indirecte verzilting stroomopwaarts in de Hollandsche IJssel is in de uitgevoerde berekening voor het najaar 2018 dus niet goed zichtbaar. Verzilting stroomopwaarts is in de berekening nauwelijks aanwezig, waardoor ook het effect van het “schoonspoelen” vanuit Gouda niet zichtbaar is.



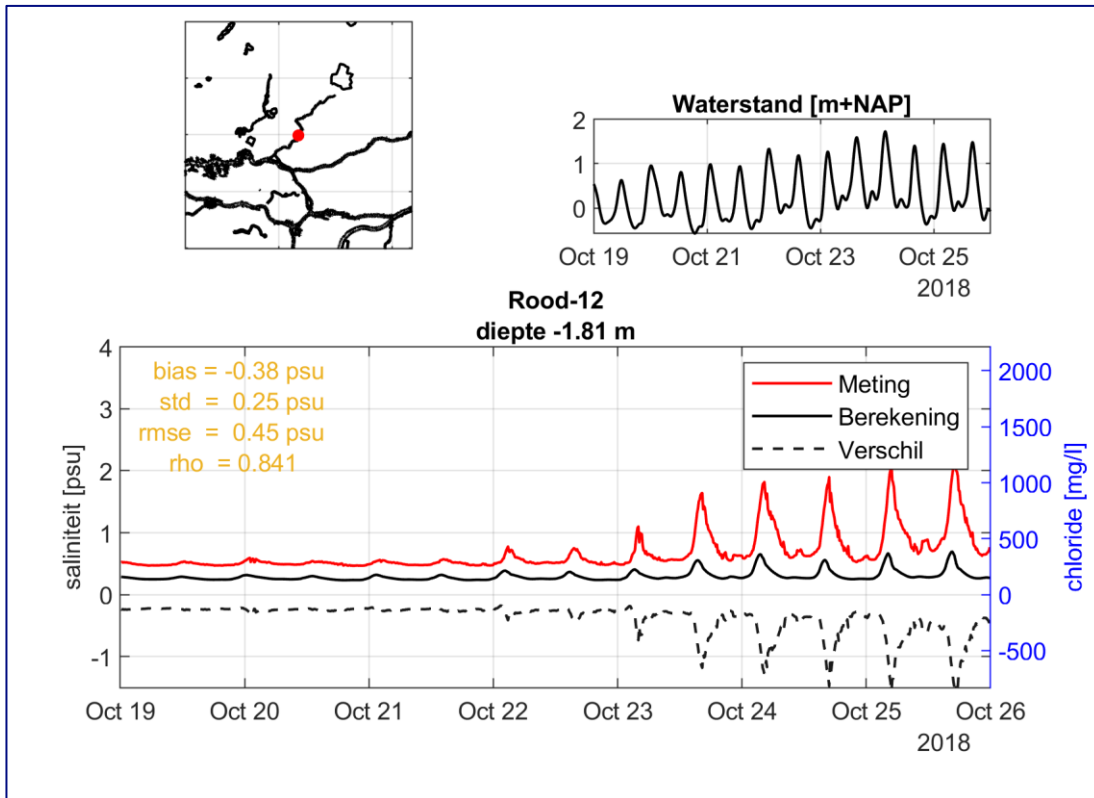
Figuur 4-16: Gemeten tegen berekende zoutgehalte, meetlocatie Krimpen aan den IJssel, 2,5 km stroomopwaarts van de monding,, periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018).

De grens tussen het gebied met “directe” en “indirecte” zoutindringing is gelegen op ongeveer 10 à 12 km gemeten vanaf de monding van de Hollandsche IJssel. Daarmee ligt diverlocatie Rood-12, zie Figuur 2-4, in het directe verziltingsgebied en Groen-26 in het indirecte verziltingsgebied. Het verschillende gedrag in deze beide gebieden wordt getoond in Figuur 4-17 en Figuur 4-18. Voor beide gebieden geldt dat de gemeten achtergrondwaarde hoger is dan de berekende achtergrondwaarde.

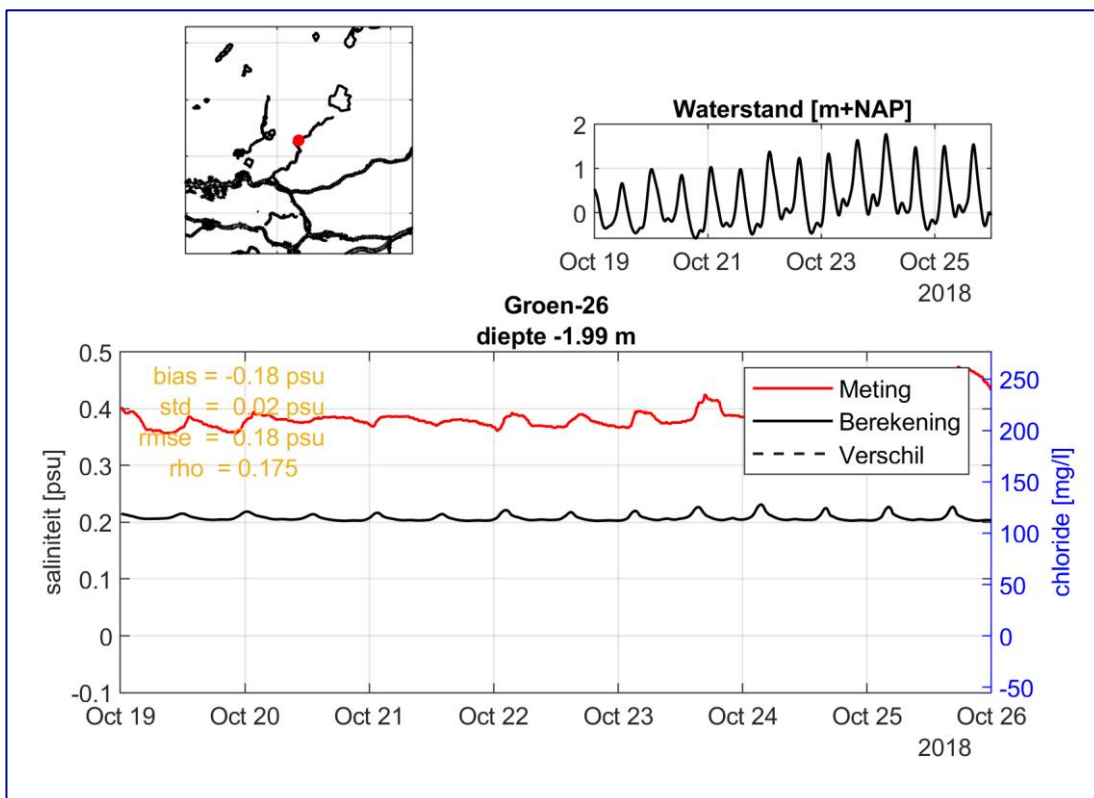
Voor diverlocatie Rood-12 geldt dat de momenten van toename ten opzichte van de achtergrondwaarde, directe verzilting, goed worden voorspeld. De grootte van de verhoging wordt onderschat wat een gevolg is van de te lage zoutgehalten bij de monding.

Voor diverlocatie Groen-26 geldt dat nauwelijks verhoging ten opzichte van de achtergrondwaarde wordt gemeten of berekend.

Tijdreeksen van gemeten en berekende zoutgehalten ter plaatse van alle diverlocaties worden getoond in Appendix D.



Figuur 4-17: Gemeten tegen berekende zoutgehalte, diverlocatie Rood-12 (afstand tot monding 8,5 km), periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018).



Figuur 4-18: Gemeten tegen berekende zoutgehalte, diverlocatie Groen-26 (afstand tot monding 12,5 km), periode met grootste zoutindringing (19 – 26 oktober 2018).

4.7 Zoutprofielen splitsingspunt Hollandsche IJssel/Nieuwe Maas

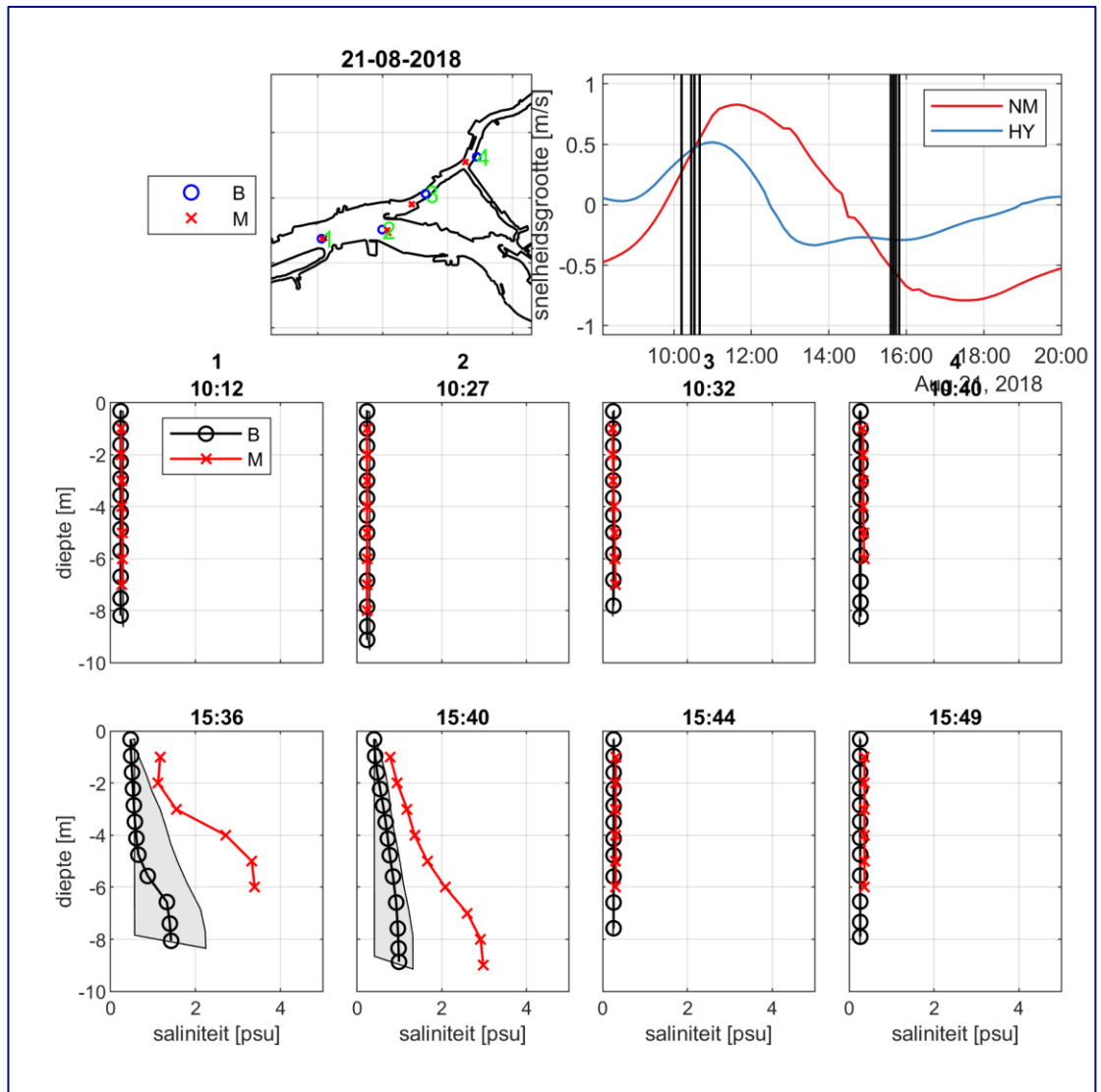
Gedurende het najaar 2018 is een aantal maal een vaartocht uitgevoerd op zowel de Hollandsche IJssel als de Nieuwe Maas en de Lek. Tijdens deze vaartochten zijn een groot aantal zoutprofielen gemeten. Tijdens de periode van grootste zoutindringing, van 19 tot 26 oktober 2018, is geen vaartocht uitgevoerd.

Een vergelijking tussen gemeten en berekende zoutprofielen wordt getoond in Figuur 4-19. De vergelijking voor alle vaartochten waar zowel de Nieuwe Maas als de Hollandsche IJssel min of meer gelijktijdig zijn bemeaten wordt gegeven in Appendix E.

Voor alle vaartochten geldt dat de monding van de Hollandsche IJssel niet langdurig, gedurende de gehele getijperiode verzilt is geweest. Het zoutgehalte is enkel hoger dan de achtergrondwaarde aan het einde van de vloedperiode. Voor deze tijdstippen geldt dat:

- Net als de metingen laten ook de berekeningsresultaten enkel een verhoging van het zoutgehalte ten opzichte van de achtergrond zien in de Nieuwe Maas (locatie 1 en 2 in Figuur 4-19). In de Hollandsche IJssel, locatie 3, 4 en 5, wordt geen verhoging ten opzichte van de achtergrond gemeten en ook niet berekend,
- De grootte van deze verhoging is in het model 1 a 2 PSU kleiner dan in de meting, en,
- De meting laat vaak een stratificatie zien. Die wordt in mindere mate door het model weergegeven.

Het onderschatten van de grootte van de verhoging ten opzichte van de achtergrond is consistent met wat te Krimpen aan den IJssel gevonden werd voor de periode met grootste zoutindringing.



Figuur 4-19: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 21 augustus 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan). Snelheid: vloedsnelheid is positief, eb negatief. B, Berekende profiel; M, Gemeten profiel

5 Discussie

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de toepasbaarheid van het model waar het zoutindringing/verziltiging betreft gebaseerd op de reproductie van de beschikbare waterstands-, saliniteits- en debietmetingen. Om deze toepasbaarheid te beoordelen, wordt in dit hoofdstuk de aanpak, een interpretatie van de resultaten, en de betekenis van de resultaten voor mogelijkheden en beperkingen voor modeltoepassing bediscussieerd.

5.2 Evaluatie aanpak

In de loop van dit project (tussen conceptrapportage en deze versie) zijn de simulaties verbeterd door een aantal aanpassingen te doen aan de opzet van de berekening. Dit betreft:

- De inspeelperiode: was eerst 1 maand, nu 3,5 maanden.
- De zeerandvoorwaarde van het model voor waterstand: de middenstand van de informatie vanuit DCSM is met ongeveer 5 cm gecorrigeerd.
- De randvoorwaarden voor zoutgehalte bij debieten en (gemaal)lozingen op de Hollandsche IJssel zijn: was eerst 0,3 PSU bij Gouda en de overige lozingen 0 PSU, nu allemaal 0,2 PSU.

Deze zaken werkten duidelijk door in de modelresultaten, terwijl ze eigenlijk geen onderdeel zijn van het model zelf. Om de kwaliteit van het model zelf goed zichtbaar te maken, en discussies over toepassingsmogelijkheden niet te laten vertroebelen door deze zaken, is het goed geweest de simulatie op deze punten te verbeteren. Met name de tweede aanpassing heeft een duidelijke verbetering opgeleverd, en wel voor de waterstandsreproductie. De derde aanpassing is – hoewel er nog steeds verbetering mogelijk is – naar ons idee een meer realistische weergave van de werkelijke condities, maar heeft de reproductie van de verziltiging van de Hollandsche IJssel slechts in beperkte mate beïnvloed.

5.3 Interpretatie resultaten

5.3.1 Onderscheid directe en indirecte verziltiging

Om te komen van resultaten voor zoutgehalte tot uitspraken over toepasbaarheid van het model, wordt hier onderscheid gemaakt tussen directe zoutindringing/verziltiging en indirecte zoutindringing/verziltiging.

Directe zoutindringing/verziltiging is een instantane reactie op verandering in forcering. Het betreft hier:

- de veranderingen in zoutgehalten binnen een getij,
- de verandering van zoutindringingslengte als gevolg van een verandering in rivierafvoer, en
- een toegenomen zoutindringingslengte als gevolg van stormopzet op zee. Dit betreft zowel kortstondige verziltiging van de monding van de Hollandsche IJssel als achterwaartse verziltiging in het Spui.

Er is een onderscheid tussen snelle (getij, opzet en afvoer) en trage processen (“diffusie” in de Hollandsche IJssel en van het Haringvliet naar Bernisse). Indirecte zoutindringing/verziltiging is een veel tragere reactie op veranderde condities. Het betreft hier bijvoorbeeld:

- de geleidelijke toename van de zoutgehalten stroomopwaarts in de Hollandsche IJssel, deels als gevolg van verzilting in de monding van de Hollandsche IJssel (zie paragraaf 2.3.3), en
- de toegenomen verzilting ter plaatse van de lijn Middelharnis – monding Spui als gevolg van nalevering van zout gevangen in diepe putten in het Haringvliet gedurende het voorgenomen kieren met de Haringvlietsluizen, of de ‘teruglevering’ van zout vanuit het Haringvliet naar het Spui na achterwaartse verzilting. Deze zaken zijn relevant wanneer de Haringvlietsluizen vanwege de lage Bovenrijnafvoer gesloten zijn maar nog wel zout in de diepe putten van het Haringvliet aanwezig is.

5.3.2 Weergave directe zoutindringing/verzilting

De weergave van de directe zoutindringing kan vooral worden afgeleid uit de reproductie van metingen op de LMW-locaties. Uit de vergelijking van metingen met berekeningsresultaten op deze locaties volgt dat:

- effecten van het getij en de afhankelijkheid van de zoutindringing van de rivierafvoer goed werden weergegeven. Dit zie je met name aan de reproductie van het meest stroomopwaarts gelegen station Kinderdijk.
- effecten van opzet in het traject Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas, Lek goed worden weergegeven (locatie Kinderdijk). Waar het achterwaartse verzilting betreft, i.e. de incidentele verzilting van de zoetwaterinname Bernisse bij opzet op zee, geldt dat de momenten van verzilting, vaak wel maar niet altijd, voorspeld kunnen worden. De grootte van het gemeten zoutgehalte in geval van verzilting wordt wel onderschat.
- iets vergelijkbaars geldt voor de directe verzilting van de monding van de Hollandsche IJssel. De momenten van verzilting worden goed gereproduceerd door het model maar de grootte van de verzilting wordt wat onderschat.
- waar het directe verzilting betreft, reproductie min of meer onafhankelijk is van de gesimuleerde periode. De reproductie ter plaatse van LMW-locaties voor het najaar 2018 zoals gepresenteerd in dit rapport is vergelijkbaar met de reproductie zoals gerapporteerd in (Kaaij & Chavarrias, 2020) voor december en mei 2011.

5.3.3 Weergave indirecte zoutindringing/verzilting

Indirecte verzilting verloopt trager dan directe verzilting en is daarmee moeilijker weer te geven. De indirecte verzilting op de Hollandsche IJssel is niet zichtbaar in de uitgevoerde berekening voor het najaar van 2018. In de berekening trad de verzilting niet op in het bovenstroomse deel van de Hollandsche IJssel.

5.4 Implicatie resultaten: mogelijkheden en beperkingen voor toepassingen

Gegeven de goede weergave van de directe verzilting lijkt voorspellen van zoutgehalten bijvoorbeeld ter plaatse van zoutwaterinnamepunten waar optredende verzilting directe verzilting is goed mogelijk.

Het model wordt op dit moment geschikt geacht om – met kennis van zaken – toe te passen in onderzoek naar verziltingsvragen, zoals onderzoek naar effecten van maatregelen en veranderingen aan de systeemforcering. Dit kan dus gelden voor vraagstukken op de korte termijn, en onderzoek naar ingrepen als de verdieping van de Nieuwe Waterweg, de aanpassing van het Breediep en overige maatregelen. Maar ook voor bijvoorbeeld klimaatverandering gerelateerde vragen. Voor het langetermijnonderzoek kan het model ook functioneren als databron voor eenvoudigere modellen.

De goede debietreproducties geven ook het vertrouwen dat stroomsnelheden goed door het model worden berekend. Hiervoor heeft echter nog niet veel directe data-modelvergelijking plaatsgevonden. Ook over de prestatie van het model in de Maasmond, zeewaarts van Hoek van Holland, is nog niet zoveel bekend. Naast toepassing voor verziltingsvragen is het model

op termijn ook bedoeld voor voorspelling van stroomsnelheden in de RMM ten behoeve van de scheepvaart. Met het oog op beide toepassingen is het nuttig bij volgende toetsingsgelegenheid nader aandacht te geven aan directe data-modelvergelijking voor stroomsnelheden en prestatie van het model in de Maasmond. De verwachting is dat het model ook op die gebieden goed zal presteren.

Om het model op termijn ook operationeel toe te kunnen passen, zijn nog een aantal hordes te nemen. Dit heeft vooral te maken met de excessieve rekeninspanning die noodzakelijk is om het model te kunnen draaien. Dit is overigens niet alleen een issue voor operationele voorspellingen, maar is ook al een belangrijke zaak voor bijvoorbeeld scenariostudies. Momenteel zijn berekeningen eigenlijk enkel mogelijk op supercomputers bij rekencentra als SURF waar een grote rekencapaciteit beschikbaar is. Om de rekestijd te beperken – voor scenariostudies en richting operationele toepassingen – zou gedacht kunnen worden aan het weer ‘uitkleden’ van deze uitgebreide 3D schematisatie: wat zijn de essentiële elementen om tot een goede zoutvoorspelling te komen en kunnen er niet-noodzakelijke elementen weggelaten worden zonder dat dit (teveel) ten koste gaat van de kwaliteit van de resultaten? Hierbij kan gedacht worden aan het afknippen van riviertakken, het vergroven van de schematisatie, het toepassen van een 2D-3D aanpak waarbij gaande van oost naar west het aantal lagen toeneemt.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

6.1.1 Conclusies met betrekking tot reproductie van metingen

Waterstanden

Driedimensionale berekeningen zijn *noodzakelijk* wanneer de vraagstelling betrekking heeft op zout. Waterstanden kunnen ook worden berekend met, rekentechnisch veel minder zware, dieptegemiddelde berekeningen. Ondanks dat voorspelling van waterstanden niet de hoofddoelstelling van het driedimensionale model is, wordt het toch gezien als wenselijk, en misschien wel noodzakelijk, wanneer ook het driedimensionale model waterstanden nauwkeurig voorspeld. Zowel voor de in 2020 uitgevoerde berekeningen voor respectievelijk December en Mei 2011, als voor de in dit rapport gepresenteerde berekening voor het najaar 2018 geldt dat het driedimensionale model gebruikt kan worden om waterstanden te voorspellen.

Debieten op splitsingspunten

Zowel voor de in 2020 uitgevoerde berekening voor mei 2011 als voor de in dit rapport gepresenteerde berekening voor het najaar 2018 geldt dat “gemeten” debieten, gegeven de nauwkeurigheid waarmee een debiet “gemeten” kan worden, uitstekend worden gereproduceerd. Omdat een debiet “meting” slechts 13-uurs meting betreft kan uit de goede reproductie niet automatisch worden geconcludeerd dat de restdebietverdeling over verschillende riviertakken juist is. Maar het zegt wel dat de getijvoortplanting over de verschillende riviertakken in het RMM-gebied zeer goed wordt weergegeven in het model.

Zout

In 2020 is geconcludeerd dat de in de Nieuwe Waterweg optredende stratificatie goed wordt gereproduceerd door dit model. Deze stratificatie is het mechanisme dat zout stroomopwaarts in het estuarium transporteert. De goede weergave van dit mechanisme heeft tot gevolg dat gemeten zoutgehalten ter plaats van de LMW-stations ook goed worden gereproduceerd. Dit geldt zowel voor december en mei 2011, als voor het najaar van 2018.

Ter plaatse van de vaste meetlocaties reageert het zoutgehalte “direct” of instantaan op verandering in forcering, i.e. de getijfase, de rivierafvoer en de opzet op zee. Voor de Hollandsche IJssel geldt dat de 10 à 12 km gerekend vanaf de monding te Krimpen aan den IJssel “direct” verzilt als de monding verzilt. Deze directe verzilting van de Hollandsche IJssel wordt door het model gereproduceerd in de zin dat de moment van verzilting van dit deel van de Hollandsche IJssel goed worden voorspeld. De grootte van de gemeten zoutgehalten in dit deel van de Hollandsche IJssel wordt wat onderschat.

Meer stroomopwaarts in de Hollandsche IJssel geldt dat zoutgehalten een gevolg zijn van de verzilting in de monding, afvoer over de Hollandsche IJssel, en het zoutgehalte van het door gemalen uitgeslagen boezemwater. Het langzaam optrekken van zout van de monding richting Gouda, voor het beheer van de Hollandsche IJssel van belang, is nog niet zichtbaar in de modelresultaten.

6.1.2 Conclusies met betrekking tot gebruik van het model

De goede reproductie van waterstands-, debiet- en zoutmetingen geeft aan dat het model gebruikt kan worden voor operationele voorspellingen en scenariostudies met betrekking tot “directe” verzilting. Waar het gebruik met betrekking tot “indirecte” verzilting betreft bleek de

reproductiekwaliteit voor het stroomopwaartse deel van de Hollandsche IJssel nog niet voldoende. “Indirecte” verzilting is niet zichtbaar in het modelresultaat.

6.2 Aanbevelingen

Wat het gebruik van het model bemoeilijkt is de noodzakelijke forse rekenkracht. Dit belemmert zowel het gebruik ten behoeve van operationele voorspellingen als gebruik in scenariostudies.

Aanbevolen wordt te onderzoeken of het mogelijk is de benodigde rekeninspanning te beperken met behoud van de reproductiekwaliteit van het model. Eén mogelijkheid is een deel van het “rivierendeel” van het model, irrelevant waar het zoutindringing betreft, te verwijderen en ter plaatse van de “knip” afvoeren bepaald uit een diepte-gemiddelde berekening voor te schrijven. Dit bespaart ongeveer 30% aan rekenpunten en bovendien kan, naar verwachting, ook gerekend worden met een wat grotere tijdstap. Een verdere versnelling van de berekeningen zal een aanpassing van het gebruikte rekennetwerk vragen, i.e. grotere rekencellen al dan niet in combinatie met het verwijderen van, onder normale omstandigheden, inactieve delen van het model, zoals bijvoorbeeld de haventerreinen.

Specifiek voor de Hollandsche IJssel kan ook gedacht worden aan een detailmodel van enkel de Hollandsche IJssel en een deel van de Lek. Open randen, bijvoorbeeld te Brienenoord en Kinderdijk, kunnen geforceerd worden met een combinatie van metingen (waterstand en zoutgehalten) en berekeningsresultaten (debieten in de Lek te Kinderdijk).

Ten behoeve van operationele voorspellingen moeten randvoorwaarden voor het model operationeel bepaald kunnen worden. Het 3D DCSM-FM model wordt op dit moment nog niet gebruikt voor operationele voorspellingen. Voor de korte termijn wordt voorgesteld om te onderzoeken of een eenvoudiger randaansturing, waterstanden uit een dieptegemiddelde operationele voorspelling van waterstanden in combinatie met dieptegemiddelde, ruimtelijk variërende maar in de tijd constante, zoutrandvoorwaarden denkbaar is. Voor de (middel)lange termijn wordt voorgesteld het 3D-DCSM-FM model operationeel te draaien en berkeningsresultaten van dit model operationeel te gebruiken voor RMM 3D.

Het bleek in de huidige studie niet goed mogelijk een uitspraak te doen met betrekking tot de verzilting van de Hollandsche IJssel in het indirecte gebied. Voor een goede weergave van dit gebied is het wenselijk dat ook zoutgehalten van de lozingen op de Hollandsche IJssel bekend zijn. Aanbevolen wordt deze zoutgehalten ook te bemonsteren.

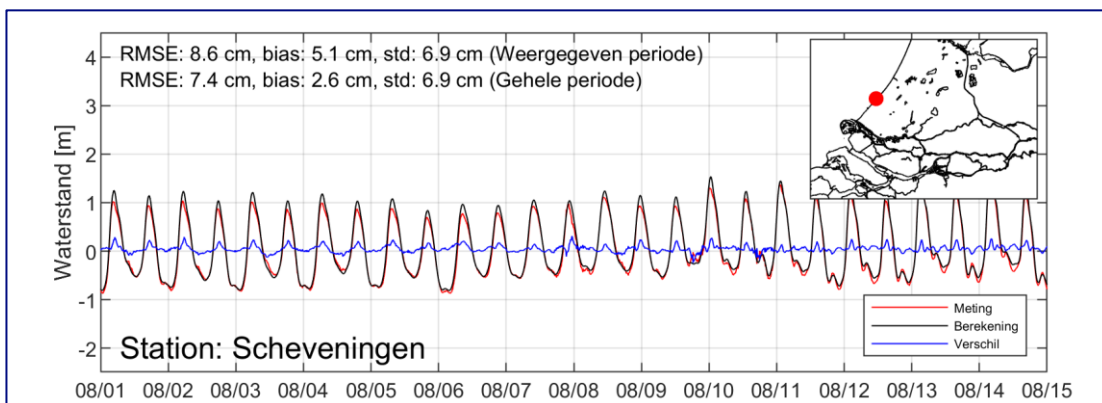
Naast gebruik van het model voor verziltings- gerelateerde vragen, is een beoogde toepassing van het model begeleiding van scheepvaart van en naar de Rotterdamse havens. Voor deze toepassing moeten gradiënten in dwarssnelheden op schepen, horizontaal en verticaal, nauwkeurig voorspeld kunnen worden. Stroomsnelheidsreproductie heeft tot nu toe geen aandacht gekregen in de uitgevoerde toetsingen van het model. Aanbevolen wordt bij een volgende toetsingsmogelijkheid snelheidsreproductie, met name in de Maasgeul, te betrekken. De in 2019 en 2020 uitgevoerde profielmetingen in de Maasgeul zijn bij uitstek geschikt om toepasbaarheid van het model voor scheepvaartbegeleiding vast te stellen.

Voor het najaar van 2018 geldt dat gemeten zoutgehalten ter plaatse van de vaste LMW-locaties vaak incompleet zijn of soms ontbreken. Aanbevolen wordt vaker te controleren of de meetinstrumenten naar behoren functioneren.

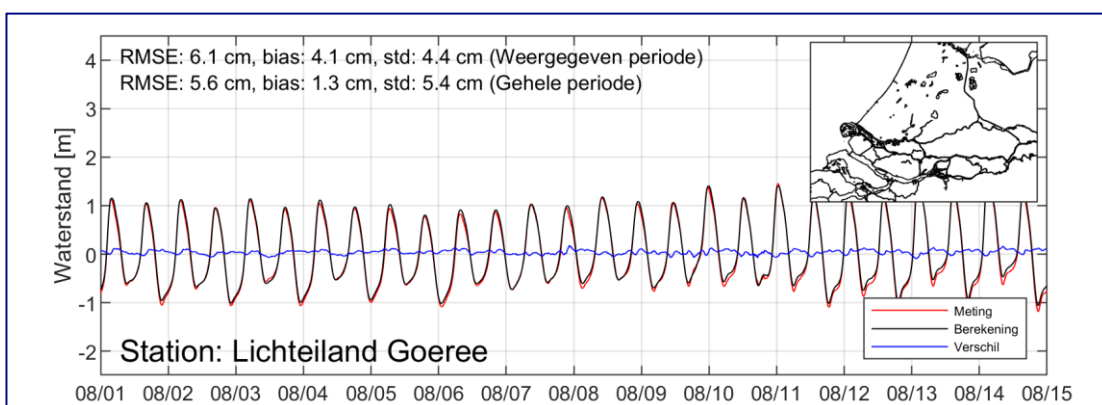
7 Referenties

- Deijl, E. v., & Wijk, R. v. (2019). *Jaarsom 2018 Rijn-Maasmonding*. Delft: Deltares.
- Jolliff, J., Kindle, J., Shulman, I., Penta, B., Friedrichs, M., Helber, R., & Amone, R. (2009). Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. *Journal of Marine Systems*, 64 - 82.
- Kaaij, T. v., & Chavarrias, V. (2020). *D-HYDRO RijnMaasMonding 3D; Zoutindringing in de Nieuwe Waterweg; Werkzaamheden 2020*. Delft: Deltares rapport 11205258-016-ZWS-0003. Versie 2.0. 21 December 2020.
- Kranenburg, W. (2015 (feb)). *Evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding (I)*. Delft: Deltares.
- Kuijper, C. (1990). *Salt conversions : formula for NaCl and seawater*. Delft: WL|Delft Hydraulics.
- Veenstra, J., Becker, A., Kaaij, T. v., & Yossef, M. (2020). *Ontwikkeling zesde-generatie Rijn-Maasmonding-model*. Delft: Deltares.
- Wijk, R. v., Kaaij, T. v., & Kranenburg, W. (2019). *Data-analyse verzilting Hollandsche IJssel en Lek droogteperiode 2018*. Delft: Deltares.
- Zijl, F., Laan, S., & Groeneboom, J. (2020). *Development of a 3D model for the NW European Shelf (3D DCSM-FM)*. Delft: Deltares.
- Zijl, F., Laan, S., & Groenenboom, J. (2021). *Development of a 3D model for the NW European Shelf (3D DCSM - FM)*. Delft: Deltares.

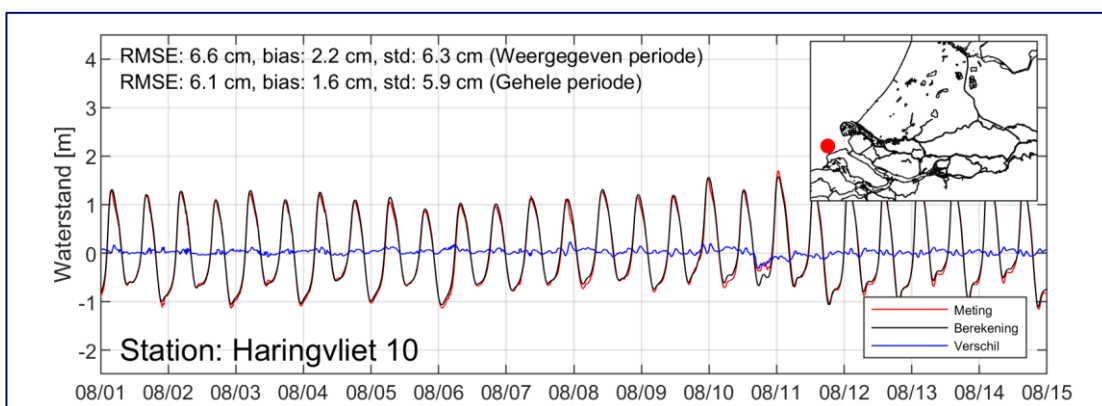
A Berekende en gemeten waterstanden 2018



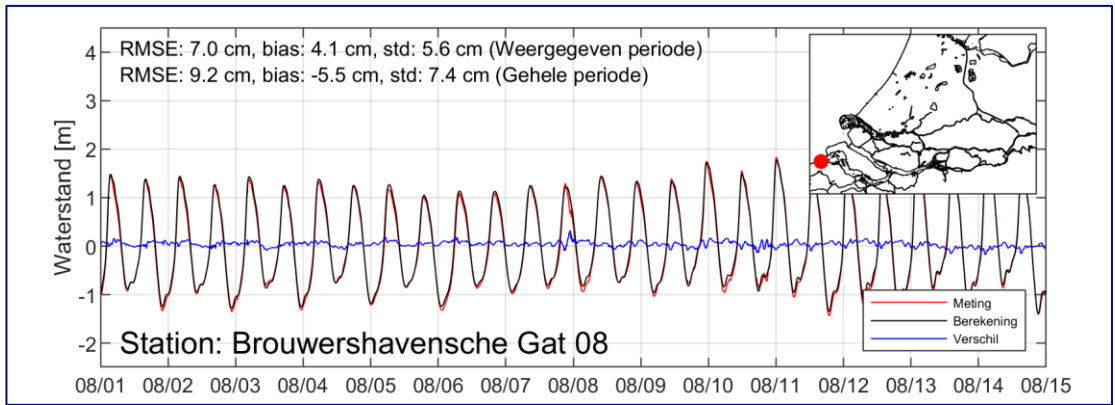
Figuur A-1: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Schevevingen



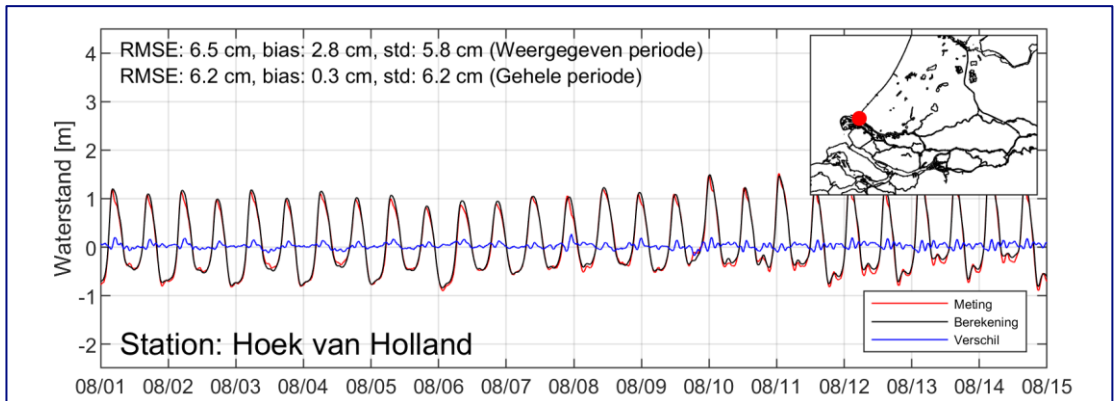
Figuur A-2: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Lichteiland-Goeree



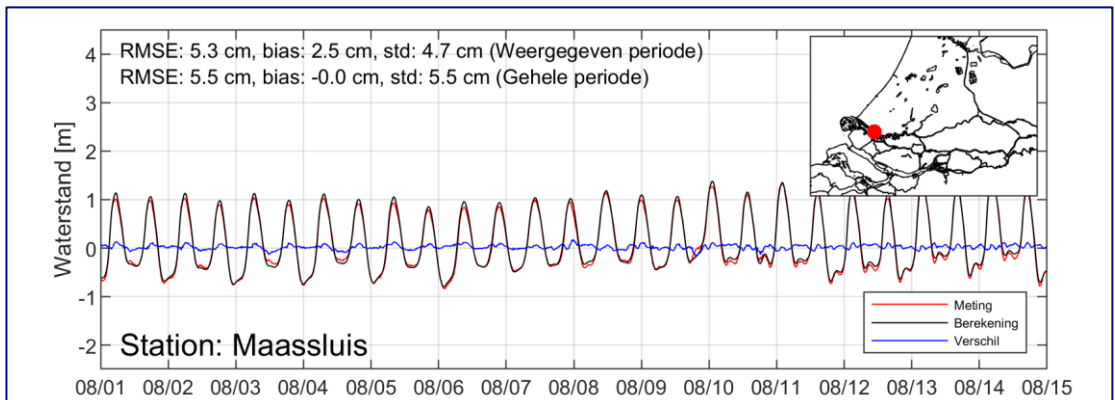
Figuur A-3: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Haringvliet-10



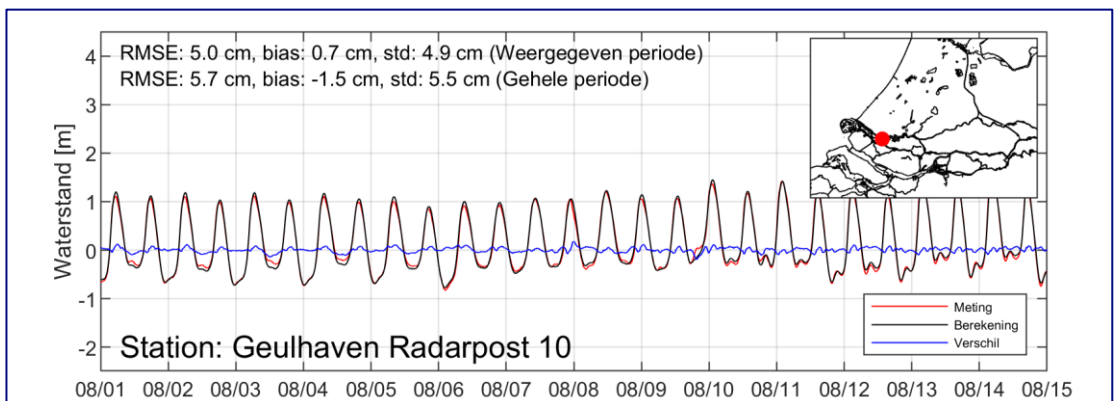
Figuur A-4: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Brouwershavensche Gat 8



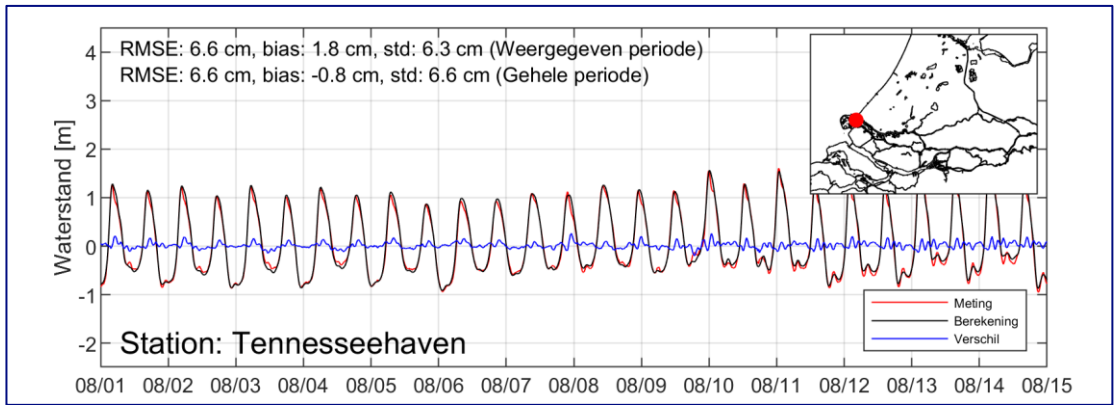
Figuur A-5: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Hoek-van-Holland



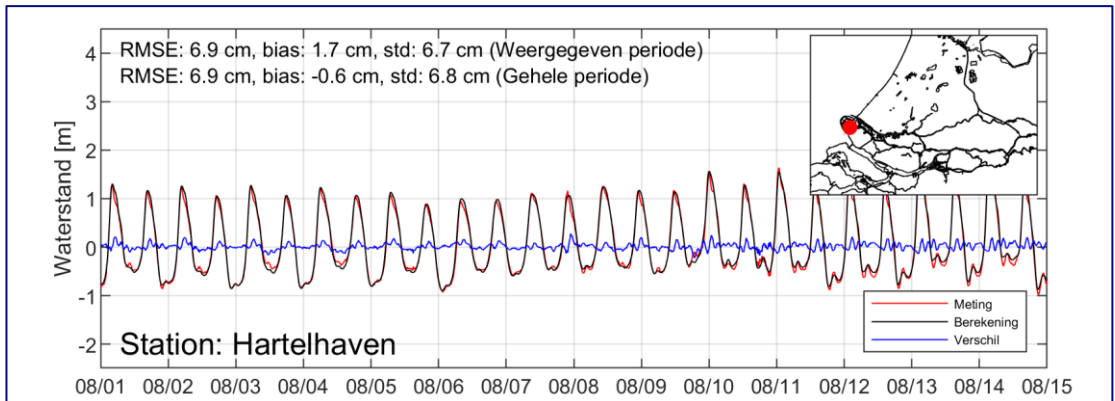
Figuur A-6: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Maassluis



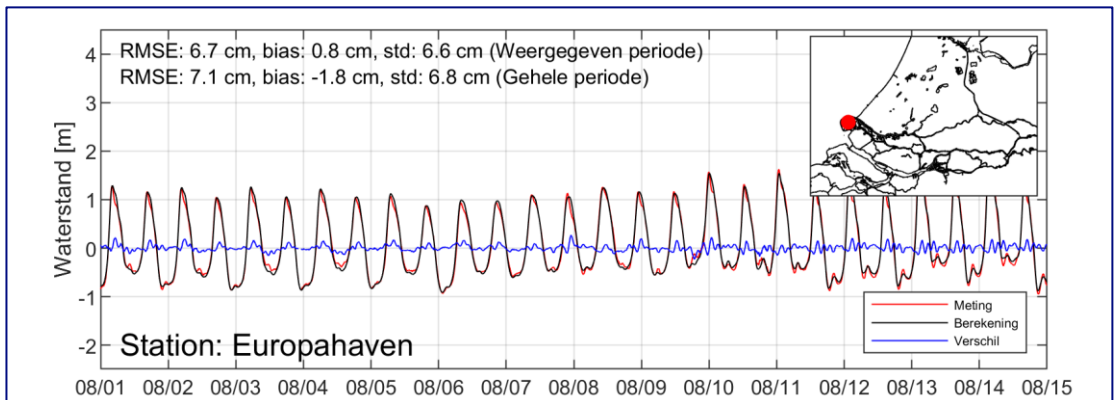
Figuur A-7: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Geulhaven



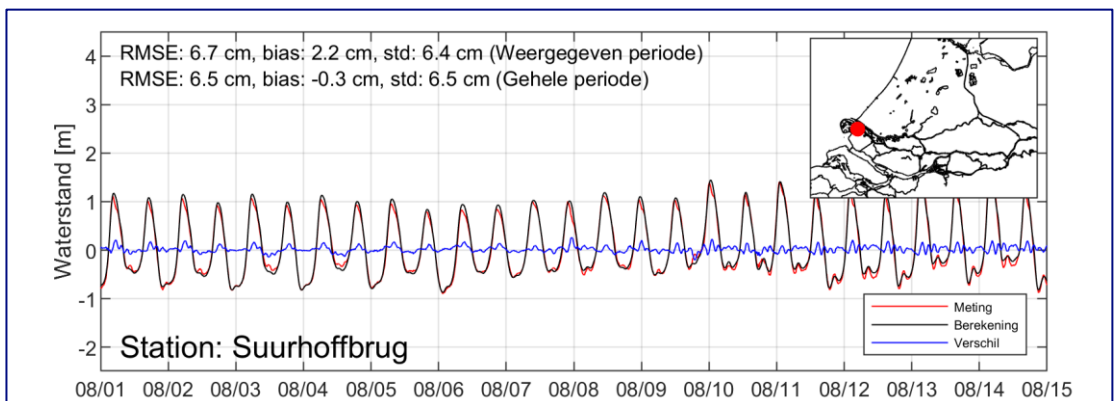
Figuur A-8: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Tennesseehaven



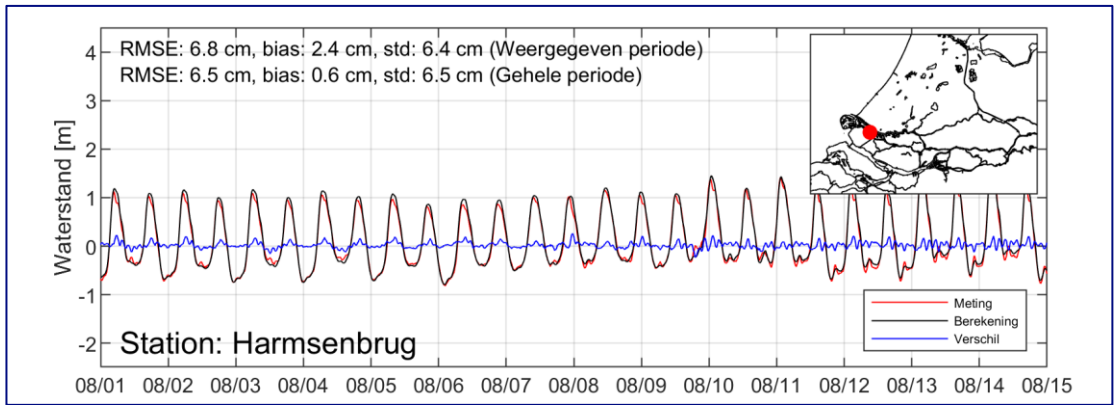
Figuur A-9: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Hartelhaven



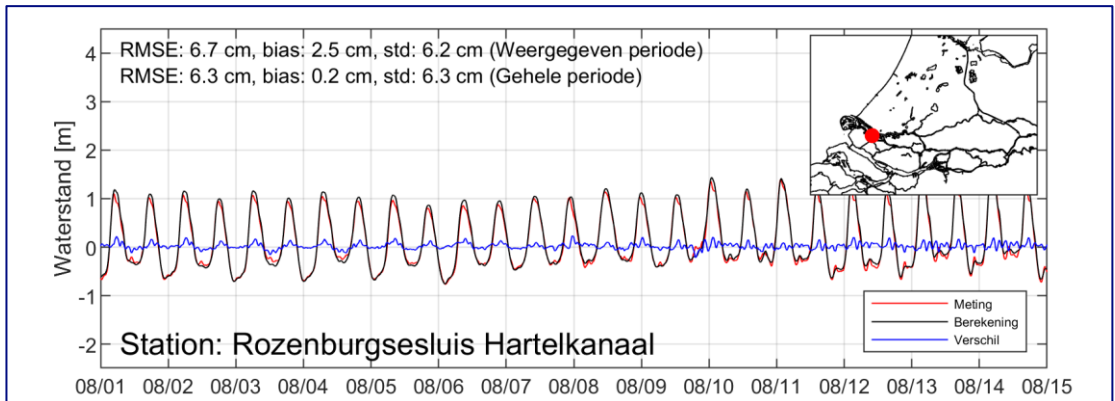
Figuur A-10: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Europahaven



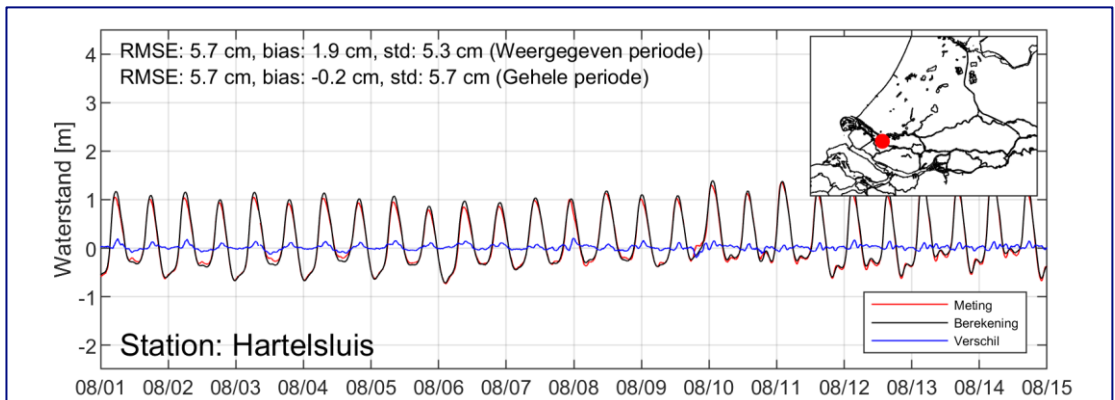
Figuur A-11: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Suurhoffbrug



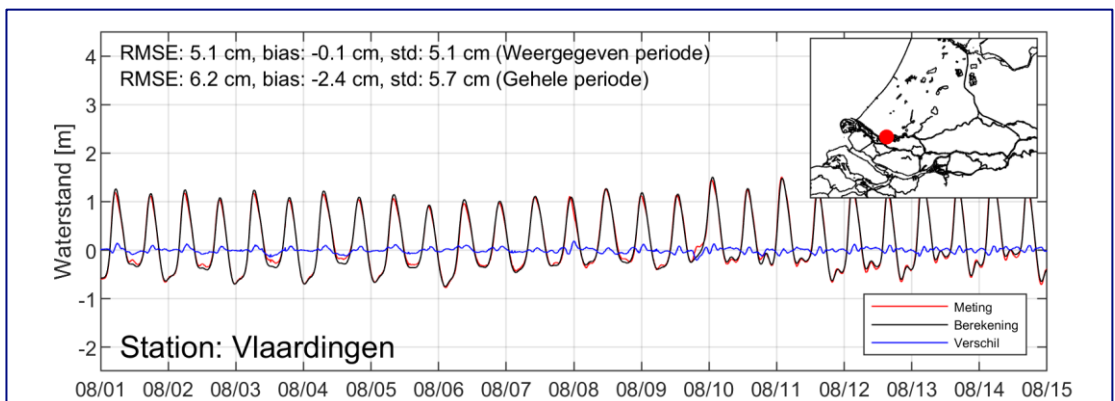
Figuur A-12: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Harmsenbrug



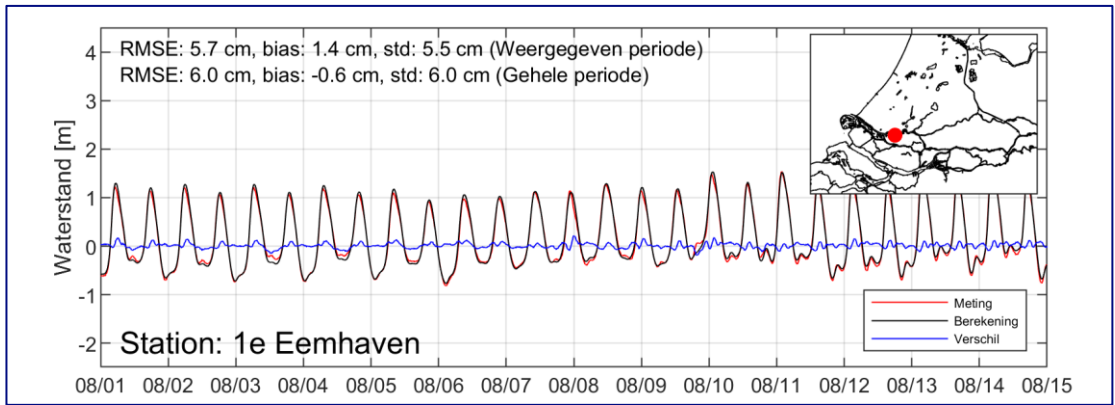
Figuur A-13: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Rozenburgsesluis



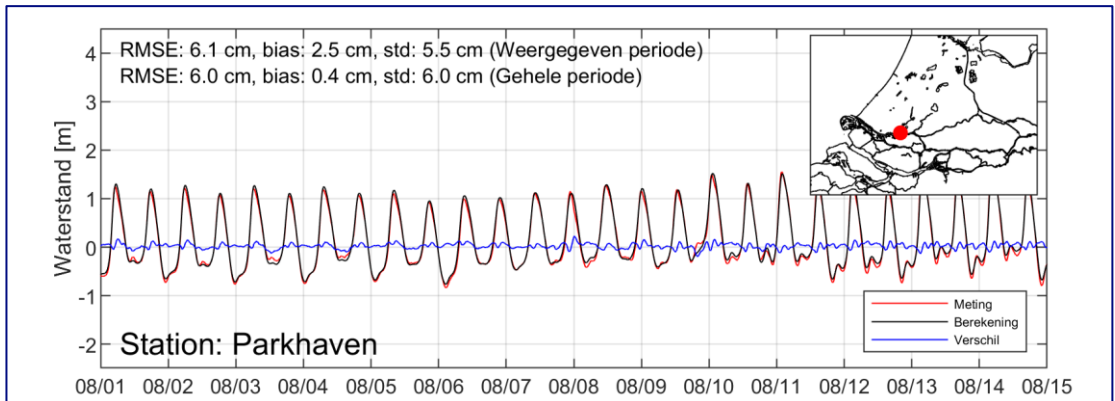
Figuur A-14: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Hartelsluis



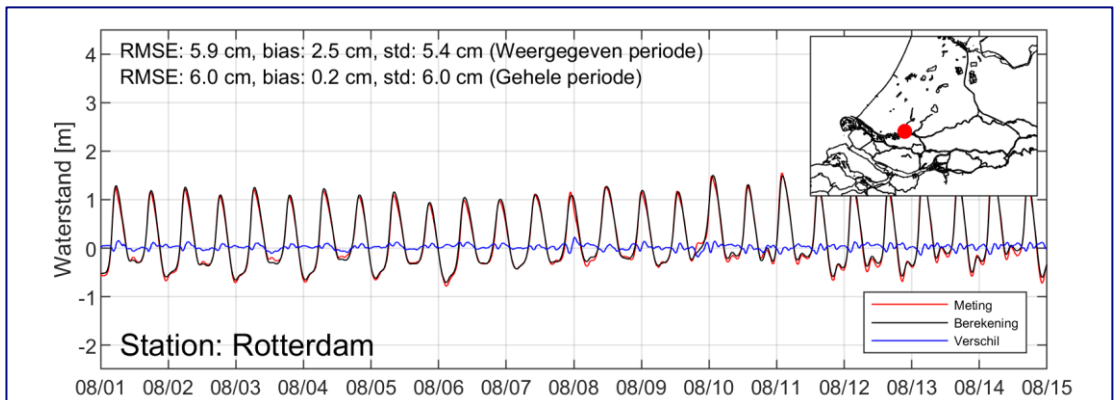
Figuur A-15: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Vlaardingen



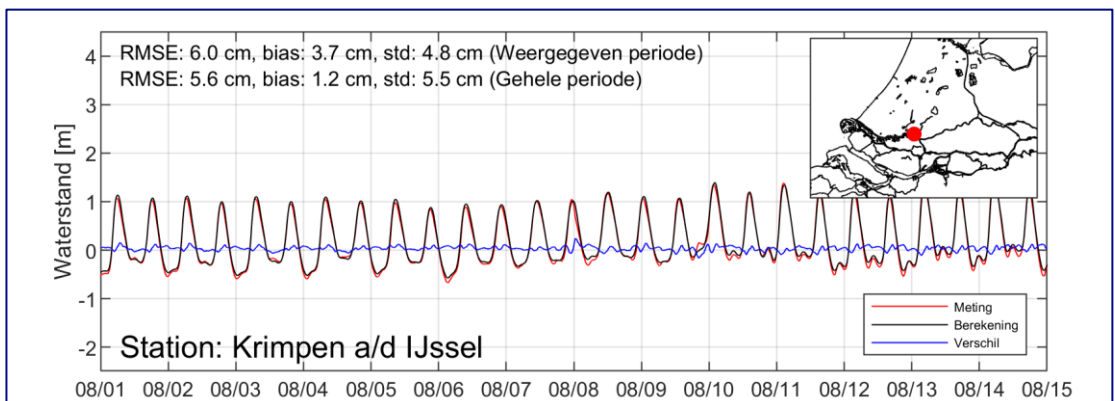
Figuur A-16: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: 1^e-Eemhaven



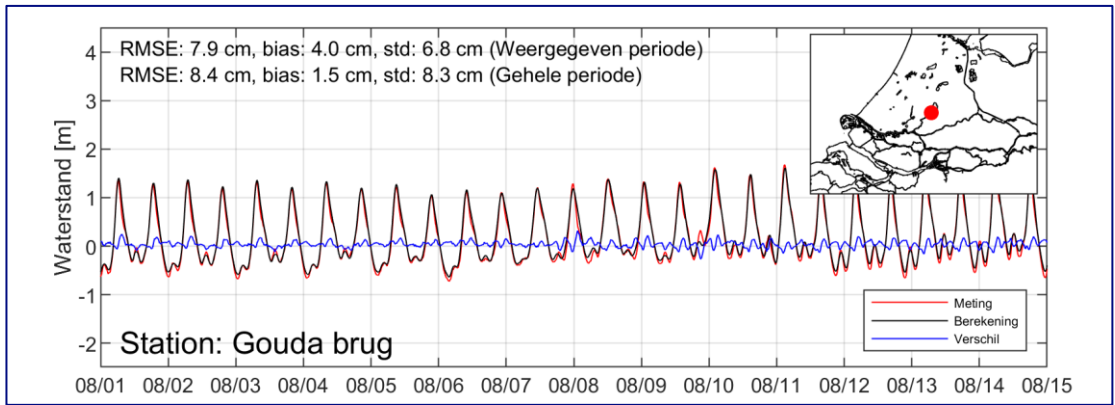
Figuur A-17: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Parkhaven



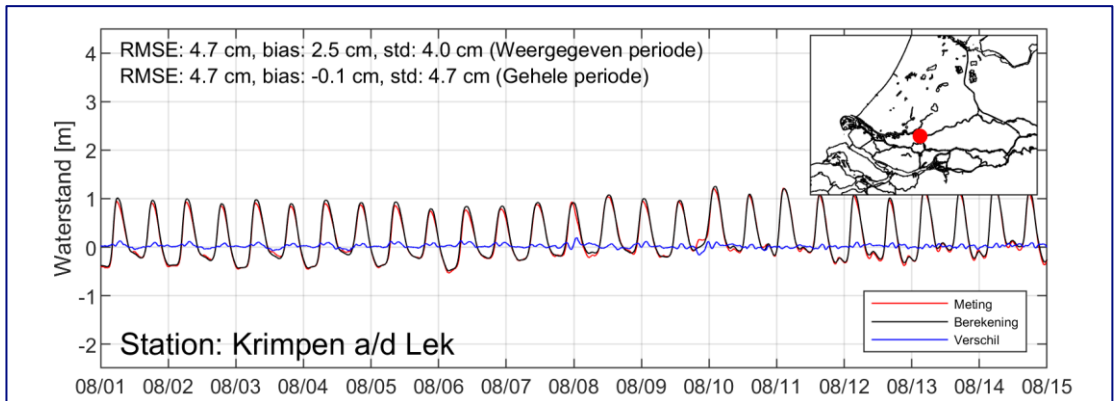
Figuur A-18: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Rotterdam



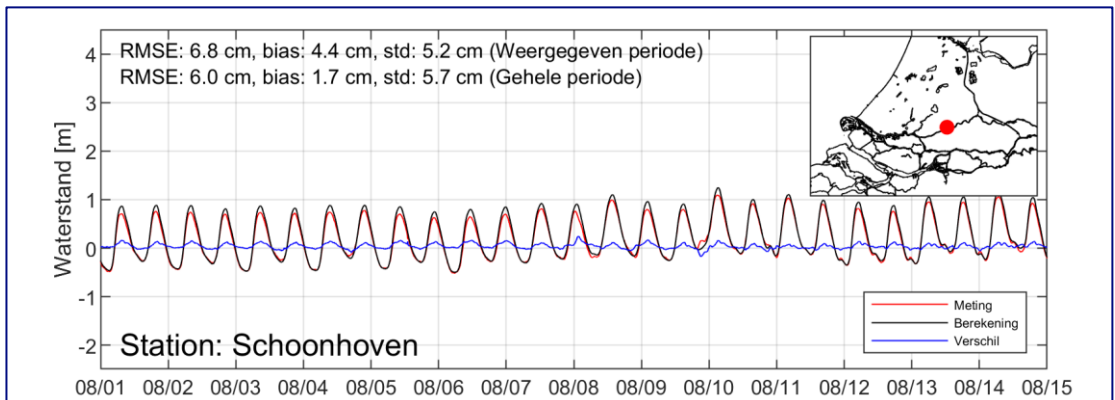
Figuur A-19: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Krimpen aan den IJssel



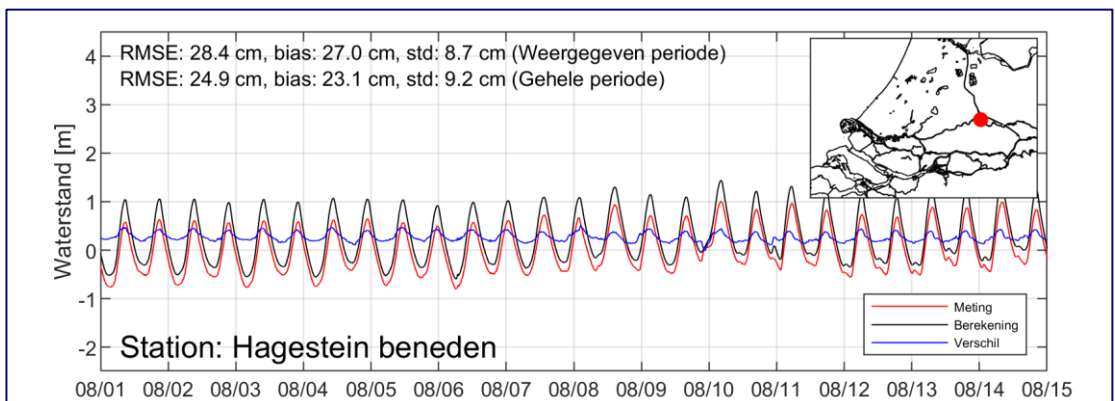
Figuur A-20: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Gouda brug



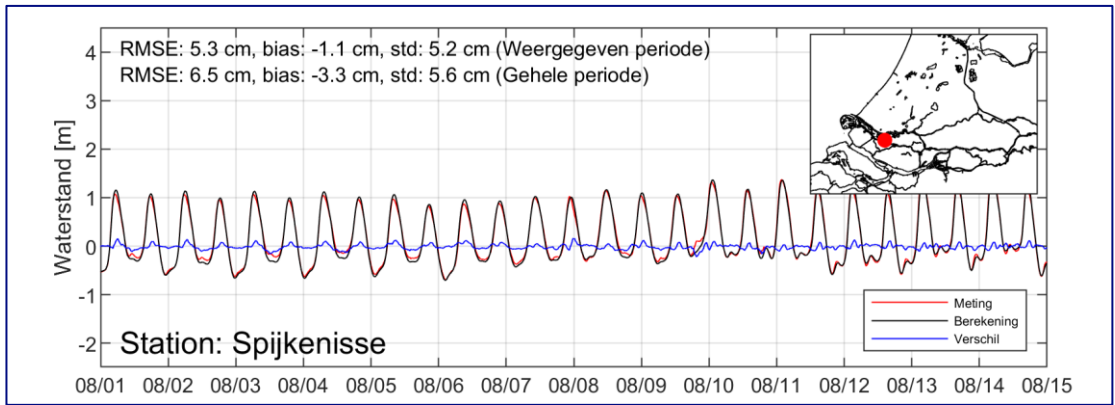
Figuur A-21: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Krimpen aan de Lek



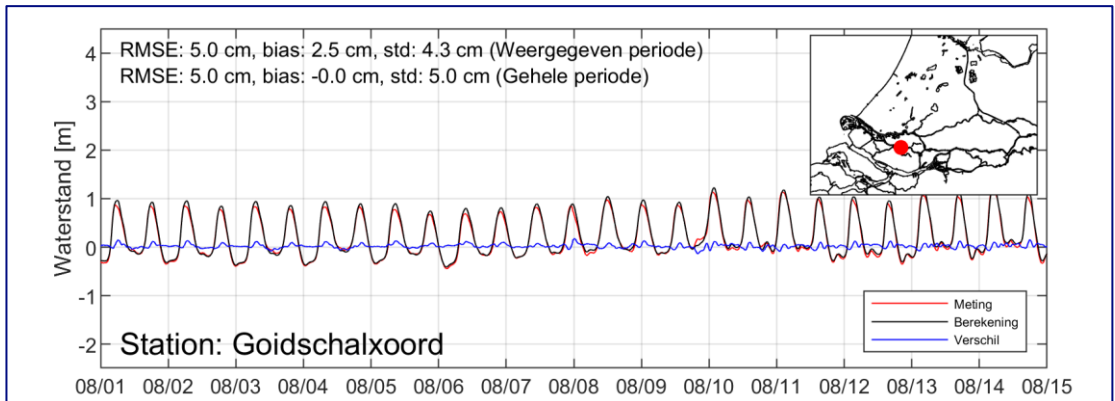
Figuur A-22: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Schoonhoven



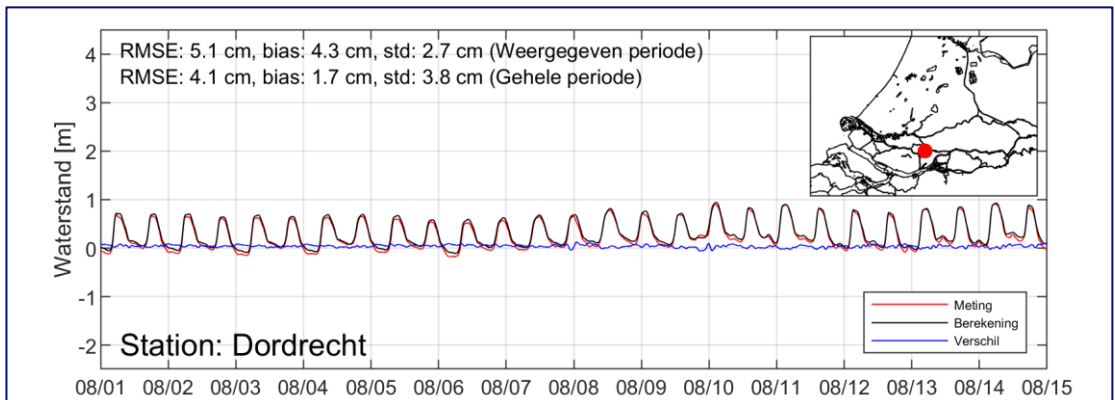
Figuur A-23: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Hagestein beneden



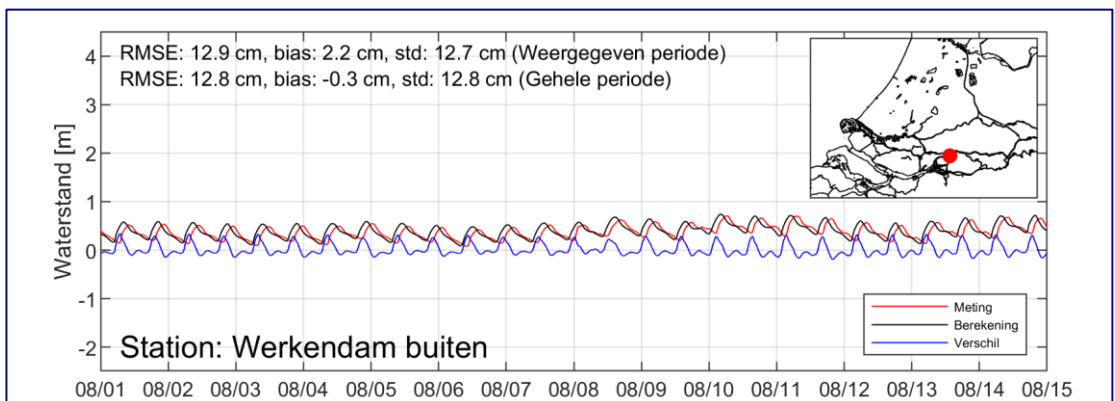
Figuur A-24: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Spijkenisse



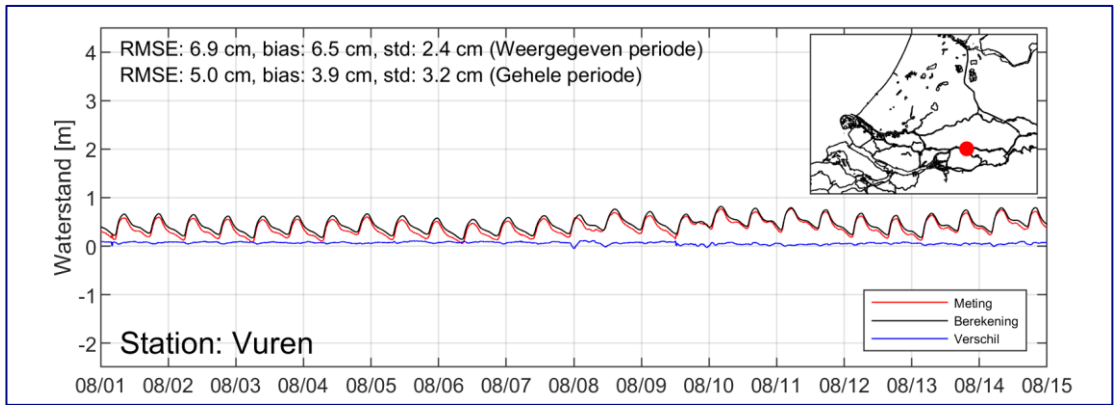
Figuur A-25: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Goidschalxoord



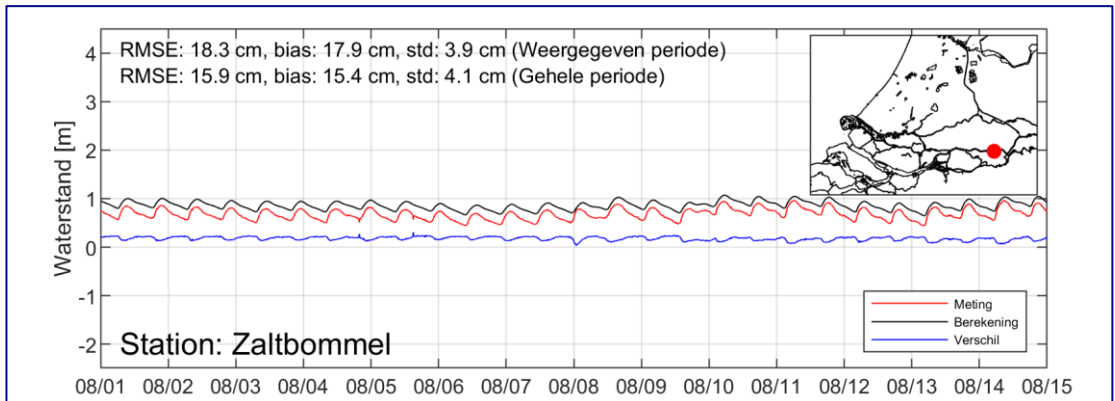
Figuur A-26: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Dordrecht



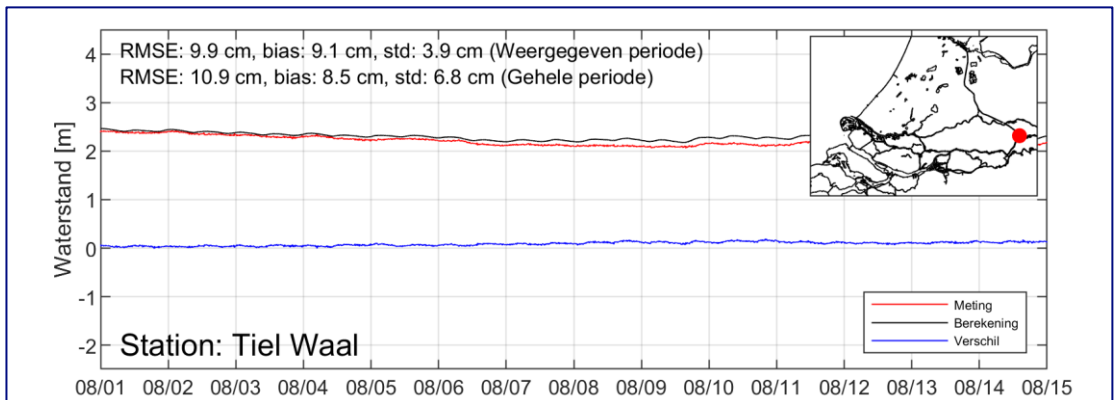
Figuur A-27: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Werkendam buiten



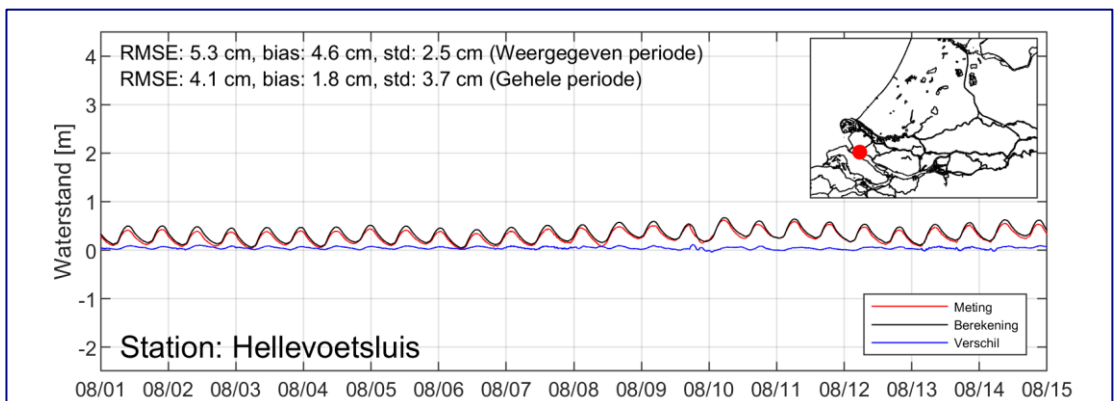
Figuur A-28: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Vuren



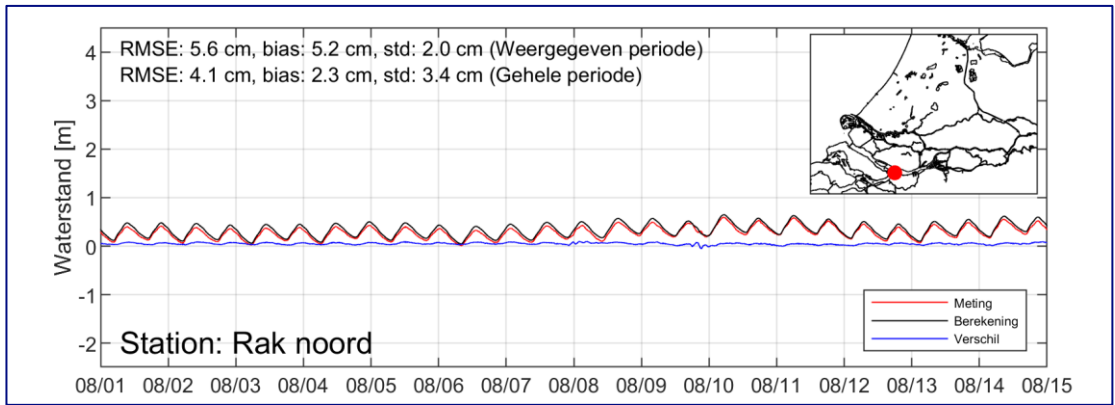
Figuur A-29: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Zaltbommel



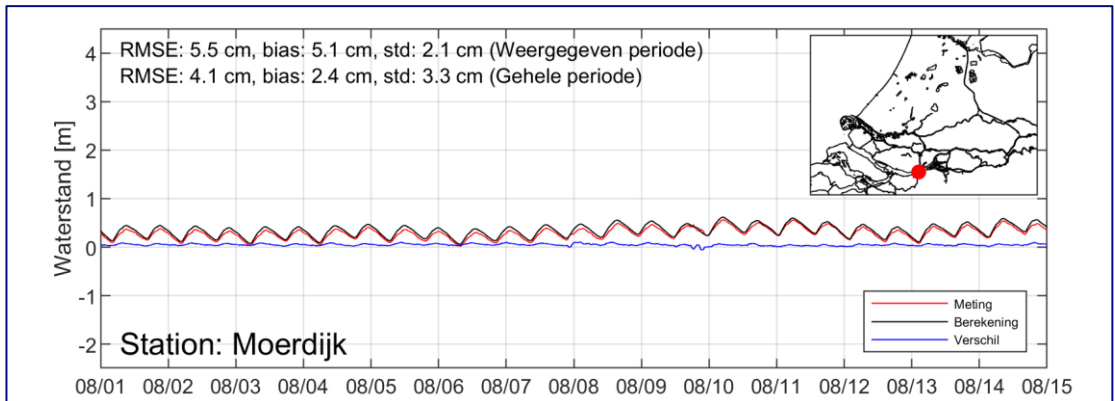
Figuur A-30: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Tiel-Waal



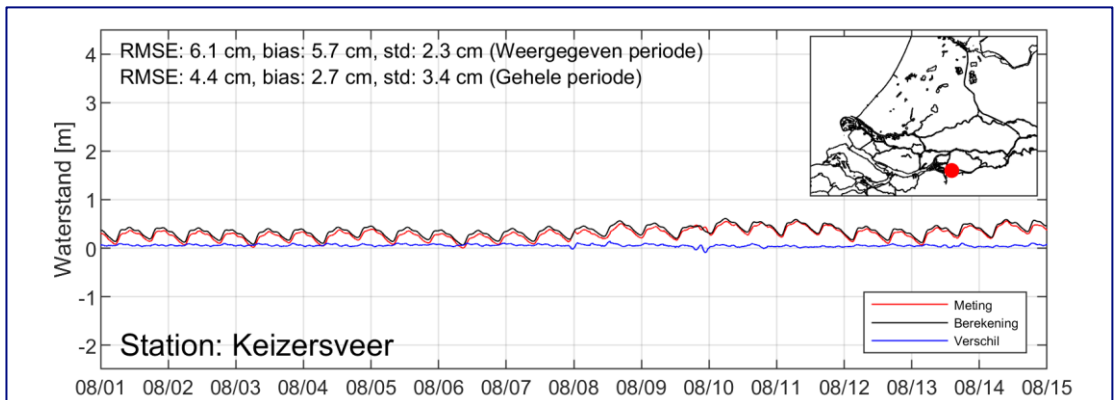
Figuur A-31: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Hellevoetsluis



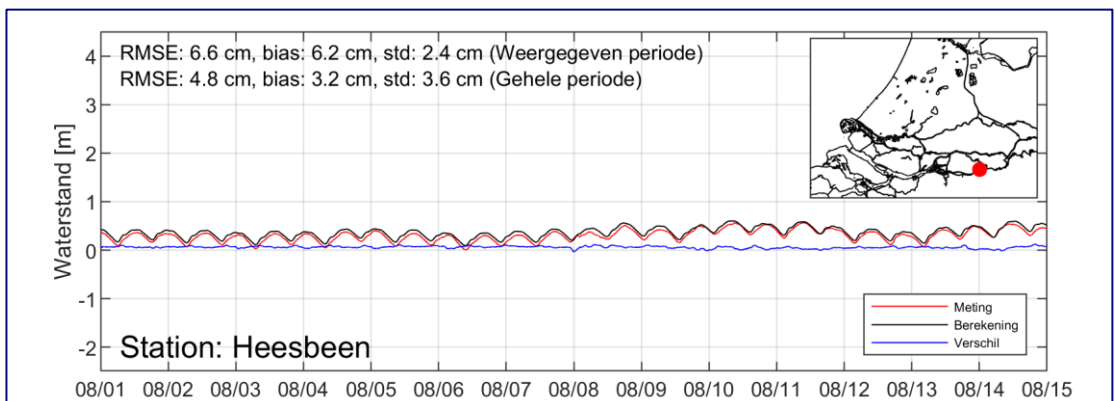
Figuur A-32: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Rak-noord



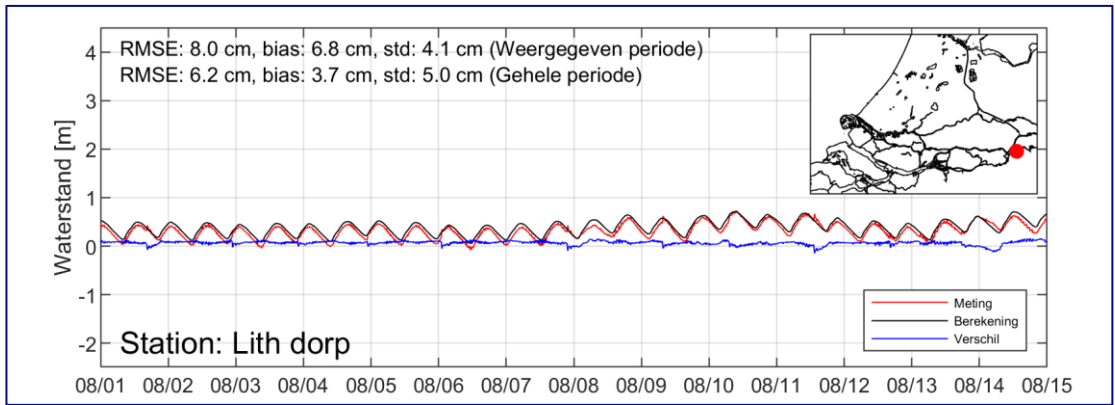
Figuur A-33: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Moerdijk



Figuur A-34: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Keizersveer

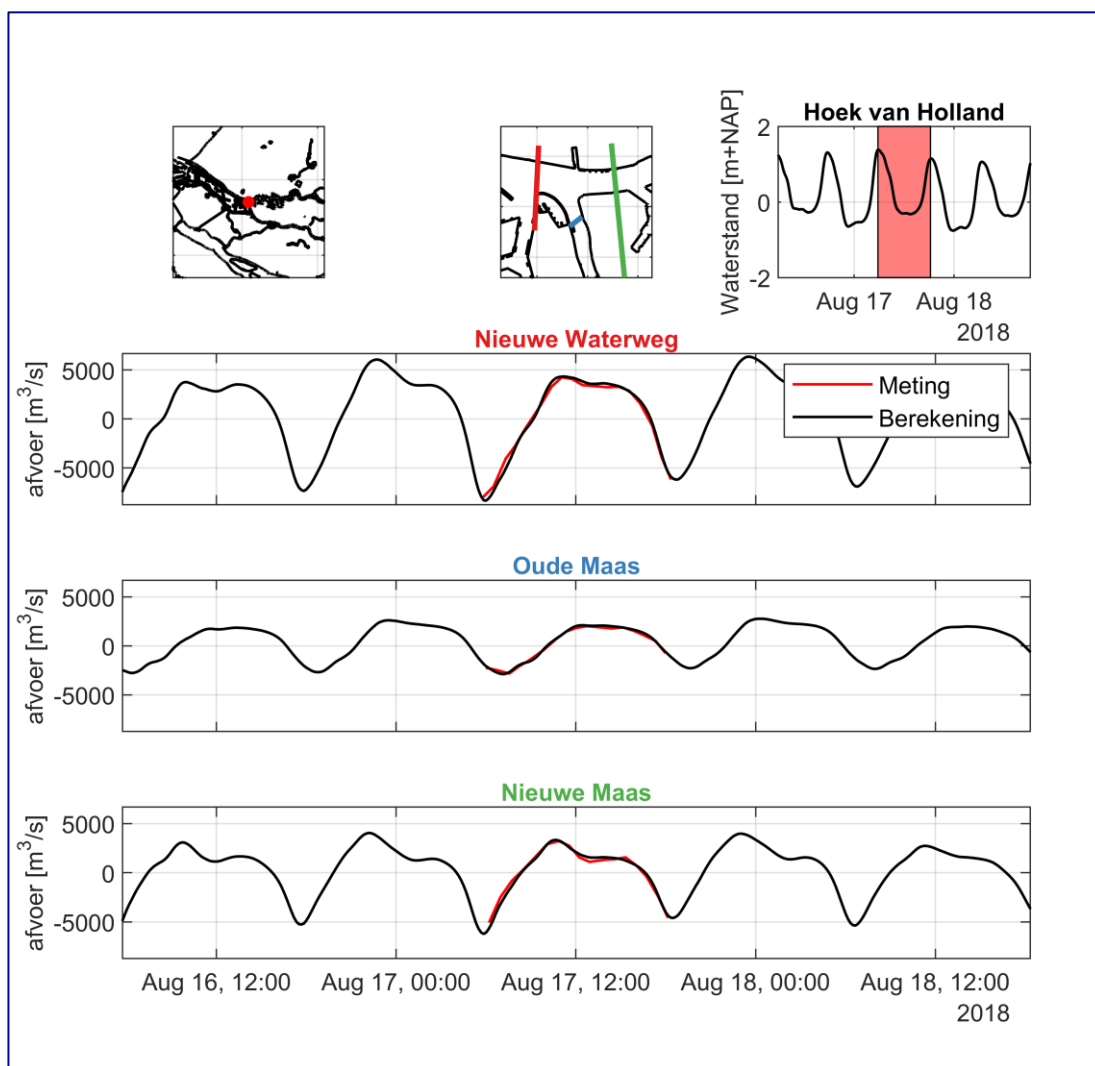


Figuur A-35: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Heesbeen

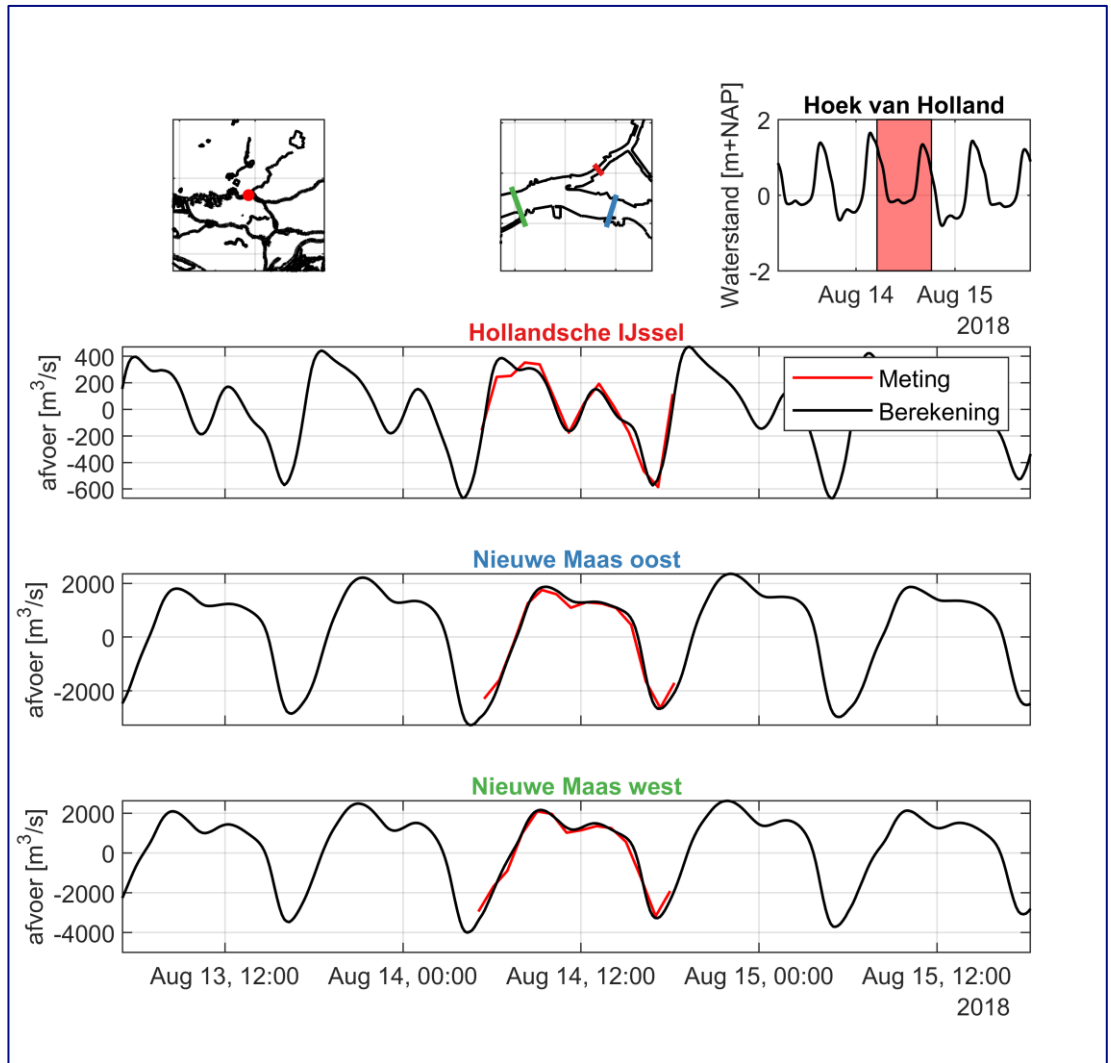


Figuur A-36: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft augustus 2018, station: Lith-dorp

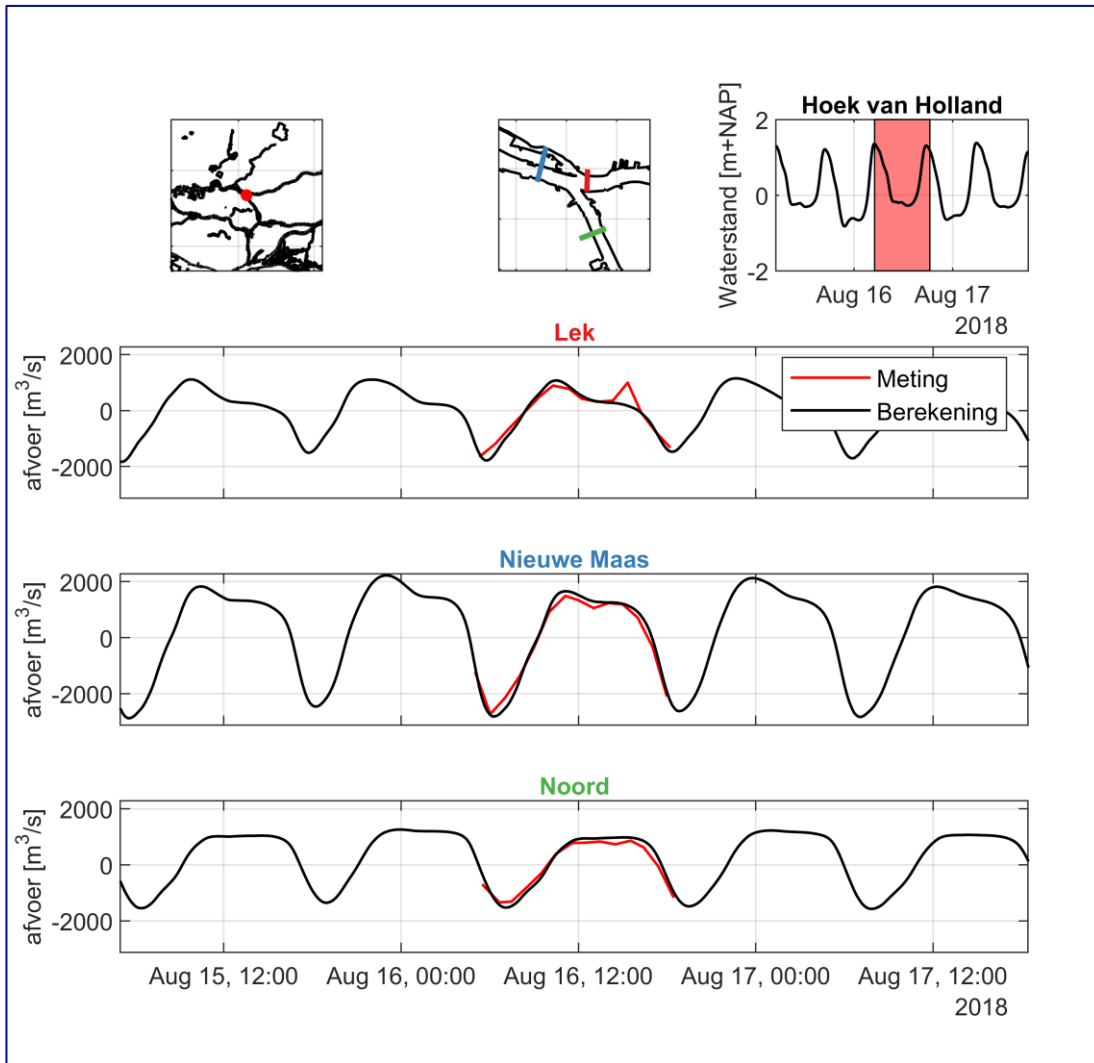
B Debiten bij Splitsingspunten



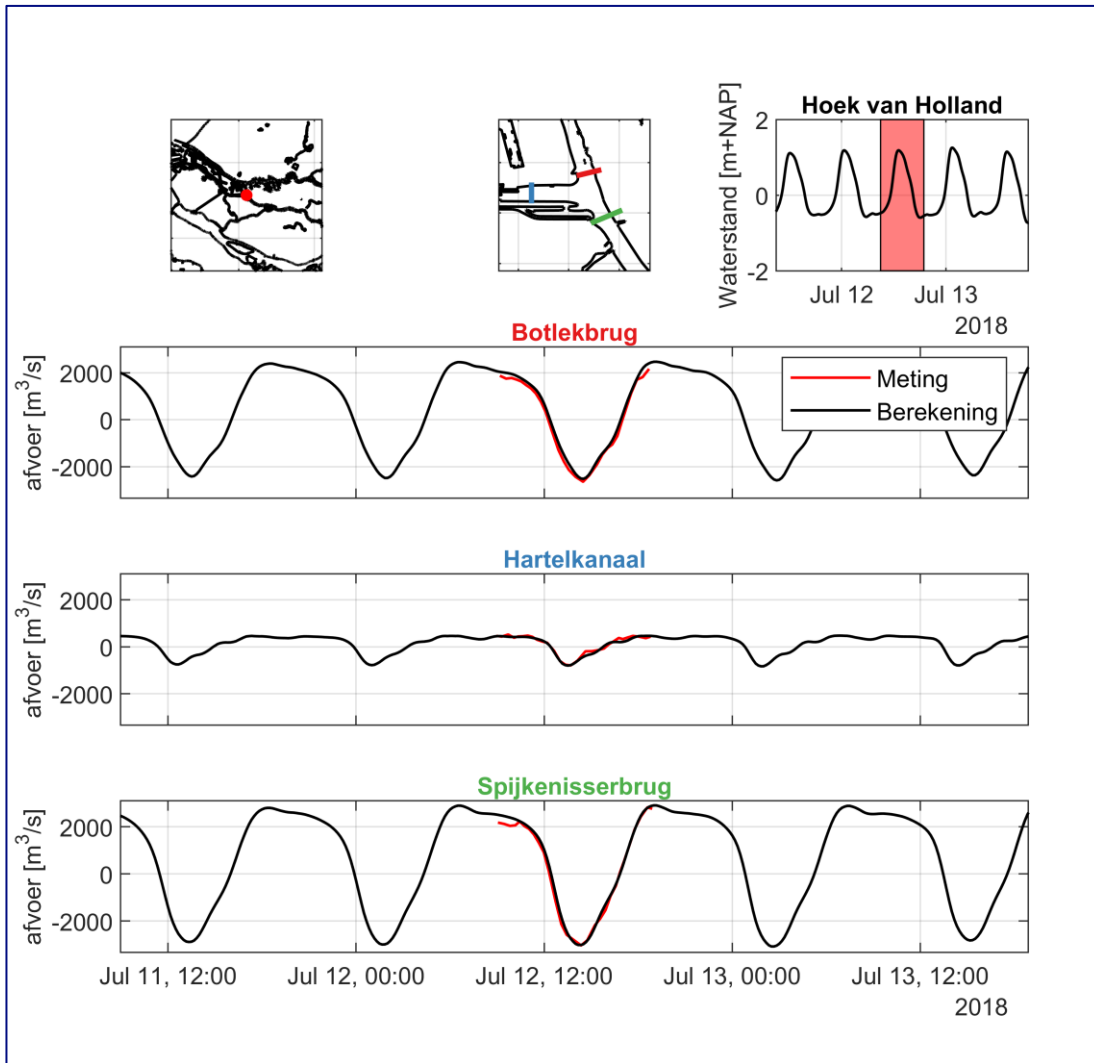
Figuur B-1: "Gemeten" en berekende debieten; Splitsingspunt Nieuwe Waterweg, Oude Maas, Nieuwe Maas; 17 augustus 2018



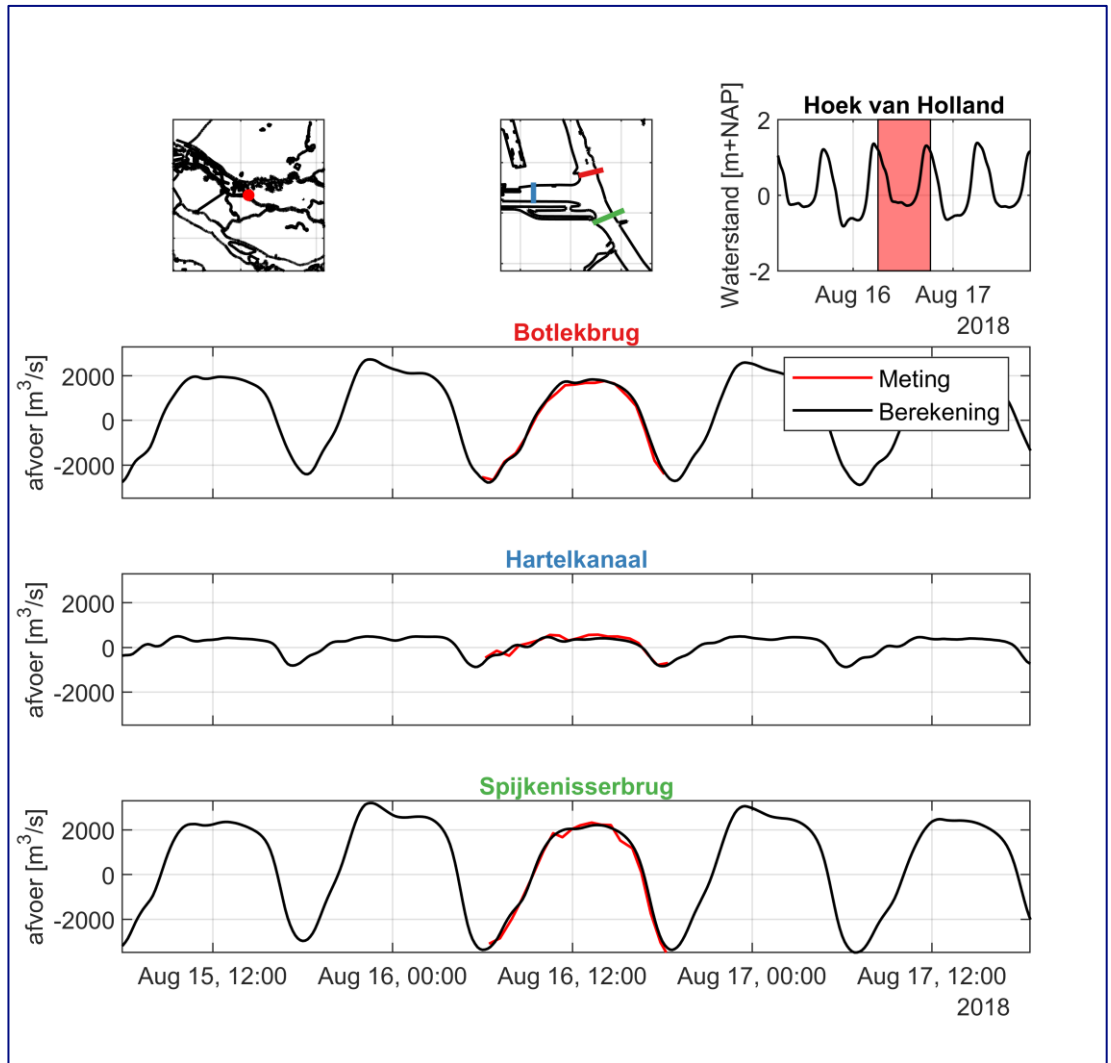
Figuur B-2: : "Gemeten" en berekende debieten; Splitsingspunt Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel; 14 augustus 2018



Figuur B-3: "Gemeten" en berekende debieten; Splitsingspunt Nieuwe Maas, Lek, Noord; 16 augustus 2018 "

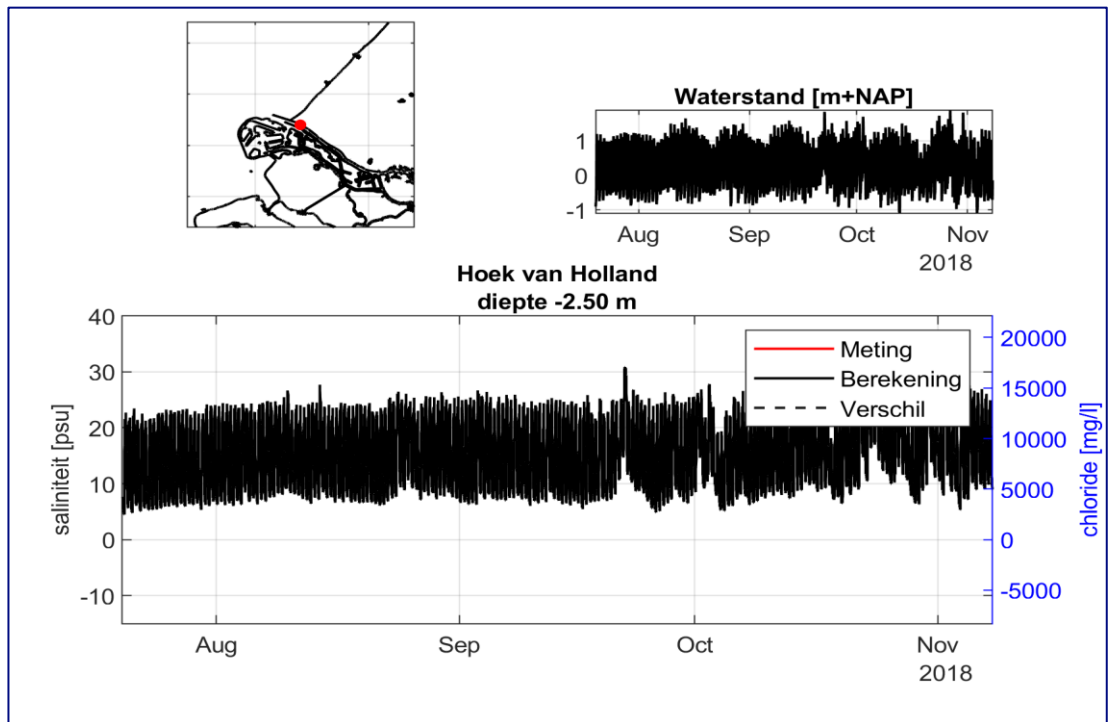


Figuur B-4: "Gemeten" en berekende debieten; Splitsingspunt Oude Maas, Hartelkanaal; 12 juli 2018

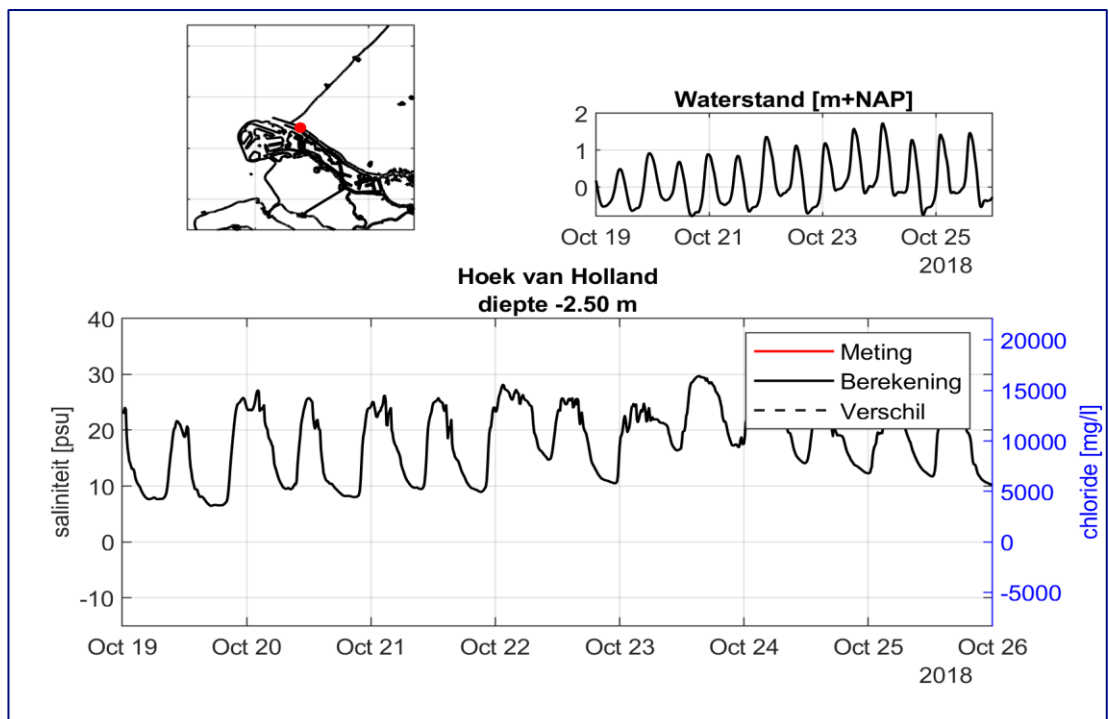


Figuur B-5: "Gemeten" en berekende debieten; Splittingspunt Oude Maas, Hartelkanaal; 16 augustus 2018

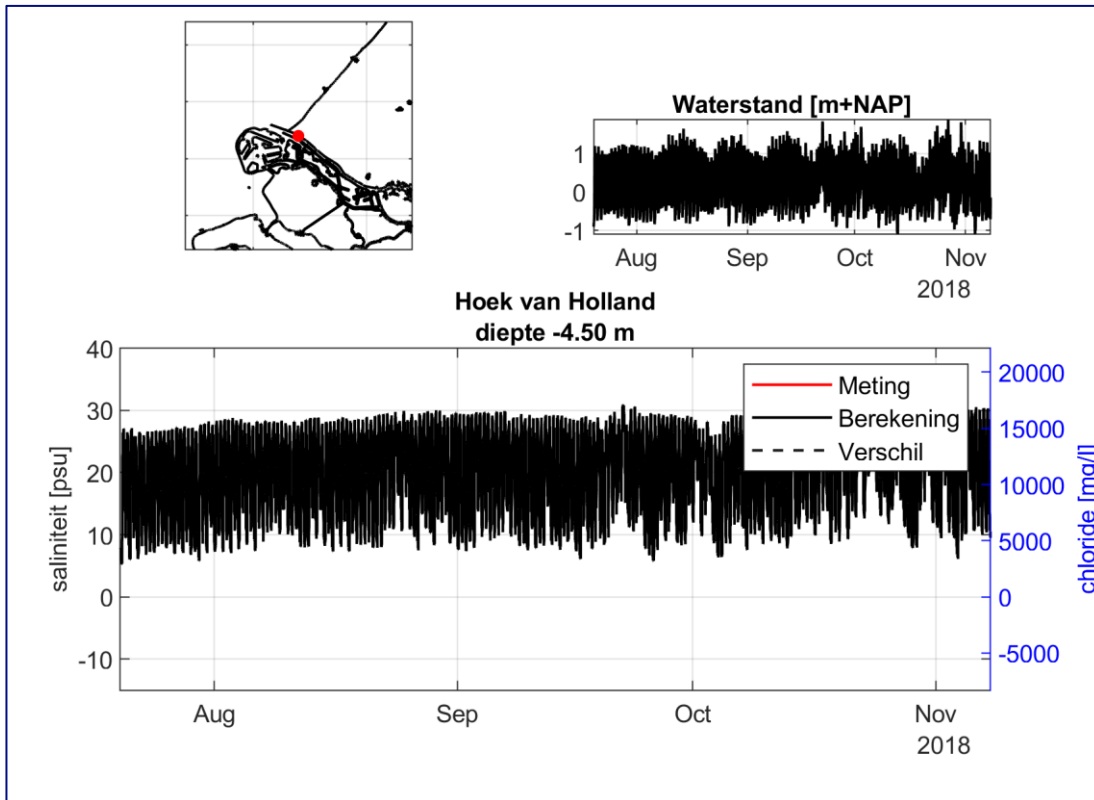
C Tijdreeksen Saliniteit 2018, Landelijk Meetnet Water (LMW) stations



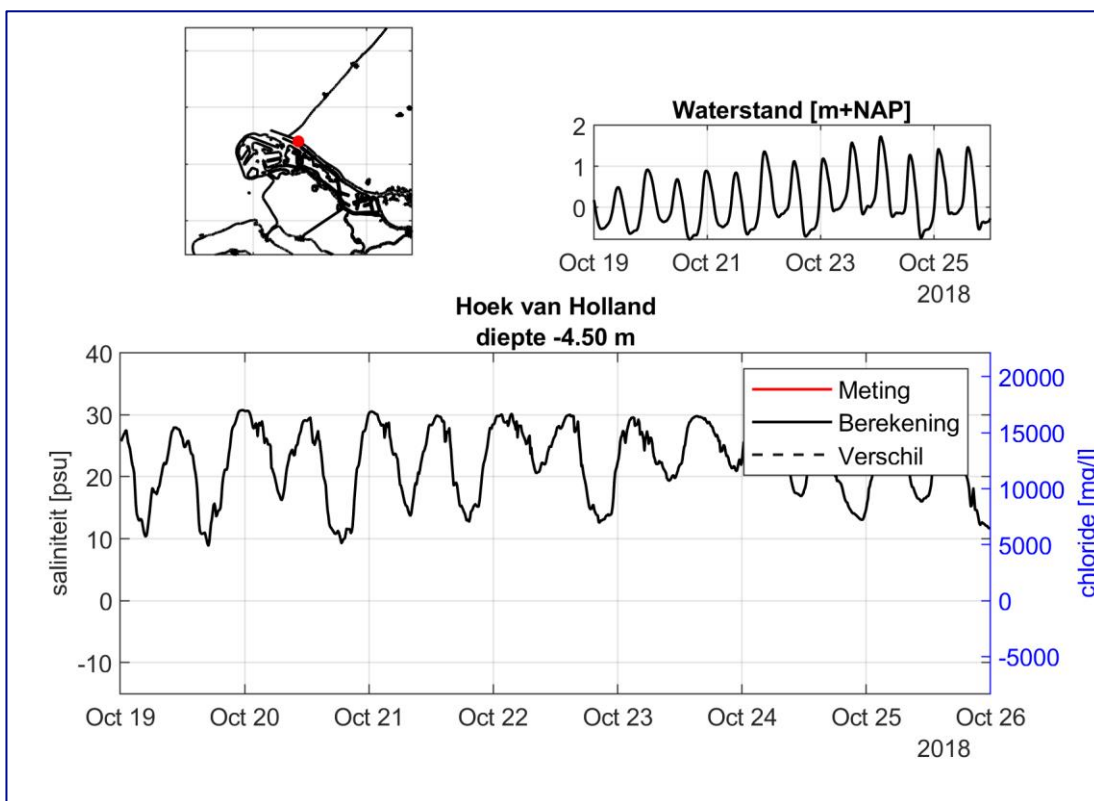
Figuur C-1: Gemeten en berekende saliniteit, Gehele analyseperiode, station: Hoek van Holland; Diepte -2.5 m NAP



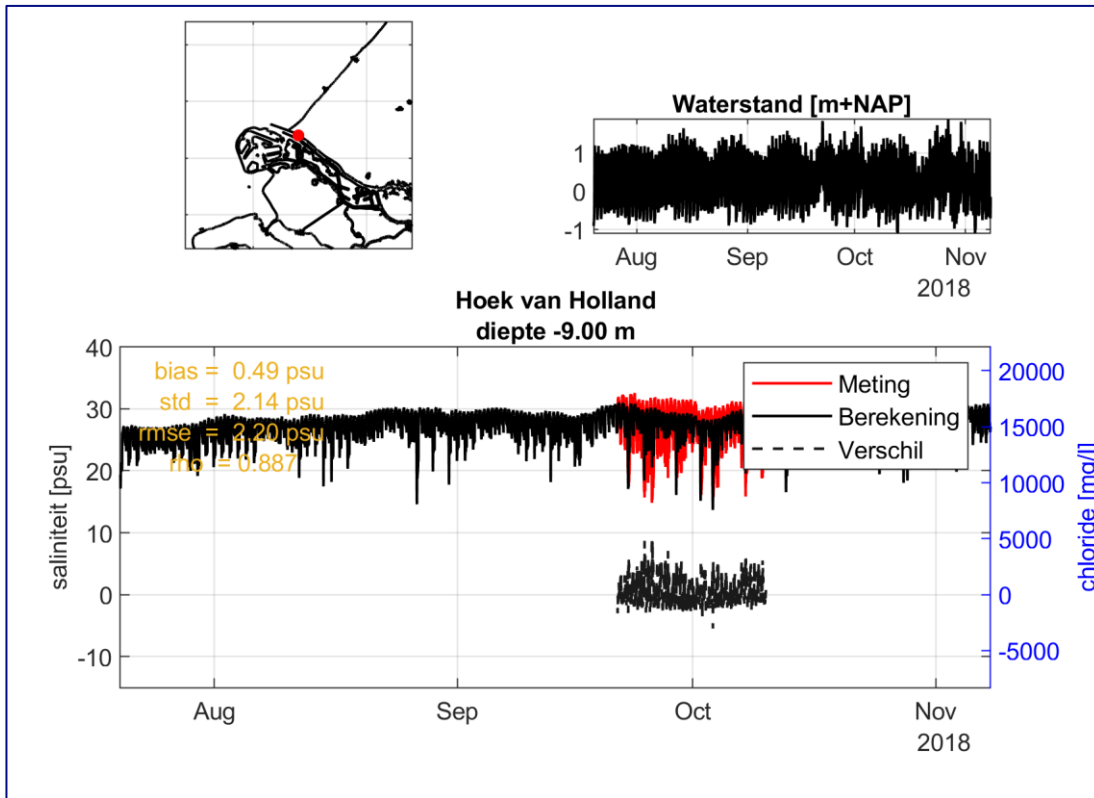
Figuur C-2: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Hoek van Holland; Diepte -2.5 m NAP



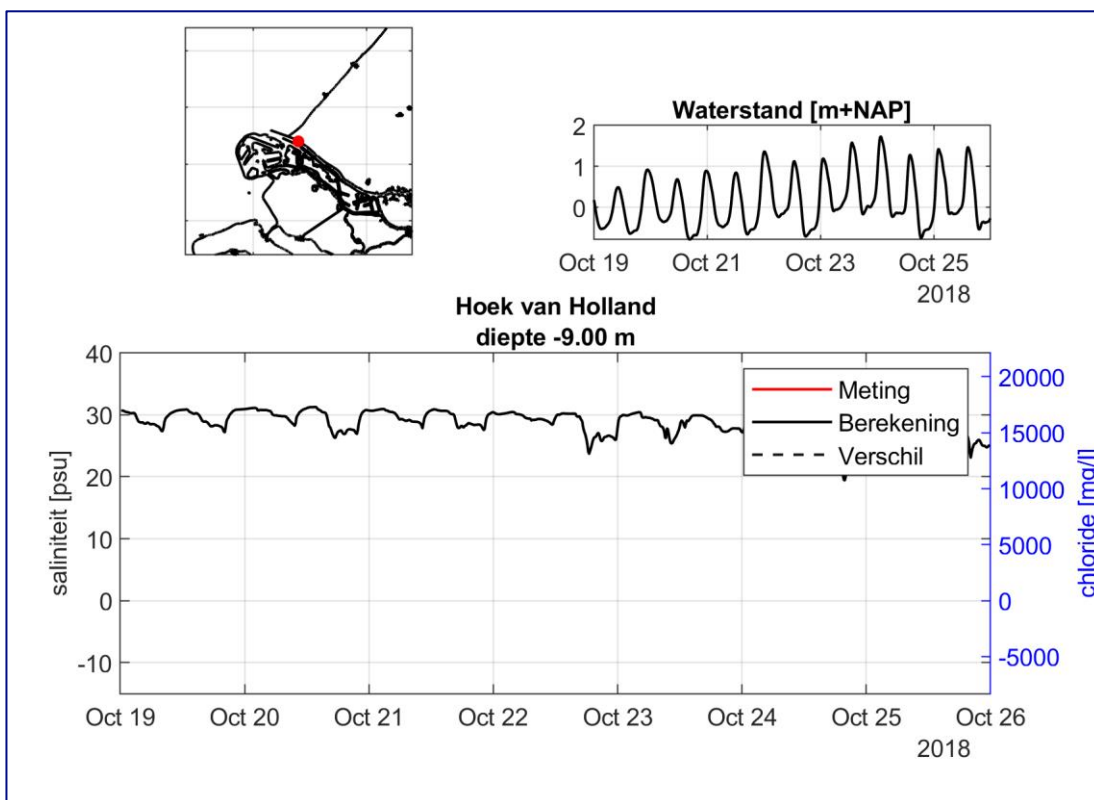
Figuur C-3: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Hoek van Holland; Diepte -4.5 m NAP



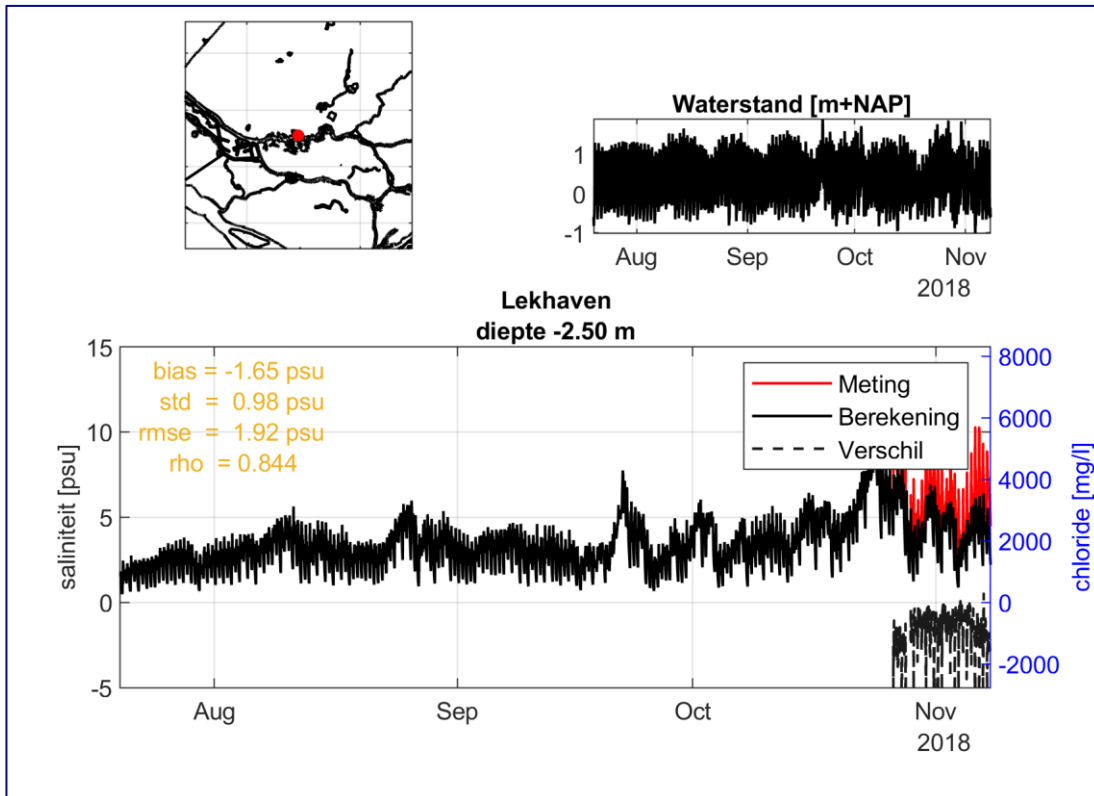
Figuur C-4: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Hoek van Holland; Diepte -4.5 m NAP



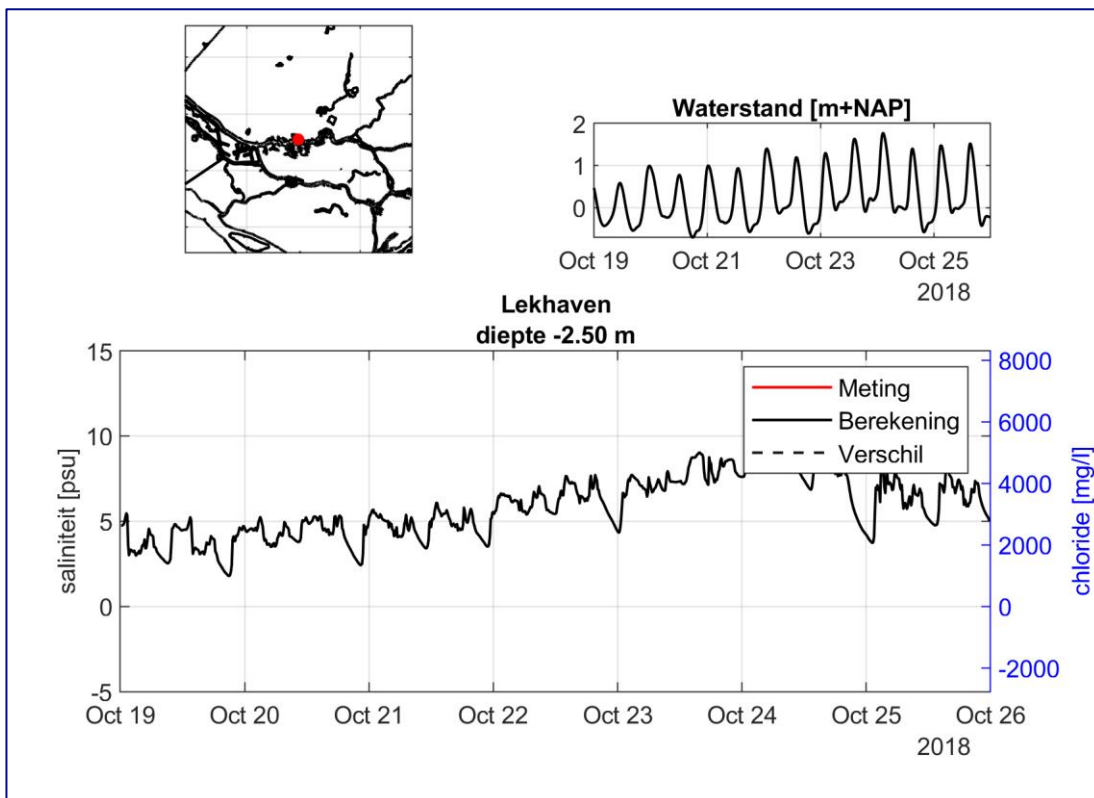
Figuur C-5: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Hoek van Holland; Diepte -9.0 m NAP



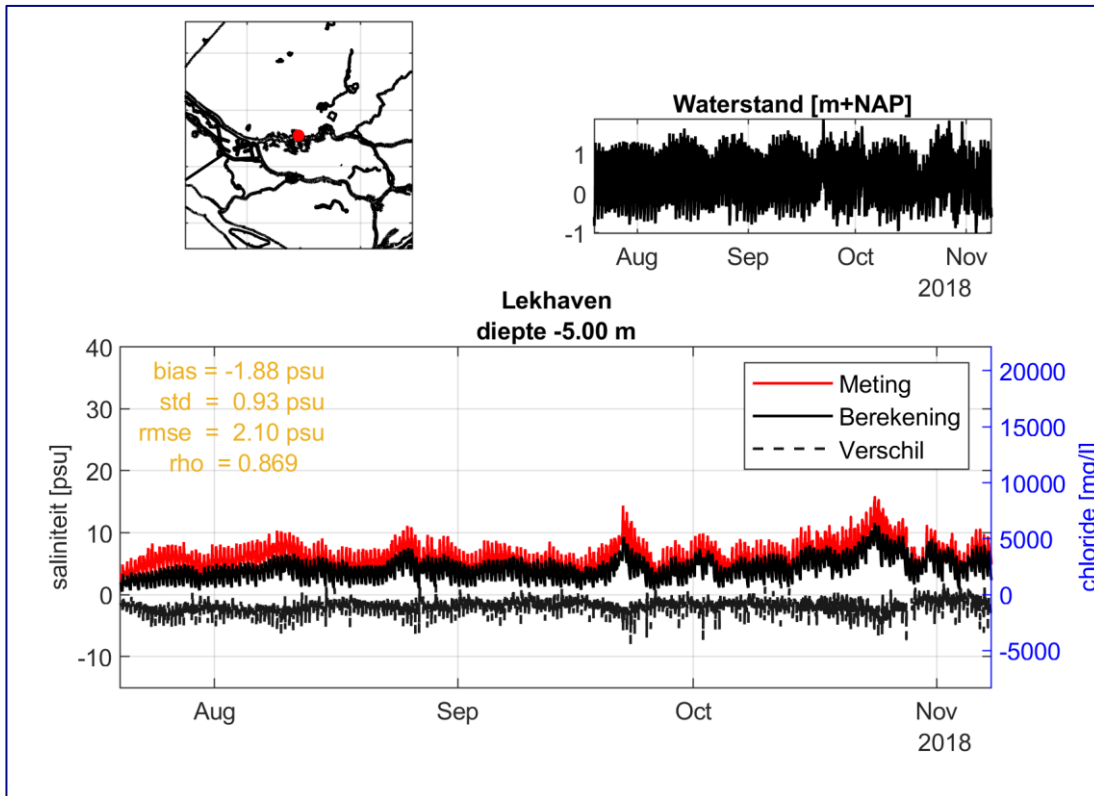
Figuur C-6: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Hoek van Holland; Diepte -9.0 m NAP



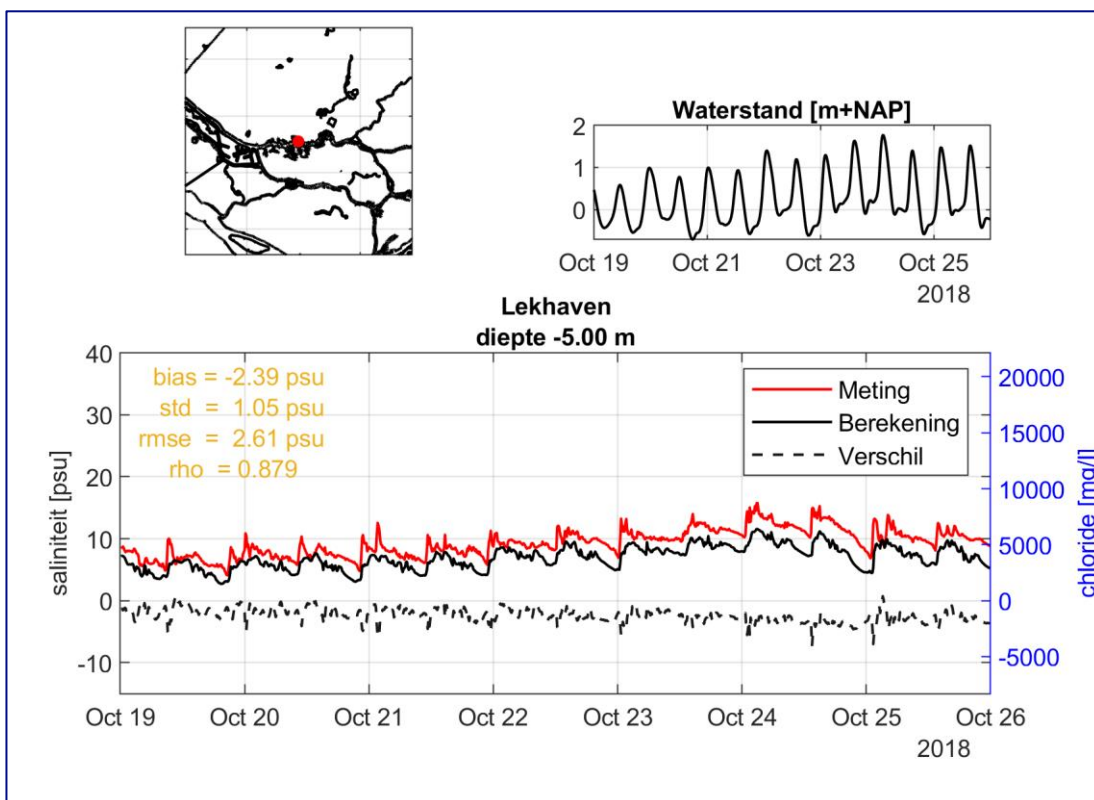
Figuur C-7: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Lekhaven; Diepte -2.5 m NAP



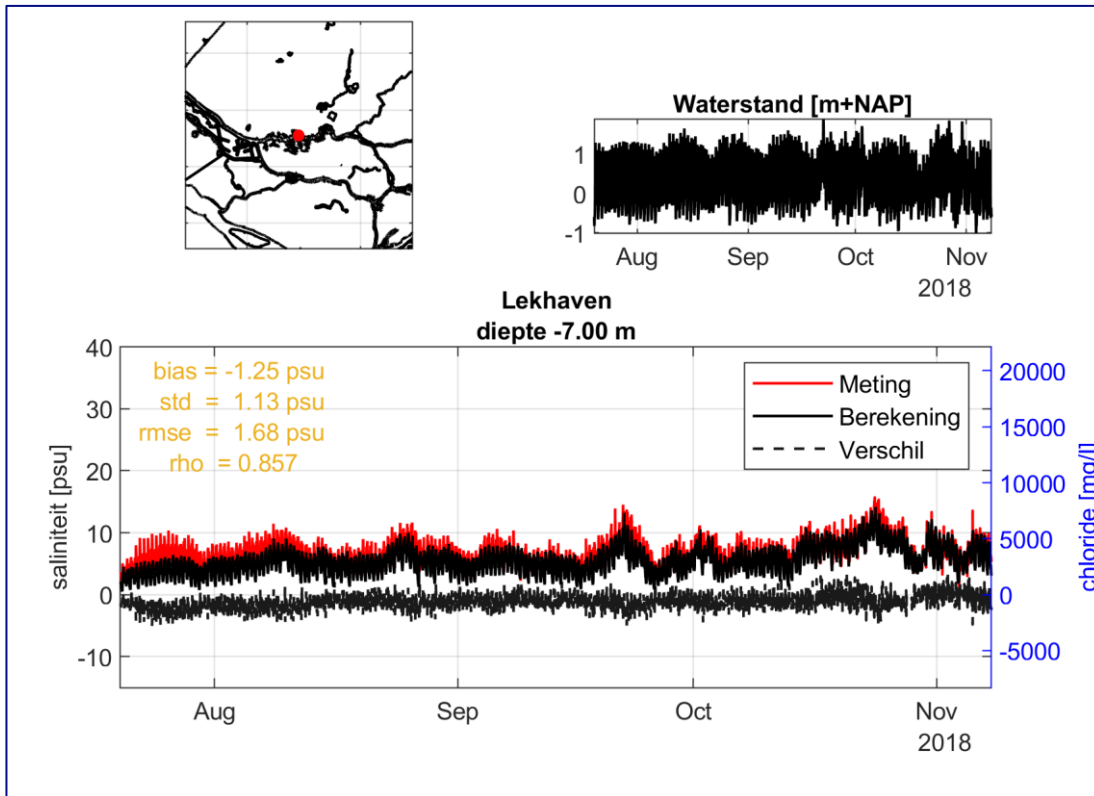
Figuur C-8: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Lekhaven; Diepte -2.5 m NAP



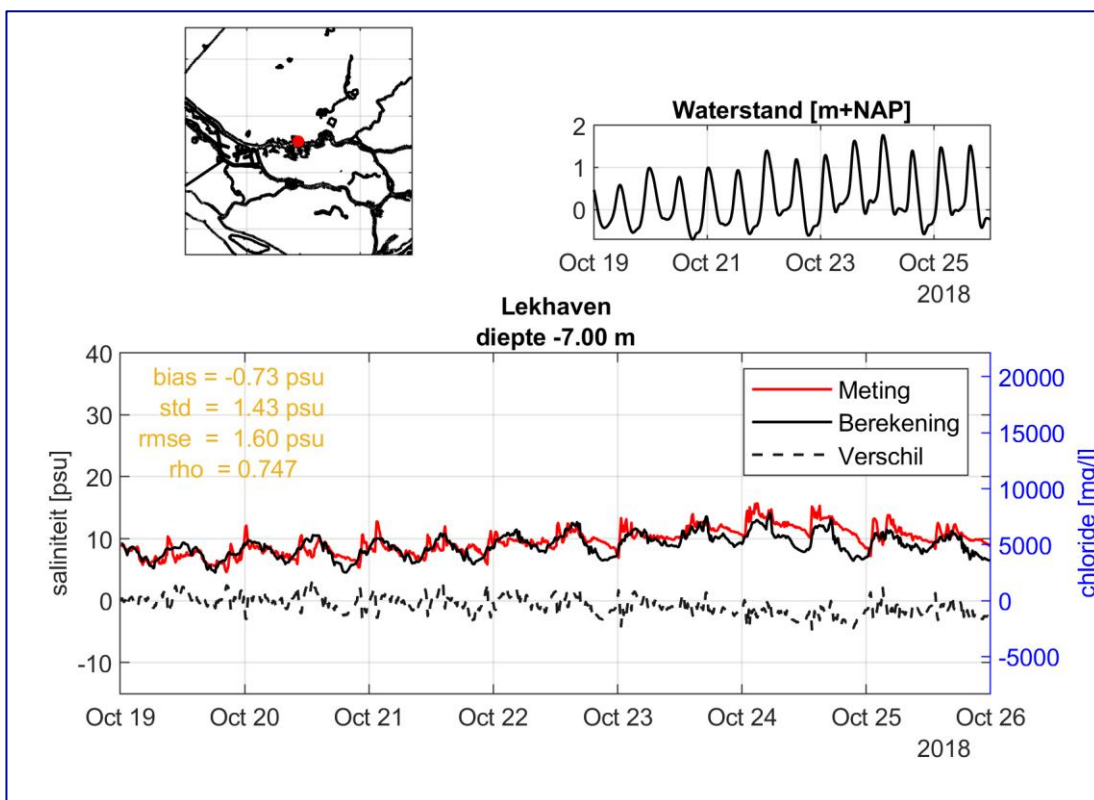
Figuur C-9: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Lekhaven; Diepte -5.0 m NAP



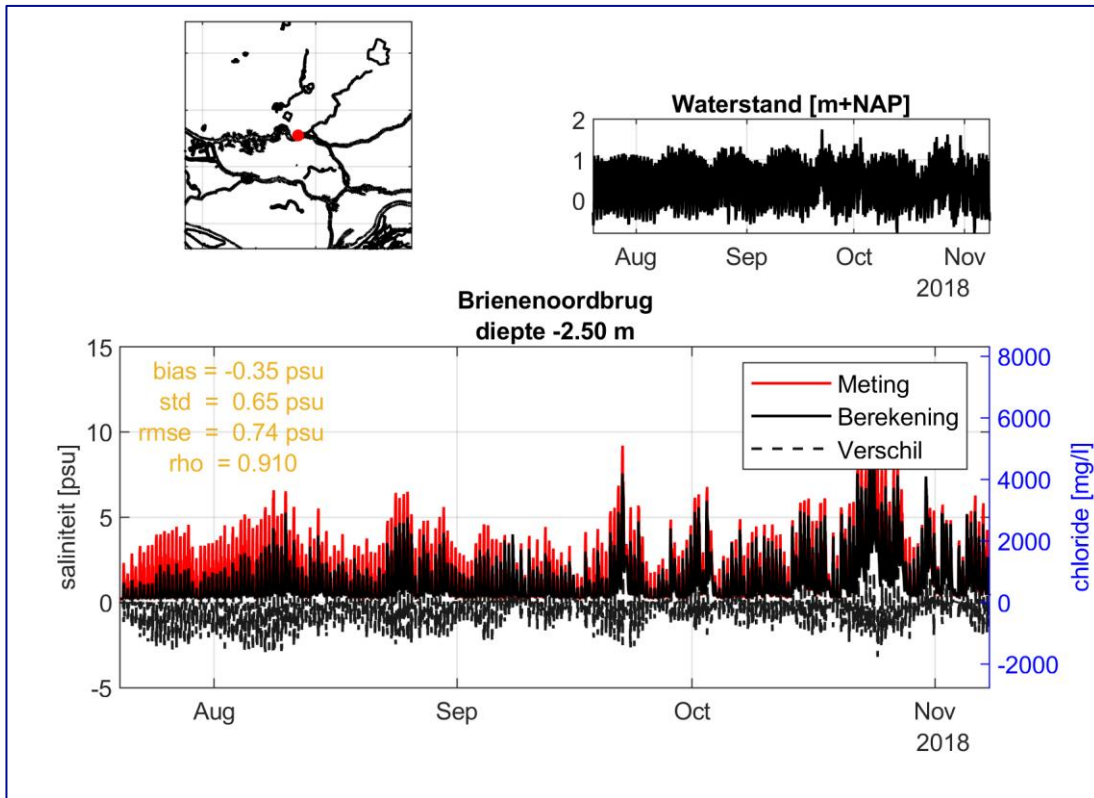
Figuur C-10: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Lekhaven; Diepte -5.0 m NAP



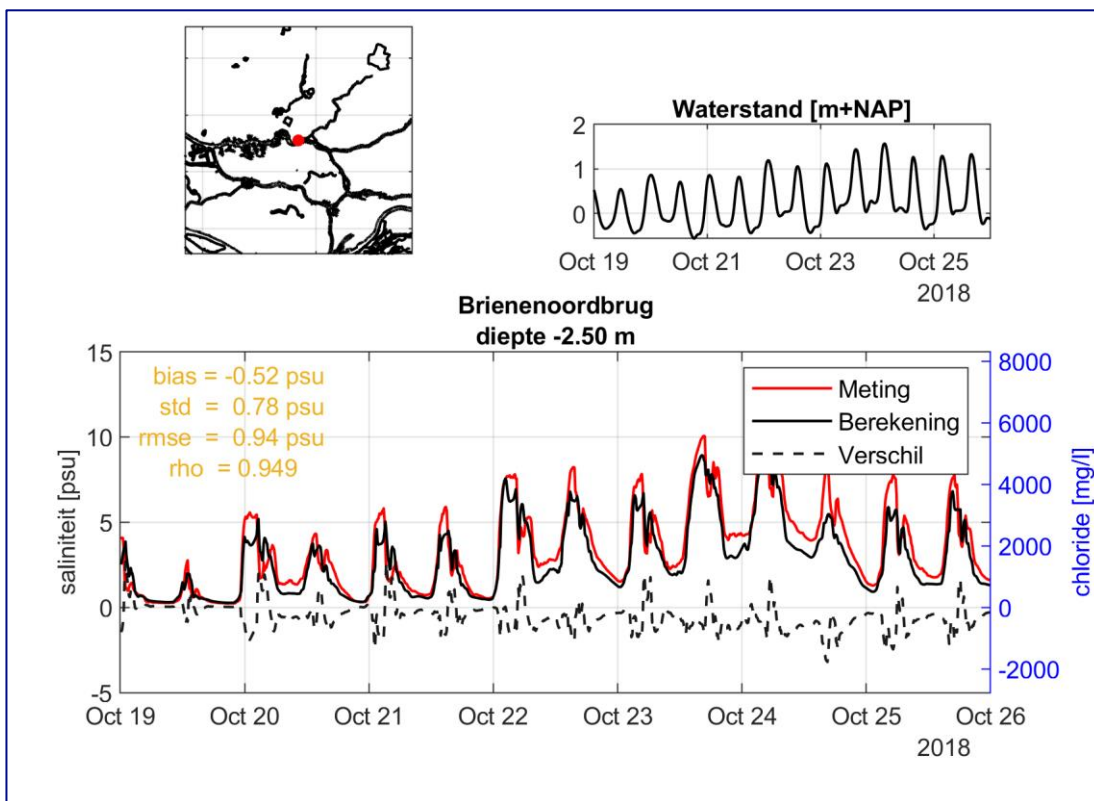
Figuur C-11: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Lekhaven; Diepte -7.0 m NAP



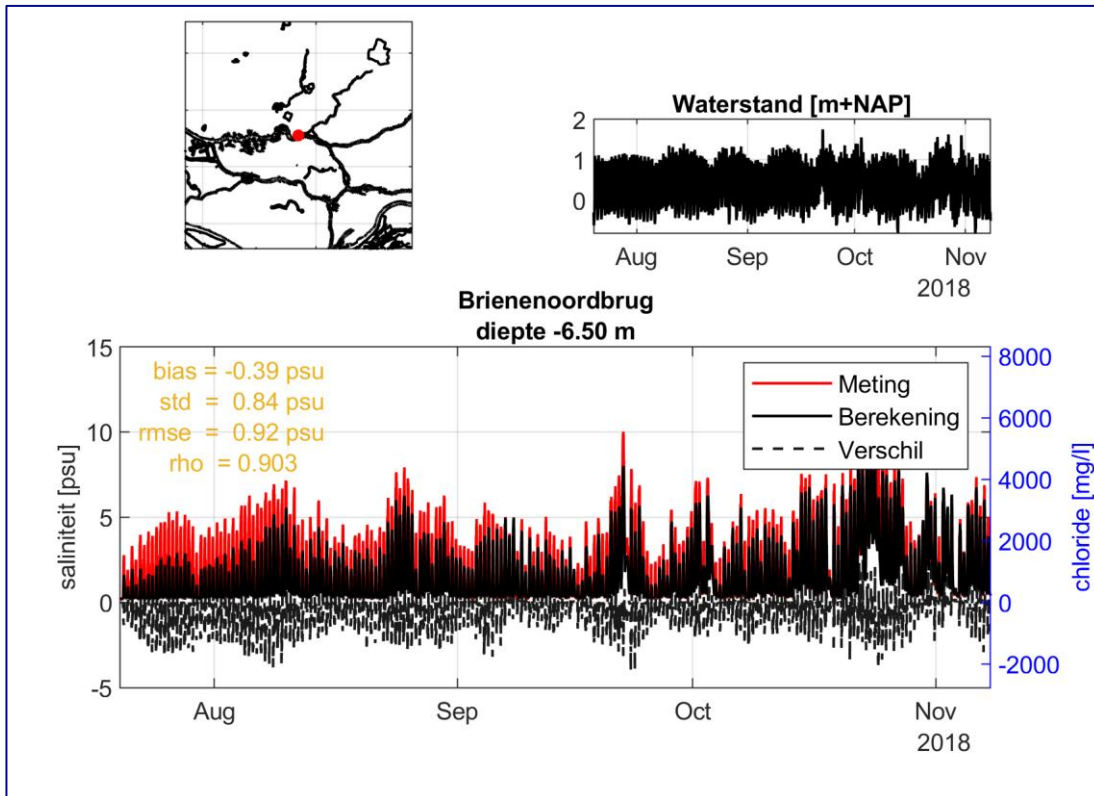
Figuur C-12: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Lekhaven; Diepte -7.0 m NAP



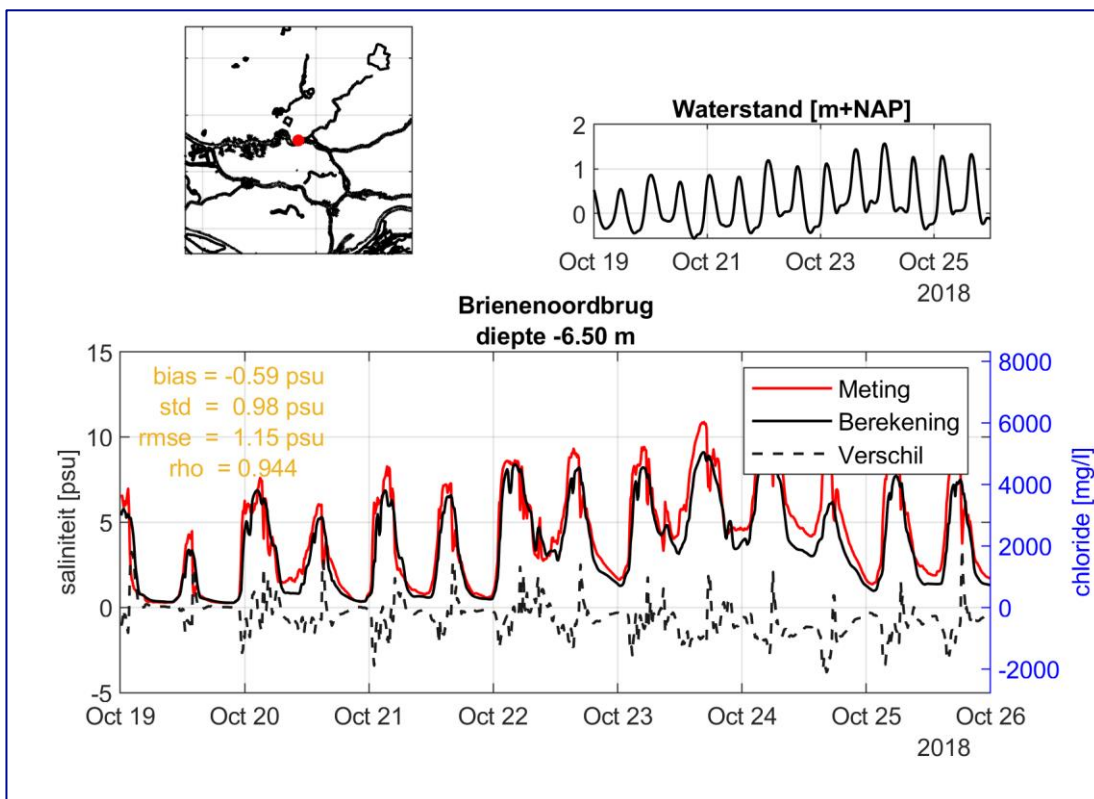
Figuur C-13: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Brienenoordbrug; Diepte -2.5 m NAP



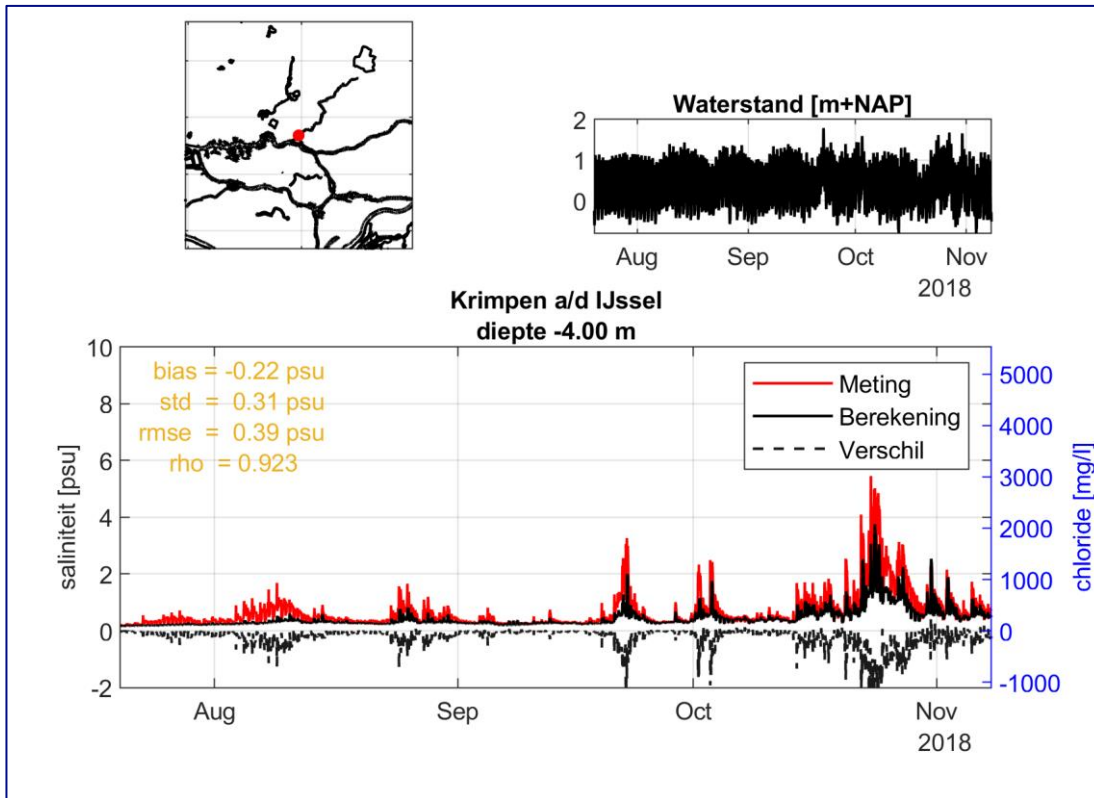
Figuur C-14: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Brienenoordbrug; Diepte -2.5 m NAP



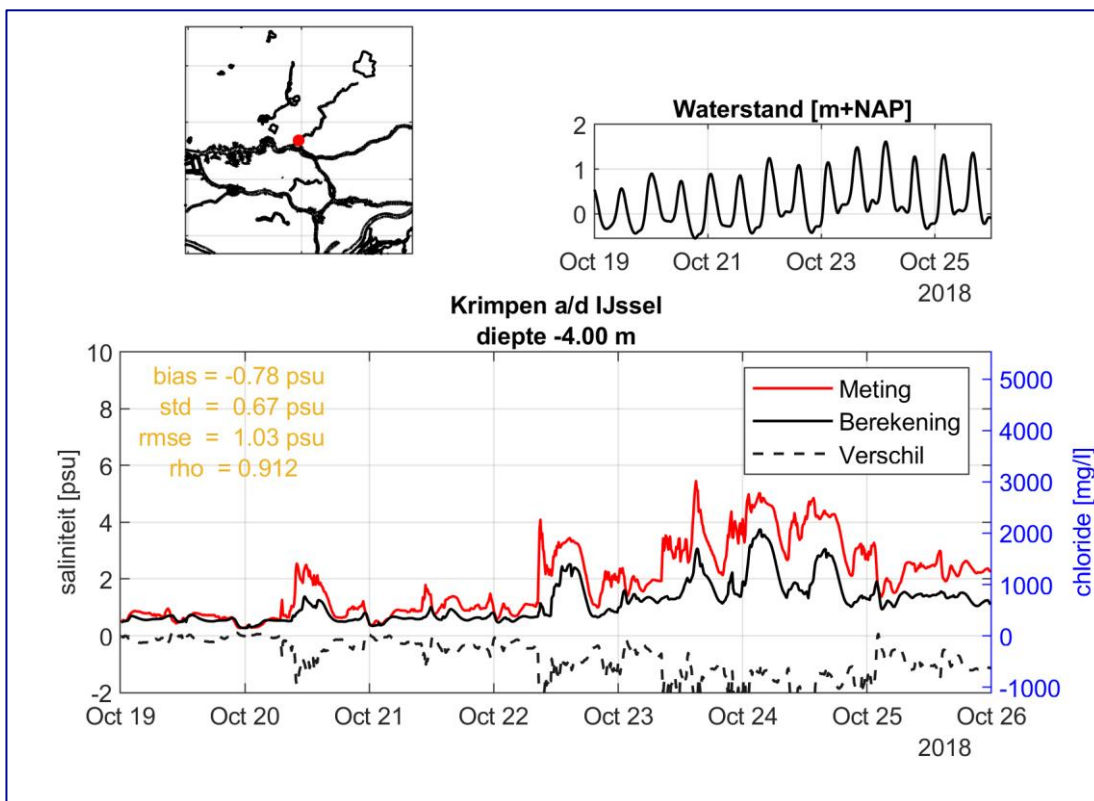
Figuur C-15: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Brienenoordbrug; Diepte -6.5 m NAP



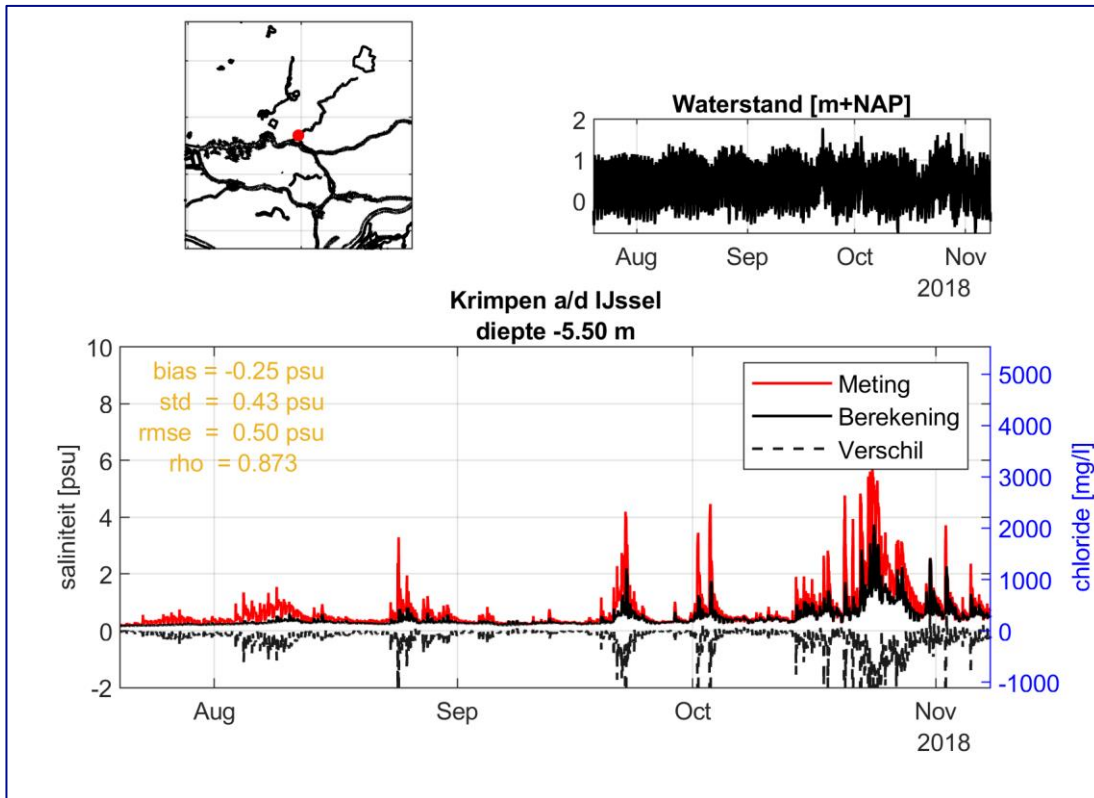
Figuur C-16: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Brienenoordbrug; Diepte -6.5 m NAP



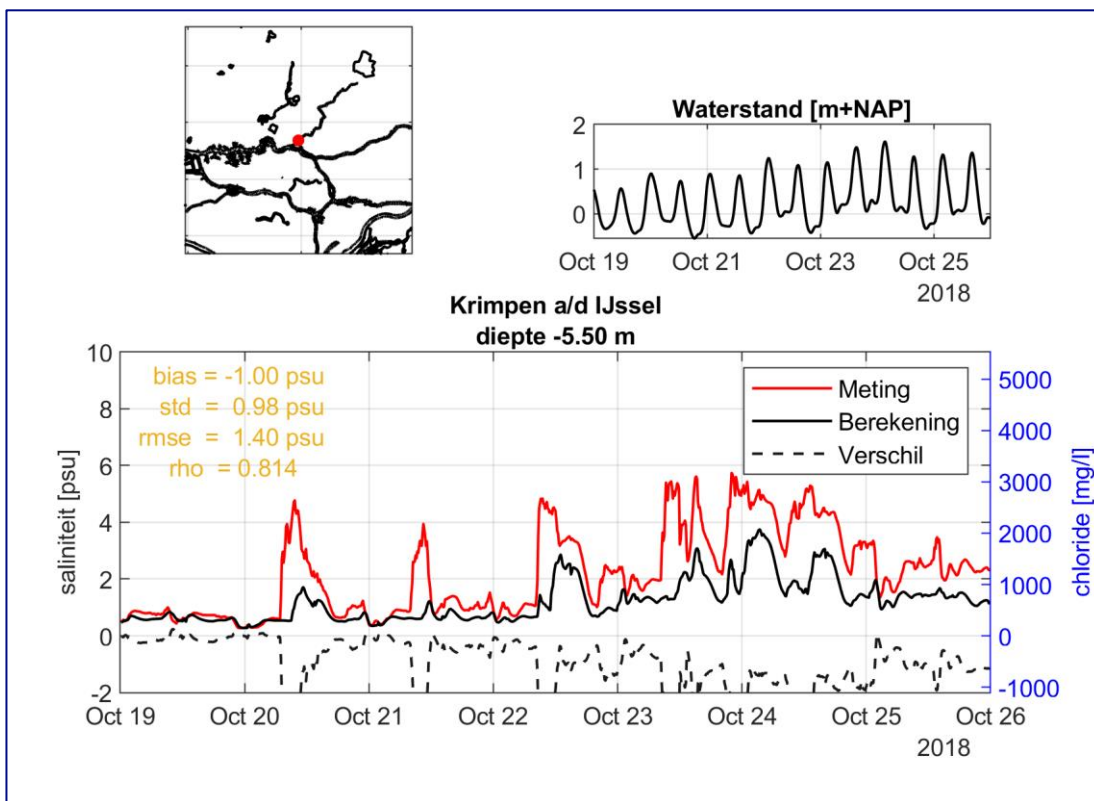
Figuur C-17: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Krimpen aan den IJssel; Diepte -4.0 m NAP



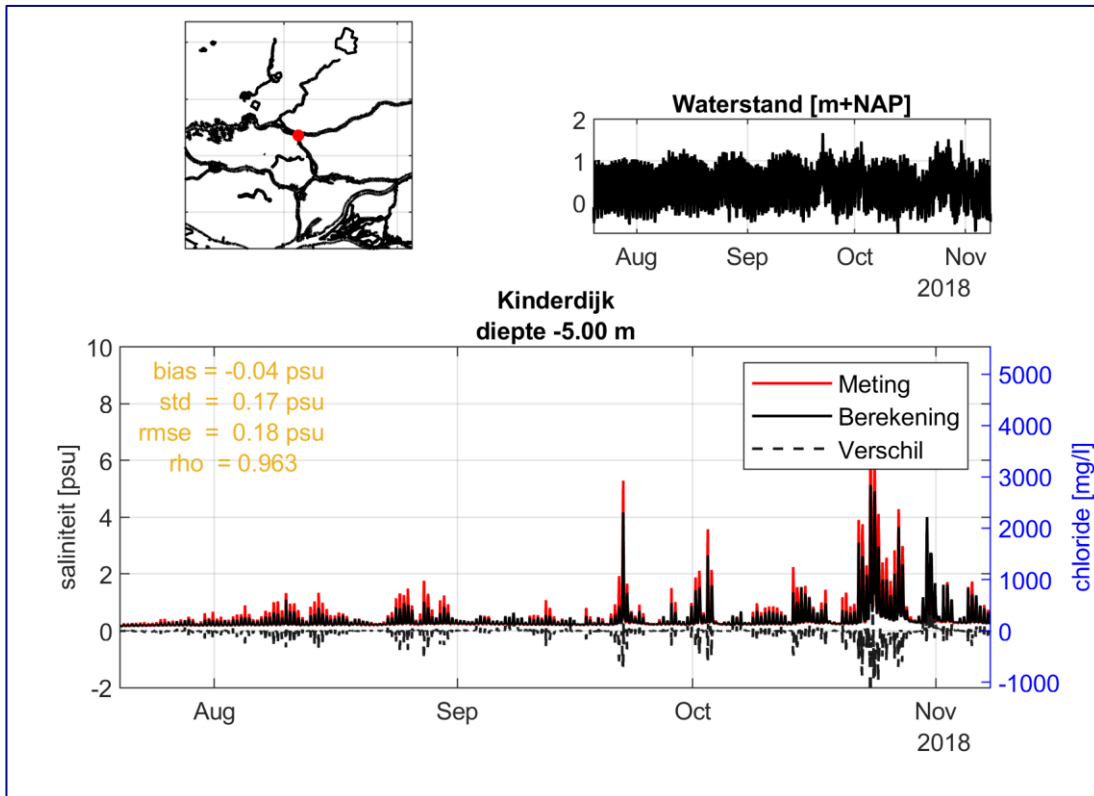
Figuur C-18: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Krimpen aan den IJssel; Diepte -4.0 m NAP



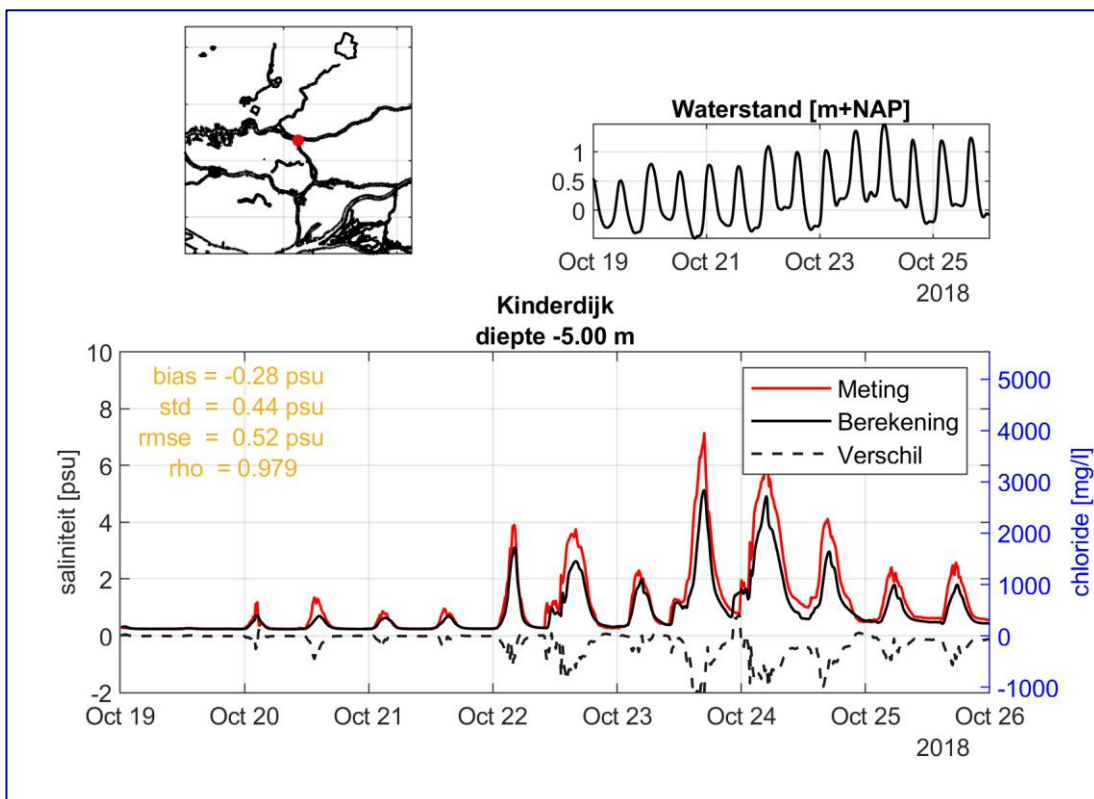
Figuur C-19: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Krimpen aan den IJssel; Diepte -5.5 m NAP



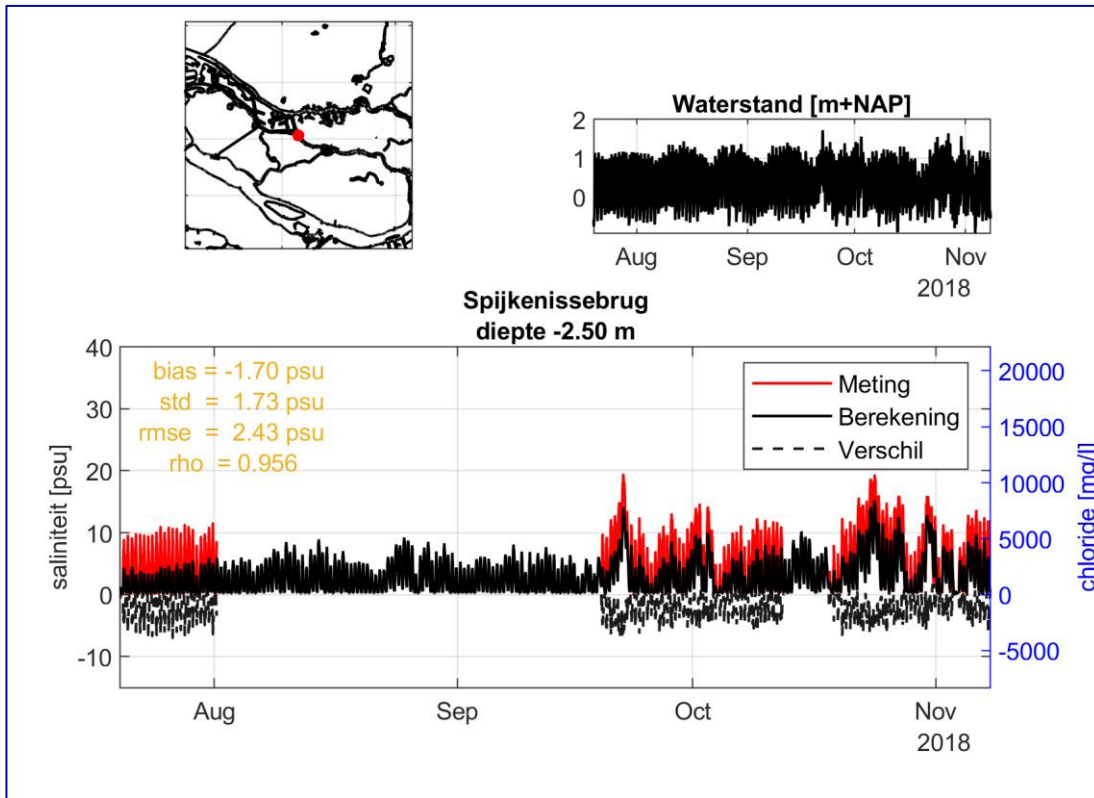
Figuur C-20: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Krimpen aan den IJssel; Diepte -5.5 m NAP



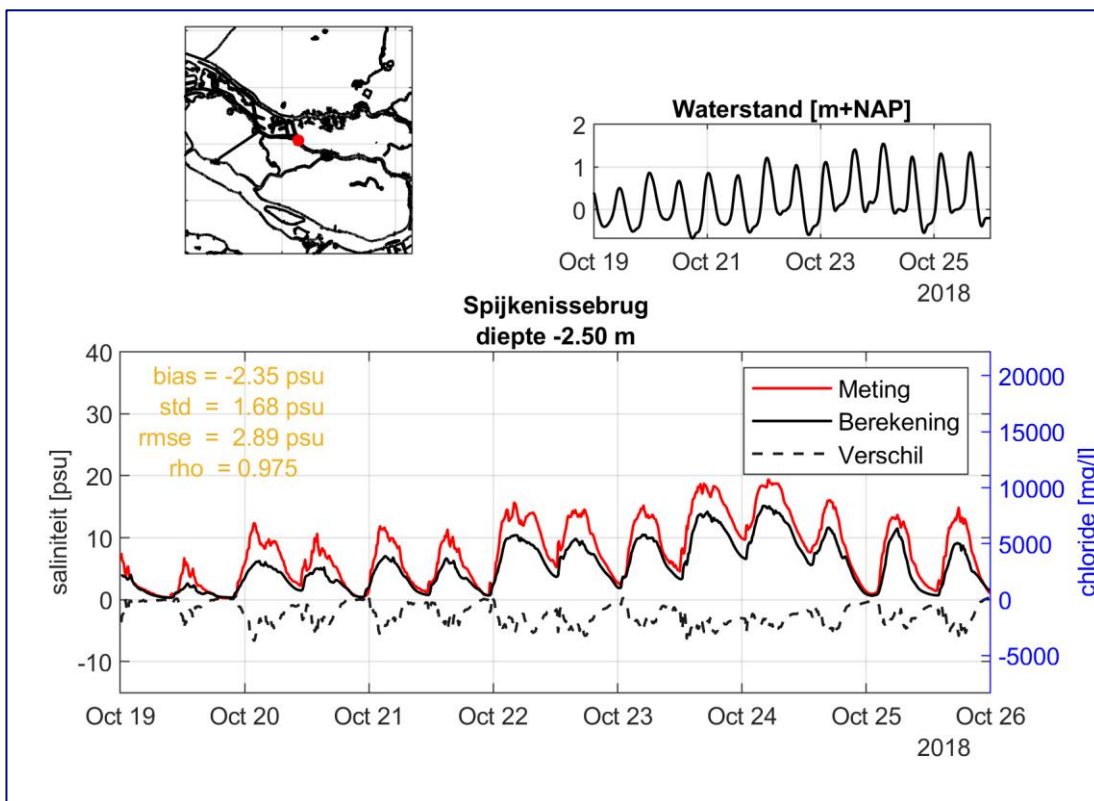
Figuur C-21: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Kinderdijk aan de lek; Diepte -4.0 m NAP



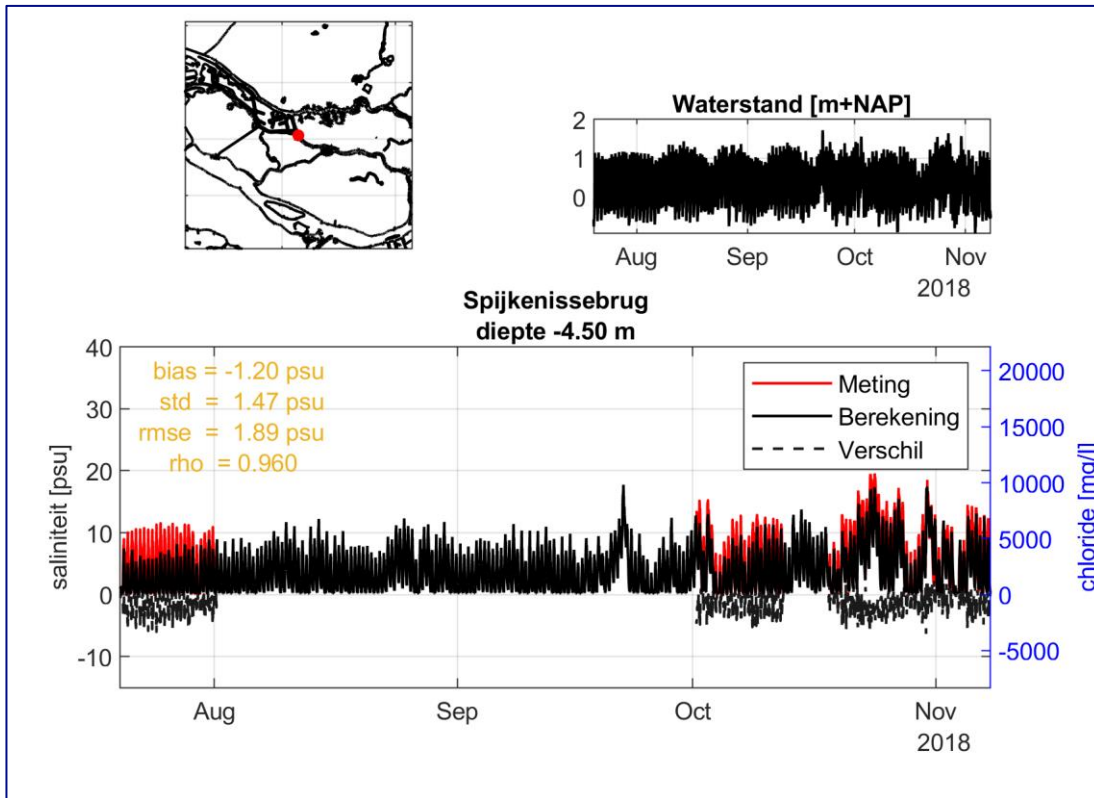
Figuur C-22: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Kinderdijk aan de lek; Diepte -4.0 m NAP



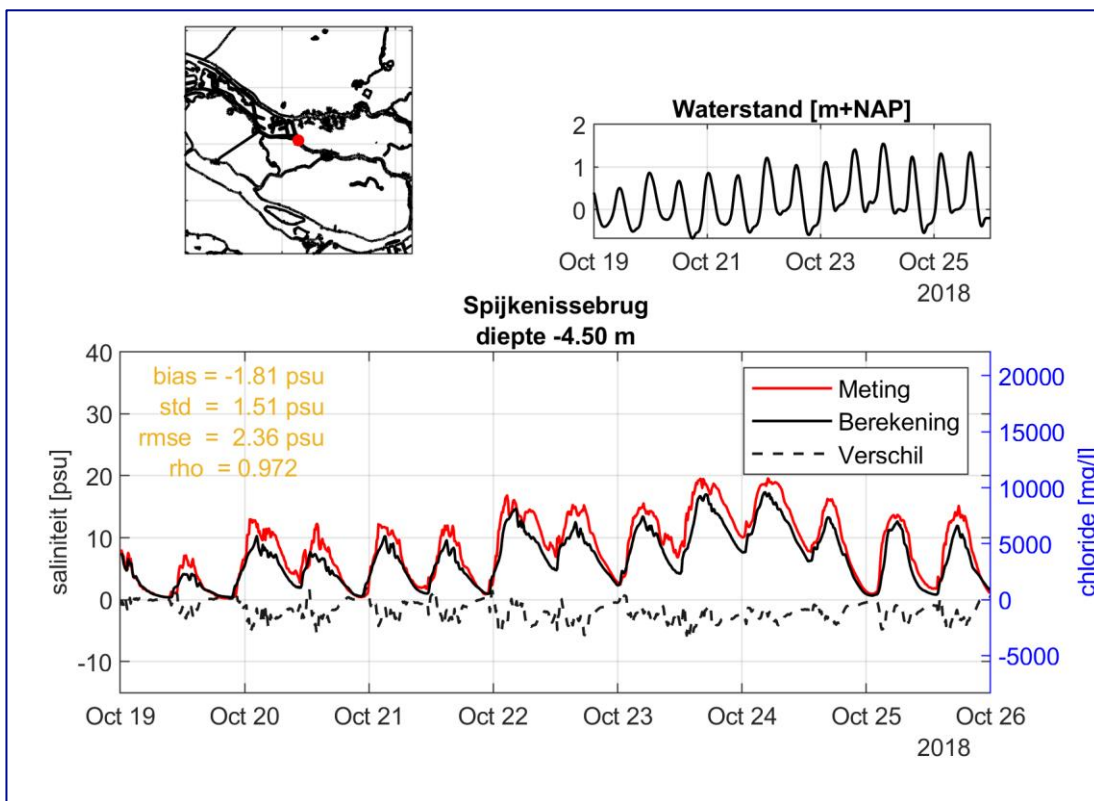
Figuur C-23: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Spijkenisserbrug; Diepte -2.5 m NAP



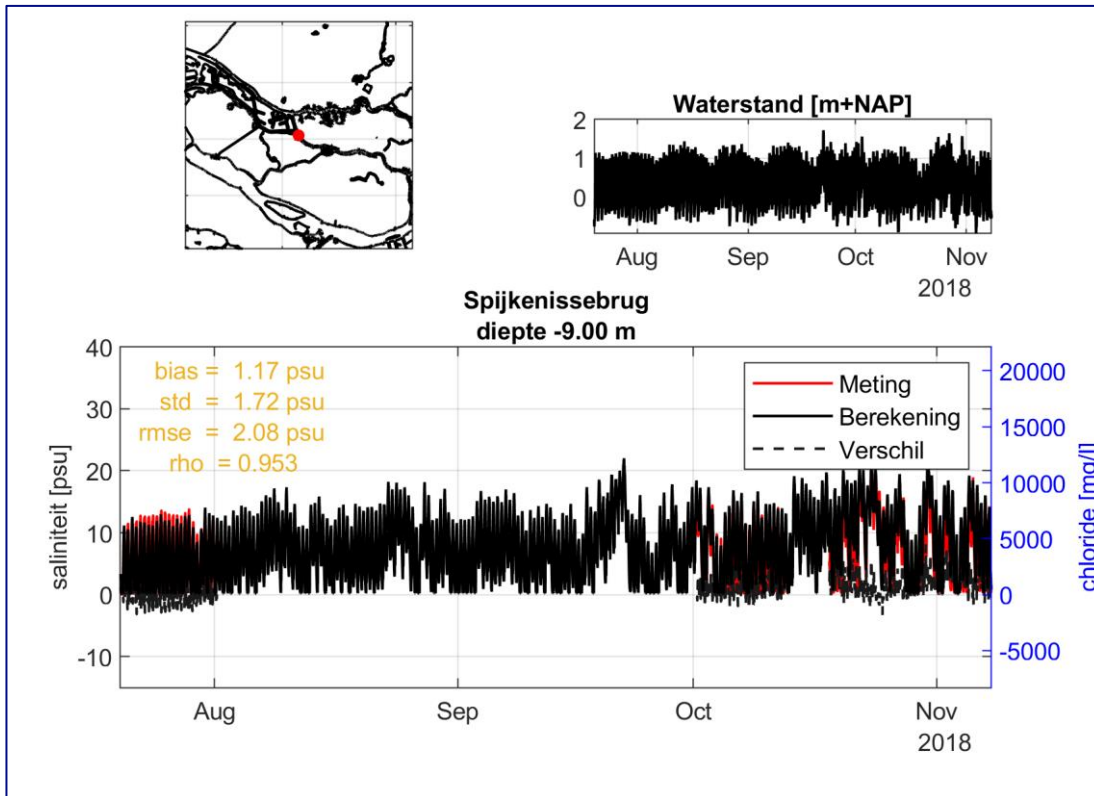
Figuur C-24: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Spijkenisserbrug; Diepte -2.5 m NAP



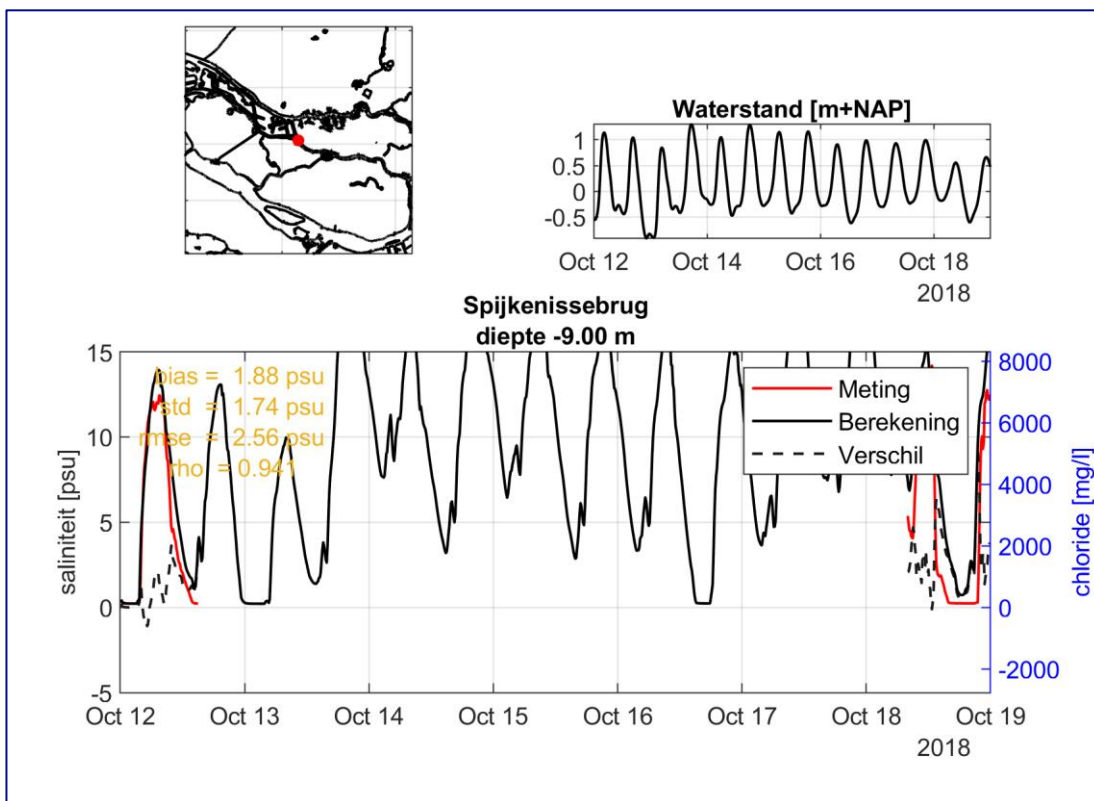
Figuur C-25: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Spijkenisserbrug; Diepte -4.5 m NAP



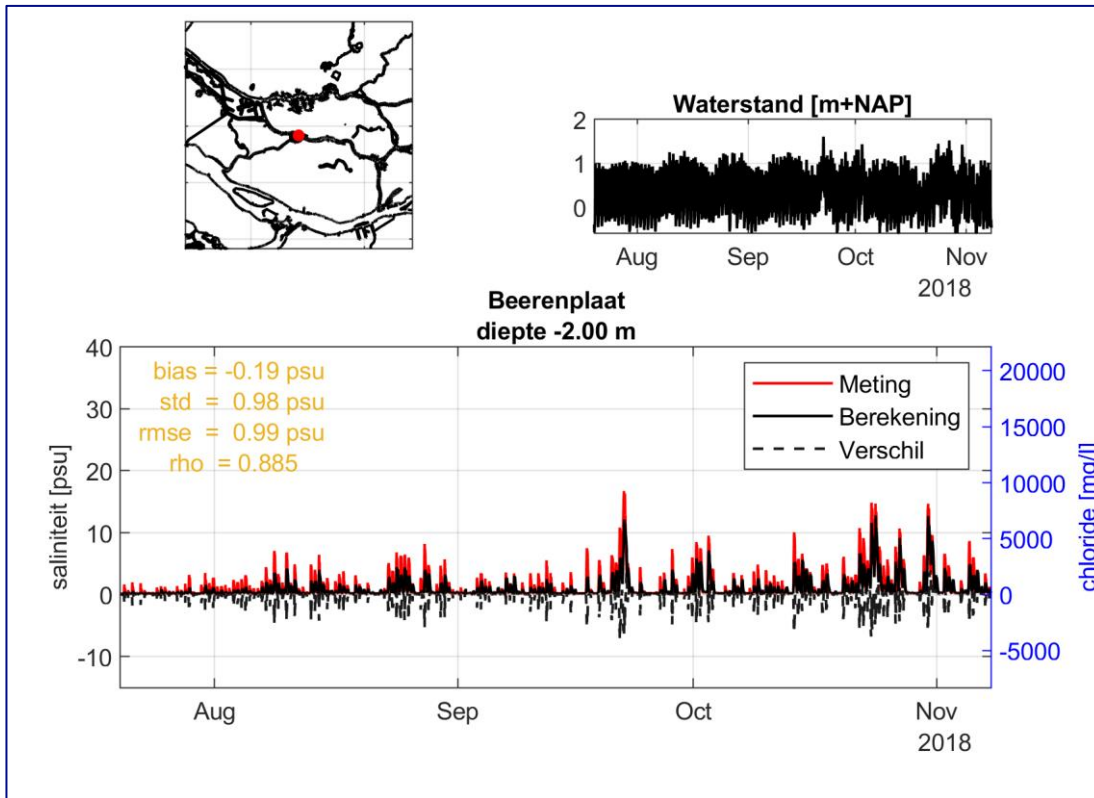
Figuur C-26: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Spijkenisserbrug; Diepte -4.5 m NAP



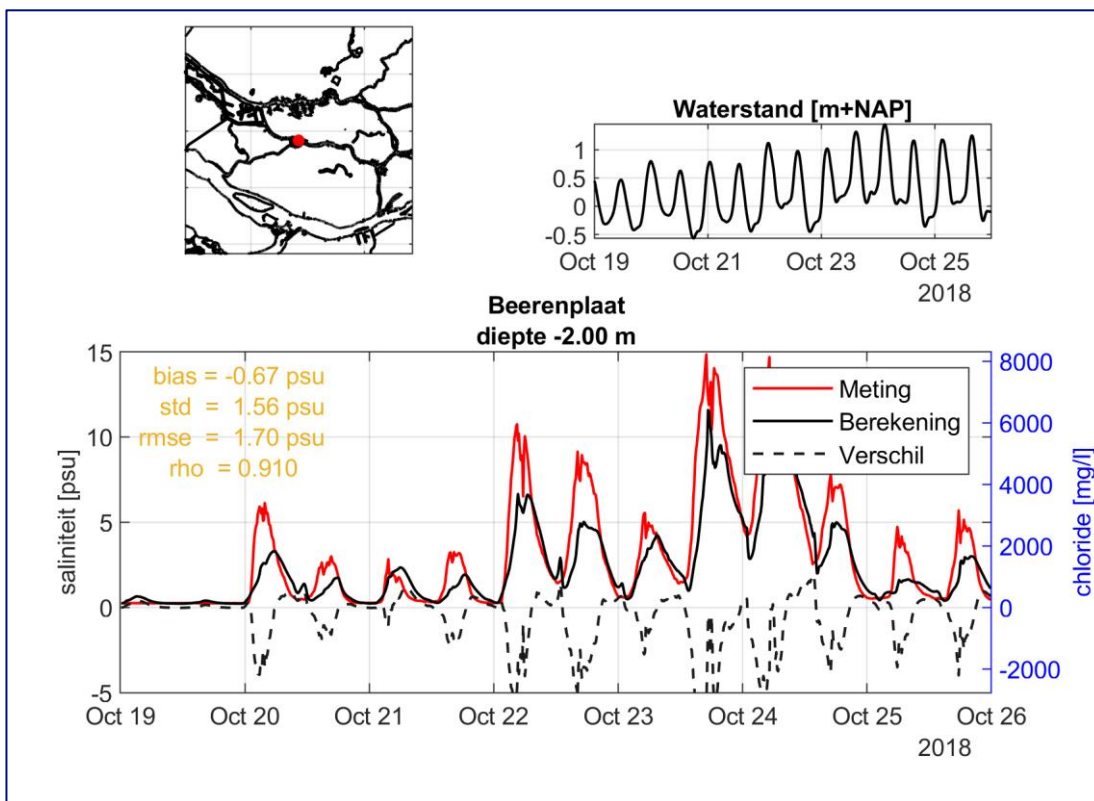
Figuur C-27: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Spijkenissebrug; Diepte -9.0 m NAP



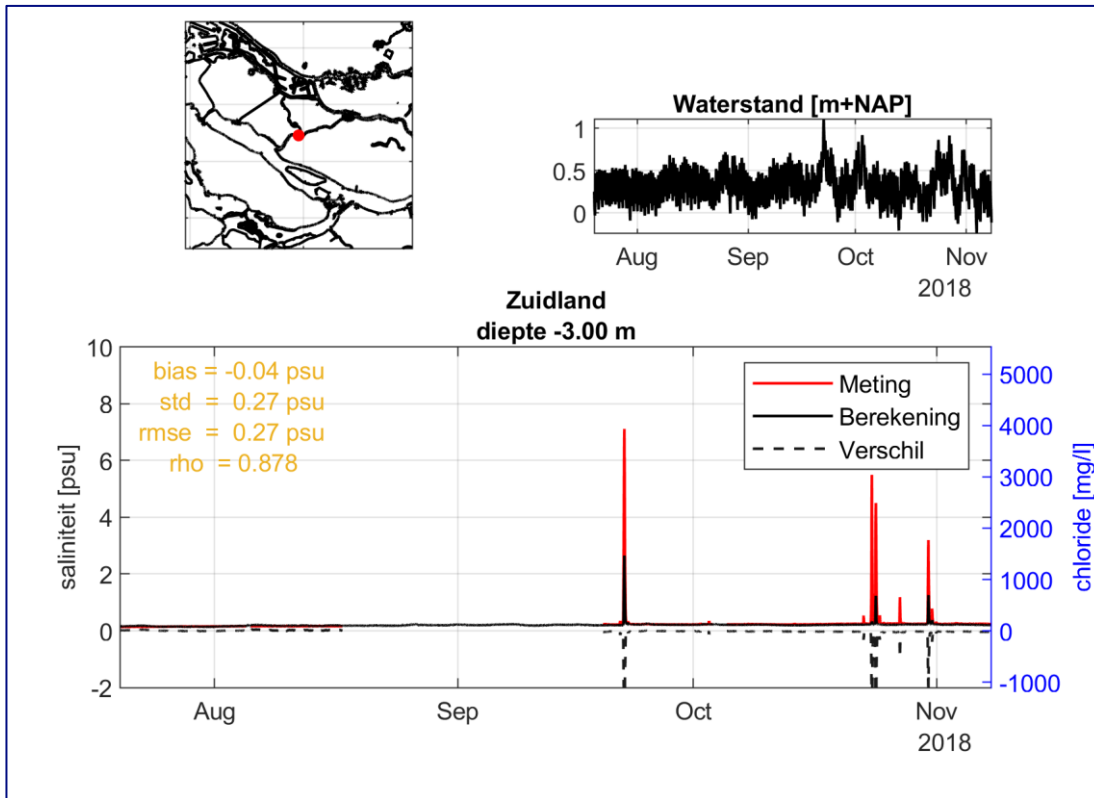
Figuur C-28: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Spijkenissebrug; Diepte -9.0 m NAP



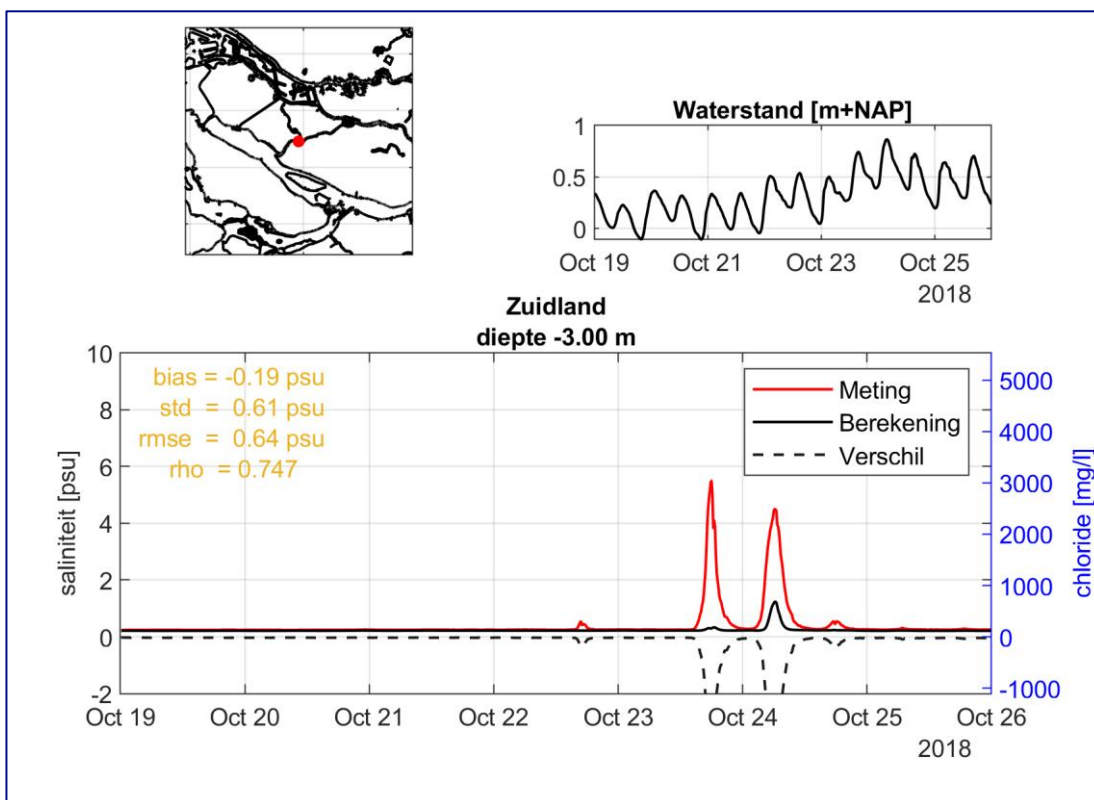
Figuur C-29: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Beerenplaat; Diepte -2.0 m NAP



Figuur C-30: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Beerenplaat; Diepte -2.0 m NAP

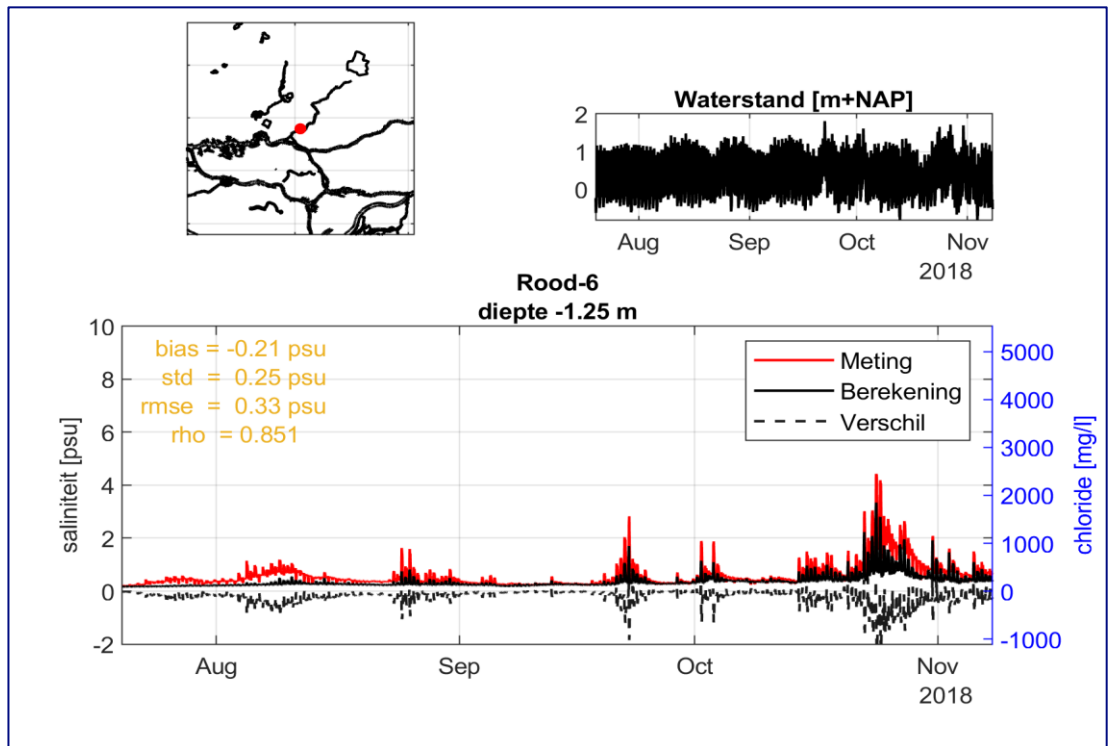


Figuur C-31: Gemeten en berekende saliniteit, gehele analyseperiode, station: Zuidland; Diepte -3.0 m NAP

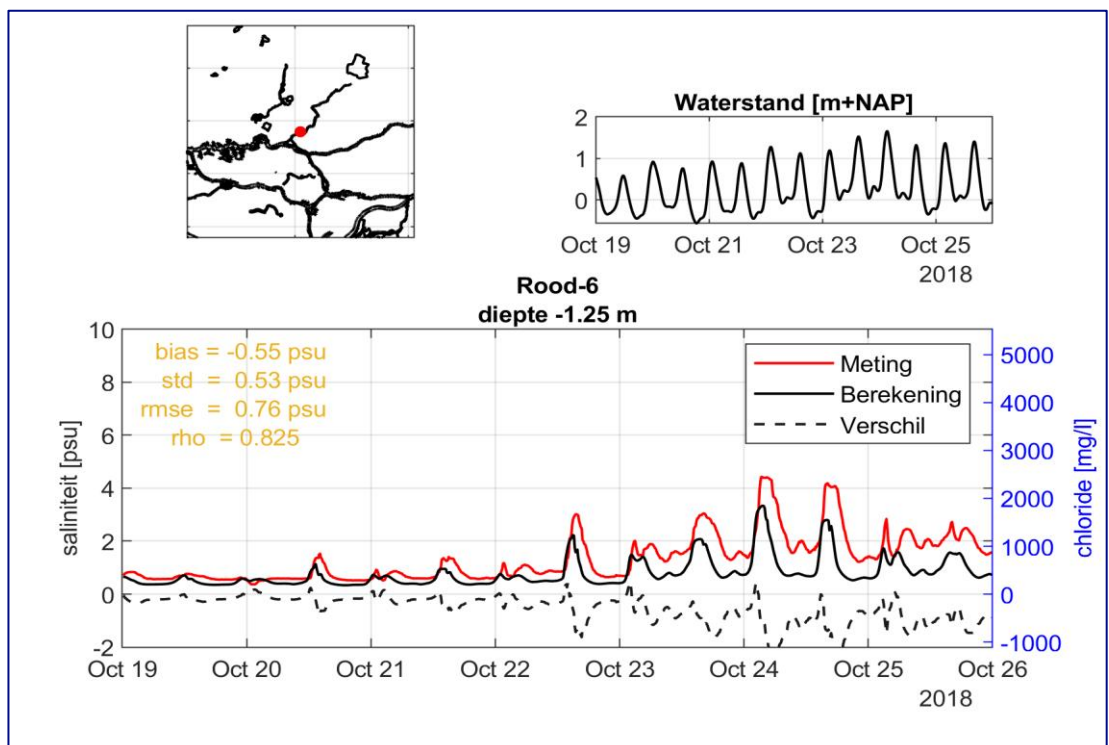


Figuur C-32: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Zuidland; Diepte -3.0 m NAP

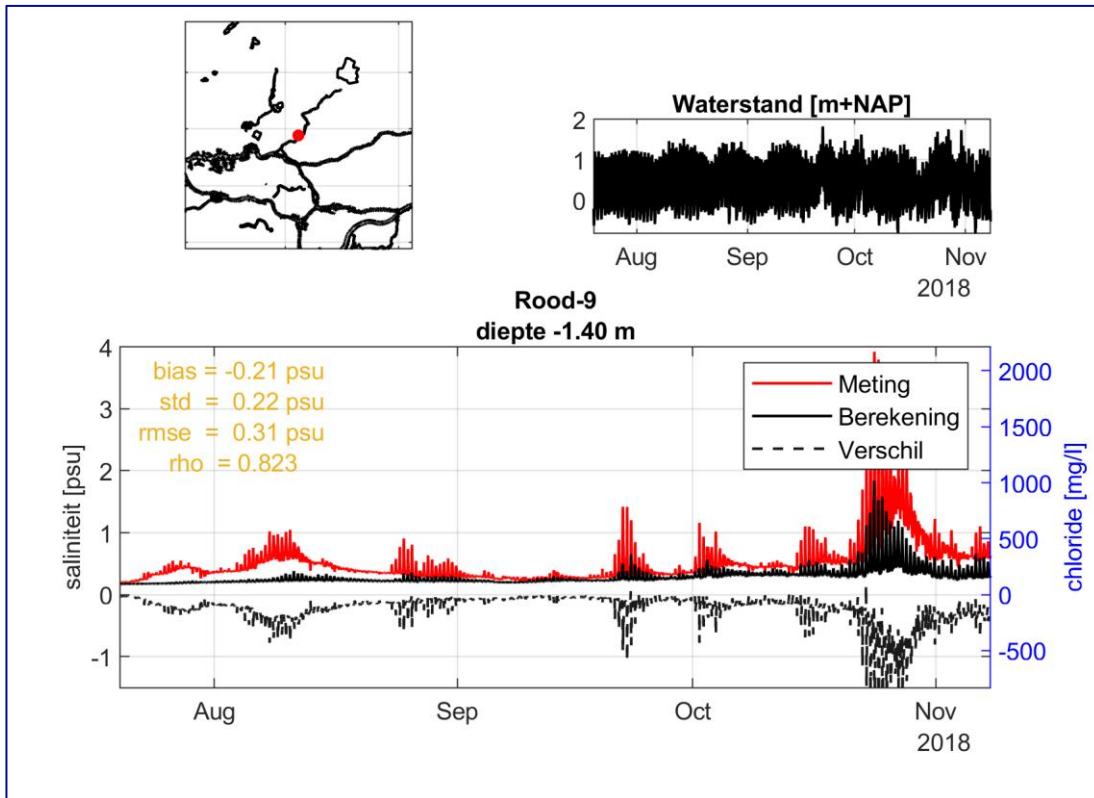
D Tijdreeksen Saliniteit 2018, Hollandsche IJssel



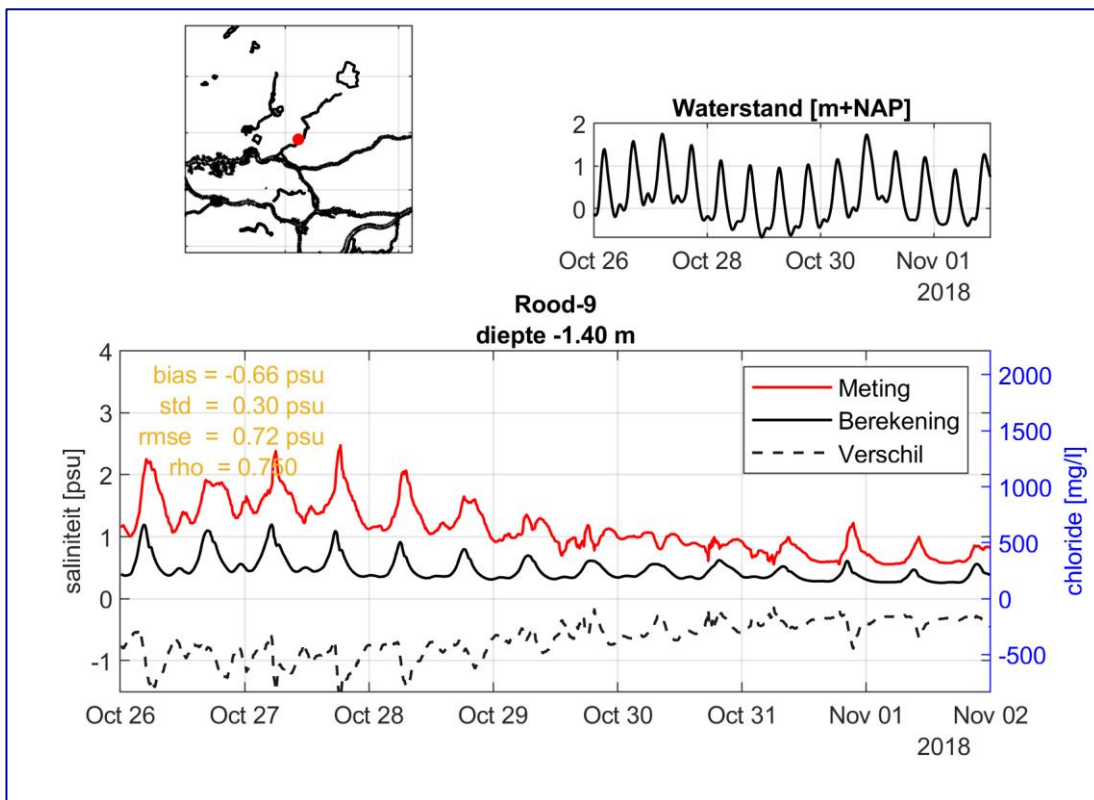
Figuur D-1: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Rood 6 (afstand tot monding 4,5 km); Diepte -1.25 m NAP



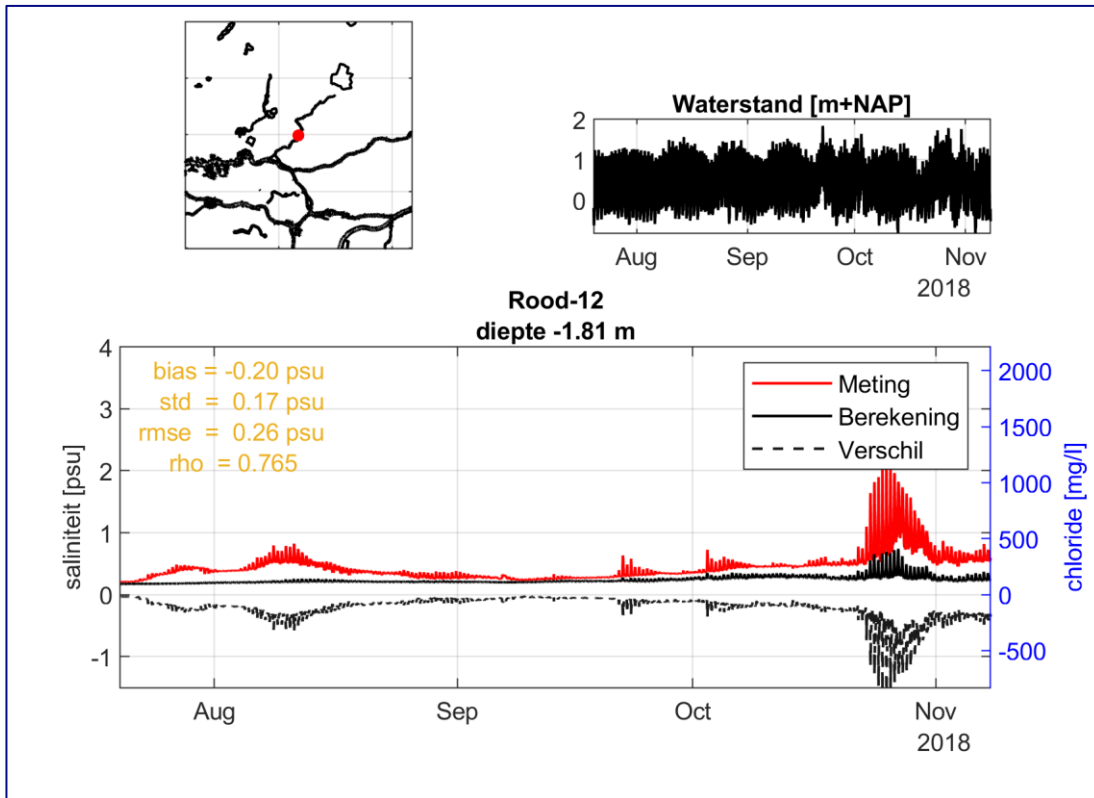
Figuur D-2: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Rood 6 (afstand tot monding 4,5 km); Diepte -1.25 m NAP



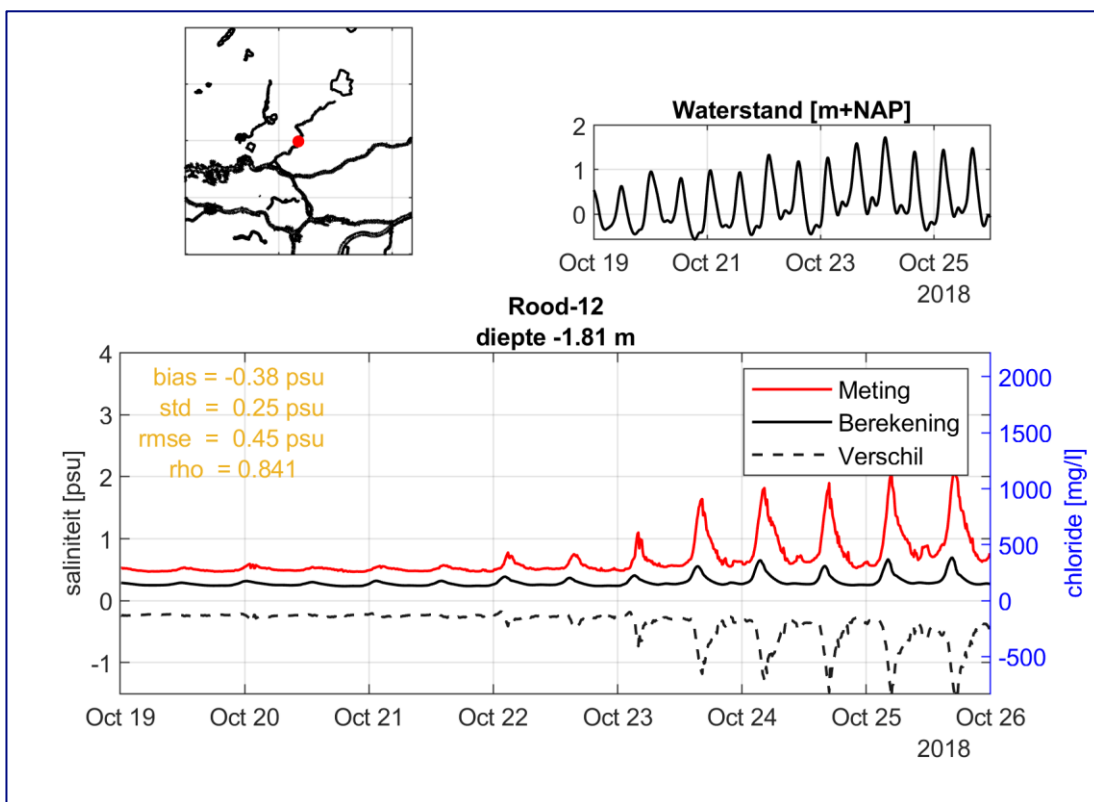
Figuur D-3: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Rood 9 (afstand tot monding 6,5 km); Diepte -1.40 m NAP



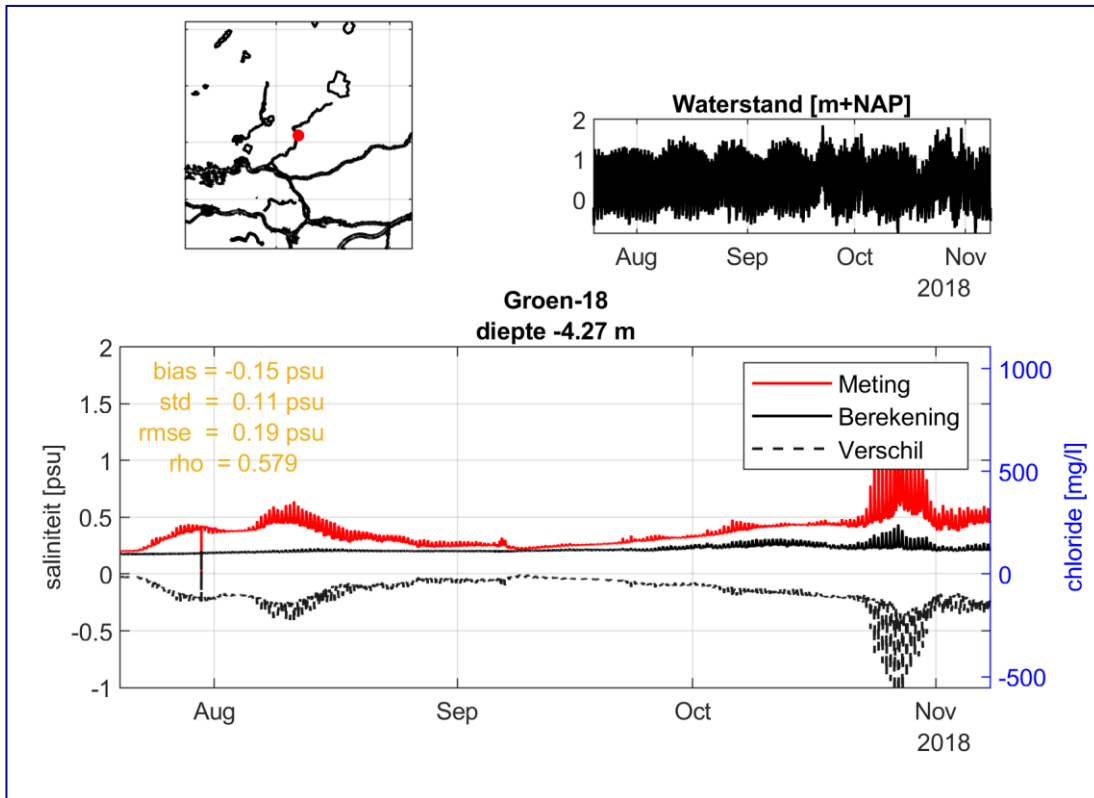
Figuur D-4: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Rood 9 (afstand tot monding 6,5 km); Diepte -1.40 m NAP



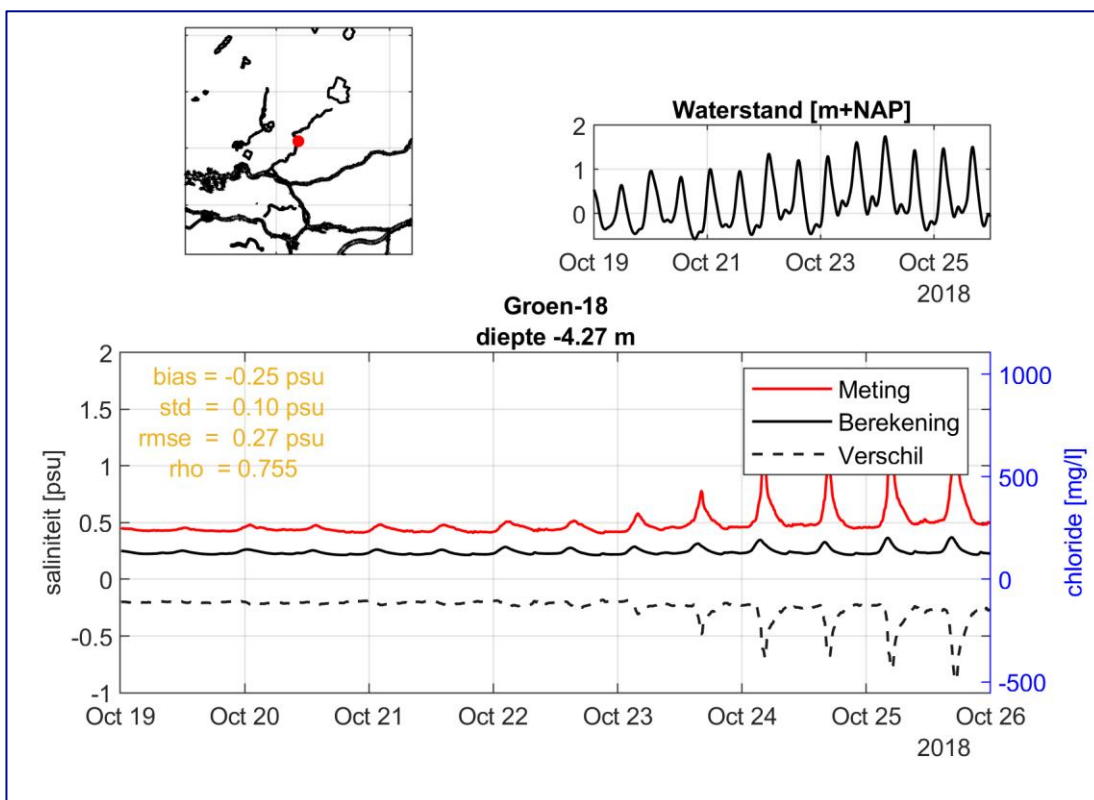
Figuur D-5: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Rood 12 (afstand tot monding 8,5 km); Diepte -1.81 m NAP



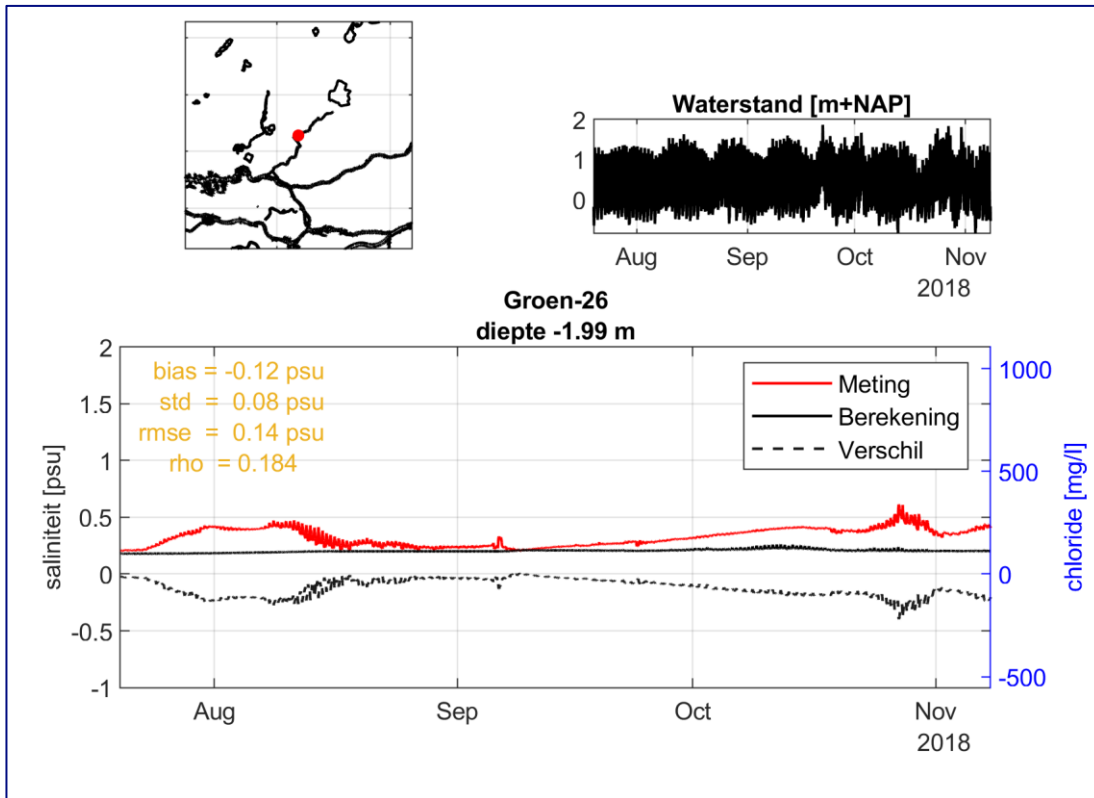
Figuur D-6: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Rood 12 (afstand tot monding 8,5 km); Diepte -1.81 m NAP



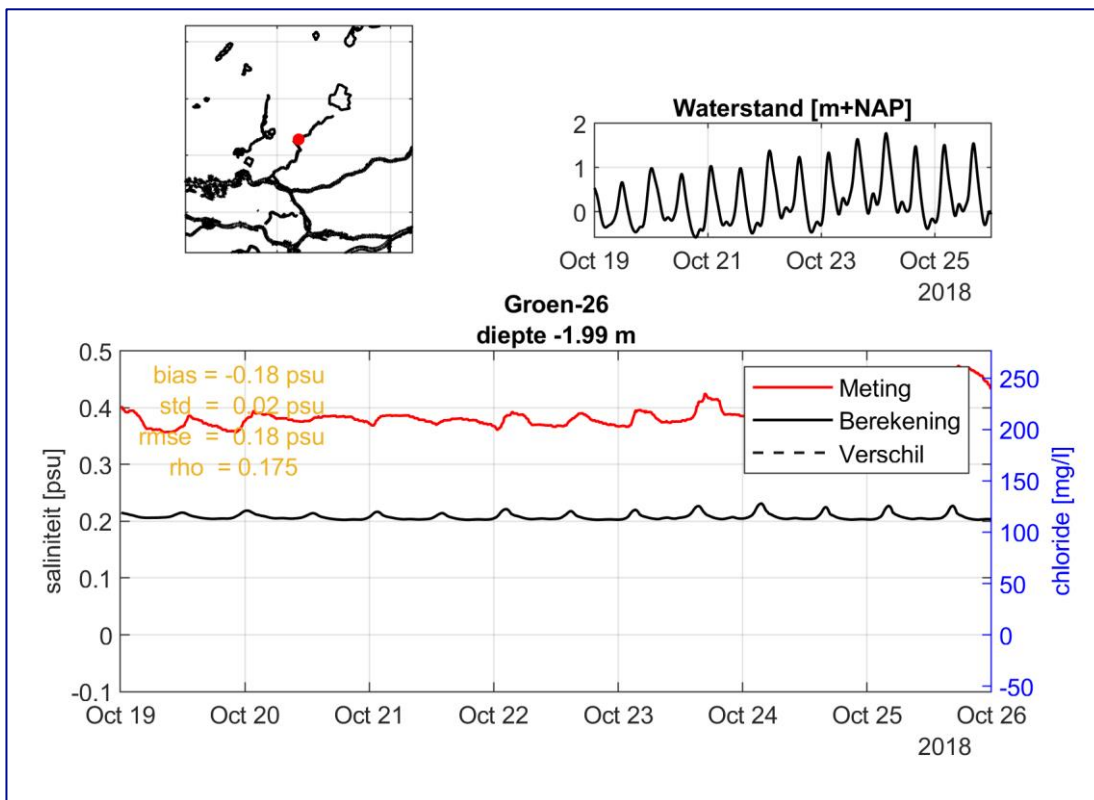
Figuur D-7: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Groen 18 (afstand tot monding 10 km); Diepte -2.0 m NAP



Figuur D-8: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Groen 18 (afstand tot monding 10 km); Diepte -2.0 m NAP

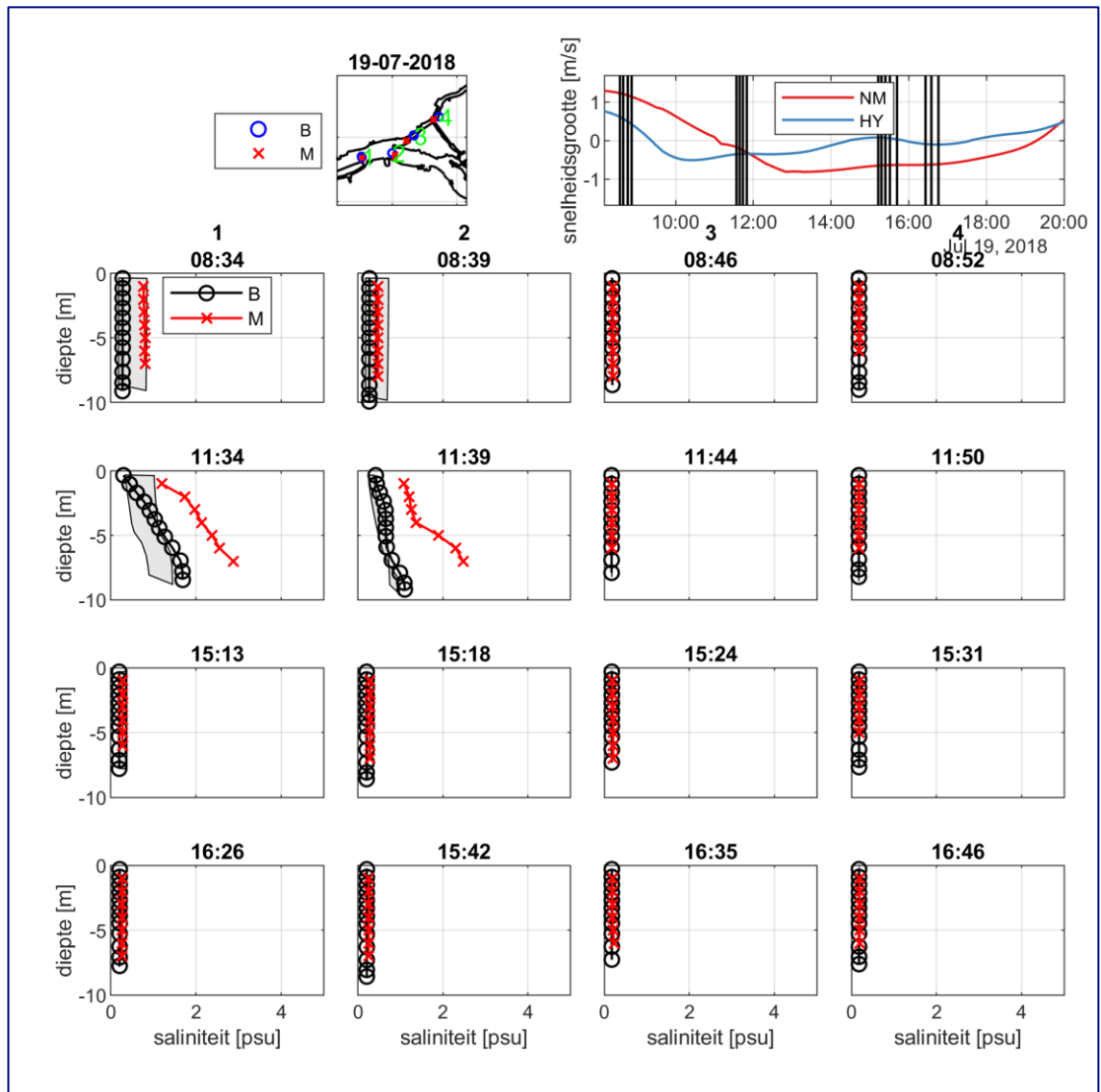


Figuur D-9: Gemeten en berekende saliniteit, gehele berekeningsperiode, station: Groen 26 (afstand tot monding 12,5 km); Diepte -2.0 m NAP

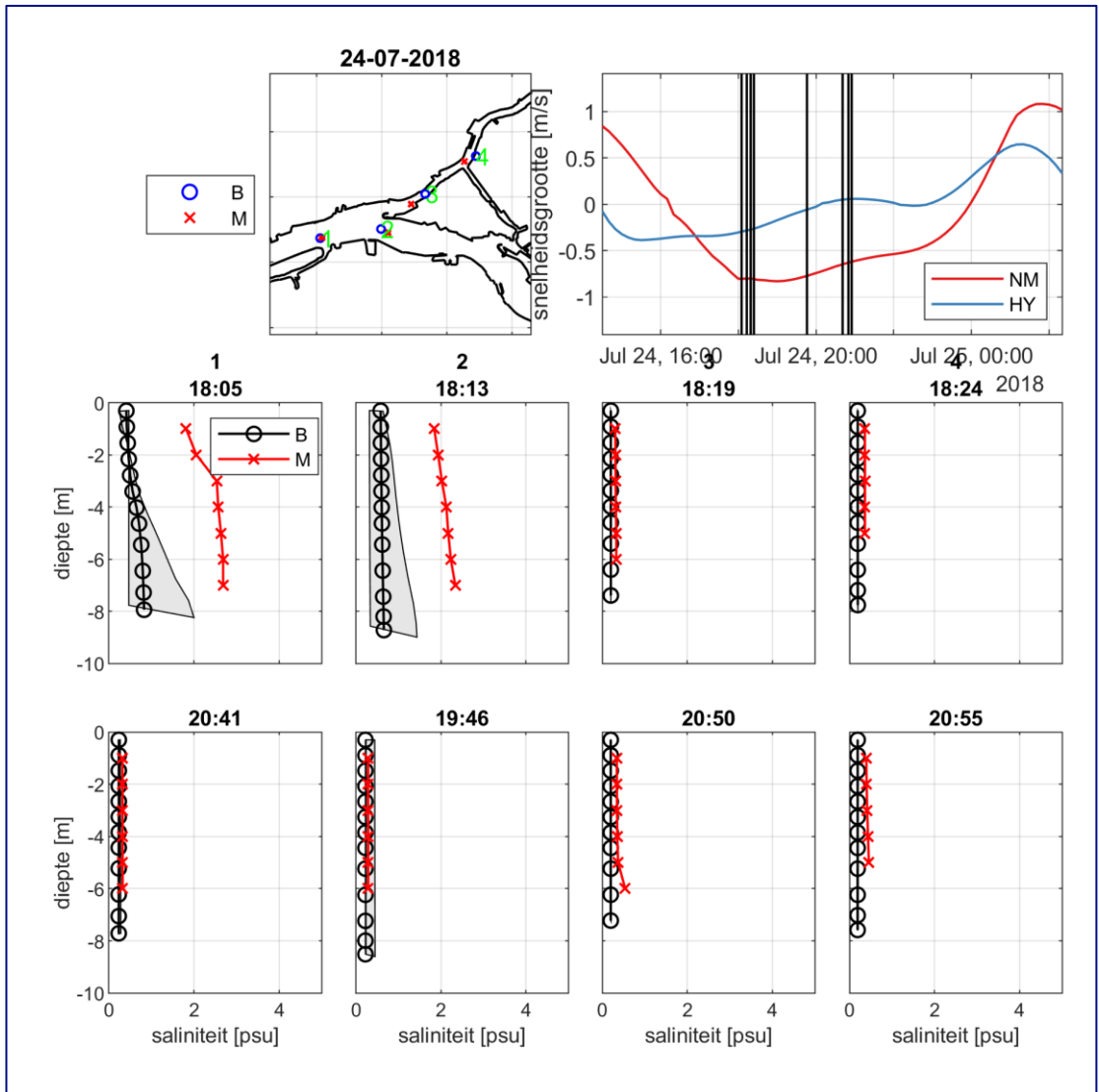


Figuur D-10: Gemeten en berekende saliniteit, periode grootste zoutindringing, station: Groen 26 (afstand tot monding 12,5 km); Diepte -2.0 m NAP

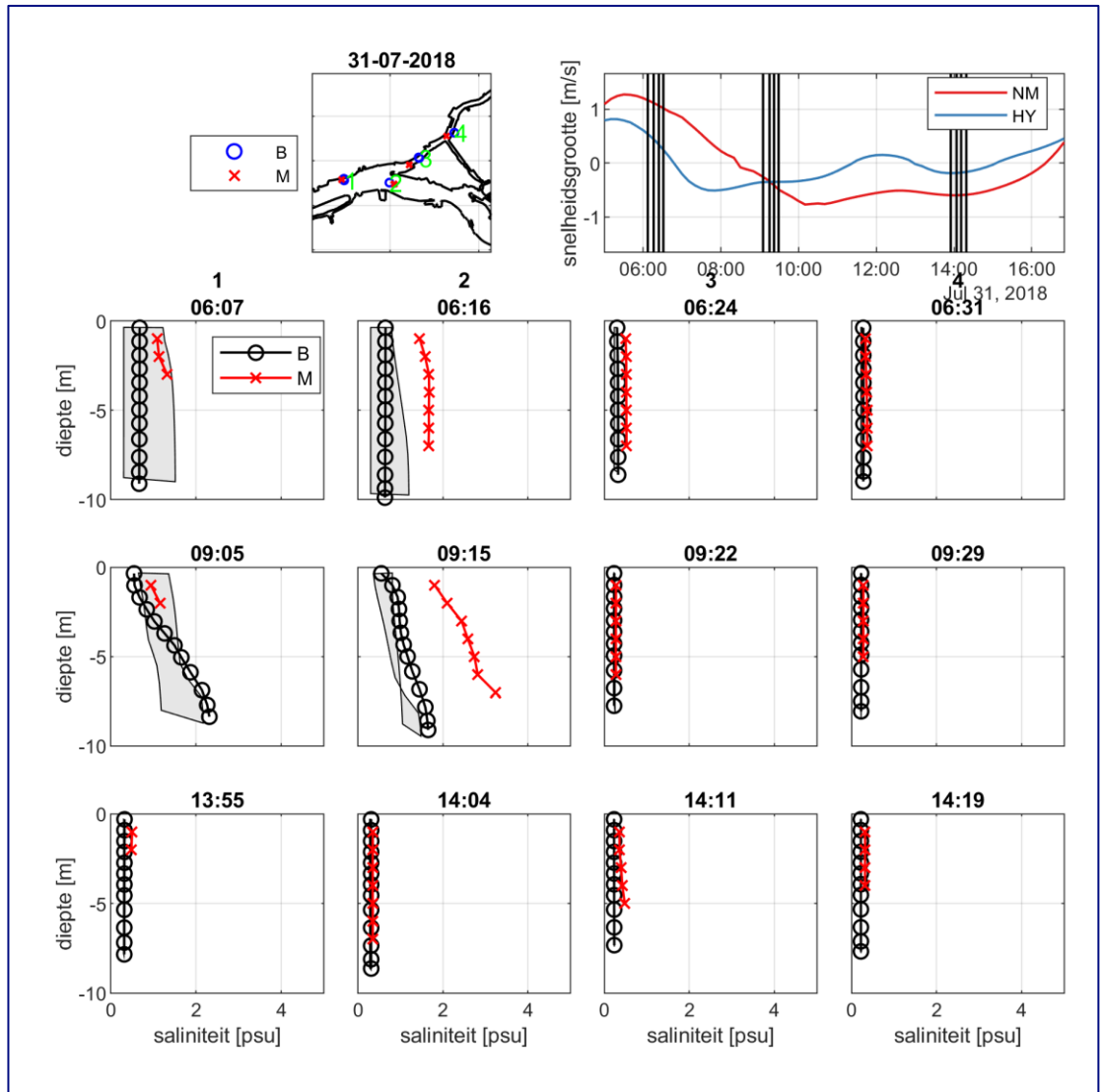
E Profielmetingen monding Hollandsche IJssel



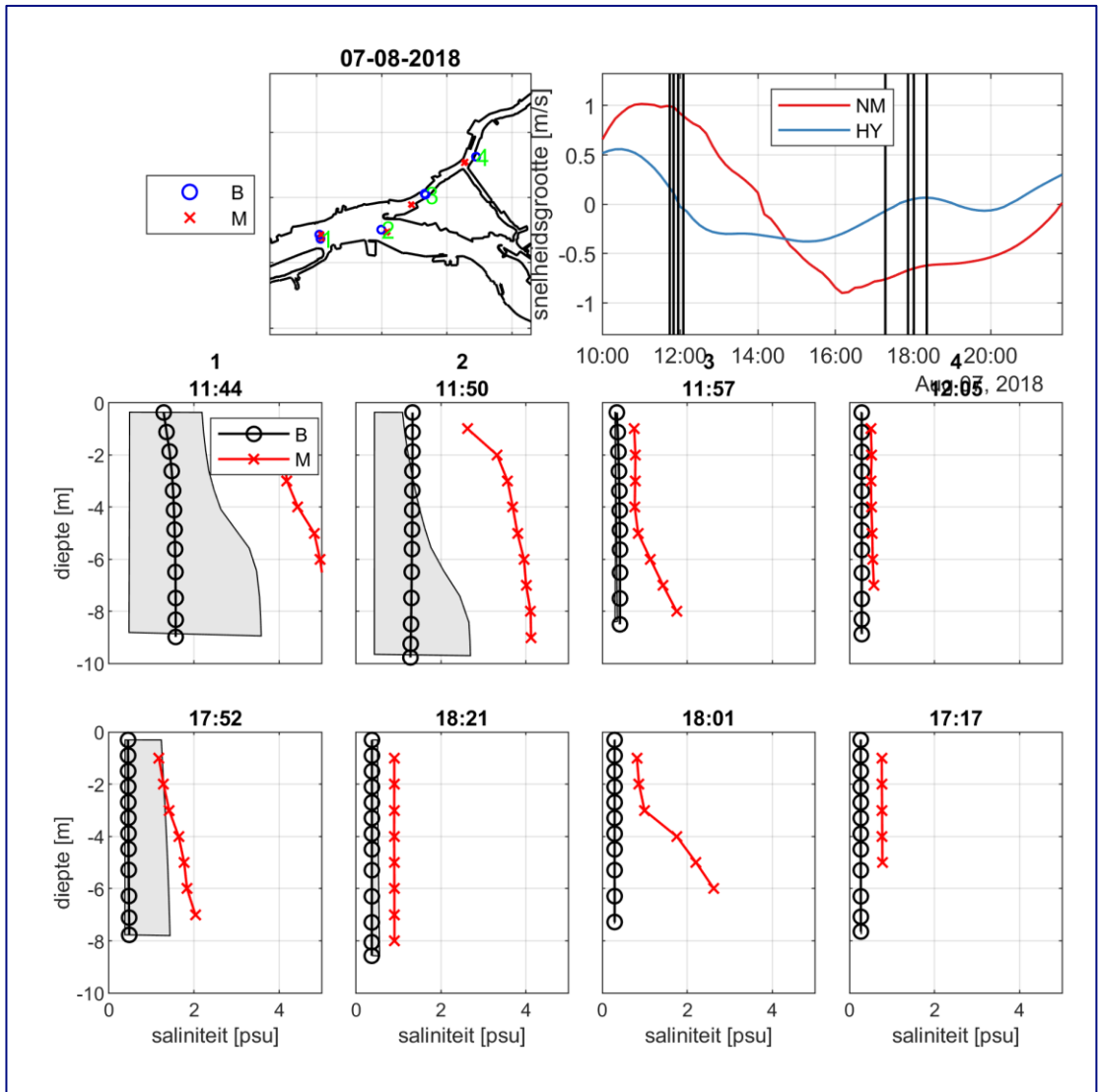
Figuur E-1: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 19 juli 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan)



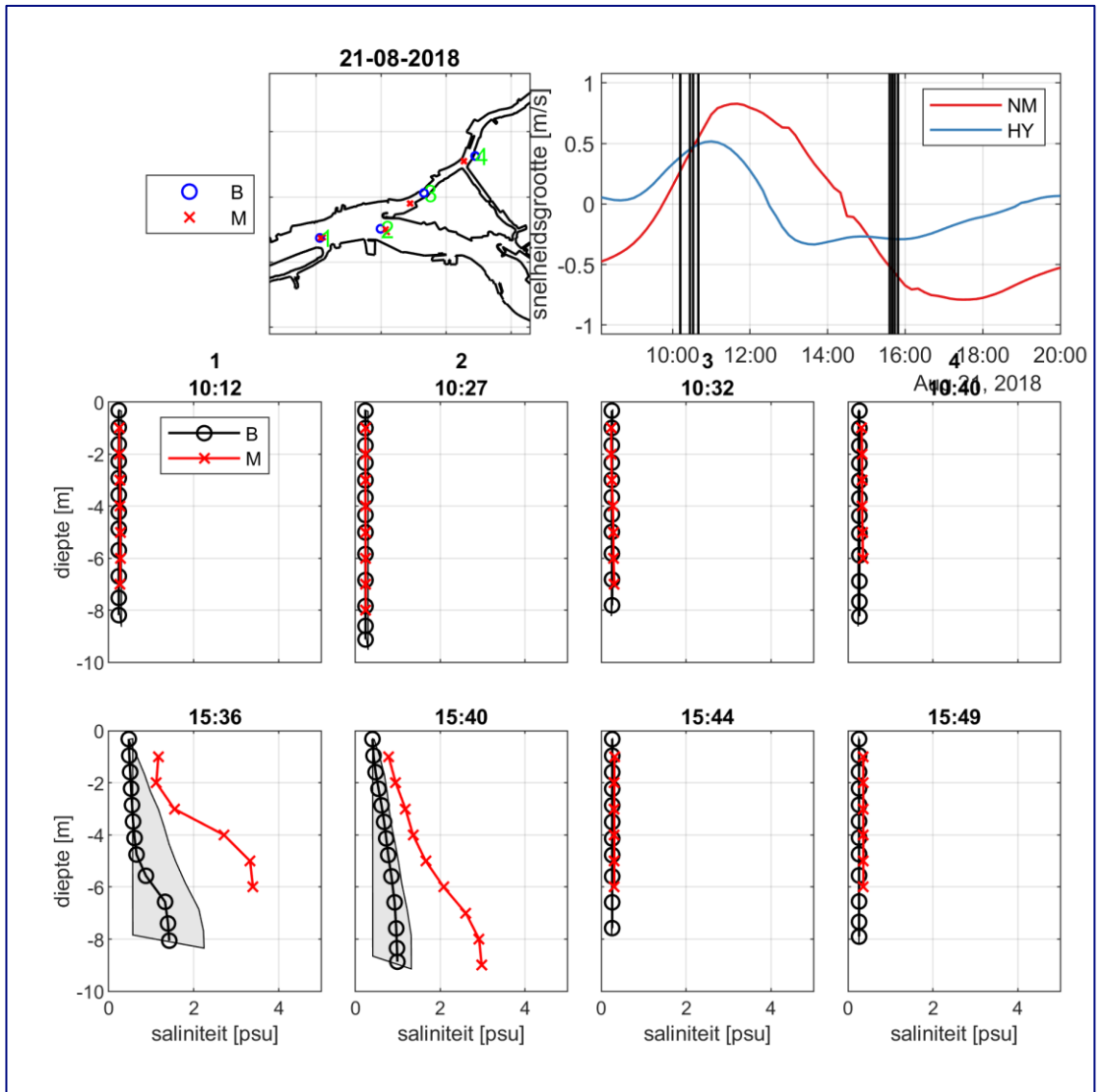
Figuur E-2: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 24 juli 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan)



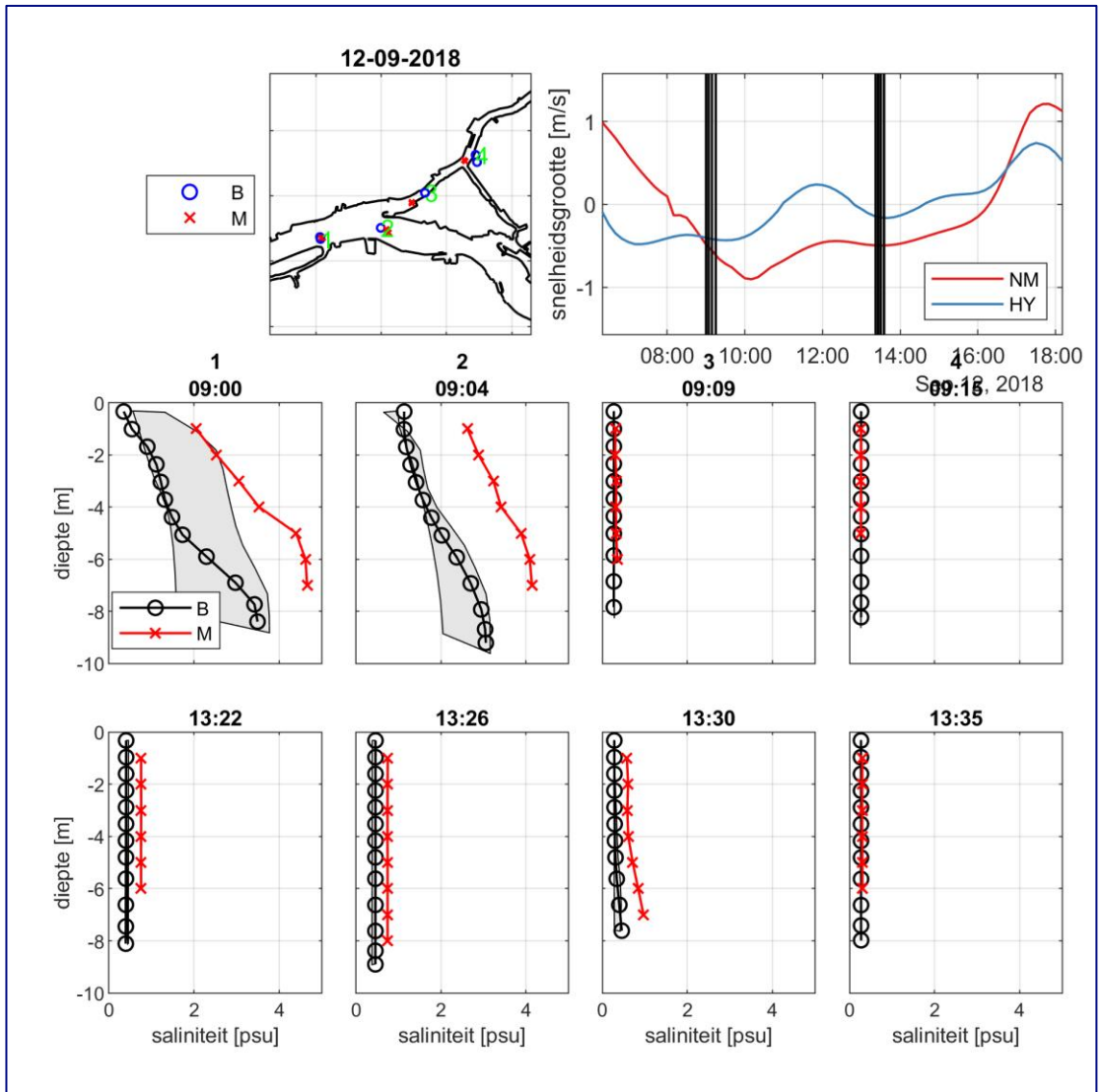
Figuur E-3: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 31 juli 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan)



Figuur E-4: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 7 augustus 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan)



Figuur E-5: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 21 augustus 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan)



Figuur E-6: Gemeten en berekende saliniteitsprofielen monding Hollandsche IJssel 12 september 2018 (de grijze band geeft de variatie van de berekende saliniteit binnen 1 uur voor en na het eigenlijke meettijdstip aan)

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl