

D-HYDRO RijnMaasMonding 3D; Zoutindringing in de Nieuwe Waterweg

Werkzaamheden 2020



D-HYDRO RijnMaasMonding 3D; Zoutindringing in de Nieuwe Waterweg
Werkzaamheden 2020

Auteur(s)

Theo van der Kaaij

Victor Chavarrias

D-HYDRO RijnMaasMonding 3D; Zoutindringing in de Nieuwe Waterweg
 Werkzaamheden 2020

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M. Scholten
Referenties	Werkplan ontwikkeling 3D modelschematisaties voor RWS in D-HYDRO; Werkzaamheden in het kader van KPP2020 Hydraulica Schematisaties.
Trefwoorden	RMM, NDB, RijnMaasMonding, Noordelijk DeltaBekken, zoutindringing, D-HYDRO

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	21-12-2020
Projectnummer	11205258-016
Document ID	11205258-016-ZWS-0003
Pagina's	111
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Theo van der Kaaij	
	Victor Chavarrias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
2.0	Theo van der Kaaij Victor Chavarrias	Wouter Kranenburg	Gerard Blom b.a. Toon Segeren	

Samenvatting

Op 15 april 2020 heeft Rijkswaterstaat – dienst WVl aan Deltares voor zes gebieden een overzicht met gewenste werkzaamheden voor de ontwikkeling van 3-Dimensionale (3D) D-HYDRO modelschematisaties verzonden. Dit rapport beschrijft de werkzaamheden die zijn verricht met betrekking tot het 3D model van de RijnMaasMonding (kortweg RMM). Het uiteindelijke doel van de werkzaamheden is gesteld te staan voor de kalibratie van het model die is voorzien voor 2021. Uiteindelijk moet dit model, onder andere, gebruikt kunnen worden voor het kwantificeren van effecten van voorgestelde maatregelen als bijvoorbeeld het verdiepen van de Nieuwe Waterweg op zoutindringing en verzilting van zoetwaterinnamepunten.

Als eerste is onderzocht of het model de zouttong (engels: “salt wedge”) in de Nieuwe Waterweg kan reproduceren. Saliniteitsprofielen gemeten gedurende een vaartocht op 5 december 2011 in de Nieuwe Waterweg zijn vergeleken met berekeningsresultaten. Dit is gedaan voor verschillende manieren van schematiseren van de 3e dimensie, i.e. de verticaal. Uit deze vergelijking volgde dat met een combinatie van vaste (z-) en met de waterstand variërende (sigma of σ) lagen als schematisering van de verticaal de beste overeenstemming met metingen werd bereikt. Bij deze manier van schematiseren worden beneden een zeker niveau vaste lagen, met een vaste laagdikte, gebruikt. Boven dat niveau worden sigma lagen, waarbij de laagdikte een percentage van de waterhoogte boven dat niveau is, toegepast.

De reproductie van de zouttong in de Nieuwe waterweg is goed, in ieder geval veel beter dan dat met voorlopers van dit model kon worden bewerkstelligd. Volgend op de vergelijking met varende metingen, is een vergelijking tussen berekende en gemeten saliniteit ter plaatse van vaste meetpunten uit het Rijkswaterstaat meetnetwerk uitgevoerd. Uit deze vergelijking volgde dat ook deze metingen goed worden gereproduceerd. Wel lijkt de gemeten stratificatie, het verschil tussen saliniteit nabij het oppervlak en bij de bodem, vaak iets kleiner dan de berekende stratificatie. De goede reproductie van metingen geldt ook voor meetlocaties verder stroomopwaarts in het estuarium als bijvoorbeeld Kinderdijk. Dit laatste is van belang in het licht van gebruik van het model waar het verziltingsvraagstukken betreft.

Na simulatie van December 2011, is een 2e periode doorgerekend. Voor deze 2e periode, Mei 2011, geldt dat de reproductie van gemeten saliniteit vergelijkbaar is met de 1e periode. Naast een vergelijking tussen gemeten en berekende saliniteit, zijn ook “gemeten” afvoeren op splitsingspunten in het RMM gebied vergeleken met berekeningsresultaten. Uit deze vergelijking volgde dat, op één uitzondering na, de gemeten afvoeren goed worden gereproduceerd door het model.

Voor de kalibratie van het model, voorzien voor 2021, wordt aanbevolen:

- Te onderzoeken of de noodzakelijke rekeninspanning verkleind kan worden met behoud van reproductiekwaliteit van het model.
- Waar het verticaal laagtype betreft de combinatie van vaste (z-) met variërende (σ -) lagen te gebruiken. Deze combinatie combineert de nauwkeurigheid van vaste lagen waar het zoutindringing betreft met de robuustheid van sigma lagen waar het de afhandeling van het vrije wateroppervlak betreft.
- Ook het gedrag in het zeegebied van het model in de beoordeling van het model te betrekken. De in 2019 uitgevoerde saliniteits- en snelheidsmetingen in de Maasgeul- en Monsterraai geven deze mogelijkheid. De reproductie van de snelheidsmetingen is relevant in het licht van de toepassing van het model met betrekking tot scheepvaartbegeleiding (Kaaij, et al., 2017).
- Vergelijkbaar met de methodiek gebruikt in dit rapport, de beoordeling van het modelgedrag niet te baseren op één enkele periode. Het is denkbaar dat een aanpassing van de modelschematisatie, een verbetering voor periode “één” maar een verslechtering voor periode “twee” tot gevolg heeft.
- Vooraf een criterium (d.w.z. een goede maat / indicator) te definiëren waarmee het modelgedrag met betrekking tot weergave van de gemeten saliniteit kan worden gekwantificeerd. Aan de hand van dit criterium moet een uitspraak “deze serie berekeningen is beter dan wel slechter dan de voorgaande serie berekeningen” mogelijk zijn. Voor tijdreeksen van saliniteit lijkt de correlatiecoëfficiënt een beter criterium dan absolute kentallen.
- Naast saliniteit ook de reproductie van gemeten water temperaturen in de beoordeling van het modelgedrag te betrekken. Het voorspellen van het gedrag van warmtelozingen, bijvoorbeeld als gevolg van elektriciteitsproductie of proceswater gebruikt door petro-chemische industrie, is een (neven)doelstelling van het model (Kaaij, et al., 2017).

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Organisatorisch kader	9
1.2	Achtergrond	9
1.3	Doel van deze studie	11
1.4	Aanpak	11
1.5	Opzet rapport	12
2	Gebruikte meetgegevens en omstandigheden	13
2.1	Algemeen	13
2.2	Specifieke Meetgegevens December 2011	15
2.3	Specifieke Meetgegevens Mei 2011	16
2.4	Omstandigheden December 2011 simulatie	17
2.5	Omstandigheden Mei 2011 simulatie	17
3	Opzet model	19
3.1	Algemeen	19
3.2	Horizontale rekennetwerk	19
3.3	Het verticale rekenrooster	20
3.4	Aanpassingen ten opzichte van de dieptegemiddelde schematisatie	21
3.5	Randvoorwaarden voor het model	22
3.6	Meteorologische forcering	22
3.7	De initiële condities	22
3.8	Weergave van effecten van turbulentie	23
4	Resultaten saliniteit voor verschillende typen laagverdeling (December 2011)	24
4.1	Wijze van beoordelen	24
4.2	Sigma (σ -) lagen	24
4.3	Vaste (z-) lagen	26
4.4	Combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen	27
4.5	Combinatie sigma (σ -) en vaste (z-)lagen met Maeslant en Hartelkering gemodelleerd als "structure"	29
4.6	Conclusies effect verticale type laagverdeling	30
5	Overige berekeningsresultaten voor verticale laagverdeling met combinatie sigma (σ-) en vaste (z-) lagen.	31

5.1	Algemeen	31
5.2	Waterstanden	31
5.3	Stratificatie in de nieuwe Waterweg	32
5.4	Saliniteit ter plaatse van de vaste meetpunten	35
5.5	Restsnelheden op zee	37
6	Berekeningsresultaten mei 2011	38
6.1	Algemeen	38
6.2	Waterstanden	38
6.3	Saliniteit ter plaatse van vaste meetpunten	38
6.4	Restsnelheden op zee	41
6.5	Afvoeren op splitsingspunten in het RMM gebied	41
7	Discussie	44
8	Conclusies en aanbevelingen	46
8.1	Conclusies	46
8.2	Aanbevelingen	46
9	Referenties	48
A	Metingen 2019	49
B	Waterstanden December 2011	51
C	Tijdreeksen Saliniteit December 2011	61
D	Pearson Correlatie coëfficiënt	77
E	Tijdreeksen Waterstanden Mei 2011	78
F	Tijdreeksen Saliniteit Mei 2011	88
G	Tijdreeksen debieten op splitsingspunten Mei 2011	104

Figuur 1: Overzicht van de Rijn Maasmonding. De namen van de deelwatersystemen in het gebied in blauw, namen van de meetlocaties in zwart. Gebieden waar het water onder normale condities overwegend zout/brak is worden in blauw weergegeven. Gebieden waar het water overwegend zoet is in groen.	9
Figuur 2: Schematische weergave dichtheidsstroom (Zouttong: Engels Salt Wedge); bron figuur onbekend	10
Figuur 3: Schematische weergave aandrijvende mechanisme “gravitational circulation”; Rode pijlen, resterende kracht (oorzaak), grijze pijlen, resterende circulatie (gevolg)	10
Figuur 4: Locaties waterstandmetingen (tijdreeksen; RWS, Rijkswaterstaat meetlocaties; HBR. Havenbedrijf Rotterdam meetlocaties)	14
Figuur 5: Locaties saliniteitsmetingen (tijdreeksen)	15
Figuur 6: Locatie meetraaien Mei 2011 metingen.	16
Figuur 7: Bovenrijnafvoer te Lobith en gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland voor Oktober, November en December 2011	17
Figuur 8: Bovenrijnafvoer te Lobith en gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland voor Maart, April en Mei 2011	18
Figuur 9: Rekenrooster/netwerk RMM model	19
Figuur 10: Rekenrooster/netwerk RMM model (detail Nieuwe Waterweg)	20
Figuur 11: Typen laagverdeling (schematisch); Blauw: Water; Oranje: Bodem; Links sigma (σ -) lagen; Midden vaste (z-) lagen en Rechts sigma (σ -) en vaste (z-) lagen	21
Figuur 12: Initiële conditie waterstand	23
Figuur 13: Initiële conditie (dieptegemiddeld) saliniteit	23
Figuur 14: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: sigma (σ -) lagen; Totaal 20 lagen; Profielen: rood gemeten, blauw berekend	25
Figuur 15: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: vaste (z-) lagen; Totaal ongeveer 13 actieve rekenlagen(Nieuwe Waterweg); Profielen: rood gemeten, blauw berekend	26
Figuur 16: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen; Totaal ongeveer 18 actieve rekenlagen(Nieuwe Waterweg); Profielen: rood gemeten, blauw berekend	28
Figuur 17: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen; Totaal ongeveer 18 actieve rekenlagen(Nieuwe Waterweg); Maeslant en Hartelkering als “structure”; Profielen: rood gemeten, blauw berekend	29
Figuur 18: Gemeten en berekende waterstanden, 1 ^e helft December 2011, station: Hoek van Holland	31

Figuur 19: Gemeten en berekende saliniteit; track splitsingspunt Oude Maas en Nieuwe Maas; 7 December 2011 10 uur; ongeveer opkomend tij; Profielen: rood gemeten, blauw berekend	33
Figuur 20: Gemeten en berekende saliniteit; track splitsingspunt Oude Maas en Nieuwe Maas; 7 December 2011 12 uur; ongeveer hoog water; Profielen: rood gemeten, blauw berekend	34
Figuur 21: Gemeten en berekende saliniteit, 1 ^e helft December 2011, station: Kinderdijk	35
Figuur 22: Berekende restsnelheden nabij het oppervlak; December 2011	37
Figuur 23: Gemeten en berekende waterstanden, 1 ^e helft Mei 2011, station: Hoek van Holland	38
Figuur 24: Gemeten en berekende saliniteit, 1 ^e helft Mei 2011, station: Kinderdijk	39
Figuur 25: Berekende restsnelheden nabij het oppervlak; Mei 2011	41
Figuur 26: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Nieuwe Maas; Positief eb richting, Negatief vloedrichting	42
Figuur 27: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Hartelkanaal; Positief eb richting, Negatief vloedrichting	42
Figuur 28: Gemeten en berekende waterstanden; Station Hoek van Holland; Periode 24 – 29 Mei 2011	43
Figuur 29: Dwarsdoorsnede saliniteit , sigma (σ -) lagen links, en combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen rechts. Locatie meetraai 1 km 5 december 2011 metingen, zie Figuur 14	44

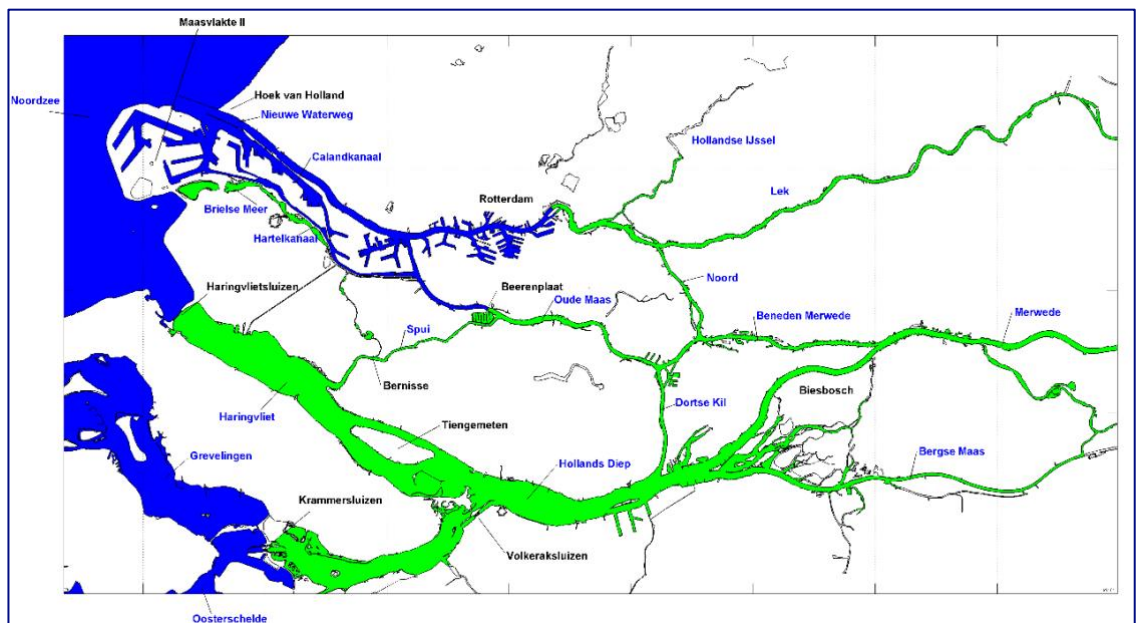
1 Inleiding

1.1 Organisatorisch kader

Op 15 april 2020 heeft RWS-WVL aan Deltares voor zes gebieden een overzicht met aanvullend gewenste werkzaamheden voor de ontwikkeling van 3D D-HYDRO modelschematisaties verzonden. Deze deelgebieden zijn:

- De Noordzee,
- Rijn-Maas Monding of kortweg het RMM gebied,
- Het Markermeer.
- Noordzeekanaal – Amsterdam Rijnkanaal
- Het Veerse Meer
- De Oosterschelde (aanvankelijk gevraagd maar later als modelontwikkeling vervallen).

In dit rapport worden de werkzaamheden die zijn uitgevoerd met betrekking tot het 3D D-HYDRO model van het RMM gebied, kortweg 3D RMM, beschreven. Deze werkzaamheden zijn uitgevoerd onder het raamwerk van het KPP2020 onder het project MA07ab Hydraulica Schematisaties, projectnummer 11205258-015. Een geografisch overzicht van het RMM gebied wordt getoond in Figuur 1.

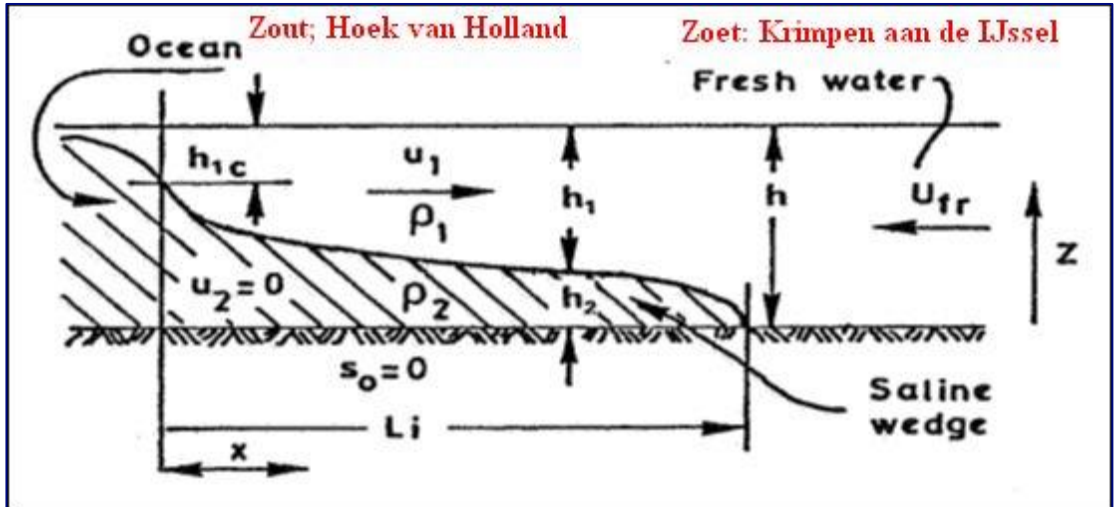


Figuur 1: Overzicht van de Rijn Maasmondning. De namen van de deelwatersystemen in het gebied in blauw, namen van de meetlocaties in zwart. Gebieden waar het water onder normale condities overwegend zout/brak is worden in blauw weergegeven. Gebieden waar het water overwegend zoet is in groen.

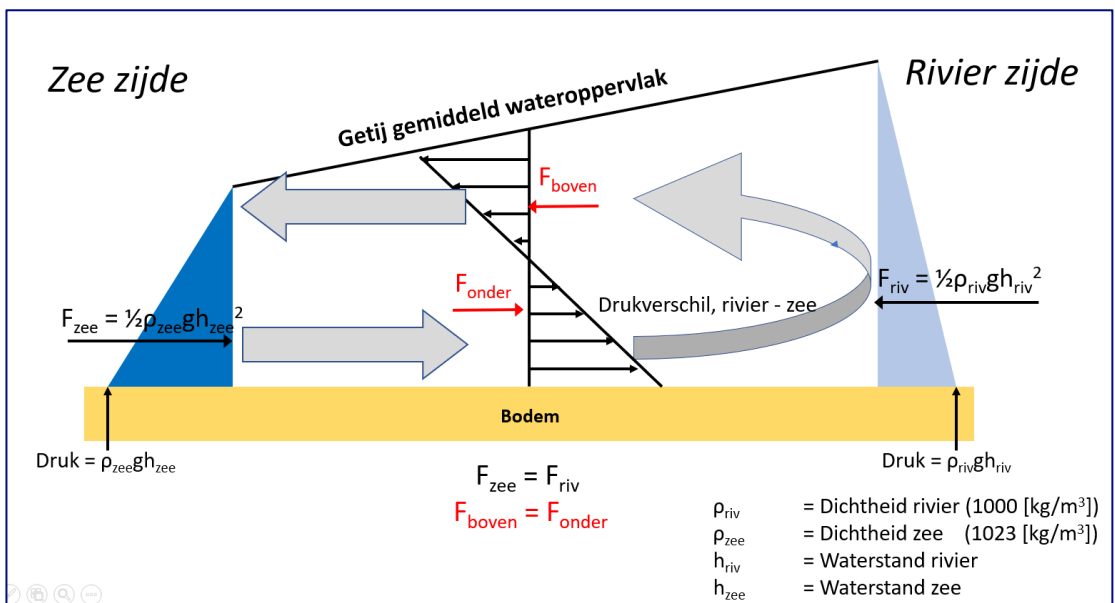
1.2 Achtergrond

De analyse van de in dit rapport beschreven simulaties richten zich vooral op de zoutindringing in het RMM gebied. Het zoute zeewater “kruipt” in de Nieuwe Waterweg, i.e. de monding van het estuarium, onder het afstromende zoete rivierwater, zie Figuur 2.

Dit "kruipen" is een gevolg van horizontale dichtheidsverschillen tussen het zoete rivierwater en het zoute zeewater. Als gevolg van dit dichtheidsverschil ontstaat een landwaarts gerichte kracht nabij de bodem en een zeewaarts gerichte kracht nabij het oppervlak. Dit aandrijvende mechanisme, schematisch weergegeven in Figuur 3, heeft een circulatie tot gevolg die in Engelstalige literatuur wordt aangeduid als "gravitational circulation".



Figuur 2: Schematische weergave dichtheidsstroom (Zouttong: Engels Salt Wedge); bron figuur onbekend



Figuur 3: Schematische weergave aandrijvende mechanisme "gravitational circulation"; Rode pijlen, resterende kracht (oorzaak), grijze pijlen, resterende circulatie (gevolg)

De gelaagde toestand met relatief zoet water nabij het oppervlak en zout water nabij de bodem, ook vaak aangeduid als gestratificeerde stroming, bleek in het verleden moeilijk te reproduceren met de modelschematisaties van het RMM gebied. Dit beperkt de toepasbaarheid van modellen waar het voorspellen van het effect van voorgenomen ingrepen op zoutindringing in het RMM gebied betreft. In de Nieuwe Waterweg is de dichtheidsgedreven netto instroom nabij de bodem doorgaans het mechanisme dat zout het estuarium inbrengt.

De zoutgehalten stroomopwaarts in het estuarium worden ook bepaald door deze instroom van zout zeewater. Zonder een juiste weergave hiervan is het niet goed mogelijk in

voorspellende zin uitspraken te doen over bijvoorbeeld zoutgehalten bij stroomopwaarts gelegen zoet water innamepunten .

De studie kan worden gezien als een vervolg op de in 2019 uitgevoerde werkzaamheden (Kaaij, et al., 2019). Gedurende deze voorgaande studie is:

- Als eerste de dieptegemiddelde schematisatie omgezet naar een 3-dimensionale schematisatie,
- Een 2-tal berekeningen uitgevoerd. De belangrijkste conclusie volgend uit deze berekeningen was dat een vaste lagen schematisatie, waarbij elke rekenlaag een vaste dikte heeft, bijvoorbeeld een dikte van 1 meter, niet robuust is. Met “niet robuust” wordt hier bedoeld dat berekeningen om onverklaarbare reden “vastlopen”. De rekentijdstep wordt vermoedelijk zodanig verkleind dat er geen voortgang meer is. Gebrek aan robuustheid kan een gevolg zijn van instabiel gedrag maar dat hoeft niet de reden te zijn.
- De berekeningen rekentechnisch erg zwaar zijn. Zodanig zwaar dat de rekenfaciliteiten van Deltares ontoereikend zijn.

De in dit rapport beschreven berekeningen zijn uitgevoerd met het simulatiepakket D-HYDRO, versienummer: 2021.03-67911-intel-2018b. Het gebruik van deze versie was noodzakelijk waar het functionaliteit met betrekking tot het schematiseren van de verticaal betreft. Vanwege de benodigde rekenkracht zijn de berekeningen zijn uitgevoerd bij het rekencentrum SURFsara op de Cartesius supercomputer. De doorlooptijd van één enkele berekening is 5 dagen waarbij 120 cores (rekenkernen) worden gebruikt¹.

1.3 Doel van deze studie

Het doel van de werkzaamheden van 2020 is gesteld te staan voor de kalibratie van het model die is voorzien voor 2021. De belangrijkste vraag die beantwoordt moest worden is wat het effect van schematiseren van de verticaal is op de berekeningsresultaten. Met ander woorden: “Wat is het beste startpunt waar het verticale laagverdeling betreft voor de kalibratie van het model”.

1.4 Aanpak

De in deze studie gevolgde aanpak is dat:

- Als eerste onderzocht is wat de manier van schematiseren van de 3^e dimensie, de verticaal, voor gevolgen heeft voor de weergave van de zouttong in de Nieuwe Waterweg. Op basis van een vergelijking van gemeten saliniteitsprofielen met berekende profielen, de varende metingen van 5 December 2011, is de meest veelbelovende manier geselecteerd. Deze 1^e simulatie beslaat de periode van 1 Oktober tot 15 December 2011.
- Vervolgens overige metingen, gemeten waterstanden, saliniteitsprofielen gemeten op 7 december 2011 en gemeten tijdreeksen van saliniteit, zijn vergeleken met berekeningsresultaten.
- Als laatste een berekening is uitgevoerd voor een andere periode, i.e. Mei 2011. Naast gemeten waterstanden en gemeten tijdreeksen van saliniteit worden ook “gemeten”²

¹ We acknowledge that parts of the results of this research have been achieved using the DECI resource Cartesius based in The Netherlands at SURFsara with support from PRACE. The support of Maxime Mogé from SURFsara, The Netherlands to the technical work is gratefully acknowledged

² Debielen worden niet direct gemeten maar afgeleid uit snelheidsprofielen in combinatie met de locale waterstand. Snelheidprofielen zijn gemeten met een Acoustic Doppler Current Profiler of ADCP.

debieten op splitsingspunten in het RMM gebied vergeleken met berekeningsresultaten.

Deze 2^e simulatie beslaat de maanden Maart, April en Mei 2011.

Van beide berekeningen worden de eerste 2 maanden gezien als inspelen van het model.

De gevolgde aanpak is waar het de 2^e simulatieperiode betreft afwijkend van de activiteiten benoemd in het oorspronkelijke projectplan (Spruyt, et al., 2020) . Als 2^e simulatie was oorspronkelijk bedoeld simulatie van een periode in 2019 waar varende metingen op zee zijn uitgevoerd. Echter, een goede analyse van deze metingen dient te worden uitgevoerd voor een vergelijking met modelresultaten. Aangezien deze data analyse nog niet is uitgevoerd, is in overleg met Rijkswaterstaat besloten, voortgangsoverleg d.d. 23 09 2020, de 2019 simulatie te vervangen door een mei 2011 berekening. In het kader van deze studie zijn de 2019 varende metingen wel kort bekeken. Daarvan is een kleine beschrijving gemaakt die is opgenomen in Appendix A..

1.5 Opzet rapport

Hoofdstuk 2 van dit rapport, beschrijft de gebruikte metingen en beschrijft de condities waar het rivierafvoer en wind betreft voor beide simulatie perioden (December 2011 en Mei 2011). De opzet van het model wordt beschreven in Hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt onderzocht wat het effect van verschillende manieren van schematiseren van de verticaal is op de weergave van de stratificatie in de Nieuwe Waterweg. Dit is gedaan door berekeningsresultaten voor verschillende verticale laagverdelingen te vergelijken met varende metingen in de Nieuwe Waterweg voor 5 December 2011. In hoofdstuk 5 worden berekeningsresultaten van de simulatie met σ -z-lagen combinatie vergeleken met overige metingen zoals, de gemeten waterstand en saliniteit ter plaatse van de vaste meetpunten van Rijkswaterstaat. Een ander periode, mei 2011, wordt behandeld in hoofdstuk 6. Naast een vergelijking van gemeten waterstand en saliniteit met berekeningsresultaten, worden ook de gemeten afvoeren bij splitsingspunten in het RMM gebied vergeleken met berekende afvoeren. In Hoofdstuk 7 wordt bediscussieerd wat mogelijk de verschillen in berekeningsresultaten tussen verschillende manieren van schematiseren van de 3^e dimensie veroorzaakt. De conclusies en aanbevelingen worden gegeven in Hoofdstuk 8

De beschreven werkzaamheden zijn uitgevoerd door Victor Chavarrias en Theo van der Kaaij. Kwaliteitsborging is verzorgd door Wouter Kranenburg. Namens Rijkswaterstaat is het project begeleid door Martin Scholten, Yann Friocourt en Theo van der Linden.

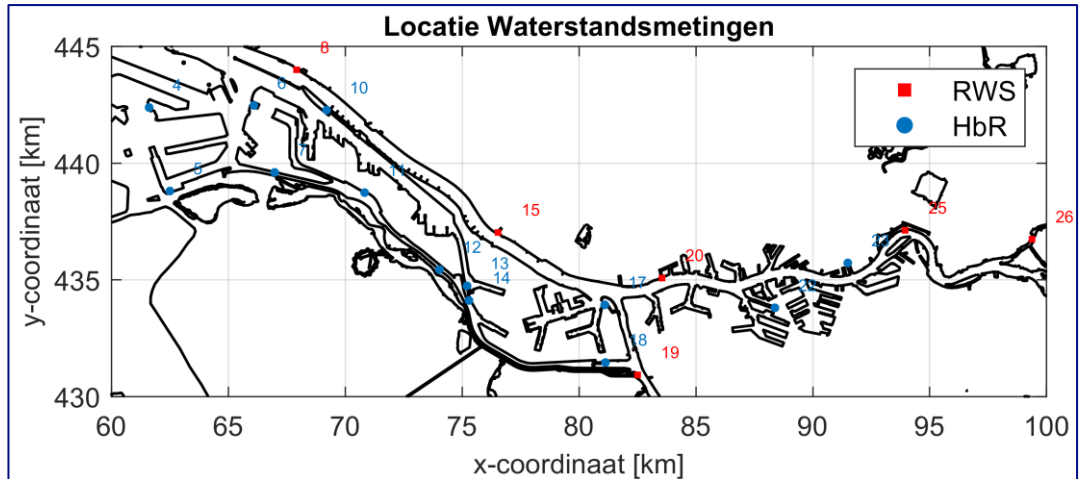
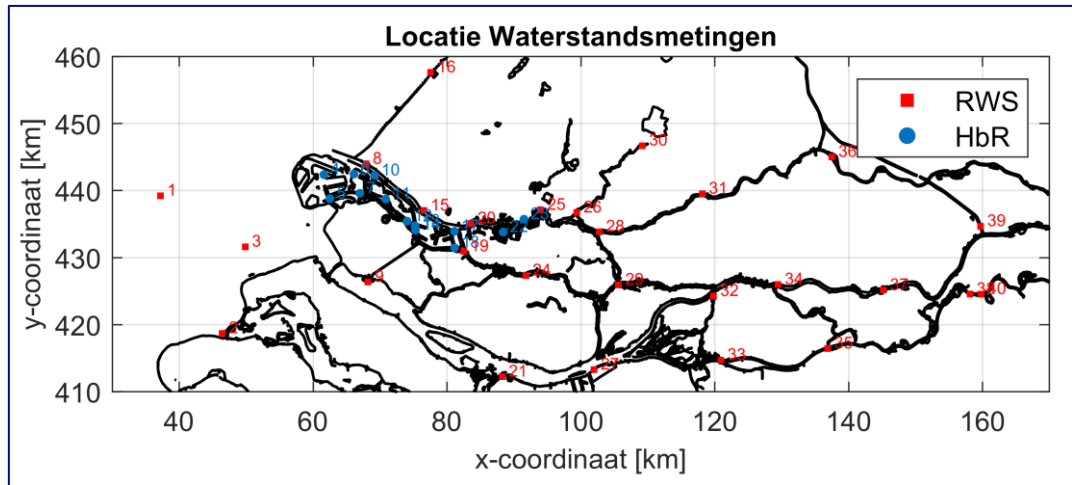
2 Gebruikte meetgegevens en omstandigheden

2.1 Algemeen

Zowel voor de December 2011 berekening als voor de Mei 2011 berekening zijn gebruikt:

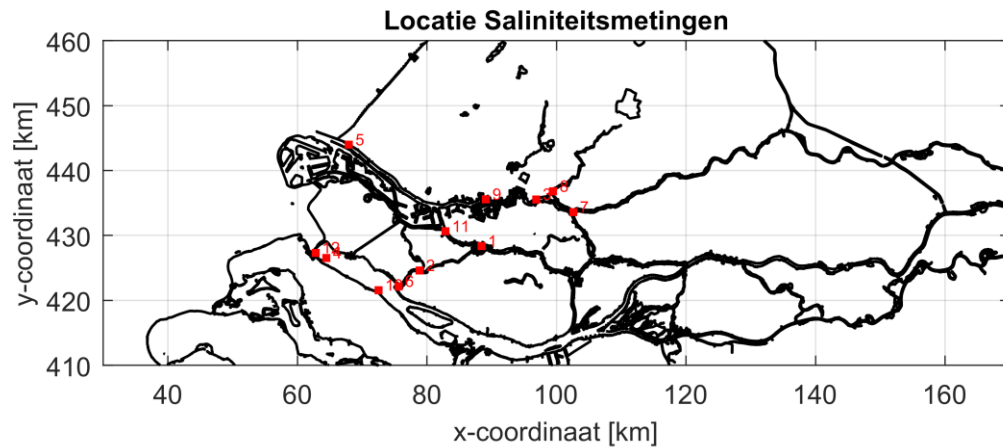
- Tijdreeksen van gemeten waterstanden uit het vaste meetnet van Rijkswaterstaat,
- Tijdreeksen van gemeten waterstanden uit het meetnet van het Havenbedrijf Rotterdam (HBR),
- Tijdreeksen van gemeten saliniteit uit het vaste meetnet van Rijkswaterstaat.

De locaties van in dit rapport gebruikte waterstandsmetingen worden getoond in Figuur 4. Figuur 5 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 4: Locaties waterstandsmetingen (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 5: Locaties saliniteitsmetingen (tijdreeksen)

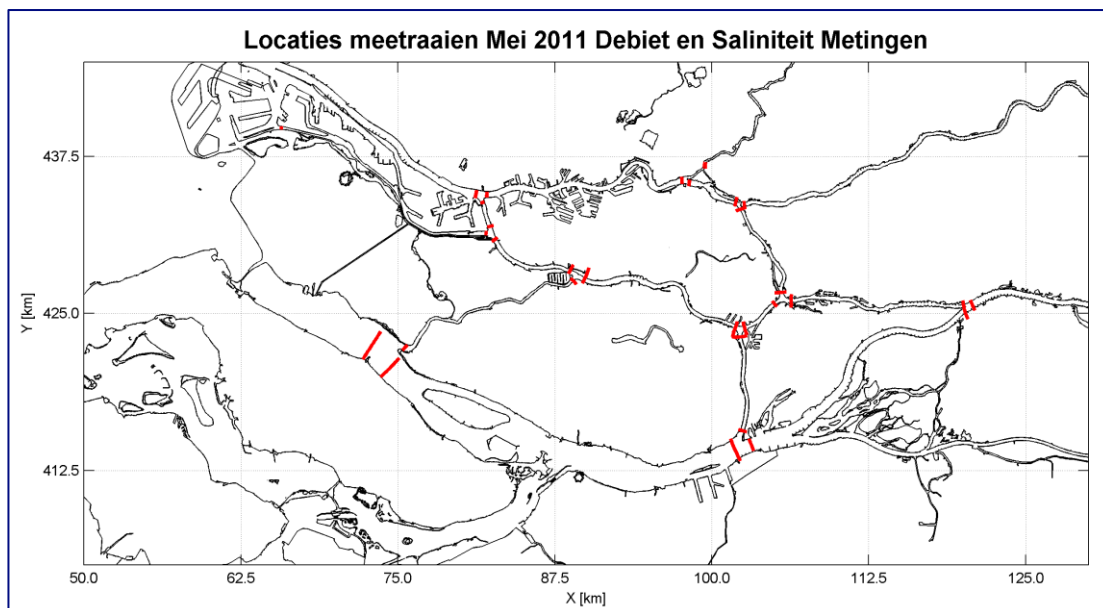
2.2 Specifieke Meetgegevens December 2011

In December 2011 zijn door Rijkswaterstaat een aantal varende metingen uitgevoerd. Gedurende een vaartocht is elke kilometer een saliniteitsprofiel gemeten. De zouttong in de Nieuwe Waterweg, Figuur 2, is het duidelijkst in beeld gebracht gedurende de vaartocht van 5 December 2011. Het gevaren en dus bemeten traject loopt van net stroomopwaarts van de Maeslantkering tot net stroomafwaarts van het splitsingspunt Oude Maas – Nieuwe Maas. Dit is het traject waar de grootste stratificatie optreedt.

Op 7 December 2011 zijn 2 vaartochten uitgevoerd. Beide tochten centreren zich rond het splitsingspunt Oude Maas – Nieuwe Maas. De doelstelling was het effect van instroom van relatief zoet Nieuw Maas water in beeld te brengen.

2.3 Specifieke Meetgegevens Mei 2011

In Mei 2011 zijn de “debieten” en de saliniteiten ter plaatse van de splitsingspunten gemeten gedurende één getijperiode. De locatie van de Mei 2011 meetraaien wordt getoond in Figuur 6.



Figuur 6: Locatie meetraaien Mei 2011 metingen.

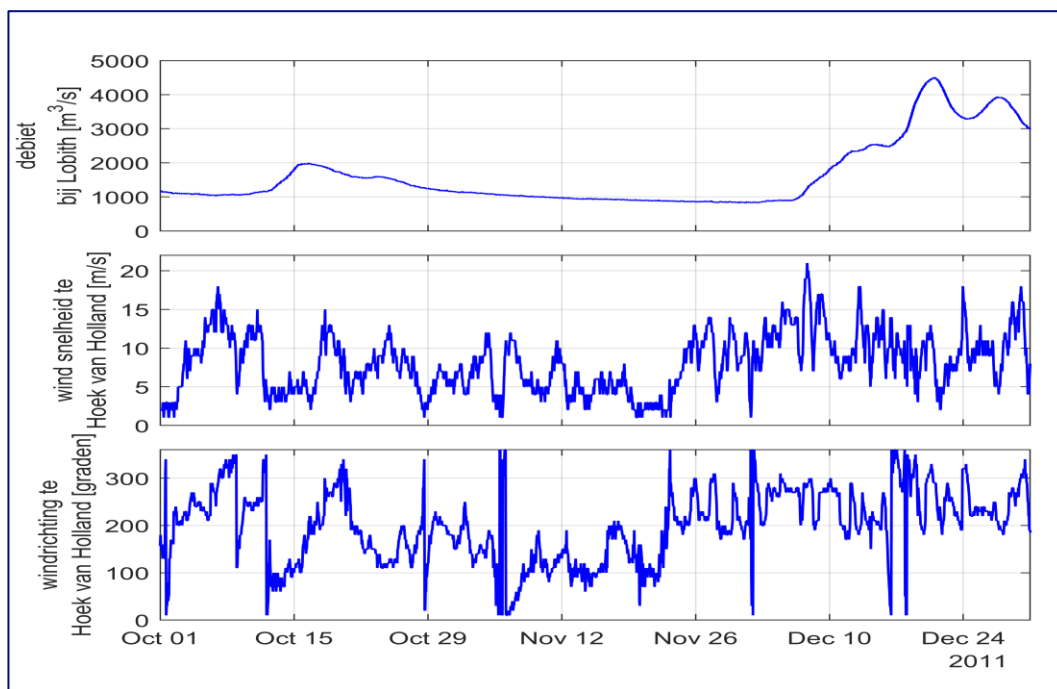
2.4 Omstandigheden December 2011 simulatie

Figuur 7 toont de bovenrijnafvoer te Lobith en de grootte van de gemeten windsnelheid te Hoek van Holland gedurende de gesimuleerde periode.

Voorafgaand aan de meetdag, 5 december 2011, was de bovenrijnafvoer laag. Dit betekent dat de Haringvlietsluizen gesloten waren. Direct na de meetdag neemt de afvoer toe tot een gemiddelde tot hoge afvoer waarbij de haringvlietsluizen deels geopend zijn. De piekafvoer treedt op rond 20 december en is groter dan 4000 m³/s.

Voor het begin van december geldt dat de windsnelheid hoog was. Voor December 2011 geldt dat de windrichting overwegend zuidwestelijk was.

De combinatie van een langdurig lage afvoer voorafgaand aan de meetdag in combinatie met minder goede condities heeft een grote zoutindringing en sterke verzilting stroomopwaarts in het estuarium tot gevolg.



Figuur 7: Bovenrijnafvoer te Lobith en gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland voor Oktober, November en December 2011

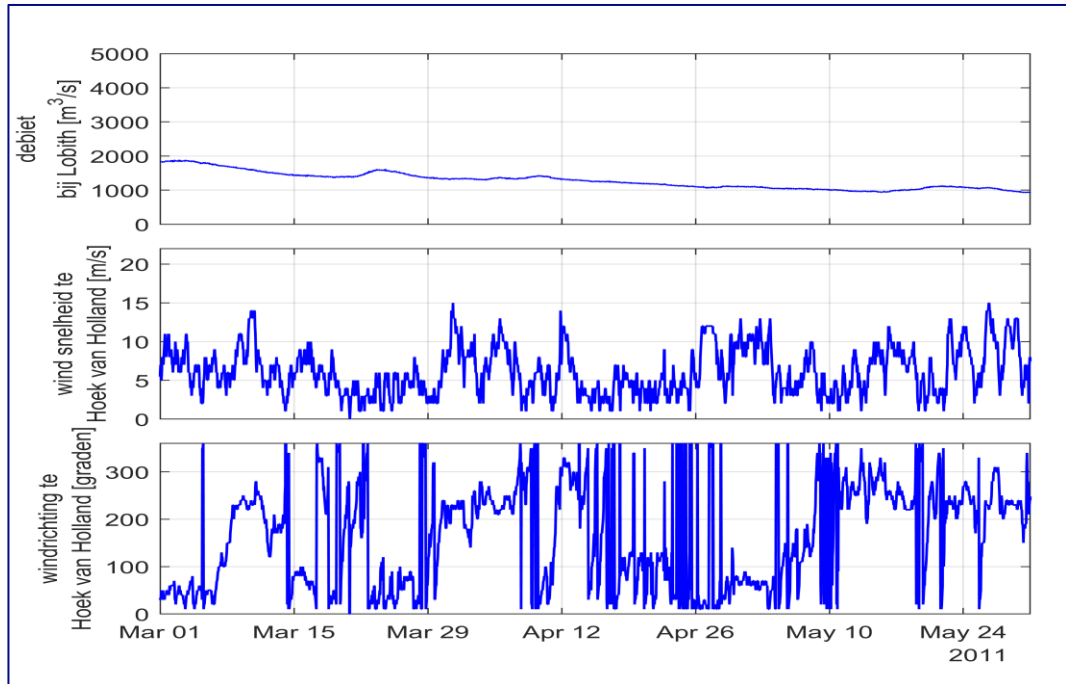
2.5 Omstandigheden Mei 2011 simulatie

Voor de gehele gesimuleerde periode geldt dat de bovenrijnafvoer te Lobith laag is, zie Figuur 8. De Haringvlietsluizen waren dan ook gesloten.

Mei 2011 was een rustiger periode dan December 2011 met aanmerkelijk lagere windsnelheden. Voor mei 2011 geldt dat de windrichting varieert tussen Oostelijk, begin Mei 2011, en Zuidwestelijk, vanaf 10 Mei 2011.

De relatief lage windsnelheid betekent dat de waterstanden in het estuarium veel meer enkel en alleen getijgedomineerd zijn en de windimpact veel geringer is. Dit betekent ook dat stroomopwaarts in het estuarium optredende verzilting enkel en alleen een gevolg is van de lage bovenrijnafvoer terwijl voor December 2011 geldt dat verzilting een gevolg was van lage

rivierafvoer en windopzet op zee. In Mei 2011 was de verzilting dan ook minder dan in December 2011.



Figuur 8: Bovenrijnafvoer te Lobith en gemeten windsnelheid en -richting te Hoek van Holland voor Maart, April en Mei 2011

3 Opzet model

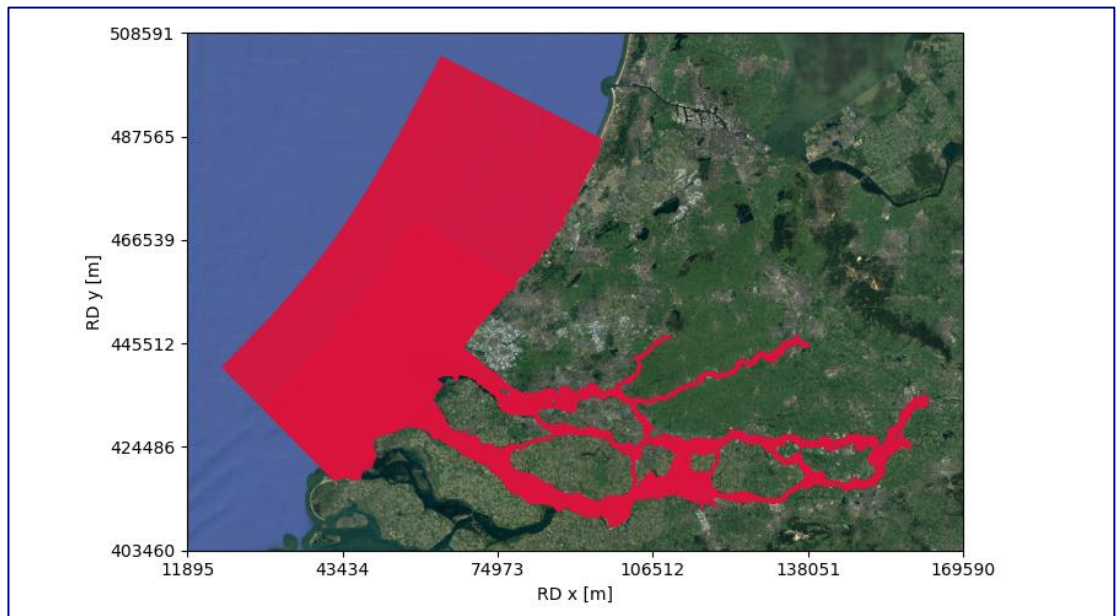
3.1 Algemeen

Het uitgangspunt voor het 3-dimensionale D-HYDRO model van het RMM gebied is het dieptegemiddelde model van dit gebied. De schematisatie en de kalibratieresultaten, de waterstanden en de debieten op de splitsingspunten in het RMM gebied, zijn uitgebreid beschreven in (Veenstra, et al., 2020).

De schematisatie is aangemaakt vanuit de geografische database Baseline6. De schematisatie heeft betrekking op het jaar 2013 en is daarmee een zogenaamde “j13” schematisatie.

3.2 Horizontale rekennetwerk

Het horizontale rekenrooster wordt getoond in Figuur 9 en Figuur 10. De essentie van het netwerk is dat op zee en voor de hoofdgeulen/riviertakken vierkante rekencellen worden gebruikt. Resolutieovergangen, havenbekkens en uiterwaarden worden gemodelleerd middels driehoekige rekencellen.



Figuur 9: Rekenrooster/netwerk RMM model



Figuur 10: Rekenrooster/netwerk RMM model (detail Nieuwe Waterweg)

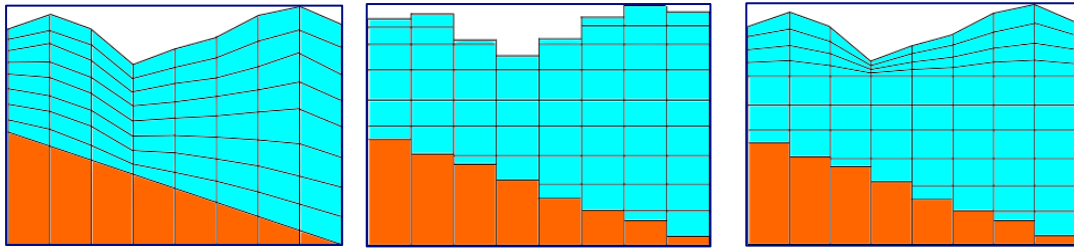
3.3 Het verticale rekenrooster

In een 3-dimensionaal 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 hebben tot doel te komen tot een onderbouwde keuze voor het voor 3-dimensionale D-HYDRO RMM berekeningen te gebruiken type laagverdeling in de verticaal. In eerdere 3-dimensionale modellen van het RMM gebied, zoals bijvoorbeeld het Zeedelta model van Rijkswaterstaat of het Operationeel Stromings Model (OSR) van het Havenbedrijf Rotterdam (HBR) worden zogenaamde sigma (σ) lagen gebruikt. Een sigma laag is een laag met een dikte gelijk aan een percentage van de lokale waterdiepte. Overall in het model is het aantal rekenlagen dus gelijk. Een alternatief voor sigma lagen is een zogenaamde z-lagen verdeling waarbij elke rekenlaag een zekere vaste dikte, bijvoorbeeld 1 meter, heeft. Deze manier van schematiseren betekent dat het aantal rekenlagen varieert over het modelgebied. Diepe gebieden hebben veel rekenlagen en ondiepe gebieden weinig rekenlagen. Een vaste lagen schematisatie wordt veelal toegepast voor watersystemen met weinig dynamiek, i.e. stagnante systemen.

Naast enkel sigma lagen of enkel vaste lagen is recent een combinatie van vaste lagen en sigma lagen in het D-HYDRO rekenhart geïmplementeerd. Hierbij wordt nabij het oppervlak gerekend met sigma lagen en dieper in de verticaal met vaste lagen. Ten opzichte van over de gehele verticaal vaste lagen heeft deze methodiek het voordeel dat het vrije wateroppervlak rekentechnisch makkelijker is af te handelen. Enkel vaste lagen betekent dat bij het wateroppervlak rekenlagen verdwijnen bij dalende waterstanden en erbij komen bij stijgende waterstanden.

Zowel administratief als numeriek is dit erg lastig en foutgevoelig. De verschillende typen laagverdeling worden schematisch getoond in Figuur 11.



Figuur 11: Typen laagverdeling (schematisch); Blauw: Water; Oranje: Bodem; Links sigma (σ -) lagen; Midden vaste (z-) lagen en Rechts sigma (σ -) en vaste (z-) lagen

Waar het berekeningsresultaten saliniteit voor de Nieuwe Waterweg betreft is de ervaring dat bij gebruik van sigma lagen de stratificatie wordt onderschat. Nabij de bodem is de berekende saliniteit laag in vergelijking met gemeten waarden. Indicatieve testberekeningen hebben laten zien dat een vaste-laagschematisatie naar verwachting deze stratificatie beter kan reproduceren.

3.4 Aanpassingen ten opzichte van de dieptegemiddelde schematisatie

Ten opzichte van de dieptegemiddelde schematisatie zijn aangepast:

1. De zomerbedruwheid in de Nieuwe Waterweg. In de dieptegemiddelde schematisatie wordt een eb- en vloed ruwheid gebruikt. De eb ruwheid is fysisch onrealistisch klein, wat een gladde bodem impliceert. Met deze lage ruwheid wordt het effect van stratificatie, geparameteriseerd weliswaar, weergegeven. In de 3-dimensionale schematisatie, waar het effect van stratificatie direct wordt verdisconteerd, is dit niet nodig en wordt dan ook gerekend met een zomerbedruwheid die identiek is voor eb- en vloedstroming. De gebruikte ruwheidswaarde is de waarde voor de vloedruwheid uit de dieptegemiddelde schematisatie omdat deze waarde, in tegenstelling tot de eb-ruwheidswaarde, fysisch wel realistisch is..
2. De horizontale dispersiecoëfficiënt is ruimtelijk uniform en heeft een waarde van 0.1 m²/s. Dit is een heel lage waarde. Effectief betekent dit dat het transport van zout bijna alleen advectioneel transport is.
3. Vorig jaar uitgevoerde berekeningen gaven de indruk dat ter plaatse van de Maeslantkering, in het model opgenomen als "structure", teveel verticale menging optrad. Om deze kunstmatige menging te vermijden zijn zowel de Maeslantkering als de Hartelkering als "structure" uit de schematisatie verwijderd. Wel is de drempel van de zowel de Maeslantkering als de Hartelkering in de bodemschematisatie verwerkt³.

Voor het 3-dimensionale model moet een aantal specifieke 3D parameters gedefinieerd worden. Voor deze parameters zijn de waarden zoals gespecificeerd in (Deltares, 2020), specifiek Tabellen A.2 en A.3, gebruikt. Uitzondering is de verticale achtergronddiffusie die, om de menging te minimaliseren, gelijk aan 0 is verondersteld.

³ "Structures", met name in 3D berekeningen, zijn nog volop in ontwikkeling. Ook tijdens testen met een veel eenvoudiger schematisatie is geconstateerd dat opname als "structure" in de modelschematisatie meer menging dan opname in de bodemhoogte als drempel tot gevolg heeft (Kernkamp, 2020)

Het model berekent waterstanden, stroomsnelheden, saliniteit en temperatuur. Voor temperatuur geldt dat het de achtergrondtemperatuur betreft. De in het RMM gebied aanwezige warmtelozingen zijn niet in de modelschematisatie opgenomen.

Temperatuur heeft, net als saliniteit, een gevolg voor de dichtheid van water. Echter, de dichtheidsverschillen van water als gevolg van saliniteitsverschillen is veel groter dan de dichtheidsverschillen als gevolg van temperatuurverschillen en hebben dan ook veel minder gevolgen voor de waterbeweging. Berekende temperaturen worden in dit rapport dan ook niet vergeleken met metingen van temperatuur. De reden van opname van temperatuur in de modelschematisatie is dat in de toekomst het 3D RMM model wellicht ook ingezet gaat worden om de effecten van thermische lozingen, de verspreiding van warm of koud geloosd water, van bijvoorbeeld energiecentrales of chemische industrie te bepalen (Kaaij, et al., 2017). Gegeven deze (neven-)doelstelling van het model wordt aanbevolen om tijdens de kalibratie van het model, voorzien voor 2021, ook gemeten watertemperaturen te vergelijken met berekende watertemperaturen.

3.5 Randvoorwaarden voor het model

Het RMM model heeft open randen op zee en een drie-tal riviertakken waar het Rijn en Maas water het estuarium instroomt, zie Figuur 9. De open zeerandvoorwaarden zijn gegenereerd met het 3D DCSM-FM model zoals beschreven in (Zijl, et al., 2018). De randvoorwaarden voor de waterbeweging zijn waterstanden ter plaatse van de open zeeranden. Het bleek nodig het gemiddeld zeeniveau volgend uit de 3D DCSM-FM model met ongeveer 5 cm te corrigeren. De reden hiervan is dat met het 3D DCSM-FM model berekende waterstanden nog niet goed gerefereerd zijn aan NAP waardoor een correctie van het gemiddeld niveau noodzakelijk is, zie (Zijl, et al., 2020).

Voor saliniteit en temperatuur worden profielen berekend met het 3D-DCSMFM model ter plaatse van de open zeeranden voorgeschreven.

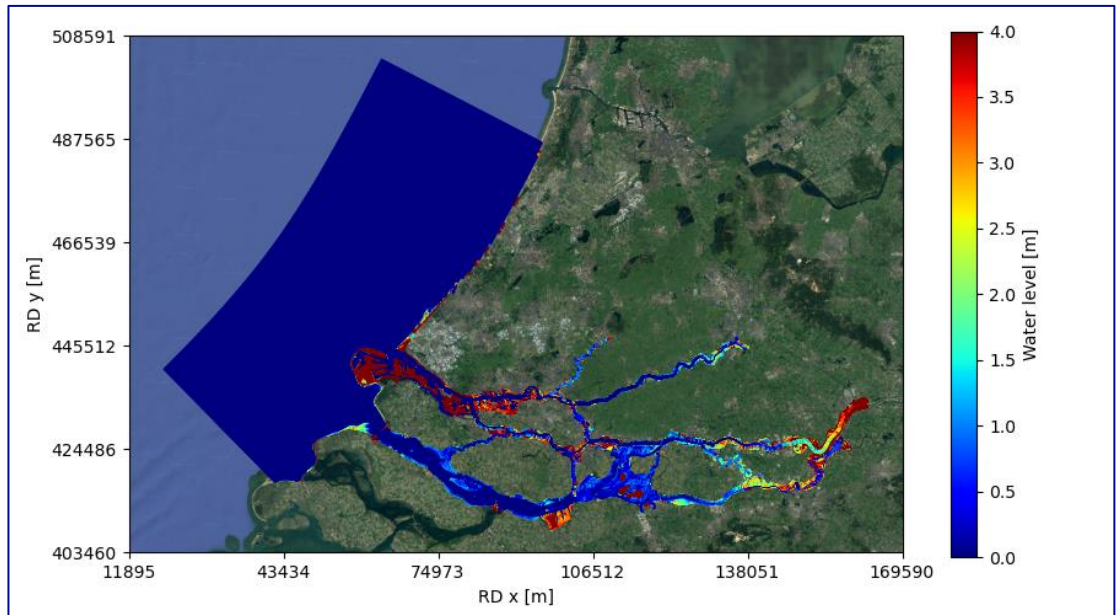
Ter plaatse van de open rivierranden wordt zowel de “gemeten” afvoer als de gemeten saliniteit zoals opgeslagen in de database DONAR voorgeschreven.

3.6 Meteorologische forcering

Net zoals in het dieptegemiddelde model worden windsnelheid en -richting en atmosferische druk ruimtelijk en in de tijd variërend voorgeschreven. Deze grootheden zijn berekend met het HIRLAM model van het KNMI (versie 7.3).

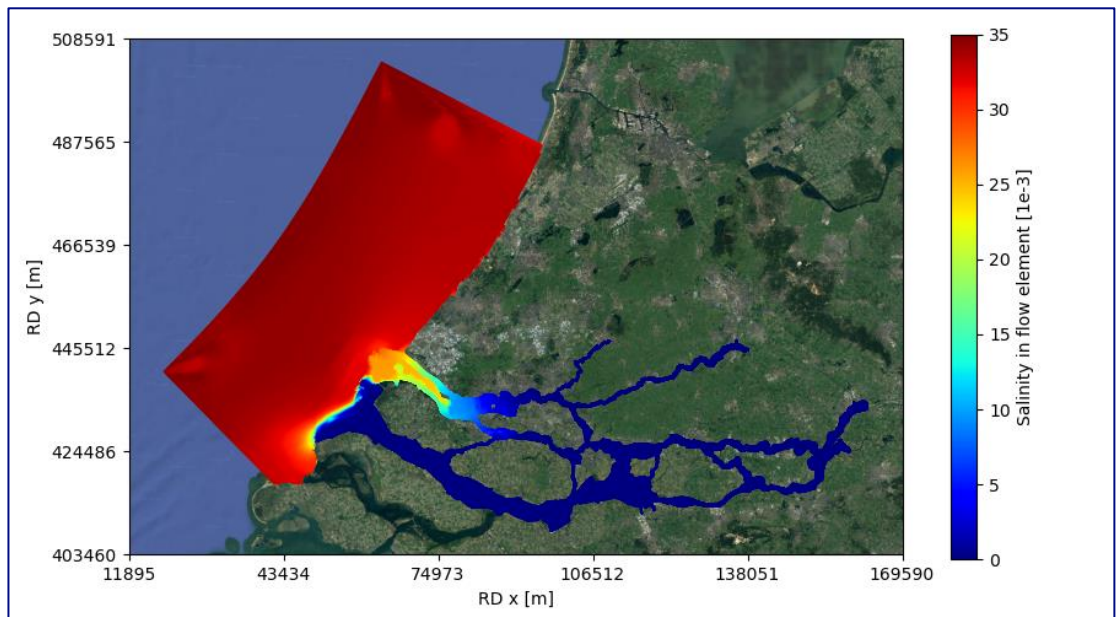
3.7 De initiële condities

Voor waterstand wordt het initiële waterstandsveld zoals gebruikt in het dieptegemiddelde model gebruikt. Dit veld wordt getoond in Figuur 12. De initiële snelheid is gelijk aan 0 m/s.



Figuur 12: Initiële conditie waterstand

Voor saliniteit wordt het diagnostische zoutveld zoals gebruikt in de dieptegemiddelde berekeningen gebruikt, zie Figuur 13. De stratificatie zoals die bijvoorbeeld in de Nieuwe Waterweg optreedt, Figuur 2, wordt gedurende de berekening door het model zelf gegenereerd.



Figuur 13: Initiële conditie (dieptegemiddeld) saliniteit

3.8 Weergave van effecten van turbulentie

Kleinschalige snelheidsfluctuaties, turbulentie, veroorzaken menging van zowel impuls als saliniteit die niet direct door het model worden uitgerekend. De effecten van turbulentie op verticale uitwisselingen worden, geparametriseerd, weergegeven met een turbulentiemodel. Uiteindelijk geeft dit model verticale uitwisselingscoëfficiënten voor impuls (turbulente viscositeit) en saliniteit (turbulente diffusiviteit). Deze coëfficiënten worden in het RMM 3D model uitgerekend met het $k-\epsilon$ turbulentiemodel, zie (Rodi, 1993).

4 Resultaten saliniteit voor verschillende typen laagverdeling (December 2011)

4.1 Wijze van beoordelen

Voor het onderzoek naar het effect van het type laagschematisatie worden berekende saliniteiten vergeleken met profielen gemeten tijdens een varende meting in de Nieuwe Waterweg op 5 december 2011. Naast figuren die kwalitatief tonen hoe de metingen gereproduceerd worden, wordt in tabellen ook een kwantitatieve beoordeling van de uitgevoerde berekeningen gegeven. Voor deze kwantitatieve beoordeling wordt gebruik gemaakt van:

- De dieptegemiddelde waarde van zowel de gemeten als de berekende zoutprofielen. Idealiter zijn deze gemiddelden identiek wat impliceert dat gemiddelde, dieptegemiddelde, zoutindringing in meting en model identiek is.
- De standaardafwijking van zowel de gemeten als de individuele zoutprofielen. De standaardafwijking is een maat voor de variatie rond de gemiddelde waarde en kun je dan ook zien als maat voor de stratificatie⁴.
- De RootMeanSquare waarde van het verschil tussen gemeten en berekend zoutprofiel. Dit kental kan gezien worden als maat voor de weergave van de combinatie van gemiddelde zoutindringing en optredende stratificatie.

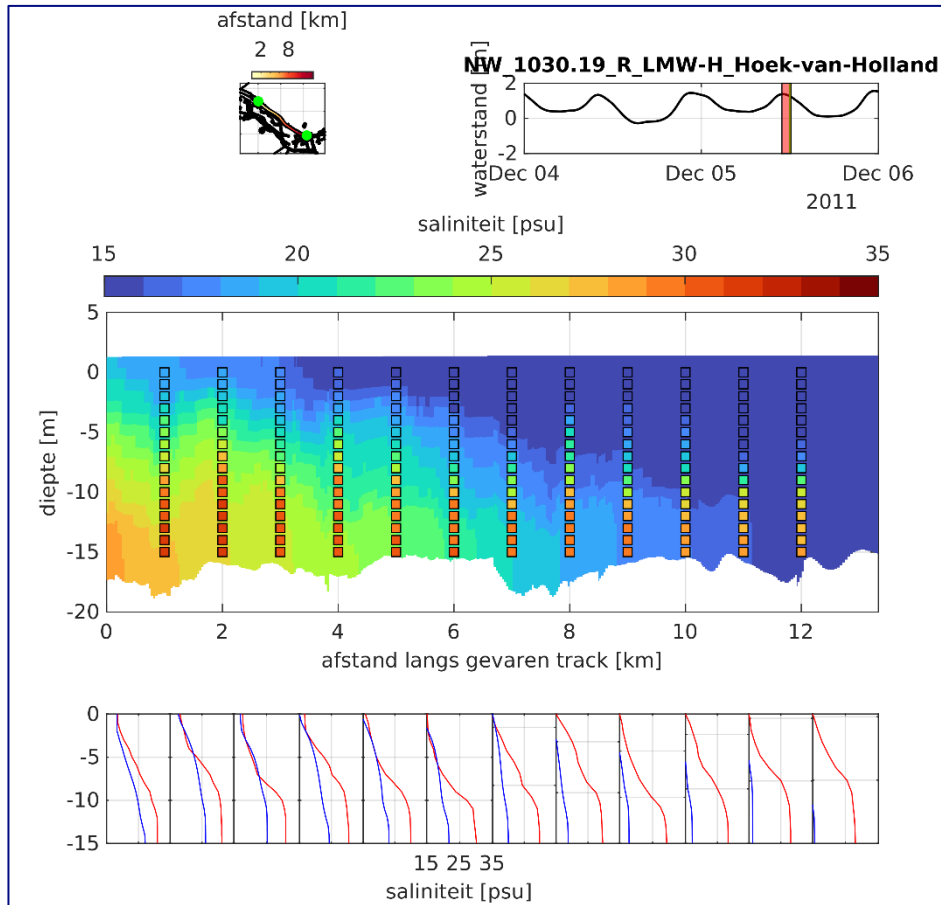
4.2 Sigma (σ -) lagen

In de sigmalagen berekening wordt gebruik gemaakt van 20 rekenlagen elk met een dikte van 5% van de lokale waterdiepte. Voor de Nieuwe Waterweg, met een diepte van ongeveer 16 m, betekent dit een laagdikte van 0.8 m.

Figuur 14 toont de gemeten en de berekende saliniteitsprofielen. De figuur laat duidelijk zien dat de stratificatie zoals die daadwerkelijk optreedt wordt onderschat. Het gemeten verschil in saliniteit tussen oppervlak en bodem is veel groter dan het berekende saliniteitsverschil.

Statistische kentallen behorend bij gemeten en berekende saliniteit en het verschil tussen beiden, Tabel 4-1, onderschrijven de slechte modelreproductie. Het gemiddelde van de gemeten saliniteitsprofielen is structureel groter dan de berekende waarde, met een verschil toenemend in stroomopwaartse richting. De standaardafwijking van de gemeten profielen is structureel groter dan de standaardafwijking van de berekende profielen, eveneens met een in stroomopwaartse richting toenemend verschil. Dit suggereert een onderschatting van de in werkelijkheid optredende stratificatie. De RootMeanSquare (RMS) waarde behorend bij het verschil tussen berekende en gemeten saliniteit, gemiddeld over alle meethoogten en alle profielen, bedraagt 6 psu. Dit kental kan gezien worden als maat voor de gemiddelde "fout" in berekende saliniteit.

⁴ Als maat voor stratificatie zou ook de "salinity variance" gebruikt kunnen worden, (Li, et al., 2018)



Figuur 14: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: sigma (σ -) lagen; Totaal 20 lagen; Profielen: rood gemeten, blauw berekend

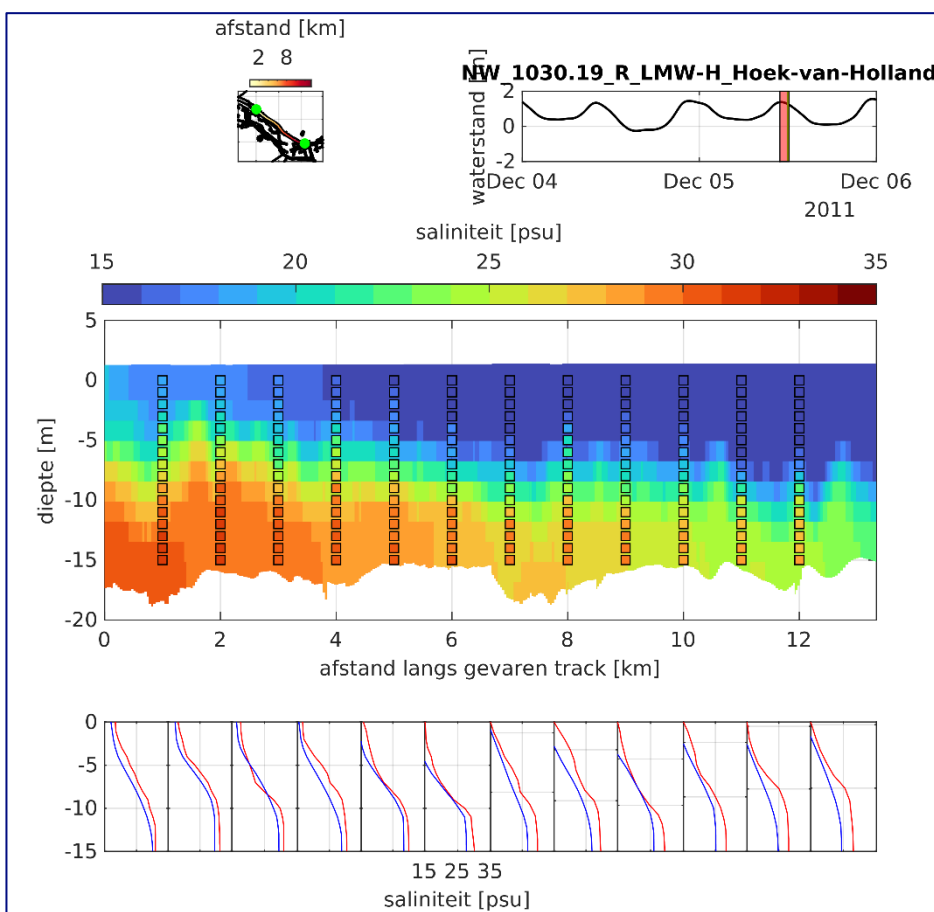
Tabel 4-1: Statistische kentallen Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: sigma (σ -) lagen

Afstand [km]	Gemiddeld [psu]			Standaardafwijking [psu]			Rms[psu]
	Gemeten	Berekend	Vershil	Gemeten	Berekend	Vershil	
1	25.65	22.65	-3.00	4.83	3.26	-1.57	3.40
2	26.16	23.25	-2.91	5.23	2.87	-2.36	3.82
3	24.47	22.06	-2.41	5.50	3.11	-2.39	3.58
4	24.94	20.61	-4.33	5.50	2.98	-2.52	5.06
5	23.54	19.87	-3.67	5.64	2.75	-2.89	4.81
6	22.21	18.59	-3.62	6.08	2.54	-3.54	5.20
7	21.33	16.85	-4.48	6.31	2.49	-3.82	5.91
8	22.65	15.93	-6.72	6.00	2.22	-3.78	7.67
9	21.55	15.61	-5.94	5.68	2.08	-3.60	6.97
10	21.00	14.85	-6.15	5.78	1.86	-3.92	7.26
11	19.94	14.36	-5.58	6.26	1.82	-4.44	7.20
12	19.99	12.98	-7.01	6.33	1.92	-4.41	8.25
Gemiddeld	22.79	18.13	-4.65	5.76	2.49	-3.27	5.76

4.3 Vaste (z-) lagen

Voor de uitgevoerde vaste (z-) lagen berekening zijn 24 rekenlagen gespecificeerd. Dit betekent dat elke rekenlaag een dikte van ongeveer 1.3 m heeft⁵. Voor de Nieuwe Waterweg, met een diepte van ongeveer 16 meter, betekent dit ongeveer 12 actieve rekenlagen.

De vergelijking tussen de gemeten en de berekende saliniteit wordt getoond in Figuur 15. Ondanks dat in de Nieuwe Waterweg de verticale resolutie aanmerkelijk minder is dan in de vergelijkbare sigma laag berekening, paragraaf 4.2, is de reproductie van de gemeten saliniteit aanmerkelijk beter. Statistische kentallen gepresenteerd in Tabel 4-2 onderschrijven deze stelling, zowel de gemiddelde zoutindringing (gemiddelde van gemeten en berekende saliniteitsprofielen), de mate van stratificatie (standaardafwijking van gemeten en berekende saliniteitsprofielen) worden aanmerkelijk beter gereproduceerd. Dit betekent dat ook de gemiddelde “fout” (RMS waarde) aanmerkelijk kleiner is dan in de sigma lagen berekening.



Figuur 15: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: vaste (z-) lagen; Totaal ongeveer 13 actieve rekenlagen(Nieuwe Waterweg); Profielen: rood gemeten, blauw berekend

⁵ De bedoeling was dat de vaste lagen berekening in de Nieuwe Waterweg een laagdikte zou hebben vergelijkbaar met de laagdikte in de sigma (σ -) lagen berekening, i.e. een laagdikte van ongeveer 1 meter. Echter, deze berekening is niet tot een goed einde gekomen. Rond 2 December 2011 werd de berekening instabiel. Het om onverklaarbare redenen “vastlopen” van vaste lagen berekeningen treedt vaker op, zie (Kaaij, et al., 2019).

Tabel 4-2: Statistische kentallen Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: vaste (z-) lagen

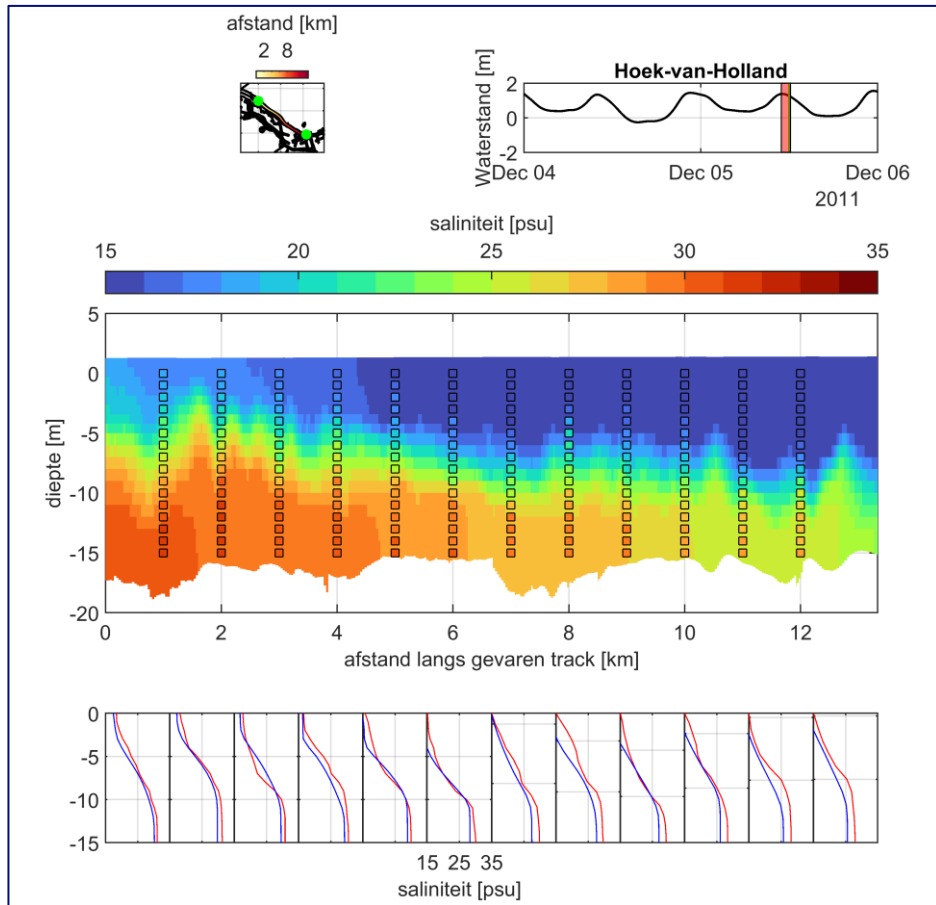
Afstand [km]	Gemiddeld [psu]			Standaardafwijking [psu]			Rms[psu]
	Gemeten	Berekend	Vershil	Gemeten	Berekend	Vershil	
1.00	25.65	23.85	-1.80	4.83	4.97	0.14	1.87
2.00	26.16	24.59	-1.57	5.23	5.18	-0.05	1.60
3.00	24.47	23.68	-0.79	5.50	5.12	-0.38	1.31
4.00	24.94	22.66	-2.28	5.50	5.22	-0.28	2.46
5.00	23.54	22.09	-1.45	5.64	5.79	0.15	1.54
6.00	22.21	20.52	-1.69	6.08	6.03	-0.05	1.82
7.00	21.33	19.26	-2.07	6.31	5.46	-0.85	2.26
8.00	22.65	19.59	-3.06	6.00	5.88	-0.12	3.17
9.00	21.55	19.46	-2.09	5.68	5.68	0.00	2.41
10.00	21.00	18.66	-2.34	5.78	5.58	-0.20	2.43
11.00	19.94	17.30	-2.64	6.26	5.40	-0.86	2.87
12.00	19.99	17.50	-2.49	6.33	5.43	-0.90	2.72
Gemiddeld	22.79	20.76	-2.02	5.76	5.48	-0.28	2.21

4.4 Combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen

De ervaring met berekeningen met enkel vaste lagen is dat de robuustheid van de berekeningen minder is dan de robuustheid van vergelijkbare sigma lagen berekeningen. Dit wordt toegeschreven aan het bewegende vrije wateroppervlak wat in een vaste lagen berekening tot gevolg heeft dat een rekenlaag soms wel en soms ook niet bestaat. Om de robuustheid van vaste lagen berekeningen te verbeteren is recent een combinatie van sigma en vaste lagen in het rekenhart van de D-Hydro software geïmplementeerd. Het bovenste deel van de waterkolom wordt middels sigma lagen en het onderste deel van de waterkolom wordt als vaste lagen afgehandeld. Deze optie beoogt de robuustheid van sigma lagen te combineren met de nauwkeurigheid van vaste lagen.

Figuur 16 toont de resultaten van een berekening waarbij het verticale laagtype een combinatie van sigma en vaste lagen is. Boven de -6 m NAP zijn 8 sigma lagen gespecificeerd. Onder de -6 m NAP wordt een vaste laagdikte van 1 m gehanteerd. Voor de Nieuwe Waterweg betekent dit ongeveer 18 actieve rekenlagen.

Zowel ten opzichte van de sigma lagen berekening gepresenteerd in paragraaf 4.2 als ten opzicht van de vaste lagen berekening gepresenteerd in paragraaf 4.4 is het modelgedrag verder verbeterd, Figuur 16. Dit geldt zowel voor de gemiddelde zoutindringing als de reproductie van de mate van stratificatie. De gemiddelde "fout" bedraagt slechts 1.5 psu, zie Tabel 4-3. Deze verbetering in modelgedrag wordt, in ieder geval deels, veroorzaakt door de hogere verticale resolutie dan de verticale resolutie gebruikt in de berekening met enkel vaste lagen.



Figuur 16: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen; Totaal ongeveer 18 actieve rekenlagen(Nieuwe Waterweg); Profielen: rood gemeten, blauw berekend

Tabel 4-3: Statistische kentallen Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen

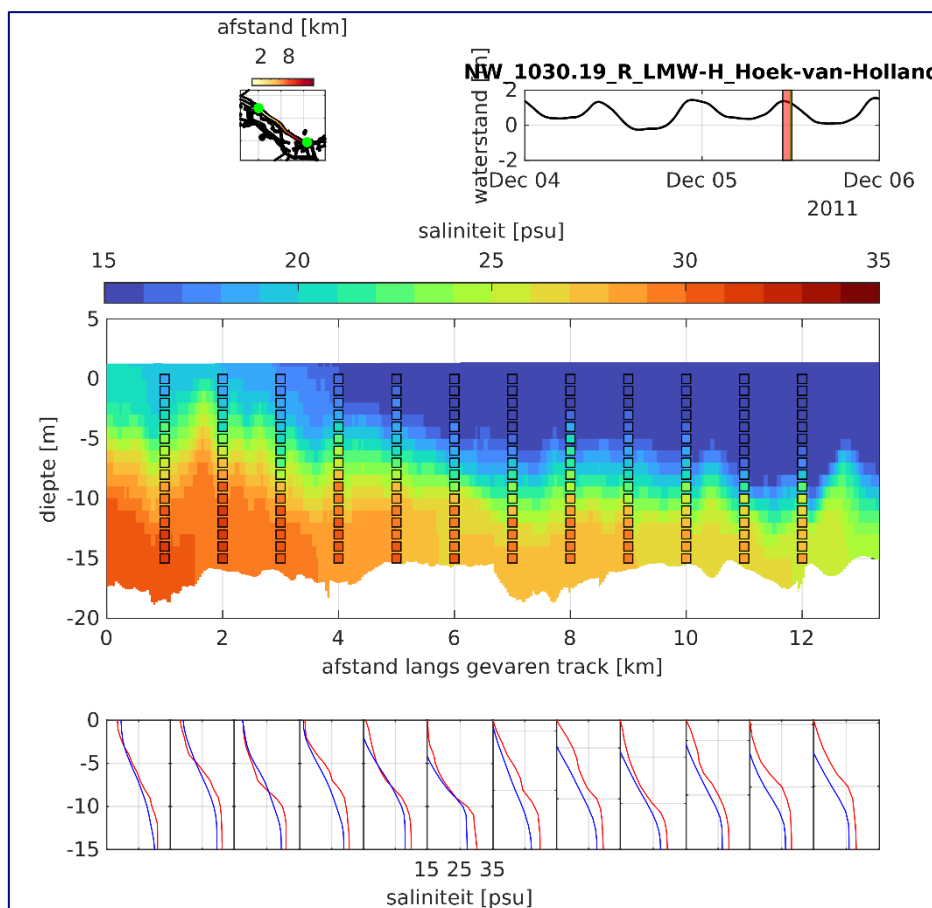
Afstand [km]	Gemiddeld [psu]			Standaardafwijking [psu]			Rms[psu]
	Gemeten	Berekend	Verschil	Gemeten	Berekend	Verschil	
1	25.65	24.63	-1.02	4.83	4.98	0.15	1.08
2	26.16	25.08	-1.08	5.23	5.14	-0.09	1.16
3	24.47	24.37	-0.10	5.50	5.16	-0.34	1.36
4	24.94	23.44	-1.50	5.50	5.33	-0.17	1.65
5	23.54	22.84	-0.70	5.64	5.99	0.35	1.21
6	22.21	21.27	-0.94	6.08	6.16	0.08	1.23
7	21.33	20.04	-1.29	6.31	5.73	-0.58	1.46
8	22.65	20.35	-2.30	6.00	6.14	0.14	2.55
9	21.55	20.09	-1.46	5.68	5.98	0.30	1.86
10	21.00	19.36	-1.64	5.78	5.92	0.14	1.81
11	19.94	17.92	-2.02	6.26	5.73	-0.53	2.17
12	19.99	18.07	-1.92	6.33	5.95	-0.38	2.00
Gemiddeld	22.79	21.45	-1.33	5.76	5.68	-0.08	1.63

4.5 Combinatie sigma (σ -) en vaste (z-)lagen met Maeslant en Hartelkering gemodelleerd als “structure”

Voor de berekeningen gepresenteerd in paragraaf 4.2 - 4.4 zijn zowel de Maeslantkering als de Hartelkering als “structure” uit de schematisatie verwijderd. Beide keringen zijn weergegeven als drempel in de bodemhoogten. Uit het oogpunt van uniformiteit tussen de diepte-gemiddelde schematisatie en de 3D schematisatie van het RMM gebied is het wenselijk beide keringen als “structure” in de modelschematisatie op te nemen, identiek aan de diepte-gemiddelde schematisatie.

Een “structure” wordt rekentechnisch anders afgehandeld dan een aanpassing van de bodemschematisatie. Op een “structure” wordt het debiet bepaald uit het waterstandsverschil boven- en benedenstroom in combinatie met een zogenaamde Q-h relatie. Het aldus berekende debiet wordt verdeeld over de rekenlagen. Bij een aanpassing van de bodemhoogte is het debiet ter plaatse direct een gevolg van de vergelijkingen die worden benaderd, de ondiepwater vergelijkingen. Deze verschillende benaderingsmethoden hebben verschillende berekeningsresultaten tot gevolg.

Het gevolg van opname van de keringen als “structure” wordt getoond in Figuur 17 en cijfermatig gekwantificeerd in Tabel 4-4. Zowel de figuur als de tabel laten zien dat opname van beide keringen als “structure” een vermindering van de reproductie van de zouttong in de Nieuwe Waterweg tot gevolg heeft.



Figuur 17: Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen; Totaal ongeveer 18 actieve rekenlagen(Nieuwe Waterweg); Maeslant en Hartelkering als “structure”; Profielen: rood gemeten, blauw berekend

Tabel 4-4: Statistische kentallen Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 5 December 2011; Verticaal laagtype: combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen; Maeslant- en Hartelkering als "structure

Afstand [km]	Gemiddeld [psu]			Standaardafwijking [psu]			Rms[psu]
	Gemeten	Berekend	Vershil	Gemeten	Berekend	Vershil	
1.00	25.65	24.9	-0.75	4.83	3.92	-0.91	1.24
2.00	26.16	25.32	-0.84	5.23	4.06	-1.17	1.50
3.00	24.47	24.03	-0.44	5.50	4.46	-1.04	1.43
4.00	24.94	23.12	-1.82	5.50	4.82	-0.68	2.04
5.00	23.54	22.29	-1.25	5.64	5.5	-0.14	1.53
6.00	22.21	20.42	-1.79	6.08	5.88	-0.20	1.97
7.00	21.33	19.18	-2.15	6.31	5.35	-0.96	2.41
8.00	22.65	19.62	-3.03	6.00	6.11	0.11	3.18
9.00	21.55	19.38	-2.17	5.68	5.9	0.22	2.30
10.00	21.00	18.69	-2.31	5.78	5.83	0.05	2.34
11.00	19.94	17.09	-2.85	6.26	6.06	-0.20	3.01
12.00	19.99	17.01	-2.98	6.33	6.28	-0.05	3.10
Gemiddeld	22.79	20.92	-1.87	5.76	5.35	-0.41	2.17

4.6 Conclusies effect verticale type laagverdeling

In dit hoofdstuk is de impact van het type verticale laagverdeling op de zoutindringing in de Nieuwe Waterweg onderzocht. De zoutindringing is een gevolg van de "gravitational circulation" zoals schematisch weergegeven in Figuur 3. Deze circulatie is het mechanisme dat zoutindringing in het estuarium veroorzaakt, en is dus het mechanisme dat in tijden van droogte voor problemen bij innamepunten van zoet water veroorzaakt. Voor een voorspellend model, waarmee ook de effecten van voorziene ingrepen in het systeem moeten kunnen worden gekwantificeerd, is dit dus ook het mechanisme dat juist moet worden weergegeven. Deze "gravitational circulation" heeft een zouttong tot gevolg.

Uit de vergelijking tussen gemeten en berekende zoutprofielen volgt dat het goed weergegeven van de zouttong enkel en alleen mogelijk is bij gebruik van vaste lagen. Vanuit het oogpunt van robuustheid heeft de combinatie van sigma lagen bij het oppervlak en vaste lagen bij de bodem de voorkeur. Met dit type laagverdeling wordt een goede reproductie van de 5 december 2011 gemeten saliniteitsprofielen bewerkstelligt.

Opname van de Maeslant- en Hartelkering als "structure" in de schematisatie heeft een verslechtering van de reproductie van deze metingen tot gevolg.

Naast de varende meting van 5 december 2011 zijn andere (saliniteits-)metingen beschikbaar voor de gesimuleerde periode. In hoofdstuk 5 worden deze overige metingen vergeleken met berekeningsresultaten van de sigma (σ -) - vaste (z-) lagen berekening.

5 Overige berekeningsresultaten voor verticale laagverdeling met combinatie sigma (σ -) en vaste (z-) lagen.

5.1 Algemeen

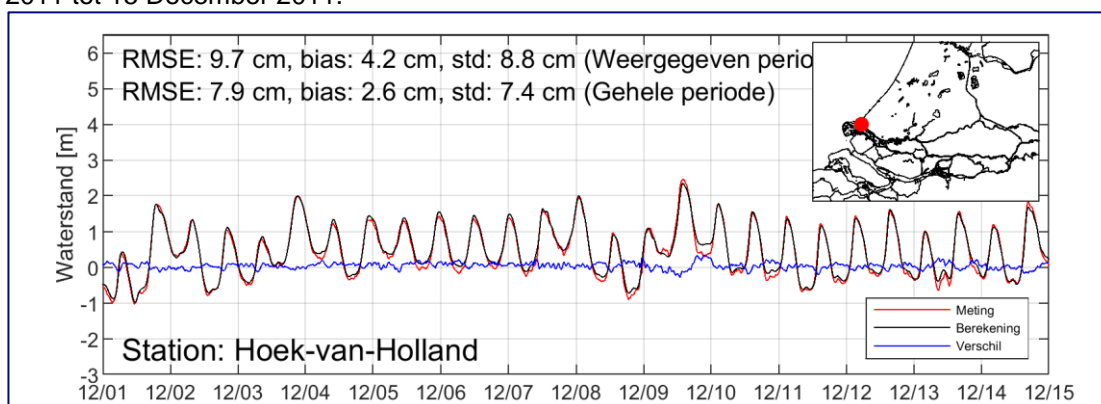
In Hoofdstuk 4 van dit rapport zijn varende metingen van 5 December 2011 vergeleken met berekeningsresultaten voor verschillen typen verticale laagverdeling. In dit hoofdstuk worden overige metingen, waterstand, andere gevaren tracks, saliniteit bij vaste meetpunten, vergeleken met berekeningsresultaten van de berekening waarbij als verticaal laagtype een combinatie van sigma (σ -) en vaste (z-) lagen is gebruikt. Het betreft dus de berekening zoals gepresenteerd in paragraaf 4.4.

5.2 Waterstanden

De meerwaarde van drie-dimensionaal rekenen ten opzichte van twee-dimensionaal dieptegemiddeld is het kunnen weergeven van saliniteits- (en snelheids-) verschillen over de verticaal. Voor het voorspellen van waterstanden is drie-dimensionaal rekenen niet nodig. Voor waterstand gerelateerde vragen kan dus worden volstaan met het dieptegemiddelde model zoals beschreven in (Veenstra, et al., 2020). Voor dit diepte-gemiddelde model geldt dat de bodemwrijving is geoptimaliseerd om de gemeten waterstanden, zo goed als mogelijk, te reproduceren. Dit betekent dat kleine, 3D effecten worden verdisconteerd in deze geoptimaliseerde bodemwrijving. De diepte-gemiddelde bodemwrijving wordt ook gebruikt in de 3D berekeningen (met uitzondering van de diepte-gemiddelde eb ruwheid in de Nieuwe Waterweg).

De kwaliteit van de waterstandsvoorspelling is momenteel niet het primaire beoordelingscriterium voor 3D-modelresultaten. Het is echter wel van belang een goed beeld te hebben van de mate waarin het 3D-model ook de waterstanden reproduceert. Verder is het denkbaar dat in de toekomst operationele voorspellingen, ook van waterstanden, met het 3-dimensionale model uitgevoerd gaan worden. Daarom volgt hieronder een data-modelvergelijking voor waterstanden.

Als voorbeeld van de vergelijking tussen de gemeten en de berekende waterstanden toont Figuur 18 de gemeten waterstanden, de berekende waterstanden en het verschil tussen gemeten en berekende waterstanden voor meetstation Hoek van Holland, periode 1 December 2011 tot 15 December 2011.



Figuur 18: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Hoek van Holland

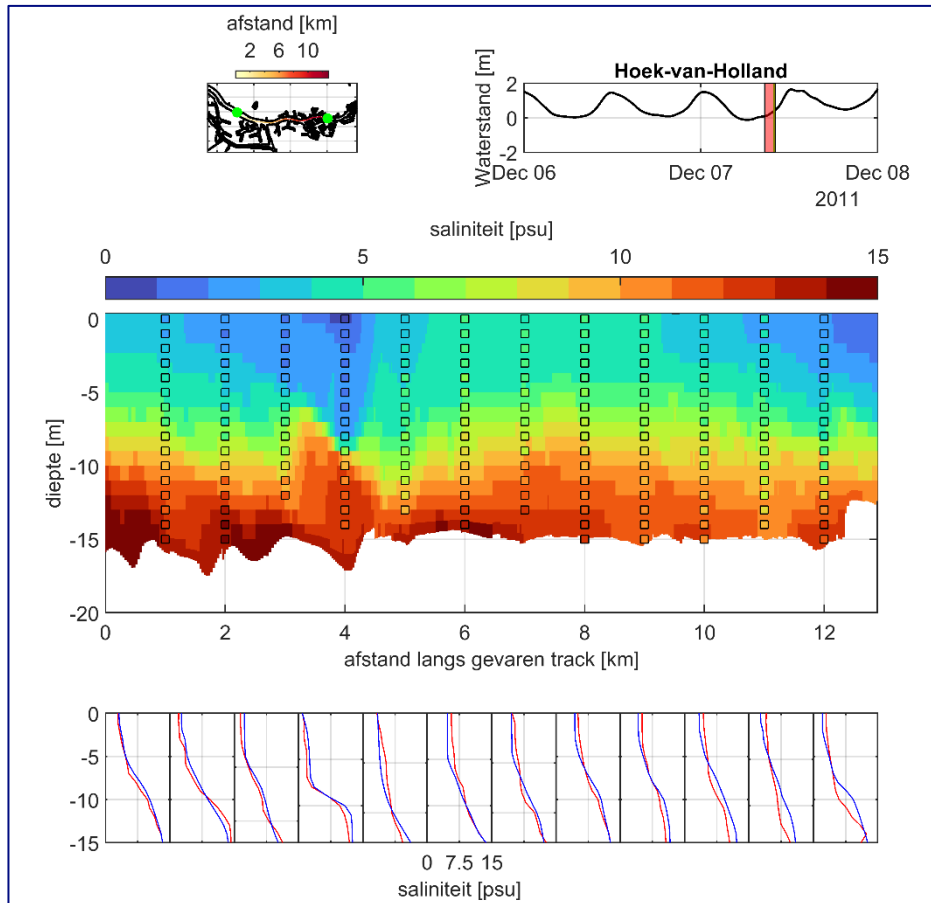
In Appendix A worden alle met het 3D RMM model berekende model waterstanden vergeleken met gemeten waterstanden voor deze periode.

Een directe vergelijking tussen de waterstandsreproductie van het dieptegemiddelde model en de waterstandsreproductie van het drie-dimensionale model is niet mogelijk omdat December 2011 niet is gesimuleerd met het diepte-gemiddelde model. Op basis van andere perioden zijn gesimuleerd met het diepte-gemiddelde model, zie (Veenstra, et al., 2020), lijkt het of de waterstandsreproductie van het diepte-gemiddelde model iets beter is dan de waterstandsreproductie van het drie-dimensionale model. Deze kleine achteruitgang in kwaliteit is logisch omdat het dieptegemiddelde model is gekalibreerd op een zo juist mogelijke weergave van de gemeten waterstanden.

5.3 Stratificatie in de nieuwe Waterweg

In Hoofdstuk 4 van dit rapport zijn varende metingen van 5 December 2011 vergeleken met berekeningsresultaten. Naast een meting op 5 december zijn ook een twee-tal tracks gevaren op 7 December 2011. Het betrof hier vaartochten met een lengte van ongeveer 12 km over Nieuwe Waterweg, voorbij het splitsingspunt met de Oude Maas en vervolgens over de nieuwe Maas. De tijdens deze vaartochten gemeten saliniteit wordt getoond in Figuur 19 en Figuur 20. Statistische kentallen behorend bij zowel de gemeten als de berekende saliniteit, en het verschil tussen de gemeten en de berekende saliniteit, worden gegeven in Tabel 5-2 en Tabel 5-3

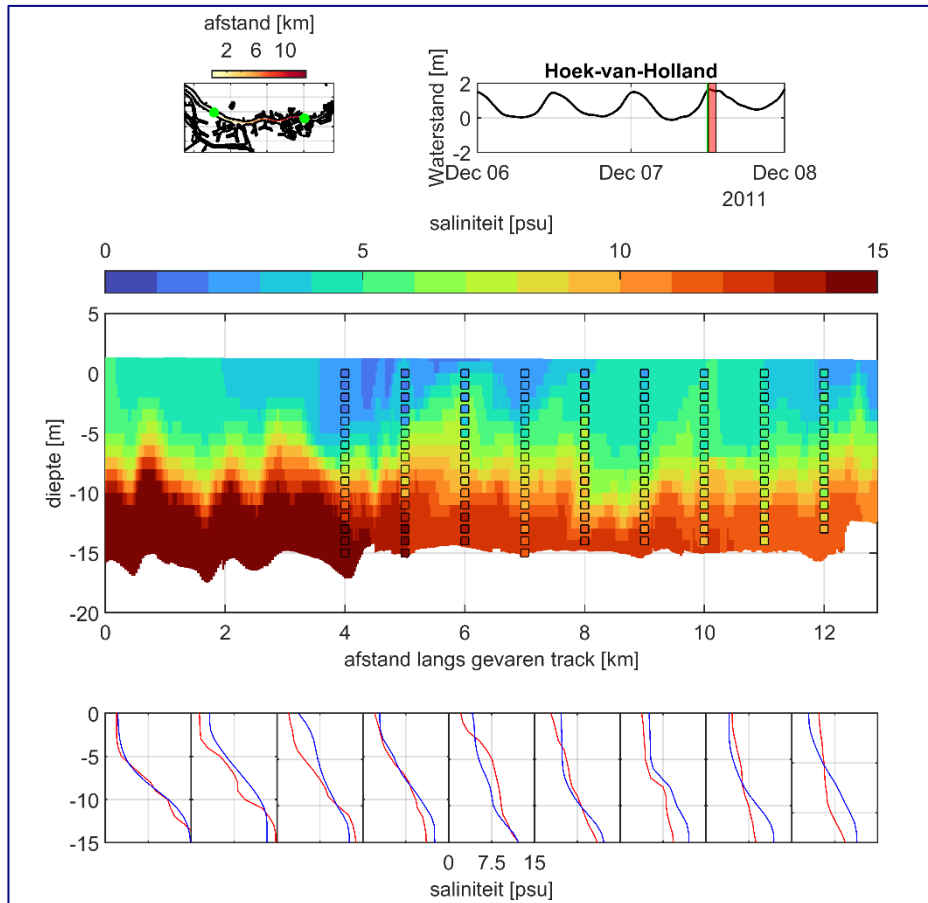
Zowel de meting als de berekening laten duidelijk een relatief zoete instroom vanuit de Oude maas zien (km 4 en 5 in Figuur 19 en Figuur 20). Verder tonen de figuren dat de gemeten stratificatie in de modelberekening wordt overschat, met name meer stroomopwaarts op de Nieuwe Maas.



Figuur 19: Gemeten en berekende saliniteit; track splitsingspunt Oude Maas en Nieuwe Maas; 7 December 2011 10 uur; ongeveer opkomend tij; Profielen: rood gemeten, blauw berekend

Tabel 5-1: Statistische kentallen Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 10 uur; ongeveer opkomend tij;

Afstand [km]	Gemiddeld [psu]			Standaardafwijking [psu]			Rms[psu]
	Gemeten	Berekend	Vershil	Gemeten	Berekend	Vershil	
1	7.30	7.76	0.46	3.81	3.79	-0.02	0.60
2	7.02	7.12	0.10	4.80	4.01	-0.79	0.88
3	4.97	5.39	0.42	3.38	2.95	-0.43	0.75
4	5.18	5.89	0.71	4.53	4.76	0.23	0.82
5	5.87	5.63	-0.24	1.77	2.53	0.76	0.99
6	8.10	7.47	-0.63	2.55	3.06	0.51	0.85
7	7.59	7.55	-0.04	2.55	2.97	0.42	0.80
8	8.14	8.09	-0.05	2.73	3.22	0.49	0.71
9	7.54	7.66	0.12	2.21	3.03	0.82	0.82
10	6.88	7.39	0.51	2.29	3.32	1.03	1.25
11	5.92	6.54	0.62	1.77	2.97	1.20	1.43
12	5.97	6.51	0.54	3.22	3.98	0.76	1.44
Gemiddeld	6.71	6.92	0.21	2.97	3.38	0.42	0.95



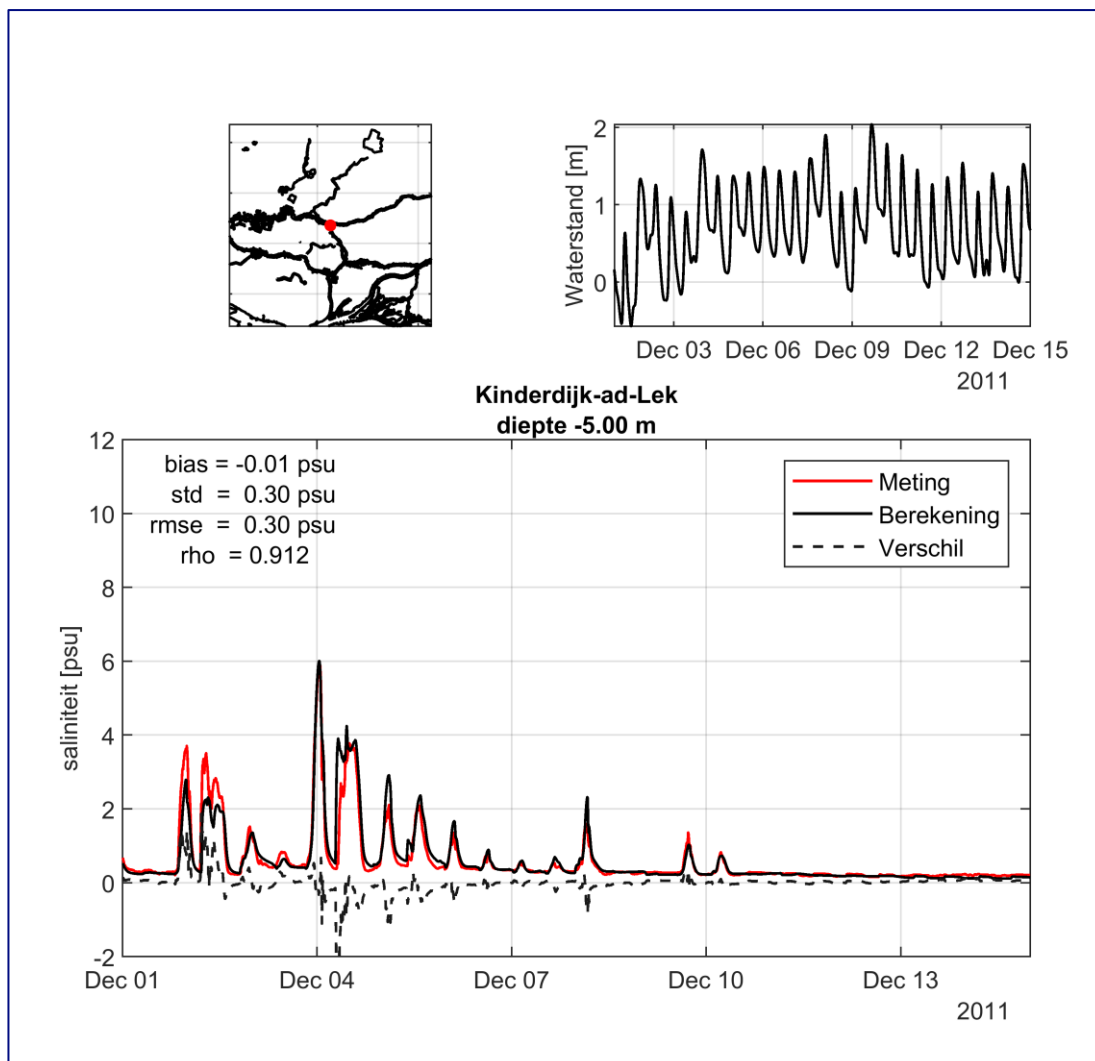
Figuur 20: Gemeten en berekende saliniteit; track splitsingspunt Oude Maas en Nieuwe Maas; 7 December 2011 12 uur; ongeveer hoog water; Profielen: rood gemeten, blauw berekend

Tabel 5-2: Statistische kentallen Gemeten en berekende zoutprofielen Nieuwe Waterweg; 12 uur; ongeveer hoog water;

Afstand [km]	Gemiddeld [psu]			Standaardafwijking [psu]			Rms[psu]
	Gemeten	Berekend	Vershil	Gemeten	Berekend	Vershil	
4	7.30	7.44	0.14	5.27	5.14	-0.13	0.69
5	7.02	8.37	1.35	5.10	4.13	-0.97	1.53
6	4.97	8.09	3.12	4.41	3.22	-1.19	1.64
7	5.18	7.40	2.22	3.33	3.72	0.39	0.80
8	5.87	6.77	0.90	3.07	2.57	-0.50	1.55
9	8.10	6.81	-1.29	2.54	2.68	0.14	0.95
10	7.59	7.73	0.14	2.16	2.77	0.61	1.64
11	8.14	6.81	-1.33	1.42	3.02	1.60	1.66
12	7.54	6.76	-0.78	1.42	3.22	1.80	2.04
Gemiddeld	6.86	7.35	0.50	3.19	3.39	0.19	1.39

5.4 Saliniteit ter plaatse van de vaste meetpunten

Het belang van saliniteit betreft vooral de saliniteit ter plaatse van zoet water innamepunten. Het meest stroomopwaartse meetpunt dat is verzilt in december 2011 is Kinderdijk. De gemeten saliniteit te Kinderdijk wordt vergeleken met de berekende saliniteit in Figuur 21. Zowel de momenten van verzilting, i.e. een saliniteit groter dan de achtergrondwaarde en dus zout afkomstig uit zee, als de grootte van de saliniteit worden erg goed voorspeld door het model.



Figuur 21: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Kinderdijk

In appendix C wordt de gemeten saliniteit op alle meetpunten vergeleken met de berekende saliniteit. Ten behoeve van het kwantificeren van het modelgedrag met betrekking tot saliniteitsreproductie, geeft Tabel 5-3 een aantal statistische kentallen, te weten:

- De bias of het gemiddelde verschil behorend bij de reeks “gemeten saliniteit – berekende saliniteit”,
- De standaardafwijking, STD, behorend bij de reeks “gemeten saliniteit – berekende saliniteit”,
- De RMSE waarde behorend bij de reeks “gemeten saliniteit – berekende saliniteit”.

Deze drie parameters zijn “absolute” kentallen. Echter een saliniteitsverschil van 1 psu te Hoek van Holland heeft een andere betekenis waar het saliniteitsreproductie betreft dan een saliniteitsverschil van 1 psu te Kinderdijk. Vandaar dat naast deze absolute kentallen ook de correlatie, $R(ho)$, tussen de berekende en de gemeten saliniteit is bepaald als “relatieve” maat voor de mate waarin de metingen gereproduceerd worden. De definitie van deze coëfficiënt en een omschrijving van de betekenis ervan is gegeven in Appendix D.

Tabel 5-3: Statistische kentallen saliniteitsreproductie bepaald voor periode van 1 tot 15 December 2011

Meetlocatie	Meetdiepte	Bias [PSU]	STD [PSU]	RMS [PSU]	$R(ho)$ [-]
Hoek-van-Holland	z = -2.50 m	1.80	2.36	2.97	0.96
	z = -4.50 m	2.05	2.23	3.02	0.97
	z = -9.00 m	-2.77	4.61	5.38	0.85
Lekhaven	z = -2.50 m	0.27	0.81	0.85	0.94
	z = -5.00 m	0.22	0.83	0.86	0.96
	z = -7.00 m	0.34	1.00	1.05	0.97
Brienoordbrug	z = -2.50 m	0.01	0.48	0.48	0.94
	z = -6.50 m	-0.07	0.59	0.59	0.95
Krimpen aan de IJssel	z = -4.00 m	-0.07	0.34	0.35	0.81
	z = -5.50 m	0.05	0.62	0.62	0.76
Kinderdijk aan de Lek	z = -5.00 m	-0.01	0.30	0.30	0.91
Spijkenissebrug	z = -2.50 m	0.28	1.16	1.19	0.96
	z = -4.50 m	0.33	1.43	1.47	0.95
	z = -9.00 m	-1.55	2.00	2.53	0.95
Beerenplaat-g6	z = -2.00 m	0.00	0.85	0.85	0.95
Bernisse/Zuidland	z = -3.00 m	0.22	0.62	0.66	0.70
Gemiddeld		0.07	1.26	1.45	0.91

In het algemeen is de overeenstemming tussen meting en berekening erg goed te noemen. Wat wellicht beter kan is:

- De stratificatie te Hoek van Holland. In de bovenste helft van de waterkolom is de meting vaak zouter, positieve bias, dan de berekening en in de onderste helft van de waterkolom is de meting vaak zoeter, negatieve bias, dan de berekening. Dit lijkt zich vooral tijdens laagwater te manifesteren. Het model lijkt dus meer gestratificeerd te zijn dan de metingen. Opgemerkt moet worden dat zoutmeetlocatie Hoek van Holland in het model ondieper is dan in werkelijkheid. Aangezien dit de analyse van verschillen tussen meting en berekening bemoeilijkt, wordt aanbevolen dit in Baseline te corrigeren.
- Ook voor meetlocatie Spijkenissebrug geldt dat het model, gemiddeld gesproken, wat meer gestratificeerd lijkt te zijn dan de metingen.
- Te Krimpen aan de IJssel is in de meting minder getij-invloed te zien dan in de berekening na 6 December 2011.
- Te Zuidland wordt de eerste verziltingspiek gemist in de modelberekening, en de twee daaropvolgende pieken wel weergegeven door het model, maar de gemeten saliniteit is hoger dan de berekende saliniteit.

5.5 Restsnelheden op zee

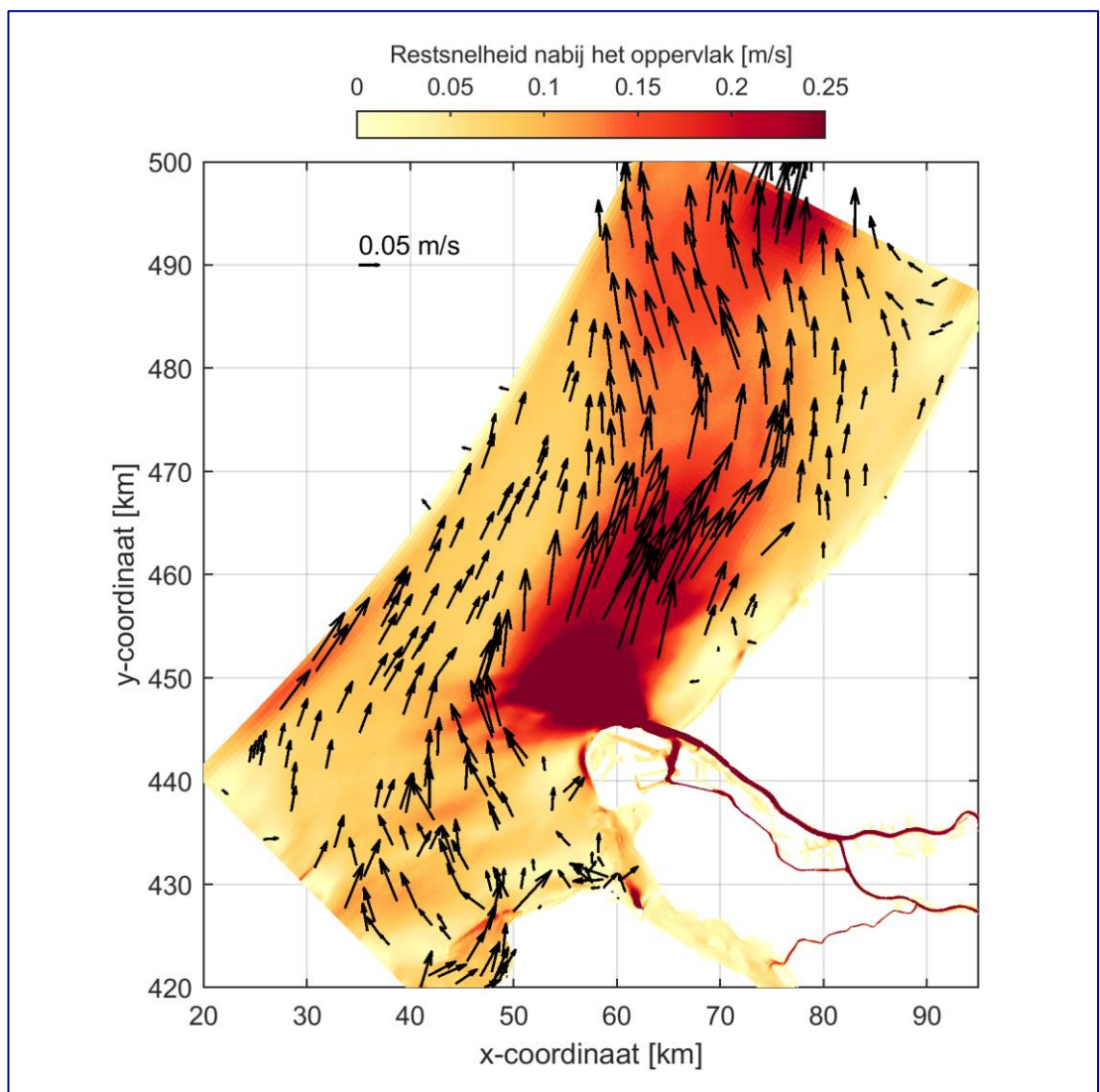
Tijdens de eb periode wordt het zoete rivierwater door de monding van de Nieuwe Waterweg geloosd in de Noordzee. Na kentering, tijdens de daaropvolgende vloedperiode, wordt een deel van dit relatief zoete rivierwater terug getransporteerd de nieuwe Waterweg in. De exacte hoeveelheid hangt af van:

- De menging op zee, zowel horizontaal als verticaal, en,
- Het transport op zee.

Waar het dit transport op zee betreft is bekend dat de netto restsnelheid, van Zuidwest naar Noordoost, ongeveer 4 – 7 cm/s bedraagt (Giesen, et al., 1990).

Het berekende restsnelheidspatroon nabij het water oppervlak wordt getoond in Figuur 22.

Zowel de richting, overwegend van Zuidwest naar Noordoost, als de grootte van de berekende restsnelheden, ongeveer 0.05 – 0.15 m/s, is in overeenstemming met wat uit metingen is afgeleid.



Figuur 22: Berekende restsnelheden nabij het oppervlak; December 2011

6 Berekeningsresultaten mei 2011

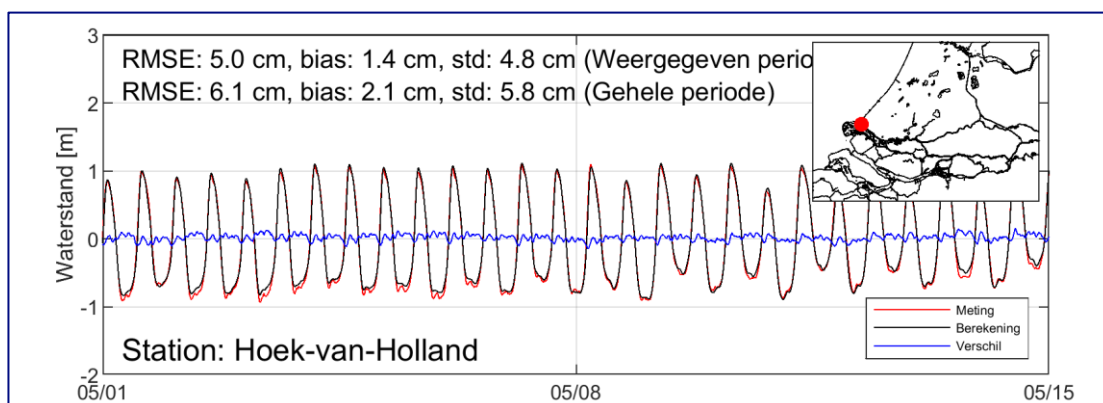
6.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden resultaten beschreven van een berekening voor Mei 2011. Deze periode is gekozen omdat in deze maand op verschillende splitsingspunten in het gebied de stroomsnelheden zijn gemeten waaruit debieten zijn afgeleid. Naast deze debieten worden ook gemeten waterstanden en gemeten saliniteit op de vaste meetlocaties vergeleken met berekeningsresultaten.

De modelinstellingen zijn identiek aan de instellingen zoals beschreven in Hoofdstuk 3. Het gebruikte verticale laagtype is de combinatie van sigma (σ -) en vaste (z-) lagen zoals gebruikt voor de berekening beschreven in paragraaf 4.4 en Hoofdstuk 5

6.2 Waterstanden

Als voorbeeld van de vergelijking tussen de gemeten en de berekende waterstanden toont Figuur 18 de gemeten waterstanden, de berekende waterstanden en het verschil tussen gemeten en berekende waterstanden voor meetstation Hoek van Holland, periode 1 Mei 2011 tot 15 Mei 2011.



Figuur 23: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Hoek van Holland

In Appendix E worden alle met het 3D RMM model berekende model waterstanden vergeleken met gemeten waterstanden voor deze periode. De reproductie is wat beter dan de reproductie van de gemeten waterstanden gedurende December 2011. Dit is een gevolg van de lagere windsnelheden in Mei 2011 waardoor de optredende waterstanden bijna enkel en alleen een gevolg zijn van het getij op zee en de bovenrijnafvoer. De “fout” in waterstandsreproductie als gevolg van de “fout” in reproductie van de windopzet valt dus weg.

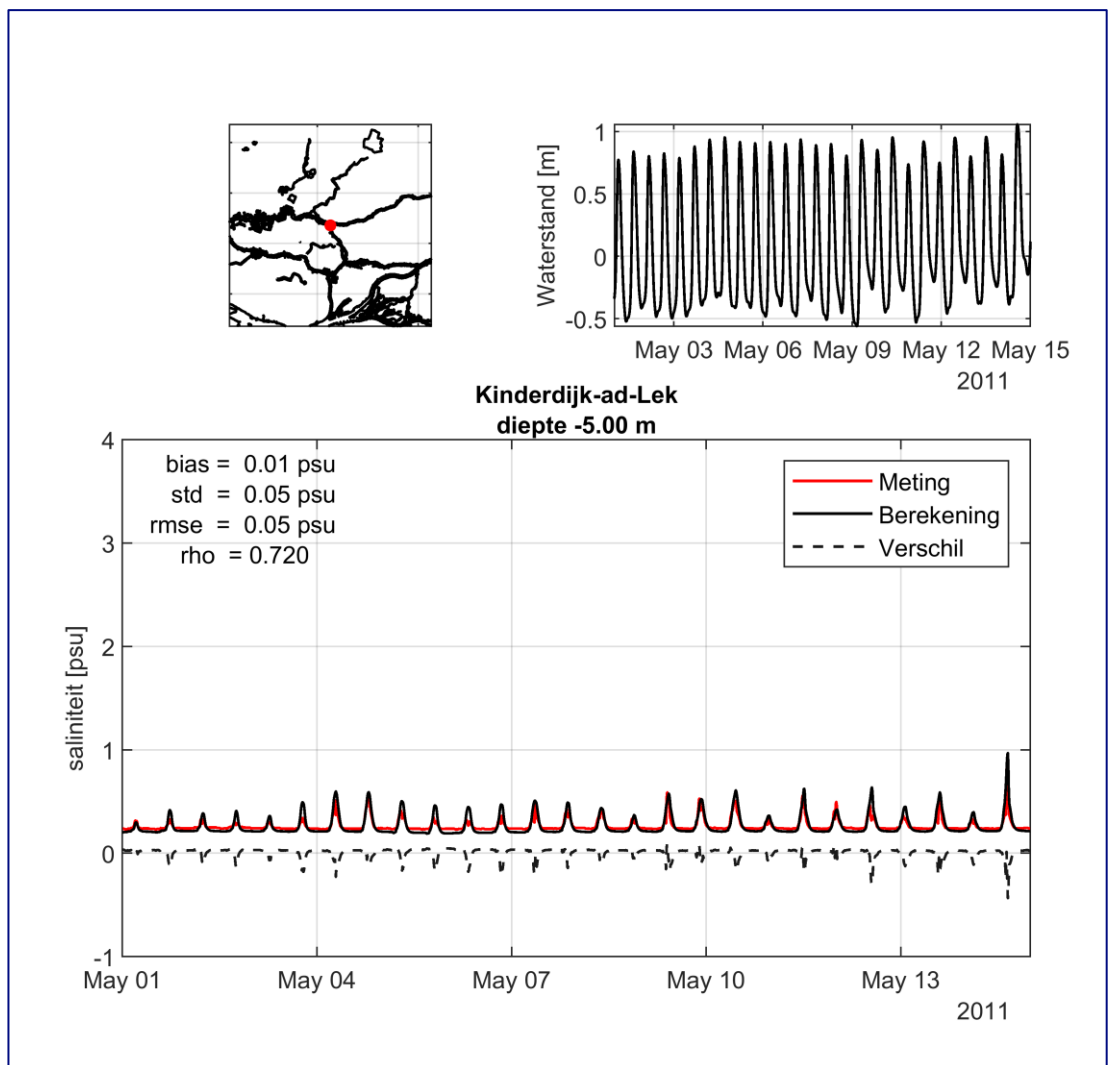
6.3 Saliniteit ter plaatse van vaste meetpunten

De reproductie van de gemeten saliniteit op de vaste meetlocaties in het RMM gebied wordt, voor meetlocatie Kinderdijk, getoond in Figuur 24. Te Kinderdijk treedt in Mei 2011 verzilting op gedurende/na een vloedperiode. Tijdens de daaropvolgende ebperiode wordt het zout door de rivierafvoer uitgespoeld en wordt de achtergrondconcentratie, het zoutgehalte van het rivierwater, gemeten. Zowel de duur van de verzilting als de grootte van de verziltingspieken te Kinderdijk wordt door het model goed voorspeld.

In Appendix F wordt de vergelijking tussen de gemeten en de berekende saliniteit gepresenteerd voor alle vaste meetlocaties. De statistische kentallen ten behoeve van het kwantificeren van het modelgedrag met betrekking tot saliniteitsreproductie worden gegeven in Tabel 6-1.

Uit de figuren en de tabel volgt dat:

- De gemeten saliniteit goed wordt voorspeld door het model. Echter, de figuren laten een iets mindere reproductie van de gemeten saliniteit zien dan gedurende December 2011. Deze, op het oog, mindere reproductie wordt niet onderschreven door de “absolute” kentallen, met name de RMS waarde behorend bij het verschil tussen gemeten en berekende saliniteit. De correlatiecoëfficiënt $R(ho)$ is wel beduidend lager voor Mei 2011 dan voor December 2011. Dit laatste kental lijkt dan ook een betere maat om het modelgedrag te kwantificeren dan de “absolute” kentallen.
- Vergelijkbaar met December 2011 geldt ook in Mei 2011 dat de berekende stratificatie te Hoek van Holland, Lekhaven en Spijkenissebrug wat groter is dan de gemeten stratificatie.



Figuur 24: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Kinderdijk

Tabel 6-1: Statistische kentallen saliniteitsreproductie bepaald voor periode van 1 tot 15 Mei 2011⁶

Meetlocatie	Meetdiepte	Bias [PSU]	STD [PSU]	RMS [PSU]	R(ho) [-]
Hoek-van-Holland	z = -2.50 m	3.08	2.67	4.08	0.92
	z = -4.50 m	1.61	2.27	2.78	0.95
	z = -9.00 m	-1.81	3.78	4.19	0.85
Lekhaven	z = -2.50 m	0.75	0.78	1.08	0.53
	z = -5.00 m	0.44	0.64	0.78	0.71
	z = -7.00 m	0.59	0.81	1.00	0.79
Brienoordbrug	z = -2.50 m	0.22	0.47	0.52	0.87
	z = -6.50 m	0.16	0.69	0.71	0.84
Krimpen aan de IJssel	z = -4.00 m	-0.04	0.06	0.07	0.63
	z = -5.50 m	-0.04	0.06	0.08	0.62
Kinderdijk aan de Lek	z = -5.00 m	0.01	0.05	0.05	0.72
Spijkenisserbrug	z = -2.50 m	0.96	1.32	1.64	0.97
	z = -4.50 m	0.82	1.31	1.55	0.95
	z = -9.00 m	-2.15	1.74	2.76	0.93
Beerenplaat-g6	z = -2.00 m	0.04	0.22	0.23	0.83
Bernisse/Zuidland	z = -3.00 m	0.12	0.03	0.12	-0.31
Gemiddeld		0.30	1.06	1.35	0.81

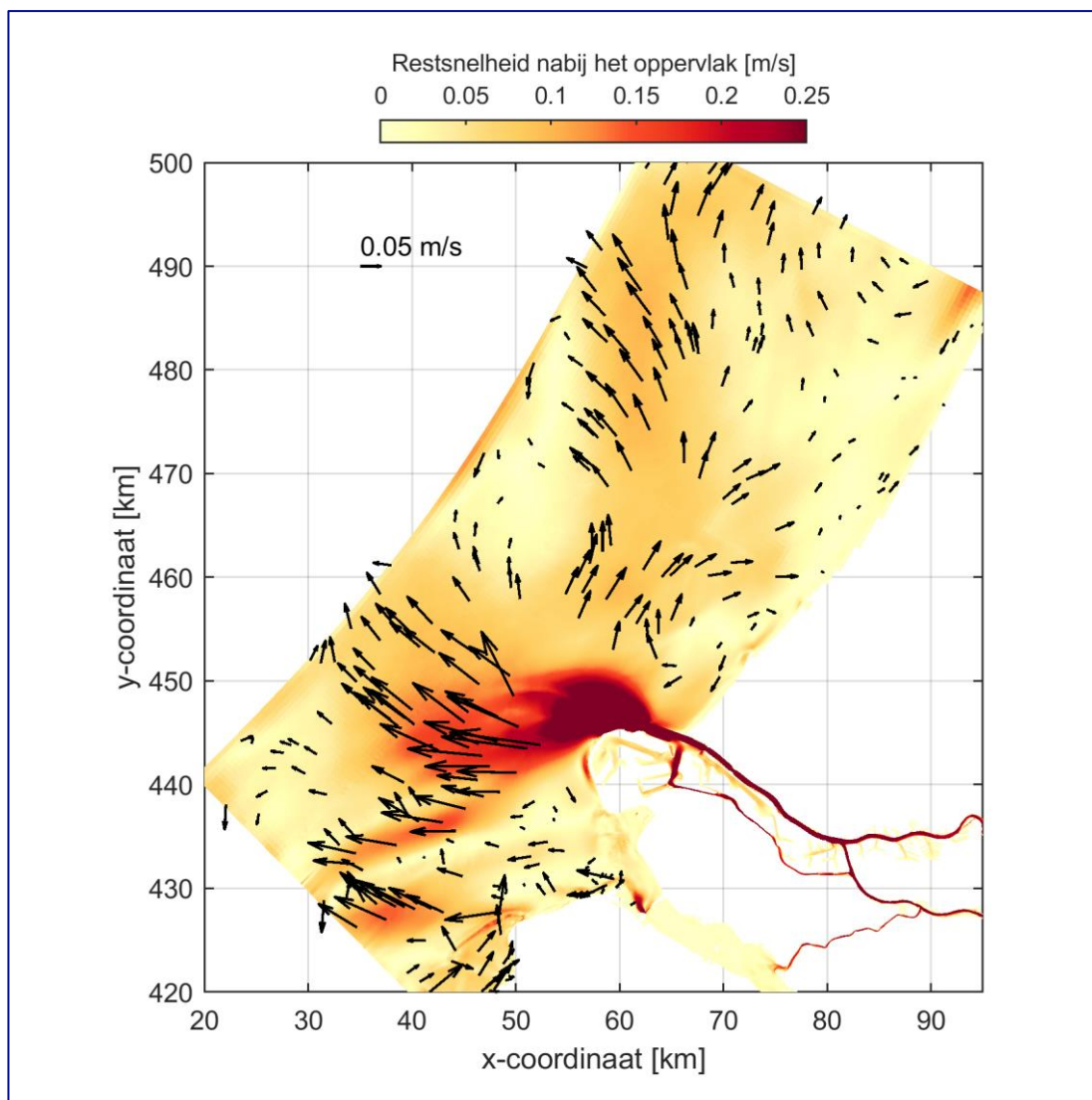
⁶ Voor locatie Bernisse/Zuidland geldt dat hier geen verzilting optreedt in Mei 2011. De negatieve correlatie is een gevolg van het niet helemaal correct zijn van de achtergrondconcentratie zoals gespecificeerd op de open rivierranden van het model. Deze negatieve correlatie is niet meegenomen in de bepaling van het gemiddelde omdat het geen verzilting, zout vanuit zee, betreft.

Als verzilting vanuit zee optreedt heeft een niet geheel juiste weergave van de achtergrondconcentratie veel minder gevolgen voor de berekende correlatiecoëfficiënt omdat de saliniteit behorend bij een verzilte toestand vele malen groter is dan de achtergrondsaliniteit. Te overwegen valt de correlatiecoëfficiënt enkel en alleen te baseren op perioden dat sprake is van verzilting vanuit zee.

6.4 Restsnelheden op zee

De restsnelheden op zee, bepaald over de gehele maand Mei 2011, worden getoond in Figuur 25. In vergelijking met de restsnelheden bepaald over December 2011, Figuur 22, is veel minder een duidelijk noordoostelijk gerichte restsnelheid te zien.

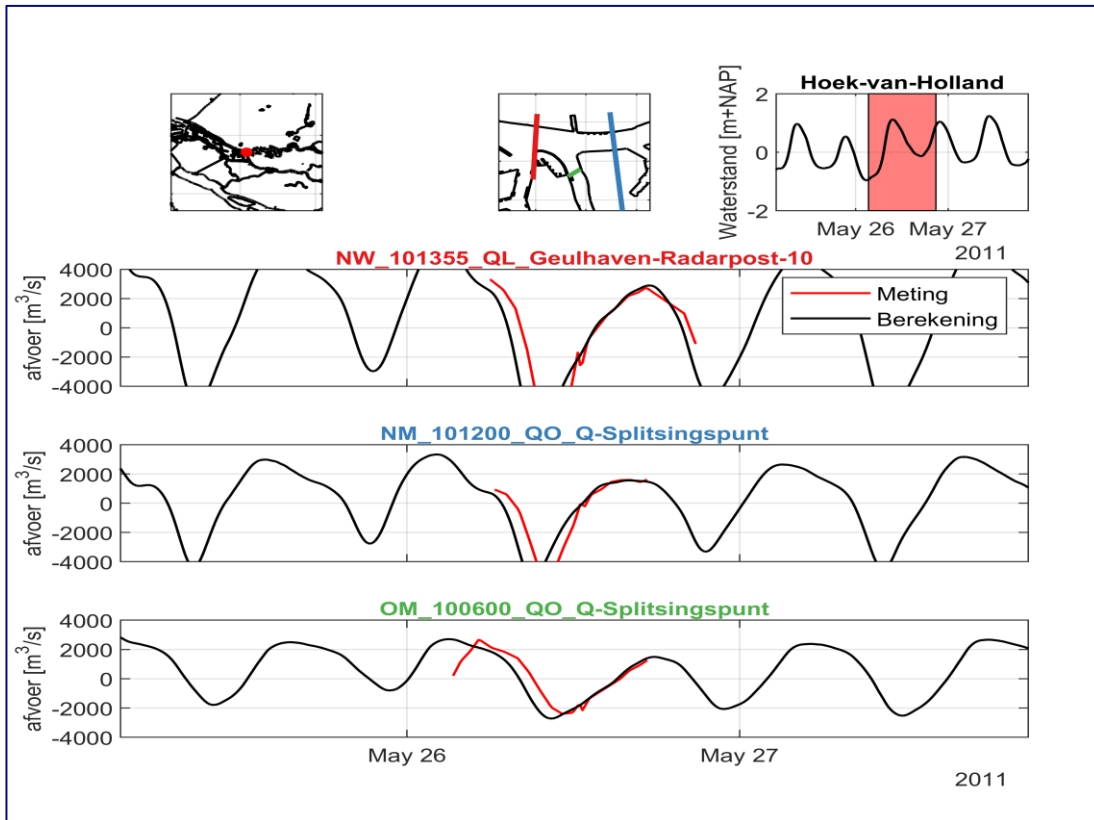
De overwegend noordoostelijk gericht restsnelheid langs de Nederlandse kust is een gevolg van de overwegend zuidwestelijke wind in Nederland. Voor de Mei 2011 periode geldt dat de windrichting minder dominant Zuidwestelijk is dan voor December 2011, zie paragraaf 2.4 en paragraaf 2.5. Ook zijn de windsnelheden lager. Dit heeft tot gevolg dat de restsnelheden meer een gevolg zijn enkel van het getij en niet van de heersende windcondities.



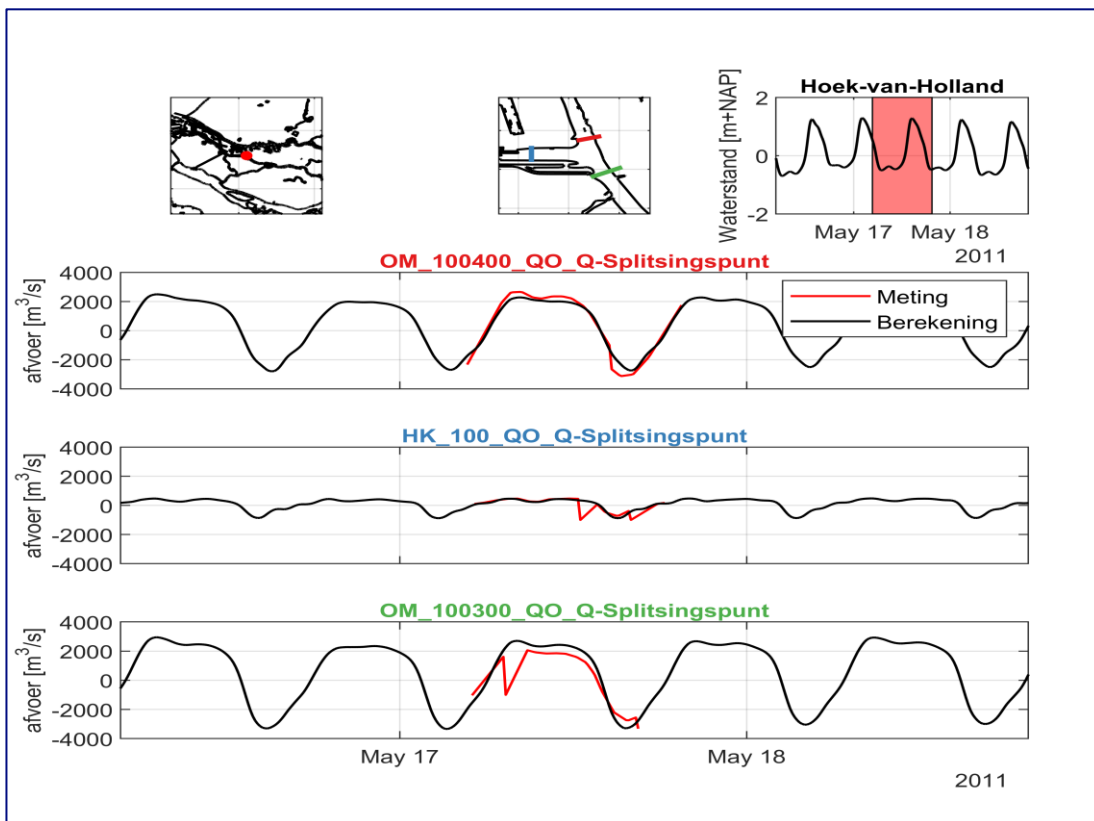
Figuur 25: Berekende restsnelheden nabij het oppervlak; Mei 2011

6.5 Afvoeren op splitsingspunten in het RMM gebied

De gemeten en de berekende afvoeren op de splitsingspunten Oude Maas – Nieuwe maas en Oude Maas – Hartelkanaal worden getoond in Figuur 26 en Figuur 27. De vergelijking tussen gemeten en berekende afvoeren voor de overige splitsingspunten wordt getoond in Appendix G.



Figuur 26: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Nieuwe Maas; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



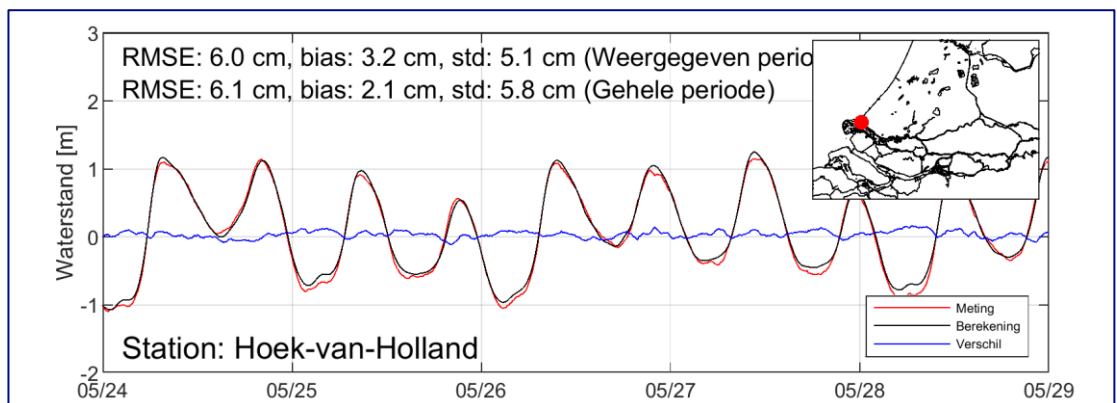
Figuur 27: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Hartelkanaal; Positief eb richting, Negatief vloedrichting

In het algemeen, met één uitzondering, worden de gemeten afvoeren goed gereproduceerd in de berekening. De reproductie is vergelijkbaar met de afvoerreproductie van het 2Dh model zoals gerapporteerd in (Veenstra, et al., 2020).

De uitzondering betreft het splitsingspunt Oude Maas – Nieuwe Maas, Figuur 26. De berekende kenteringsmomenten, van eb naar vloed en omgekeerd, lijken een uur later op te treden dan in de meting, i.e. de berekening loopt achter op de meting. Voor de splitsingspunten stroomopwaarts van het splitsingspunt Oude Maas – Nieuwe maas, de splitsingspunten Oude Maas – Hartelkanaal en Nieuw Maas – Hollandsche IJssel, Figuur 27 en Figuur G-2 geldt dat de kenteringsmomenten wel goed worden voorspeld.

De afvoeren zijn gemeten op verschillende dagen. Voor de meting op het splitsingspunt Oude Maas – Nieuwe maas geldt dat het een winderige dag betrof, 26 mei 2011. Voor de overige meetdagen geldt dat het rustige dagen waren. Mogelijk worden debieten minder gereproduceerd op winderige dagen. Wat pleit tegen deze hypothese is dat de waterstanden op 26 Mei 2011 wel goed worden gereproduceerd, zie Figuur 28. Waterstanden en debieten zijn, deels, uitwisselbaar. Een goede waterstandsreproductie impliceert een goede debietreproductie en omgekeerd.

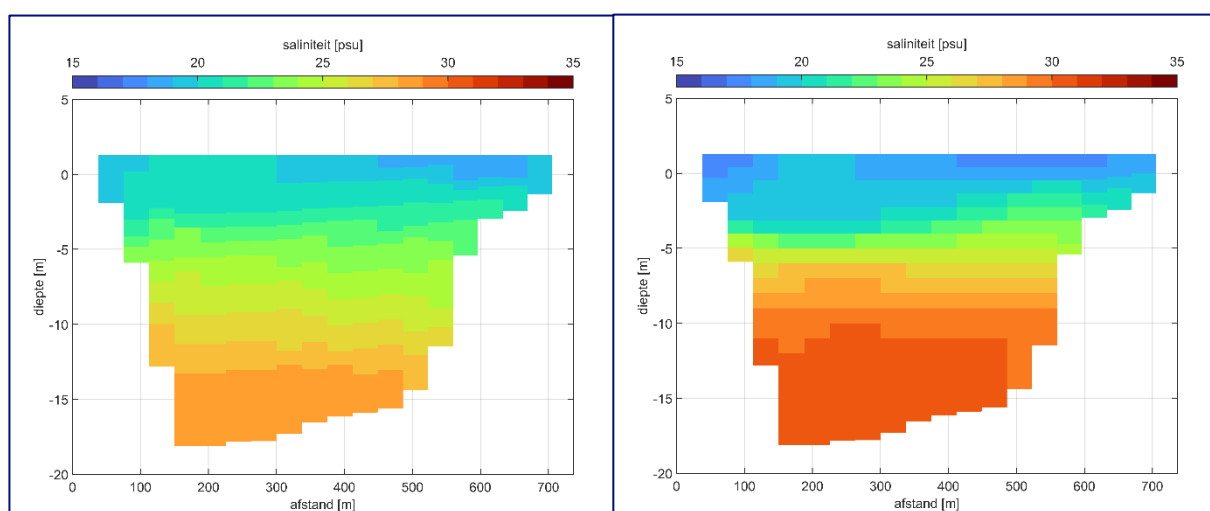
Een andere mogelijkheid is dat de tijdzone waarin de metingen zijn uitgevoerd niet overeenstemt met de tijdzone waarin de modelberekeningen worden uitgevoerd (MET) voor de splitsingspunt Nieuw Maas – Oude Maas meting. De bij de metingen behorende metadata specificeren de tijdzone waarin de metingen zijn uitgevoerd niet.



Figuur 28: Gemeten en berekende waterstanden; Station Hoek van Holland; Periode 24 – 29 Mei 2011

7 Discussie

Met sigma lagen lijkt het niet mogelijk zoutindringing in het RMM gebied nauwkeurig te voorspellen. Dit is mogelijk een gevolg van de “dwarsrichting”. In hoofdstroom richting kan zoutindringing gezien worden als een “sigma laag proces” waarbij de zoet-zout grenslaag omhoog komt bij het stijgen van het waterniveau met het binnendringen van de getijgolf. Echter, loodrecht op de hoofdstroomrichting kan zout, de sigma lagen volgend, tegen de oevers opkruipen waardoor het in de bovenste helft van de waterkolom beland. Dit manifesteert zich in berekende zoutprofielen als, ongewenste, menging. In de in dit rapport gepresenteerde berekeningen is het opkruipen van zout tegen de oevers van de Nieuwe Waterweg sigma lagen volgend niet overduidelijk zichtbaar. Dit geldt in ieder geval voor de doorsnede ter plaatse van het 1^e meetpunt van de 5 December 2011 meting, zie Figuur 29. Wellicht dat meer stroomafwaarts gelegen doorsneden meer van het kruipen van zout loodrecht op de hoofdstroomrichting laten zien.



Figuur 29: Dwaarsdoorsnede saliniteit , sigma (σ -) lagen links, en combinatie sigma (σ -) en vaste (z -) lagen rechts. Locatie meetraai 1 km 5 december 2011 metingen, zie Figuur 14

Voor modellen met de grootte van het RMM model is het vaak lastig of zelfs ondoenlijk om oorzaak/gevolg relaties vast te stellen. Met een geschematiseerd Nieuwe Waterweg model, het getijgootmodel, met en zonder Nieuwe Waterweg oevers, is het wellicht mogelijk meer grip te krijgen de oorzaak van het gebrek aan stratificatie in geval van een verticale laagschematisatie middels sigma (σ -) lagen.

In dit rapport worden berekeningsresultaten voor een 2-tal periodes gepresenteerd. De resultaten waar het zoutindringing betreft lijken voor de Mei 2011 periode wat minder dan voor de December 2011 periode. Dat volgt niet uit een absoluut kental als de RMS waarde behoren bij het verschil tussen gemeten en berekende saliniteit. De Pearson correlatie coëfficiënt tussen de gemeten en de berekende tijdreeks saliniteit, niet afhankelijk van de grootte van de saliniteit, lijkt een betere maat om tijdreeksen te kwantificeren.

De verschillen in saliniteitsreproductie tussen de Mei 2011 en December 2011 berekening geven aan dat het modelgedrag niet beoordeeld kan worden op slechts één, relatief korte, periode. Voor de kalibratie van het model moeten dan ook meerdere periodes beschouwd worden. Naast meerdere periodes is ook de reproductie van verschillende grootheden,

waterstanden, saliniteitsprofielen, tijdreeksen saliniteit, debieten op splitsingspunten, eventueel de reproductie van snelheidsmetingen op zee, van belang. Al deze informatie, verschillende perioden en verschillende grootheden, moeten uiteindelijk gecombineerd worden tot één criterium (d.w.z. een goede maat / indicator).

Met dit criterium moet een uitspraak als “deze serie berekeningen is beter/slechter dan een voorgaande serie berekeningen” mogelijk zijn. Aangezien het verschillende grootheden betreft is de definitie van dit criterium niet triviaal. Het is echter wel noodzakelijk om te kunnen beslissen of, bijvoorbeeld, een achtergrondsdiffusie een beter dan wel slechter modelgedrag tot gevolg heeft.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Het is in deze studie duidelijk geworden dat zoutindringing in de RijnMaasMonding *niet* goed voorspeld wordt met een model waarin de verticaal wordt weergegeven middels sigma (σ -) lagen. Met die wijze van modellering wordt de in de Nieuwe Waterweg optredende stratificatie onderschat, wat betekent dat het mechanisme waarmee zout het estuarium in wordt getransporteerd niet goed wordt weergegeven. Het is daarmee dan dus ook niet mogelijk met behulp van modelresultaten uitspraken te doen over toe- dan wel afname van verzilting verder stroomopwaarts is het estuarium als gevolg van voorgestelde ingrepen in de Nieuwe Waterweg.

Met een relatief dikke vaste (z-) lagen wordt de stratificatie in de Nieuwe Waterweg al aanmerkelijk beter voorspeld. De beste resultaten waar het stratificatie in de nieuwe Waterweg betreft worden verkregen met een combinatie van sigma (σ -) en vaste (z-) lagen. Sigma lagen nabij het oppervlak en vaste lagen in de onderste helft van de waterkolom. Deze combinatie combineert de nauwkeurigheid van vaste lagen waar het zoutindringing betreft met de robuustheid van sigma lagen.

Met de combinatie van sigma en vaste lagen wordt de stratificatie in de nieuwe Waterweg goed voorspeld. Wel lijkt de gemeten stratificatie te meetlocaties Hoek van Holland, Lekhaven en Spijkenissebrug iets minder groot dan de berekende stratificatie.

Als gevolg van de goede reproductie van de stratificatie in de nieuwe Waterweg wordt ook de verzilting verder stroomopwaarts, bijvoorbeeld te Krimpen aan de IJssel en Kinderdijk, goed voorspeld. Dit geldt voor beide in dit rapport beschreven simulatieperioden, i.e. December 2011 en Mei 2011. Wel geldt dat de reproductie in mei 2011 iets minder is dan in December 2011.

De beste resultaten, waar het stratificatie in de nieuwe Waterweg betreft, zijn verkregen met een modelschematisatie waar de drempel van de Maeslantkering in de bodemschematisatie van het model is opgenomen. Opname van de Maeslantkering als "structure" veroorzaakt meer menging en heeft een verslechtering van het modelgedrag tot gevolg.

8.2 Aanbevelingen

De in dit rapport beschreven werkzaamheden dienen ter voorbereiding van de kalibratie van het model, voorzien voor 2021. Voor deze kalibratie wordt aanbevolen:

- Te onderzoeken of de noodzakelijke rekeninspanning verkleind kan worden met behoud van reproductiekwaliteit van het model. Gedacht kan worden aan bijvoorbeeld optimalisatie van de verticale laagverdeling (minder rekenlagen) en/of het afknippen van een deel het rivierendeel van het model. Met dit laatste kan, naar verwachting, ongeveer 30% rekentijd bespaard worden.

- Ook het gedrag in het zeegebied van het model in de beoordeling van het model te betrekken. De in 2019 uitgevoerde metingen, saliniteit, snelheids grootte en -richting te meetraaien Maasgeul en Monster, lijken deze mogelijkheid te bieden. Wel wordt aanbevolen om deze metingen uitgebreid te analyseren alvorens te gebruiken in een meting/model vergelijking. Tot het zeegebied behoort ook de voordelta van het Haringvliet. Waar in het verleden alleen gespuid werd met de Haringvlietsluizen wordt momenteel onderzocht wat het effect van het “kieren” met de Haringvlietsluizen op de saliniteit in het Haringvliet is. De saliniteit in de voordelta van het haringvliet bepaald hoe zout het binnenstromende water is en moet dus ook goed worden gereproduceerd door het model. De reproductie van de snelheidsmetingen is relevant in het licht van de toepassing van het model met betrekking tot scheepvaartbegeleiding (Kaaij, et al., 2017)
- De beoordeling van het modelgedrag niet te baseren op één enkele periode. Het is denkbaar dat een aanpassing van de modelschematisatie, bijvoorbeeld het specificeren van een verticale achtergronddiffusie, een verbetering voor periode “één” maar een verslechtering voor periode “twee” tot gevolg heeft.
- Vooraf criterium (d.w.z. een goede maat / indicator) te definiëren waarmee het modelgedrag met betrekking tot weergave van de gemeten saliniteit kan worden gekwantificeerd. Aan de hand van dit criterium moet een uitspraak “deze serie berekeningen is beter dan wel slechter dan de voorgaande serie berekeningen” mogelijk zijn. Als gevolg van de grote variatie in saliniteit in het RMM gebied is de definitie van dit criterium niet triviaal. Zo betekent een RMS waarde van het verschil tussen gemeten en berekende saliniteit van 1 psu te Hoek van Holland iets anders dan een RMS waarde van 1 psu te Kinderdijk. Voor tijdreeksen saliniteit lijkt de correlatiecoëfficiënt een beter criterium dan absolute kentallen. Ondanks dat reproductie van gemeten waterstanden niet het primaire doel is van het model, mag de waterstandsreproductie niet verslechteren.
- Ook de reproductie van gemeten water temperaturen in de beoordeling van het modelgedrag te betrekken. Naast zoutindringing is ook het reproductie van het gedrag van warmtelozingen, bijvoorbeeld als gevolg van elektriciteitproductie of proceswater gebruikt door petro-chemische industrie, een (neven)doelstelling van het model (Kaaij, et al., 2017).
- “Structures” in drie-dimensionale berekeningen hebben op dit moment nog niet de status “general availability”. In deze studie zijn de Maeslant- en Hartekering als “structure” uit de schematisatie verwijderd omdat de Maeslantkering teveel menging veroorzaakte. Aanbevolen wordt te onderzoeken of een formulering die minder menging veroorzaakt, en zich dus effectief gedraagt als een drempel, mogelijk is.

9 Referenties

- Deltares. 2020.** *D-Flow_FM_User_Manual.pdf*. Delft : Deltares, 2020.
http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Flow_FM_User_Manual.pdf.
- Giesen, A. van der, Ruijter, W.P.M. de en Borst, J.C. 1990.** *Three-dimensional current structure in the Dutch coastal zone*. 1990. pp. 45 - 55.
- Kaaij, Th. van der en Chavarrias, V. 2019.** *Preliminary simulations with the 6th generation RMM model*. Delft : Deltares, 2019.
- Kaaij, Th. van der, Huismans, Y. en Becker, A. 2017.** *Werkplan ontwikkeling zesde generatie model voor de RijnMaasMonding; Ontwikkeling in DHYDRO suite*. Delft : Deltares, 2017.
- Kernkamp, H.W.J. 2020.** *Eerste aanzet tot 'kunstwerken in 3D' in D-HYDRO*. Delft : Deltares, 2020.
- Kranenburg, W.M. 2015 (feb).** *Evaluatie van het OSR-model voor zoutindringing in de Rijn-Maasmonding (I)*. Delft : Deltares, 2015 (feb).
- Li, X., et al. 2018.** *The Transformation of Salinity Variance: A New Approach to Quantifying the Influence of Straining and Mixing on Estuarine Stratification*. sl : JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY, Volume 48, 2018.
- Rodi, W. 1993.** *Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review*. sl : Balkema, 1993.
- Spruyt, A., et al. 2020.** *Werkplan ontwikkeling 3D modelschematisaties voor RWS in D-HYDRO; Werkzaamheden in het kader van KPP2020 Hydraulica Schematisaties*. Delft : Deltares, 2020.
- Veenstra, J, et al. 2020.** *Ontwikkeling zesde-generatie Rijn-Maasmonding-model;*. Delft : Deltares, 2020.
- Zijl, F., Laan, S. en Groeneboom, J. 2020.** *Development of a 3D model for the NW European Shelf (3D DCSM-FM)*. Delft : Deltares, 2020.
- Zijl, F., Veenstra, J. en Groenenboom, J. 2018.** *The 3D Dutch Continental Shelf (3D DCSMFM) Model - Flexible Mesh (3D DCSM - FM)*. Delft : Deltares, 2018. 1220339-000.

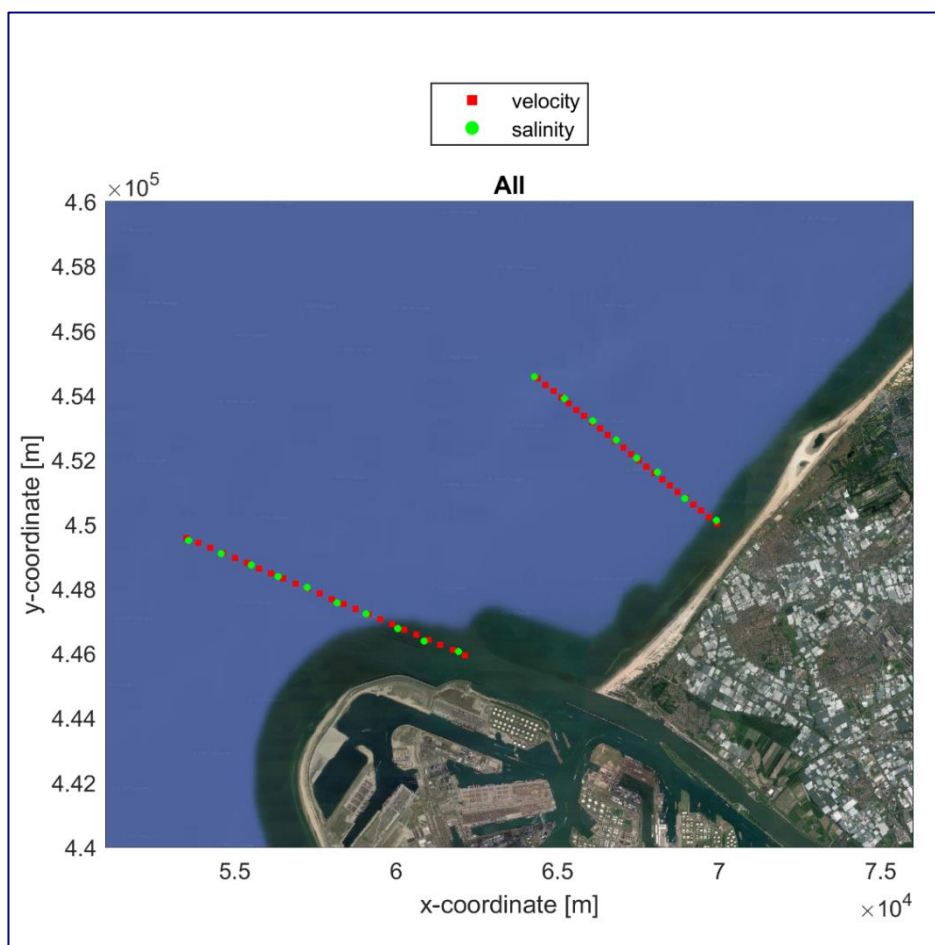
A Metingen 2019

Varende metingen zijn uitgevoerd gedurende de 3^e en 4^e Juli 2019 en gedurende de 22^e en 23^e Oktober 2019. De metingen zijn uitgevoerd langs een 2-tal meetraaien, de “Maasgeul” raai, i.e. de zoet water uitstroom van de Rijn voor de Nieuwe Waterweg, en de “Monster” raai, 5 km noordelijk van de monding van de Nieuwe Waterweg (Figuur A-1). De secties zijn, per meetserie, ongeveer 5 maal bemonsterd. De duur van één bemonsteringsperiode was ongeveer 2 uur.

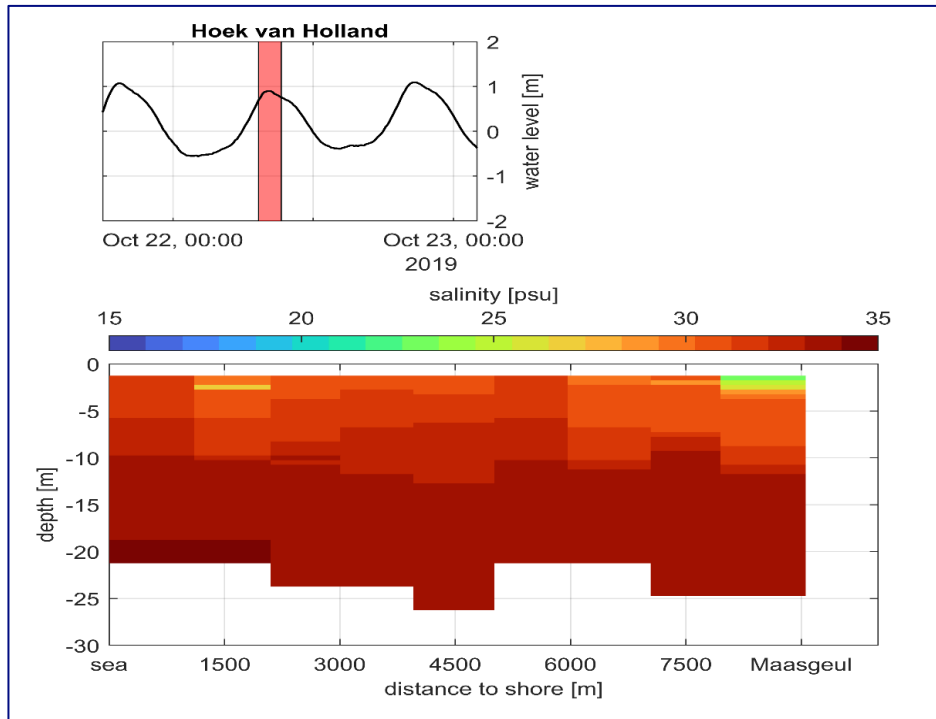
Per sectie en per bemonsteringsperiode zijn gemeten:

- De saliniteits- en temperatuurprofielen op ongeveer 20 locaties.
- De snelheidsgrrootte en -richting op ongeveer 20 locaties.

Figuur A-2 toont, als voorbeeld, de gemeten saliniteit in de “Maasgeul” sectie op 22 Oktober 2019, ongeveer rond Hoogwater



Figuur A-1: Locatie van de meetraaien “Maasgeul” (Zuidelijk) en “Monster” (Noordelijk)

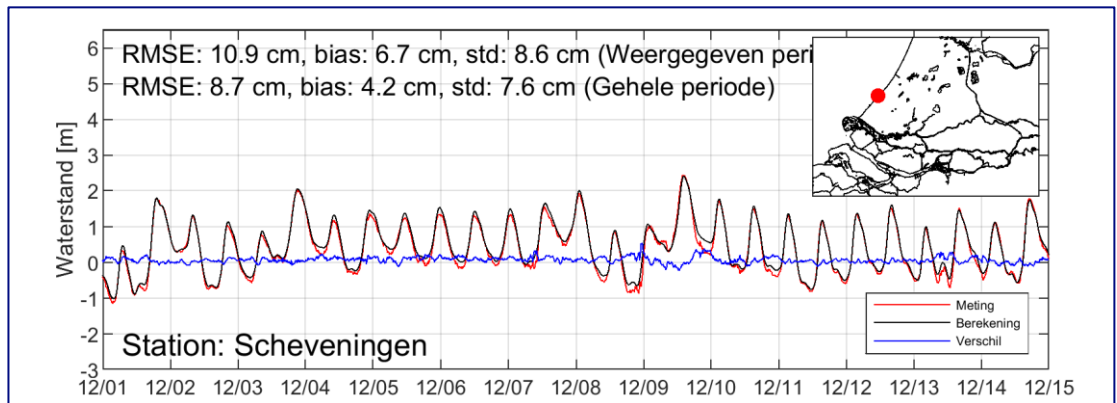


Figuur A-2:: Gemeten saliniteit "Maasgeul" sectie, 22 Oktober 2019, Hoogwater

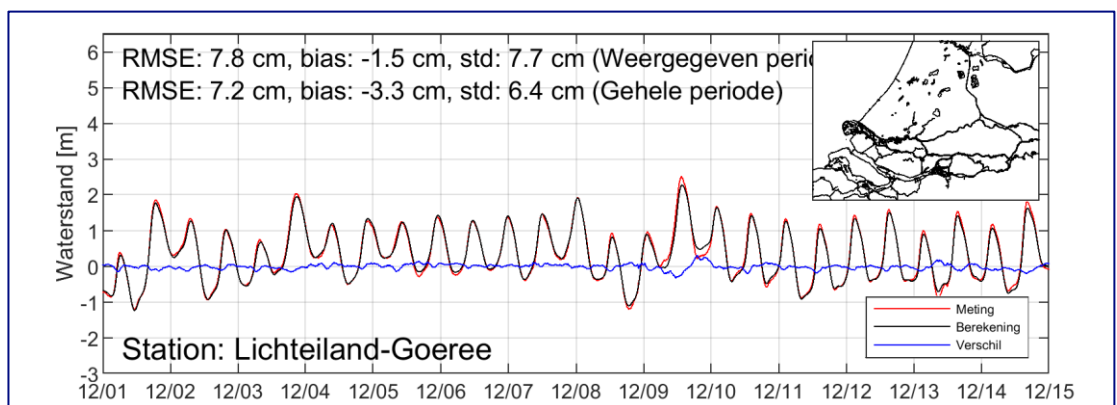
In het kader van dit project zijn de varende metingen in het zeedeel *niet* uitgebreid geanalyseerd. Wel is, na een eerste verkenning van de metingen, duidelijk geworden dat de metingen uiterst waardevolle informatie met betrekking tot het gedrag van de uitstroom van het zoete Rijnwater in zich hebben.

De metingen uit 2019 zijn in 2020 herhaald (zelfde secties, zelfde perioden en zelfde parameters). Voorgesteld wordt om een uitgebreide analyse van alle metingen in het zeegebied uit te voeren voordat de metingen worden vergeleken met modelresultaten. In deze analyse kunnen/moeten ook metingen uitgevoerd in 2020 betrokken worden. Na analyse van de metingen, waarbij bijvoorbeeld ook consistentie tussen saliniteits- en snelheidsmetingen wordt betrokken, kunnen ze gebruikt worden ten behoeve van de kalibratie van het model, voorzien voor 2021. Dit vereist wel dat de analyse van de metingen begin 2021 wordt uitgevoerd.

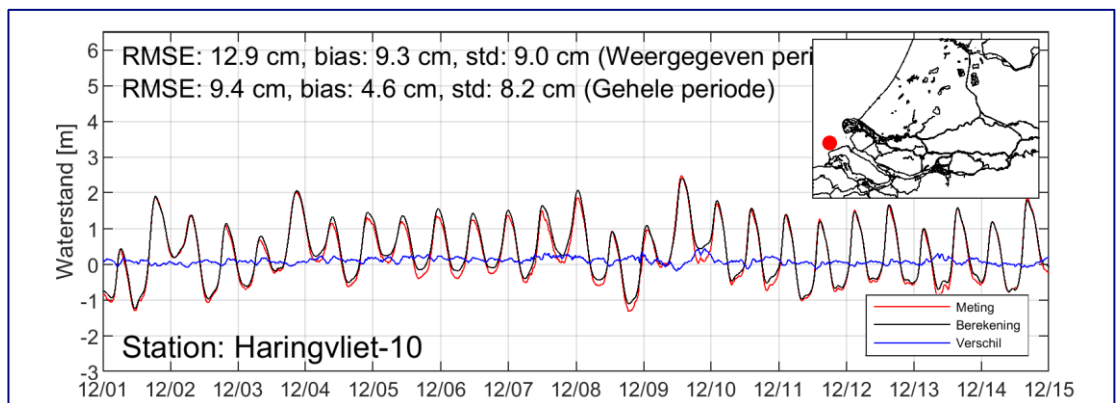
B Waterstanden December 2011



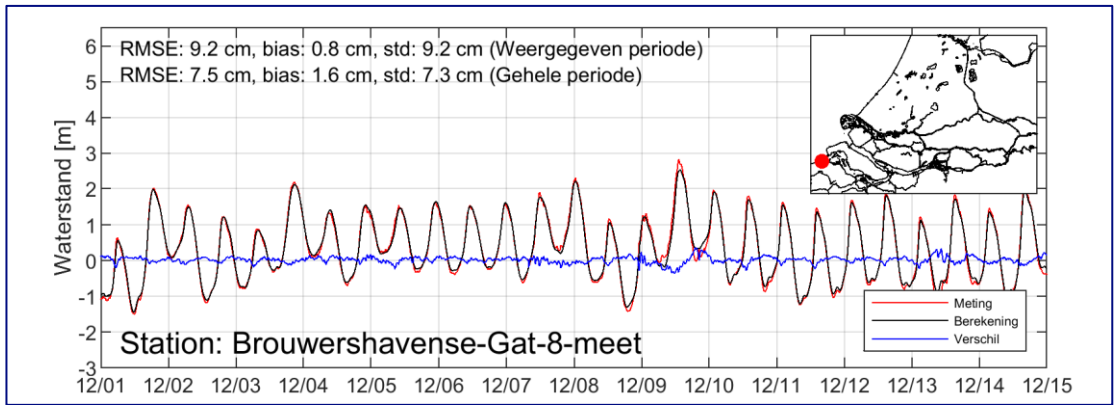
Figuur B-1: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Scheveningen



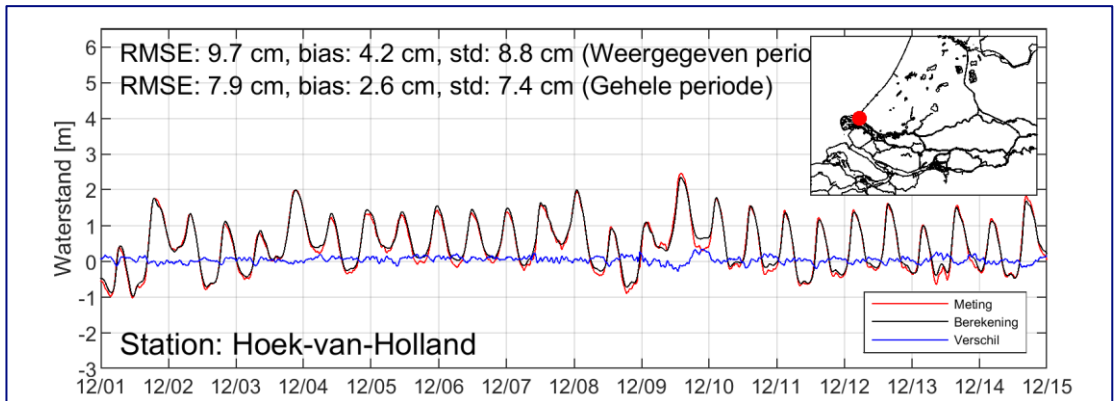
Figuur B-2: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Lichteiland-Goeree



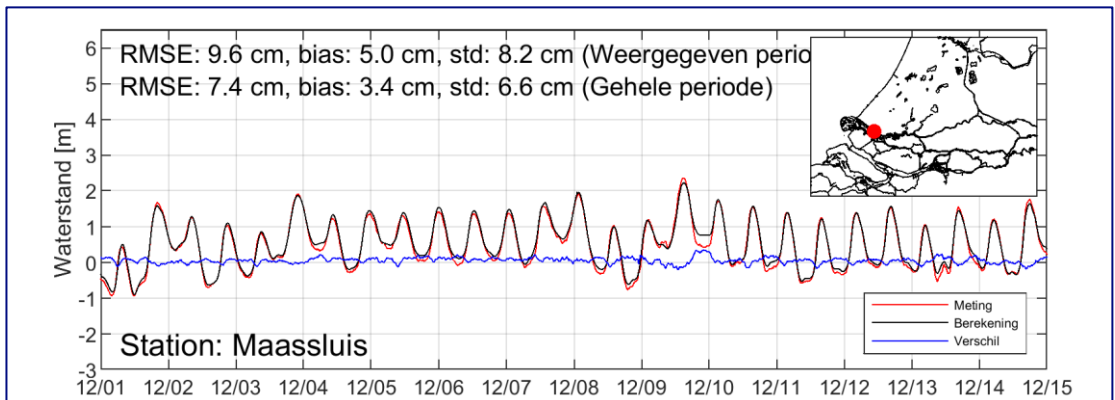
Figuur B-3: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Haringvliet-10



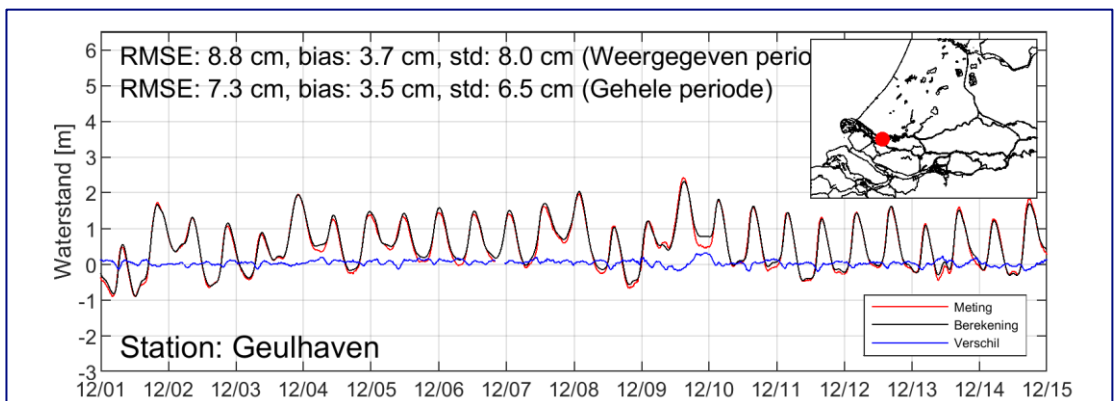
Figuur B-4: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Brouwershavense Gat8



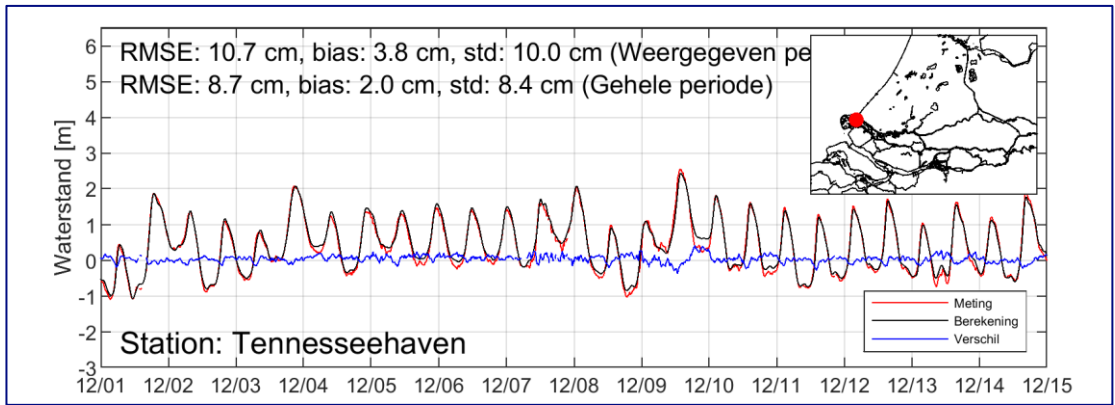
Figuur B-5: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Hoek-van-Holland



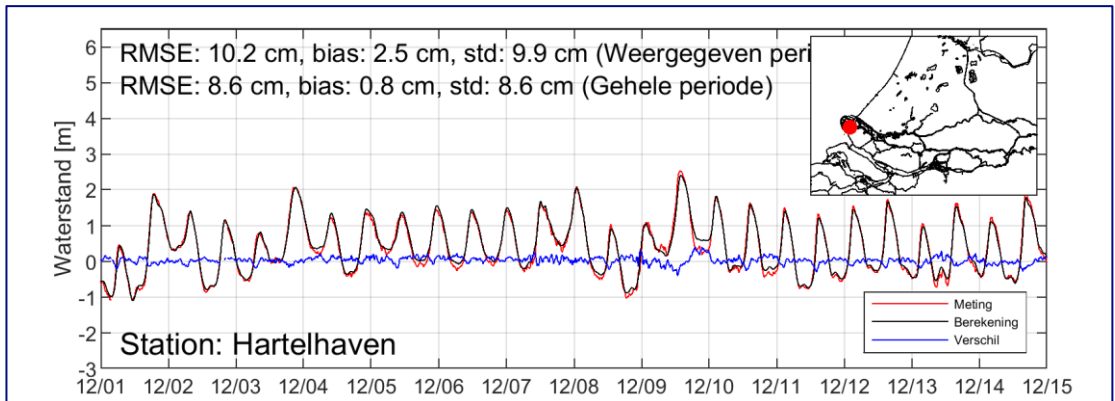
Figuur B-6: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Maassluis



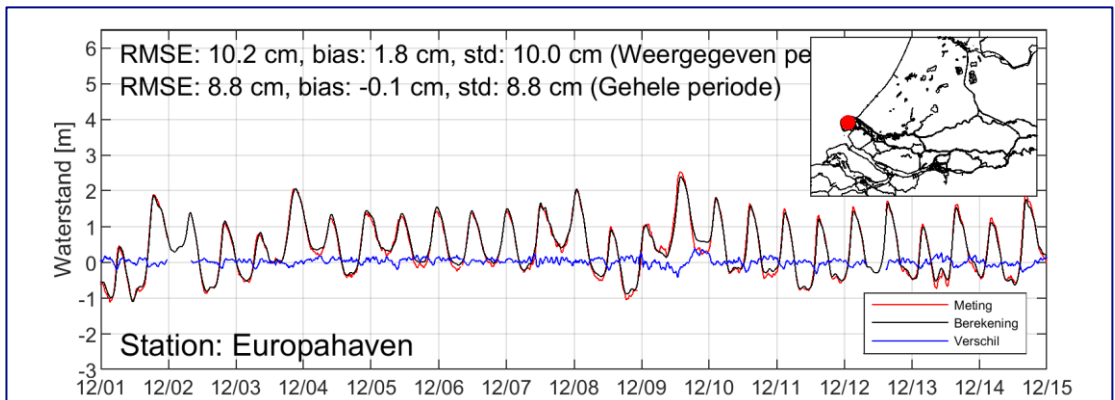
Figuur B-7: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Geulhaven



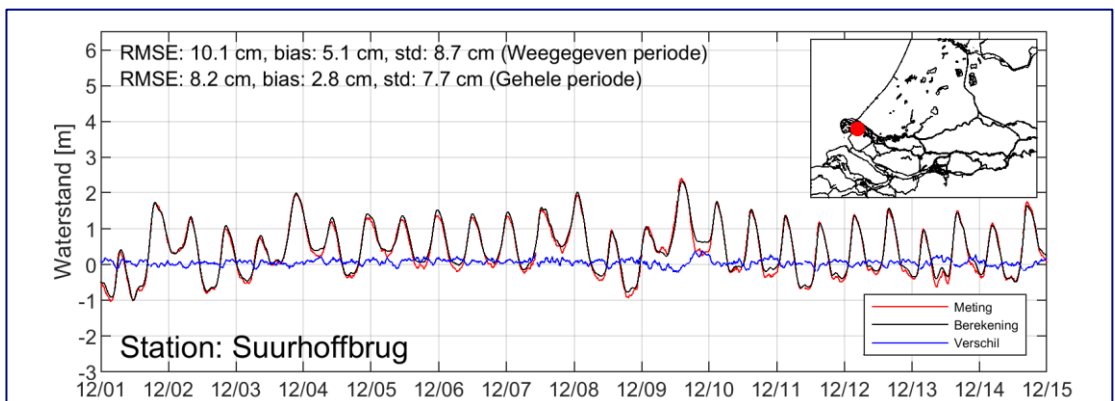
Figuur B-8: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Tennesseehaven



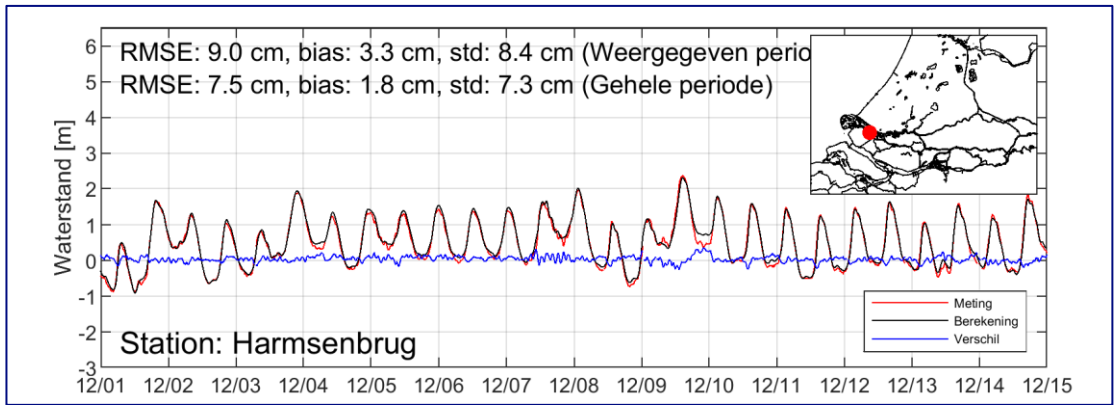
Figuur B-9: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Hartelhaven



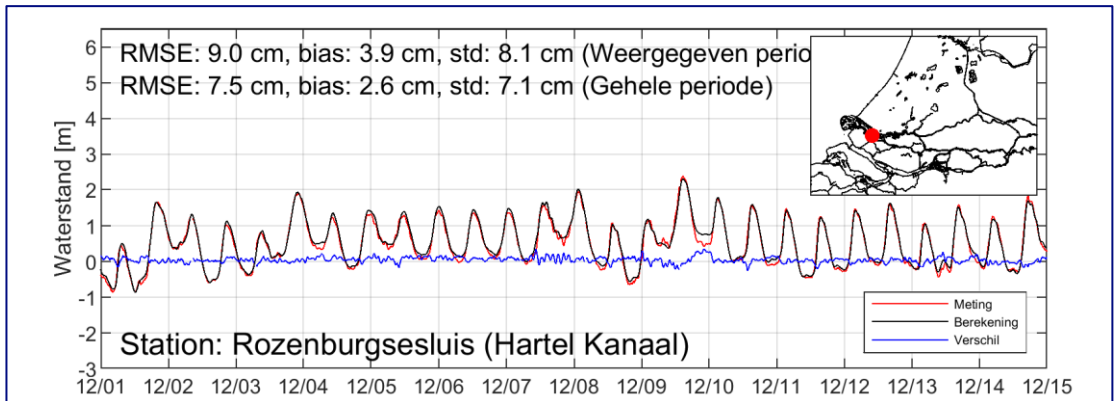
Figuur B-10: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Europahaven



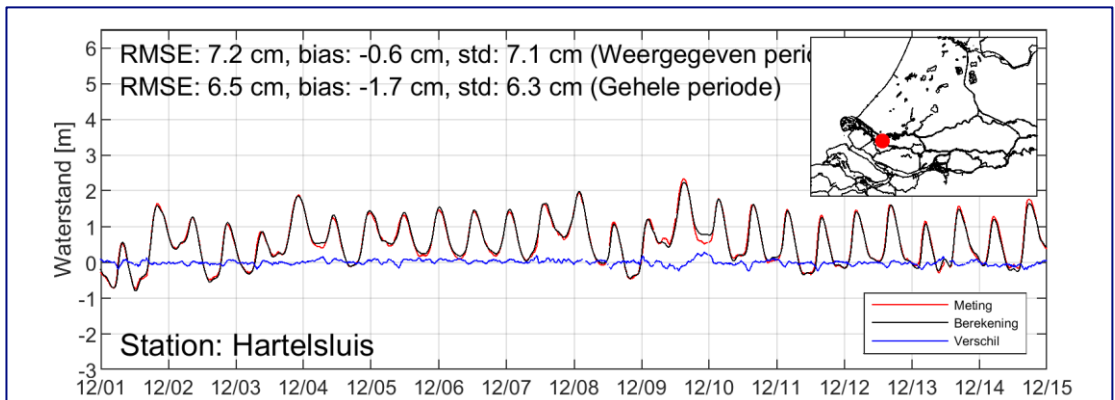
Figuur B-11: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft December 2011, station: Suurhoffbrug



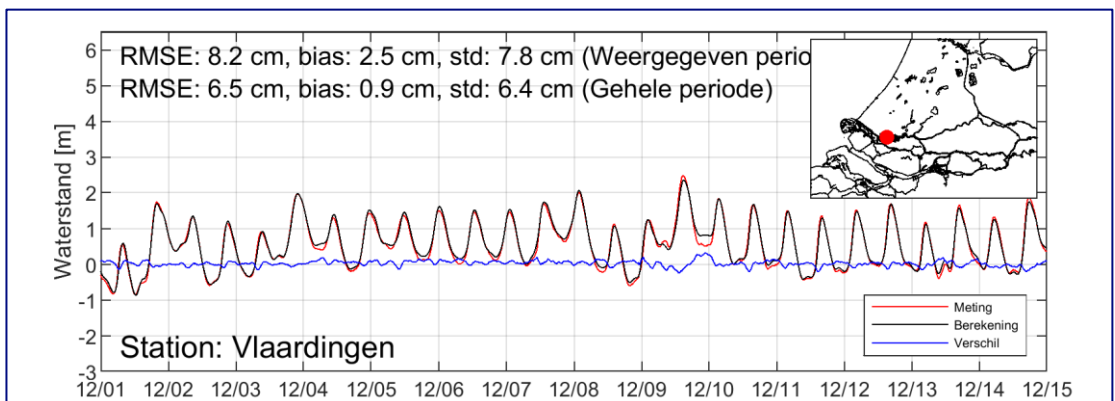
Figuur B-12: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Harmsenbrug



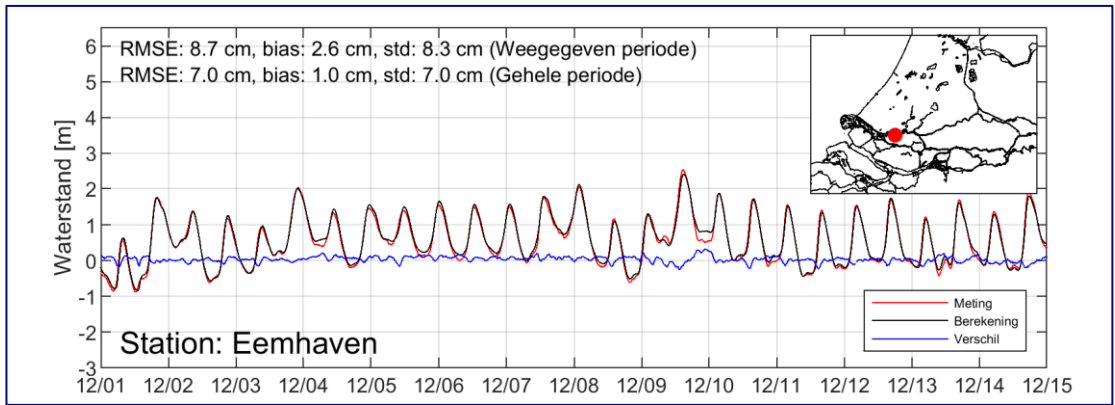
Figuur B-13: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Rozenburgsesluis



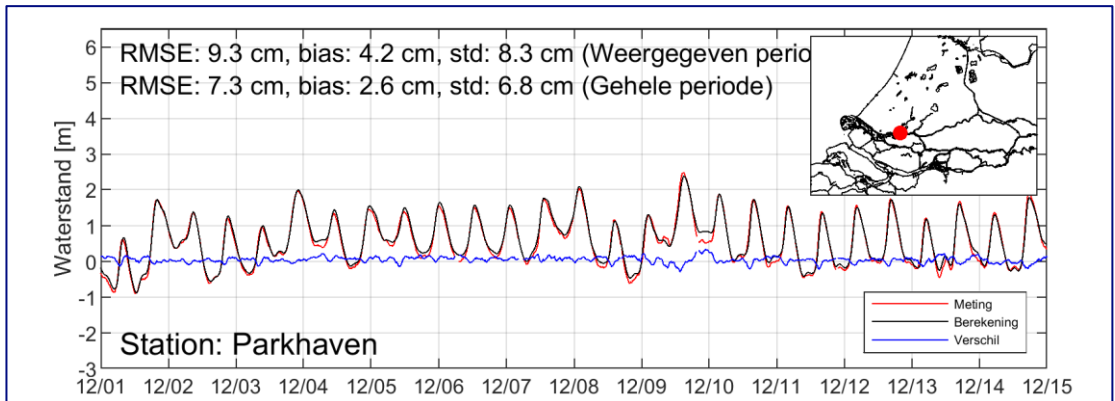
Figuur B-14: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Hartelsluis



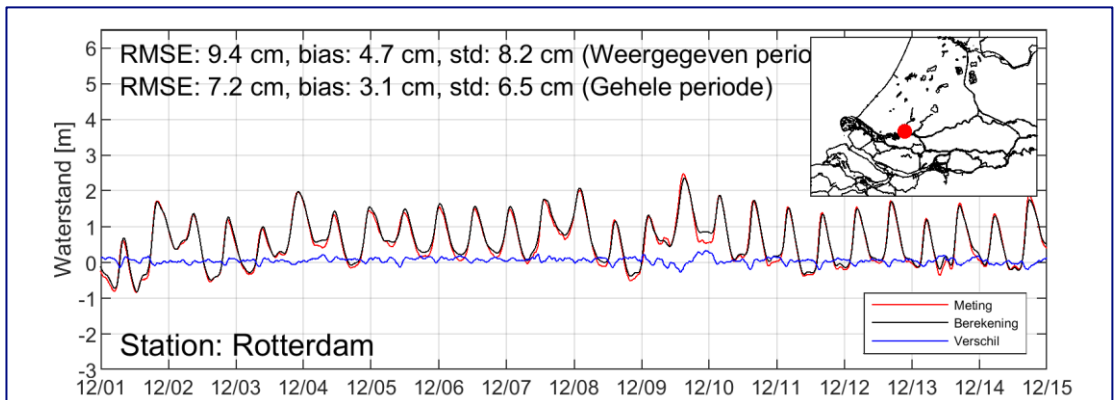
Figuur B-15: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Vlaardingen



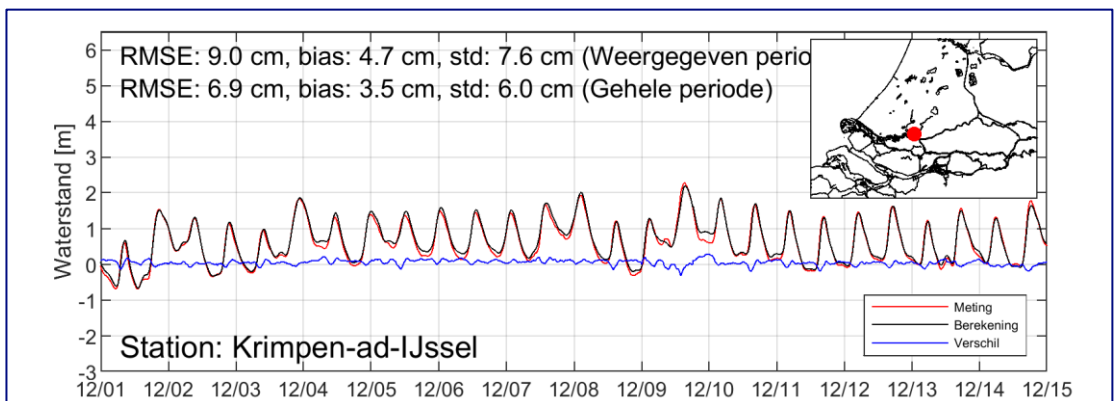
Figuur B-16: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: 1^e-Eemhaven



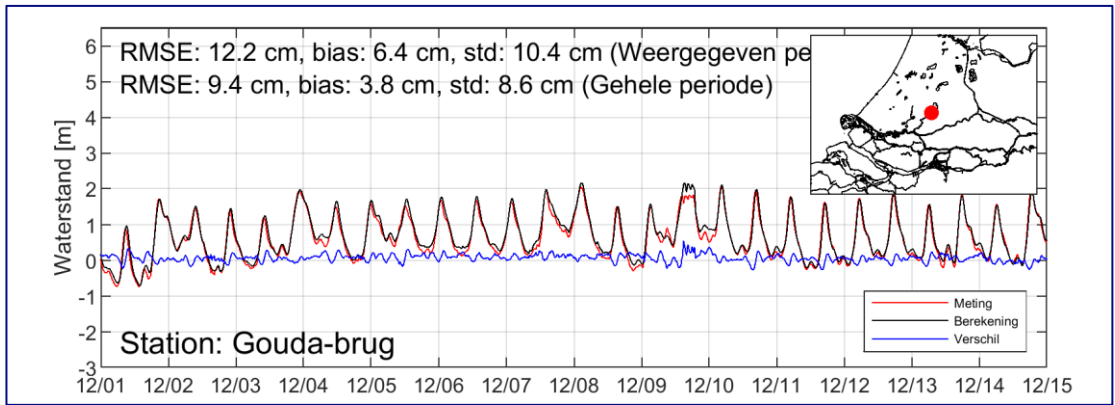
Figuur B-17: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Parkhaven



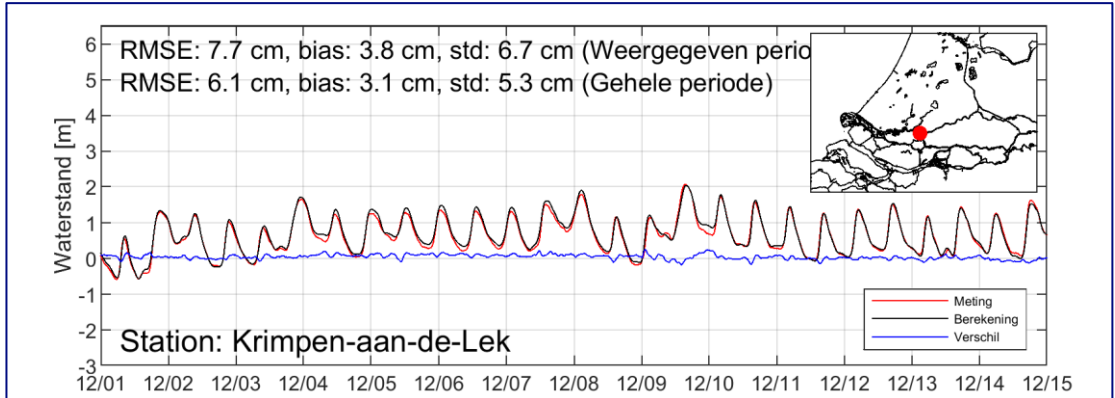
Figuur B-18: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Rotterdam



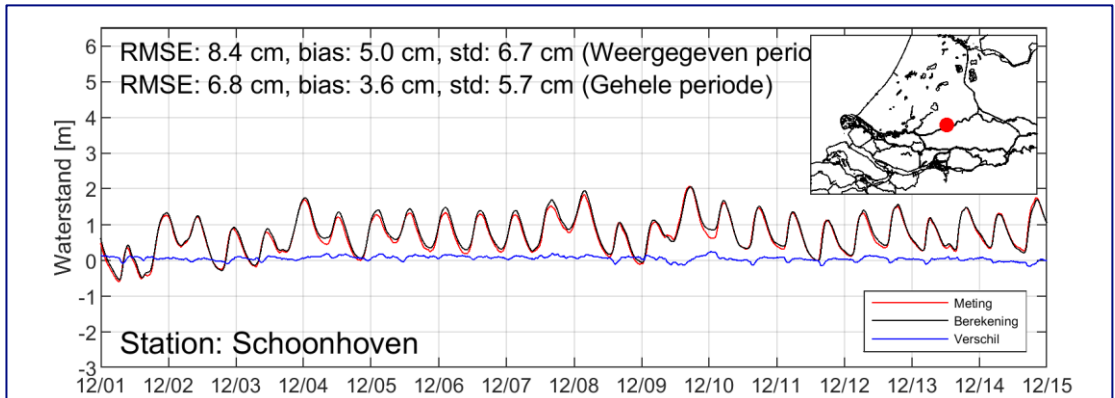
Figuur B-19: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Krimpen aan de IJssel



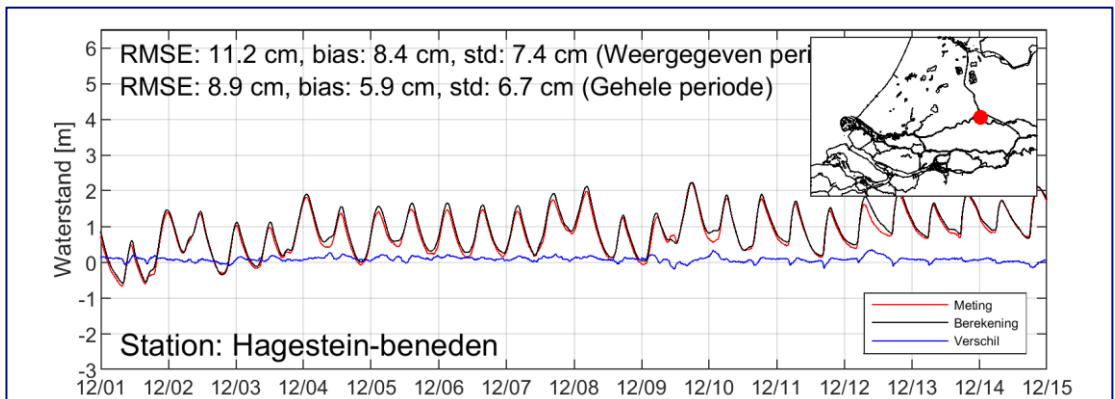
Figuur B-20: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Gouda brug



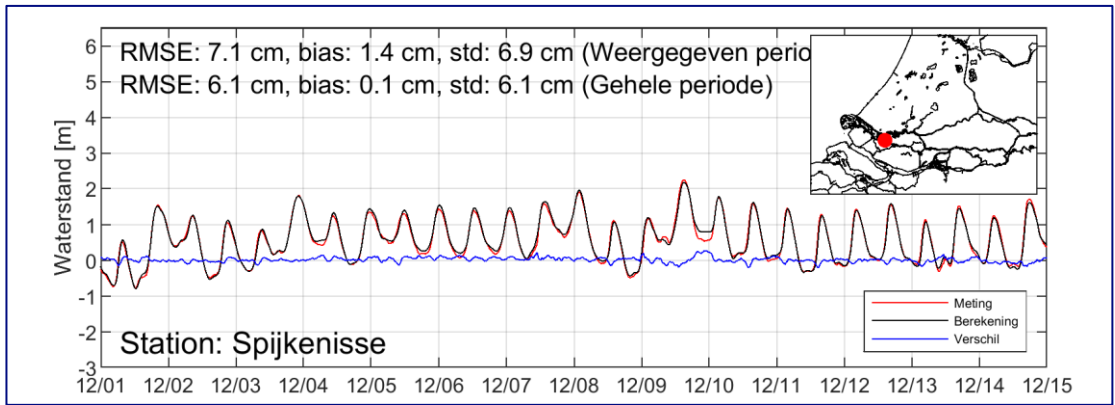
Figuur B-21: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Krimpen aan de Lek



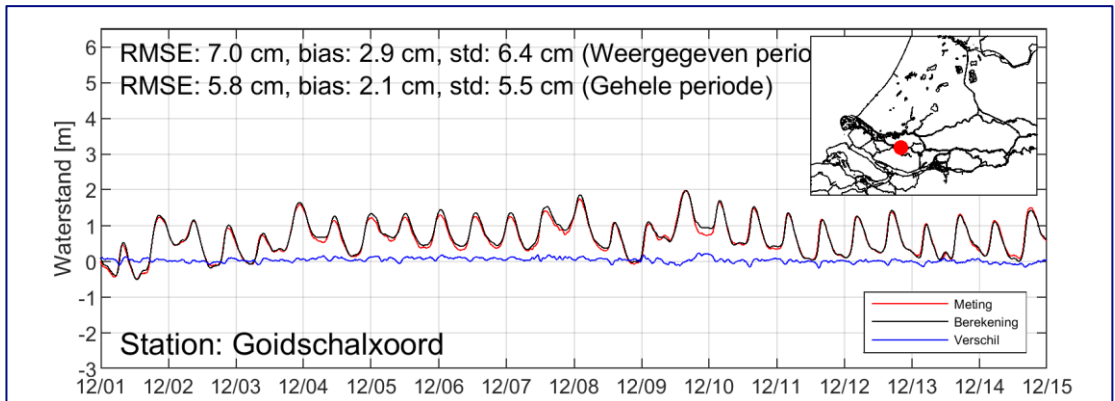
Figuur B-22: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Schoonhoven



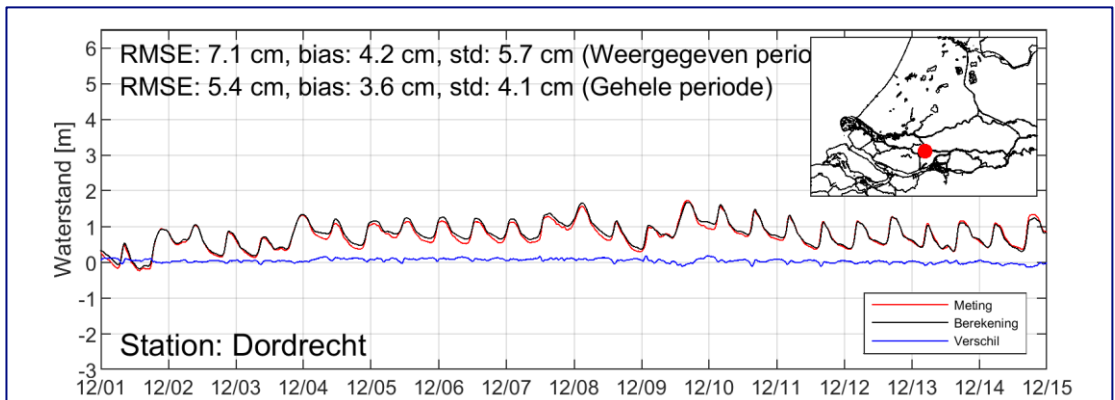
Figuur B-23: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Hagestein beneden



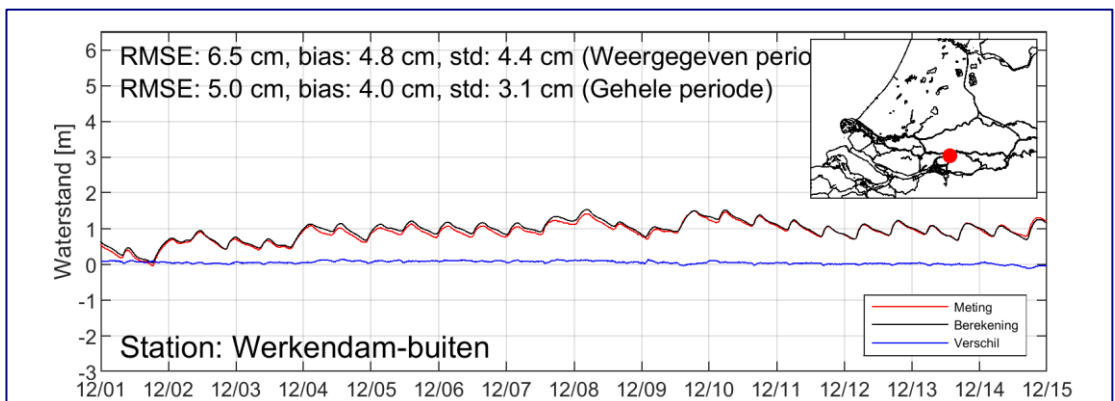
Figuur B-24: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Spijkenisse



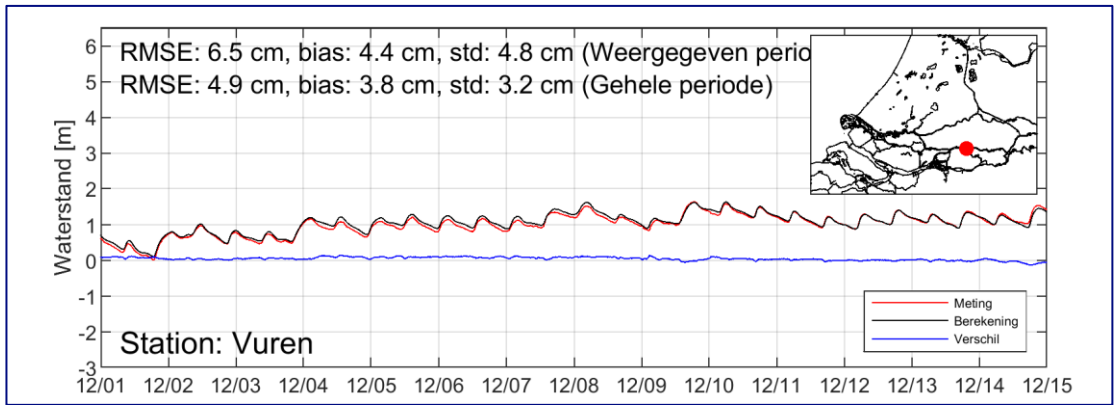
Figuur B-25: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Goidschalxoord



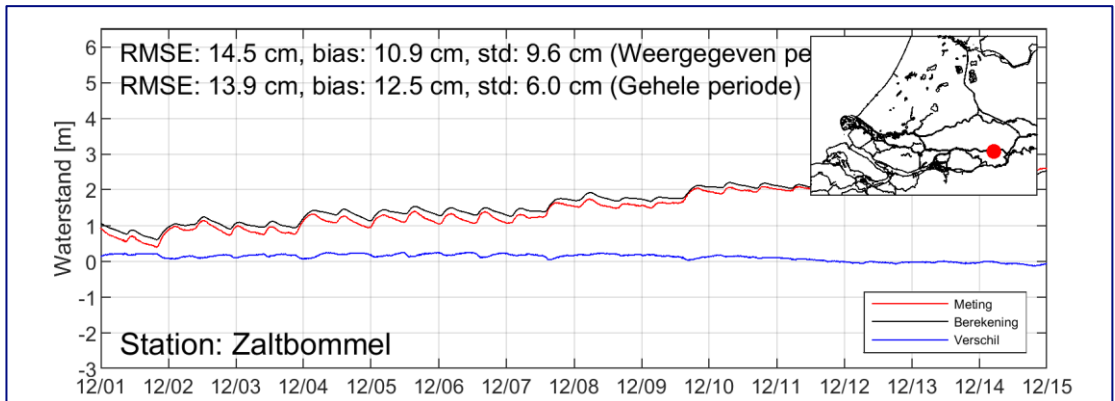
Figuur B-26: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Dordrecht



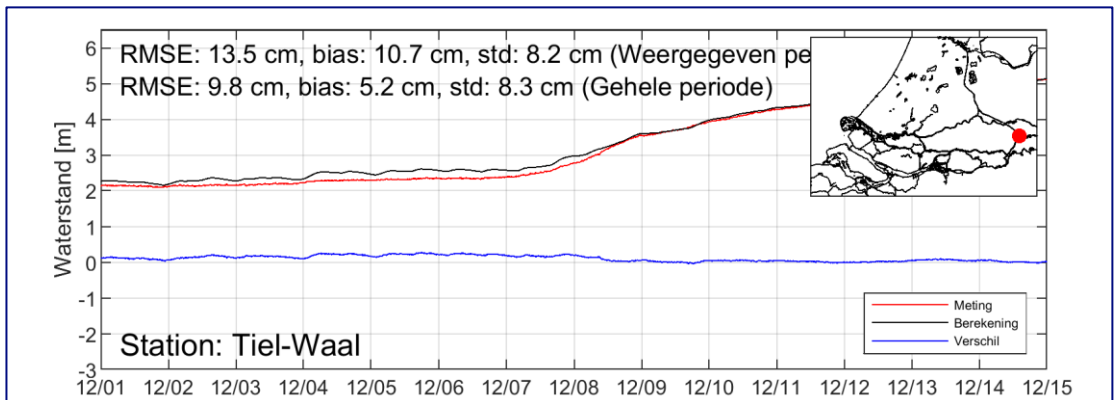
Figuur B-27: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Werkendam buiten



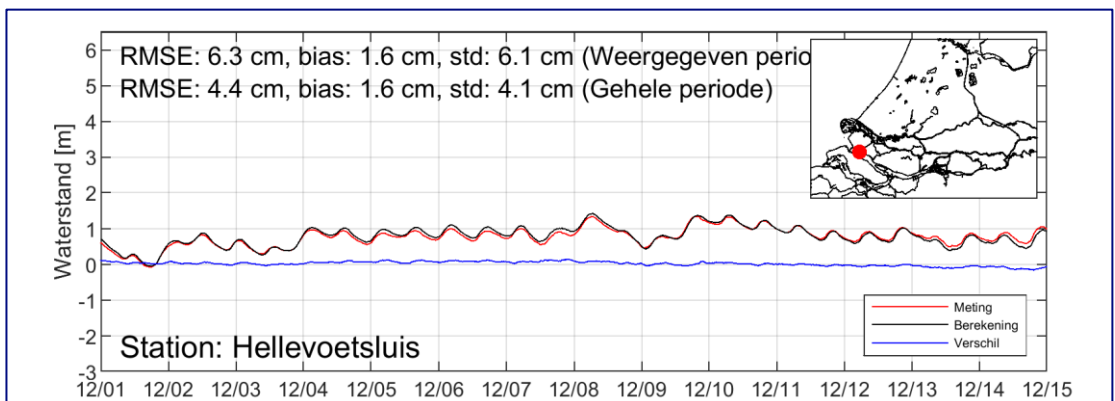
Figuur B-28: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Vuren



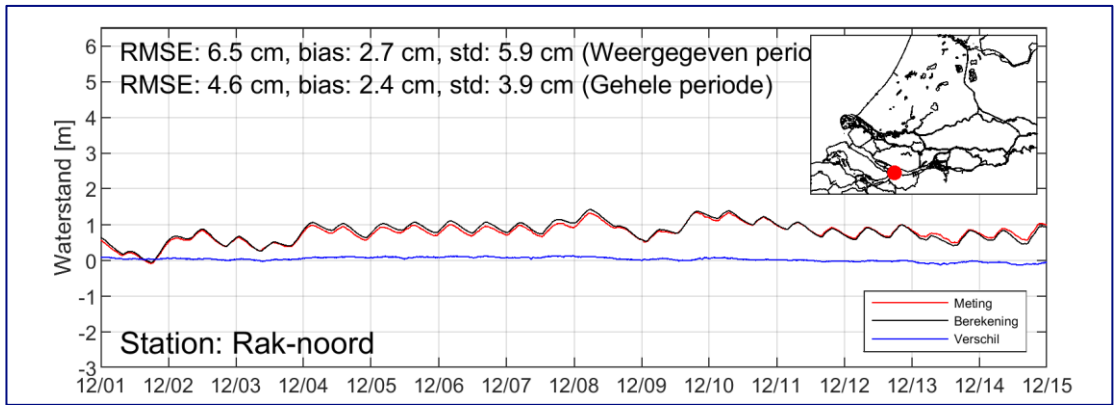
Figuur B-29: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Zaltbommel



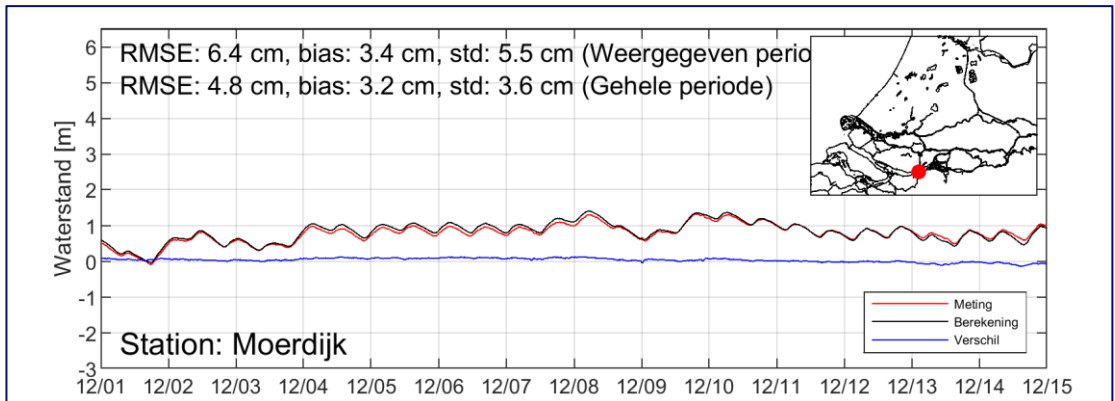
Figuur B-30: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Tiel-Waal



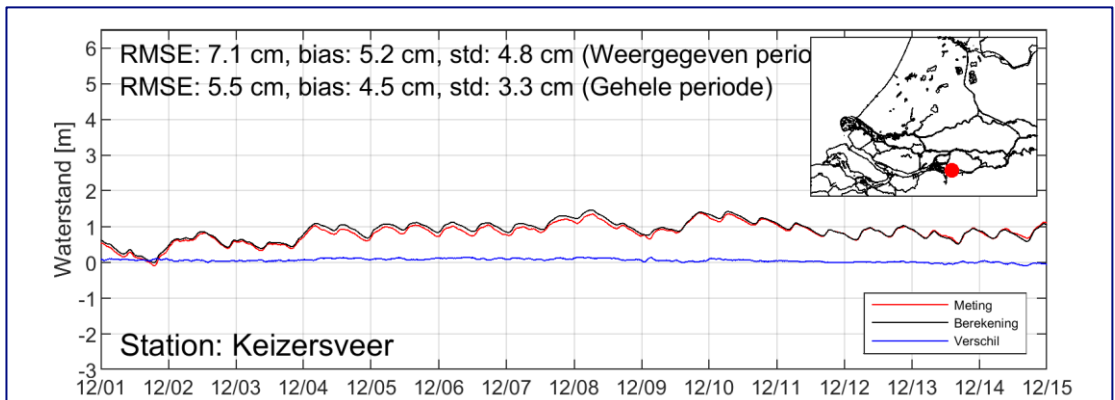
Figuur B-31: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Hellevoetsluis



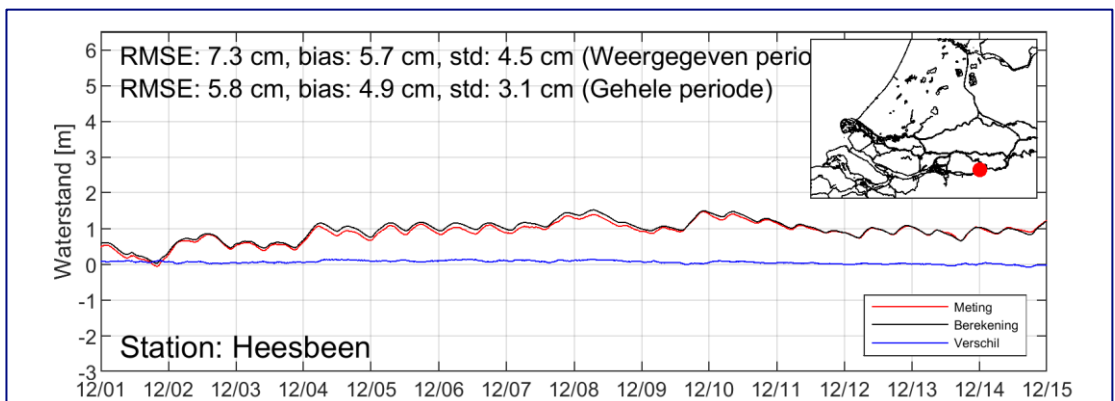
Figuur B-32: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Rak-noord



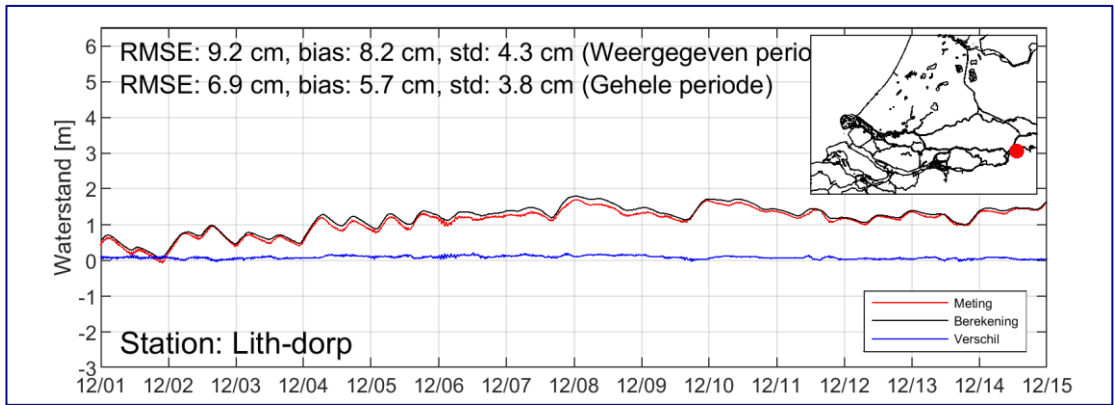
Figuur B-33: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Moerdijk



Figuur B-34: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Keizersveer

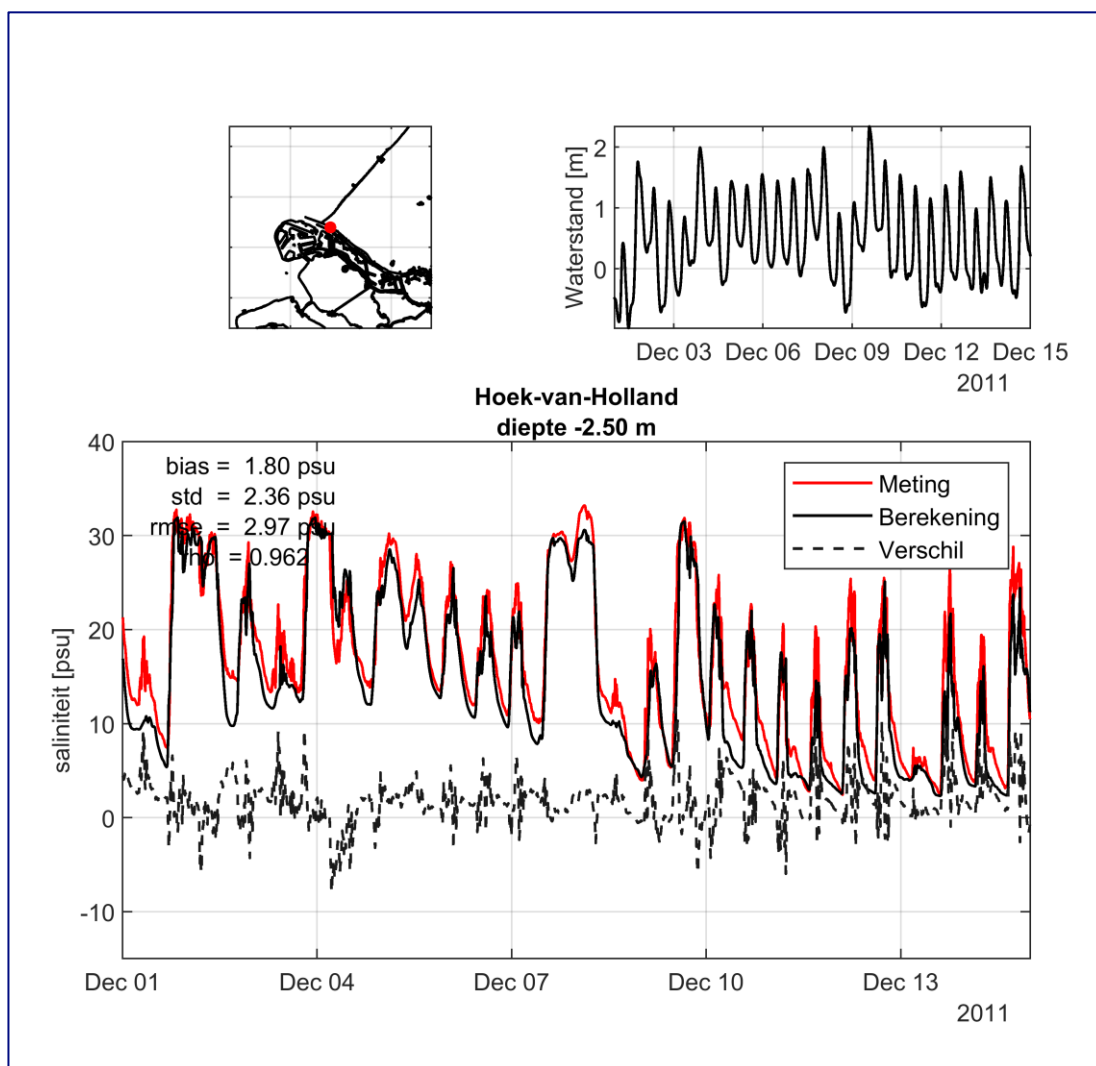


Figuur B-35: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Heesbeen

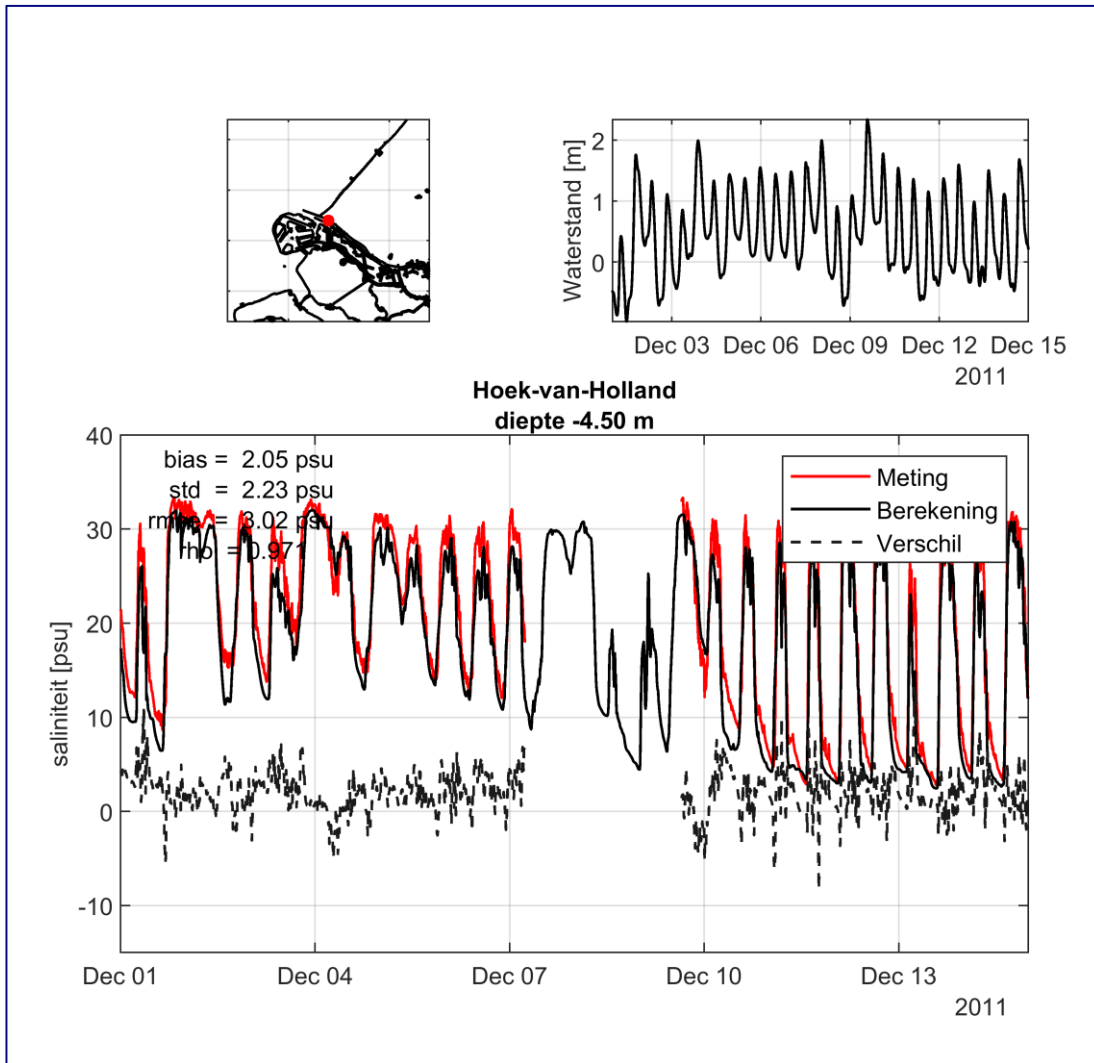


Figuur B-36: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft December 2011, station: Lith-dorp

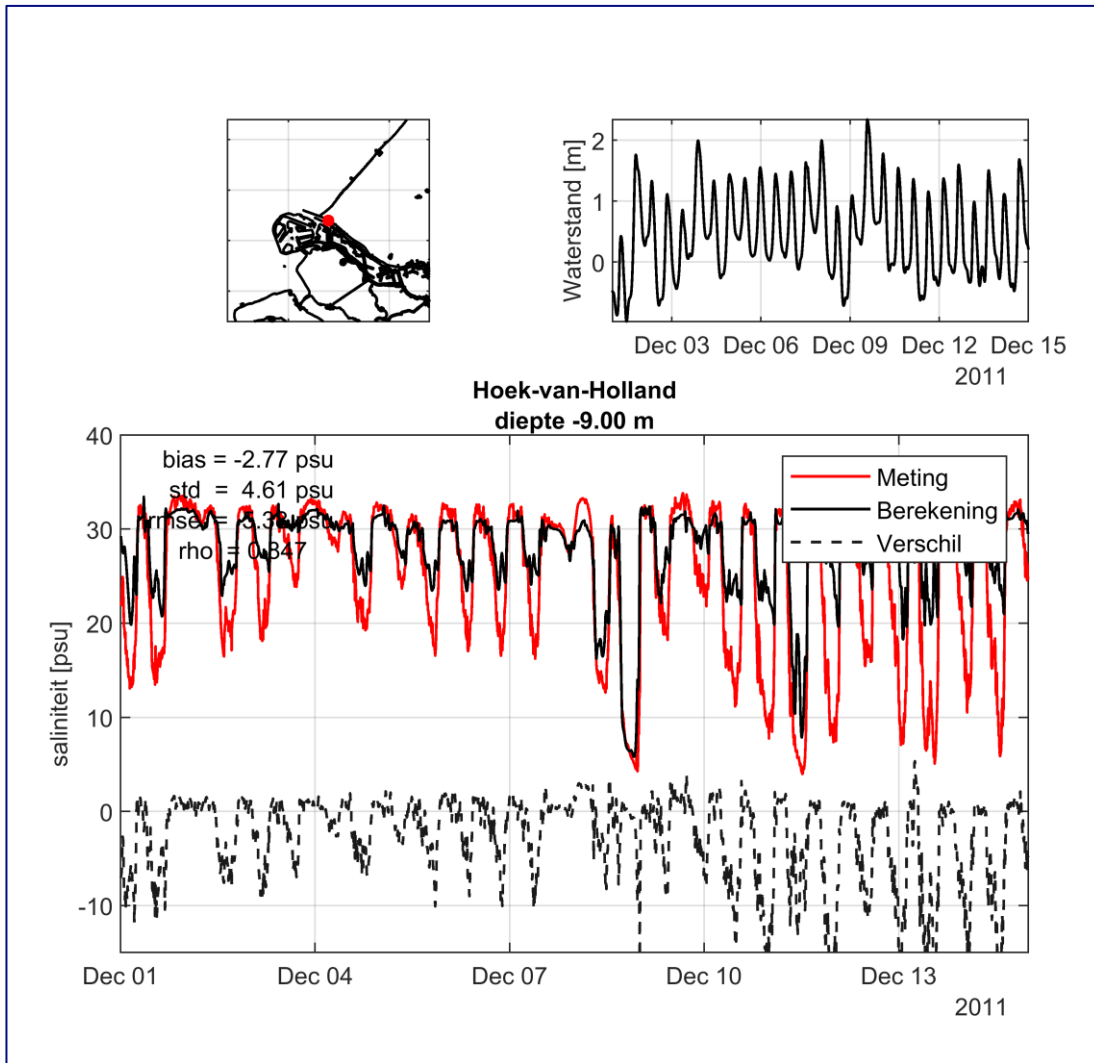
C Tijdreeksen Saliniteit December 2011



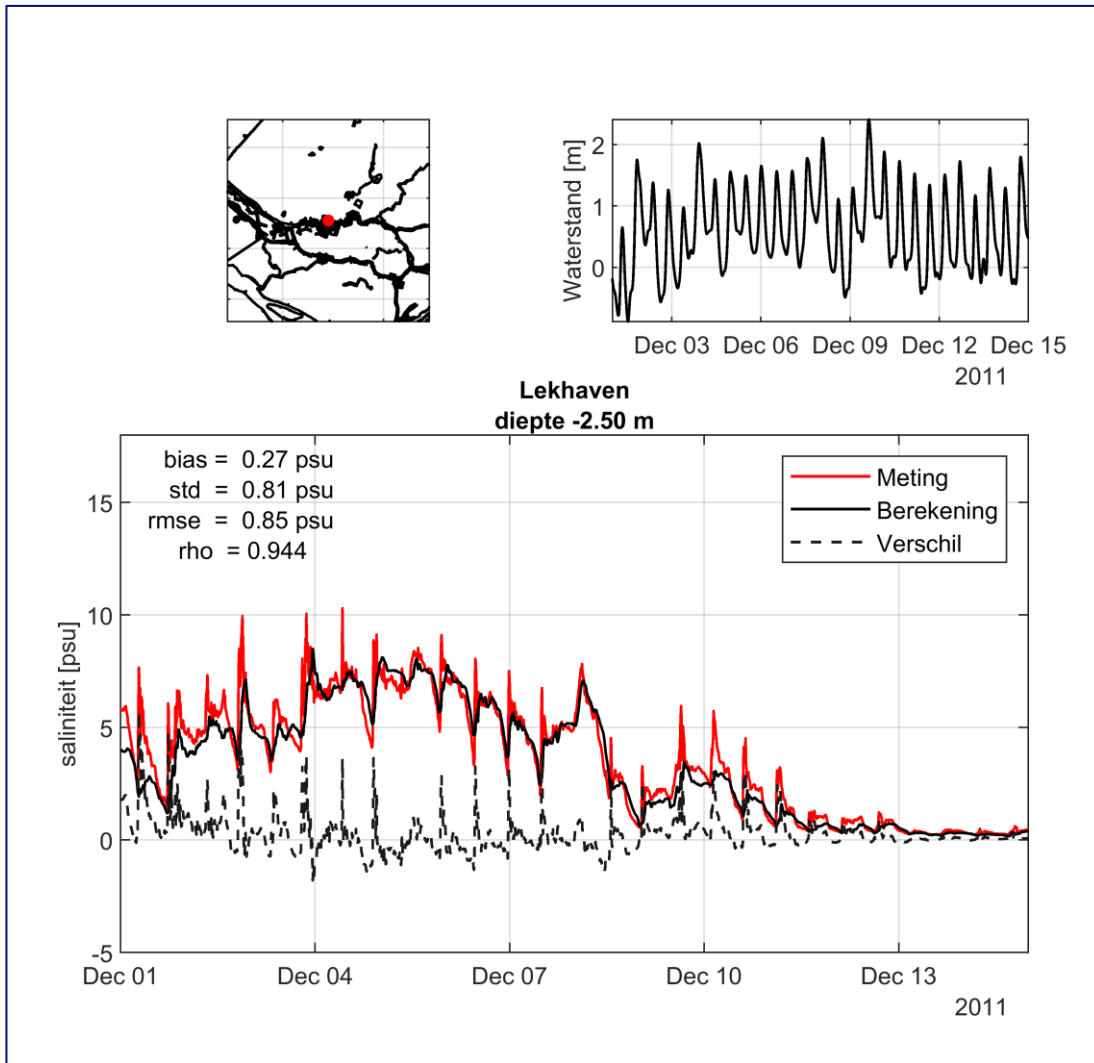
Figuur C-1: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Hoek van Holland; Diepte -2.5 m NAP



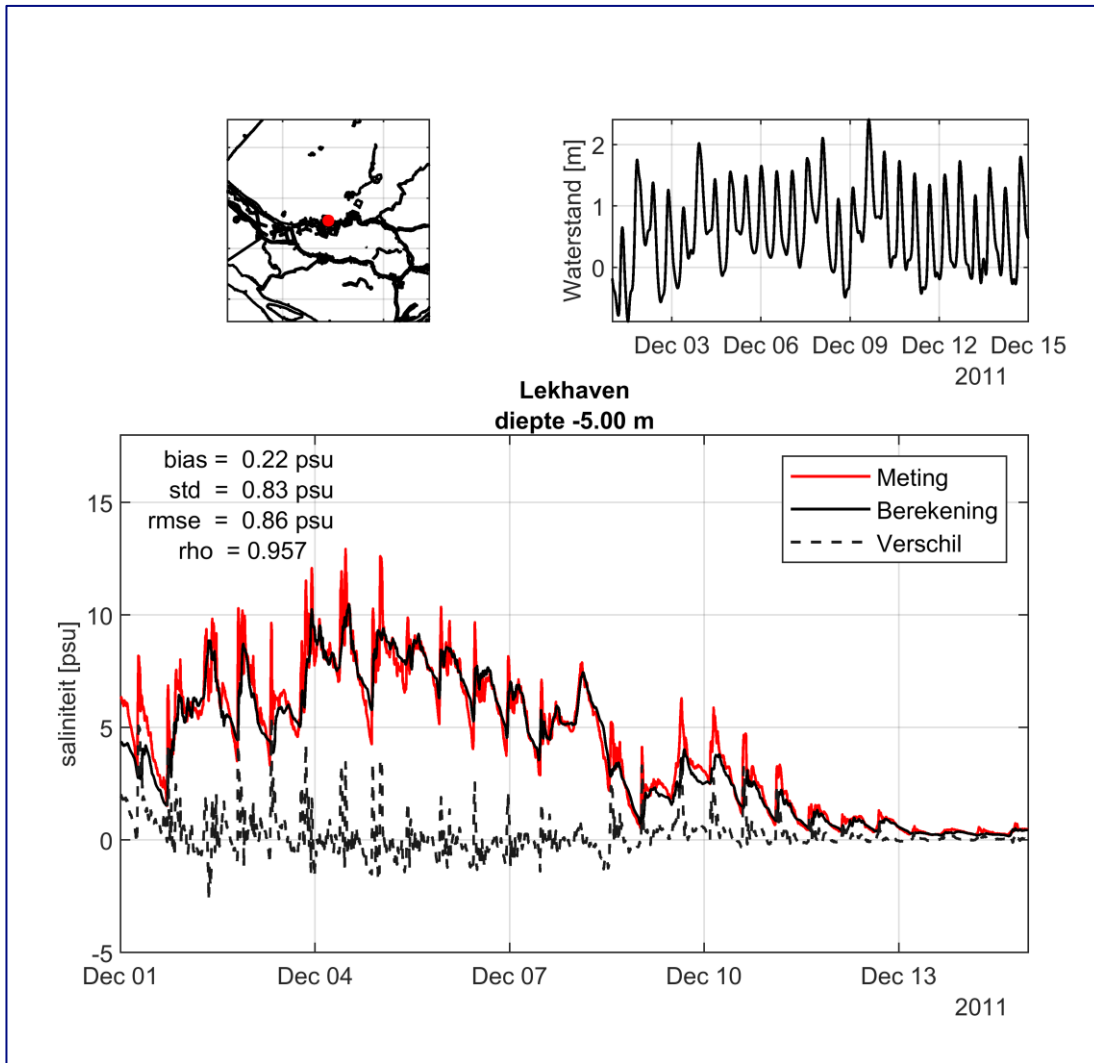
Figuur C-2: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Hoek van Holland; Diepte -4.5 m NAP



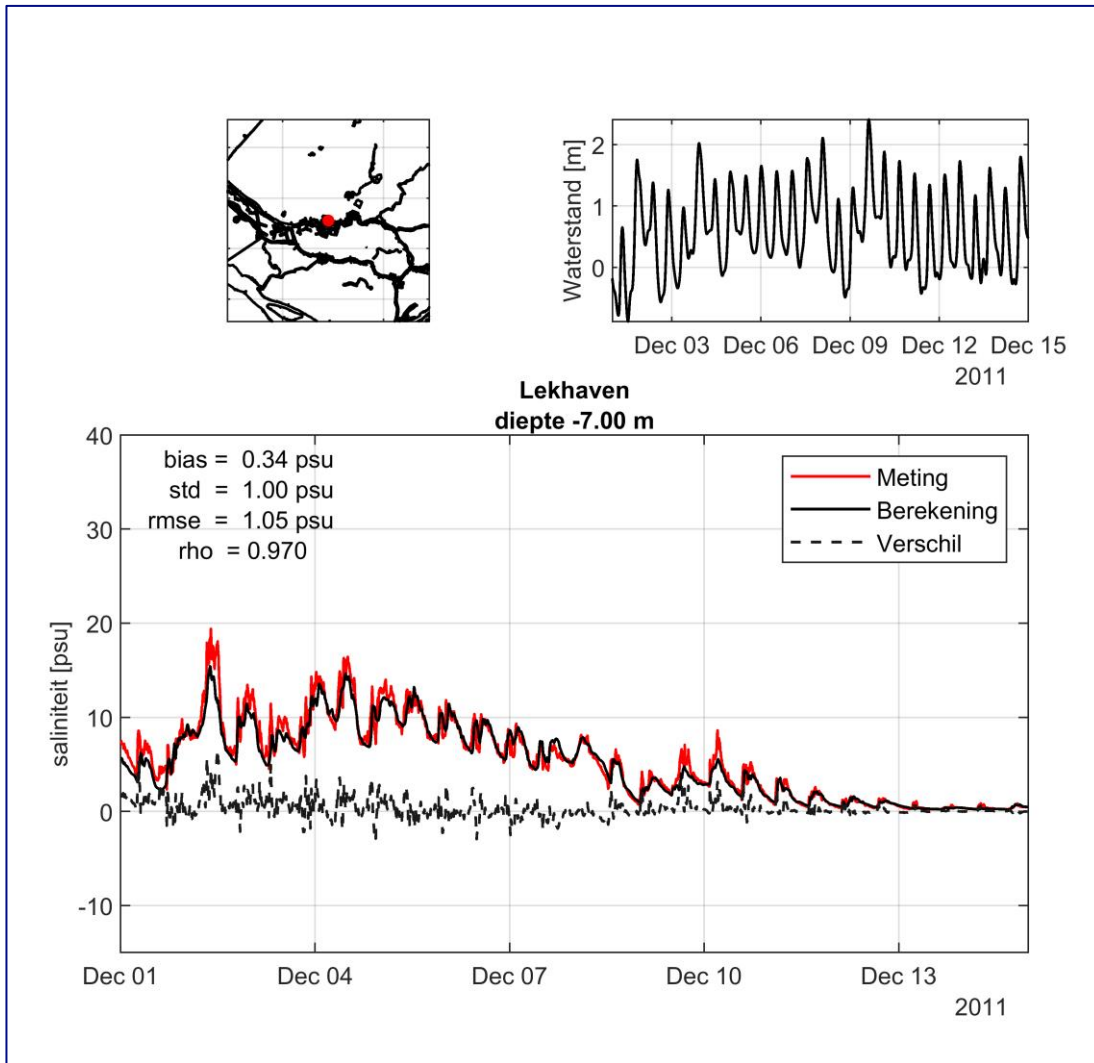
Figuur C-3: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Hoek van Holland; Diepte -9.0 m NAP



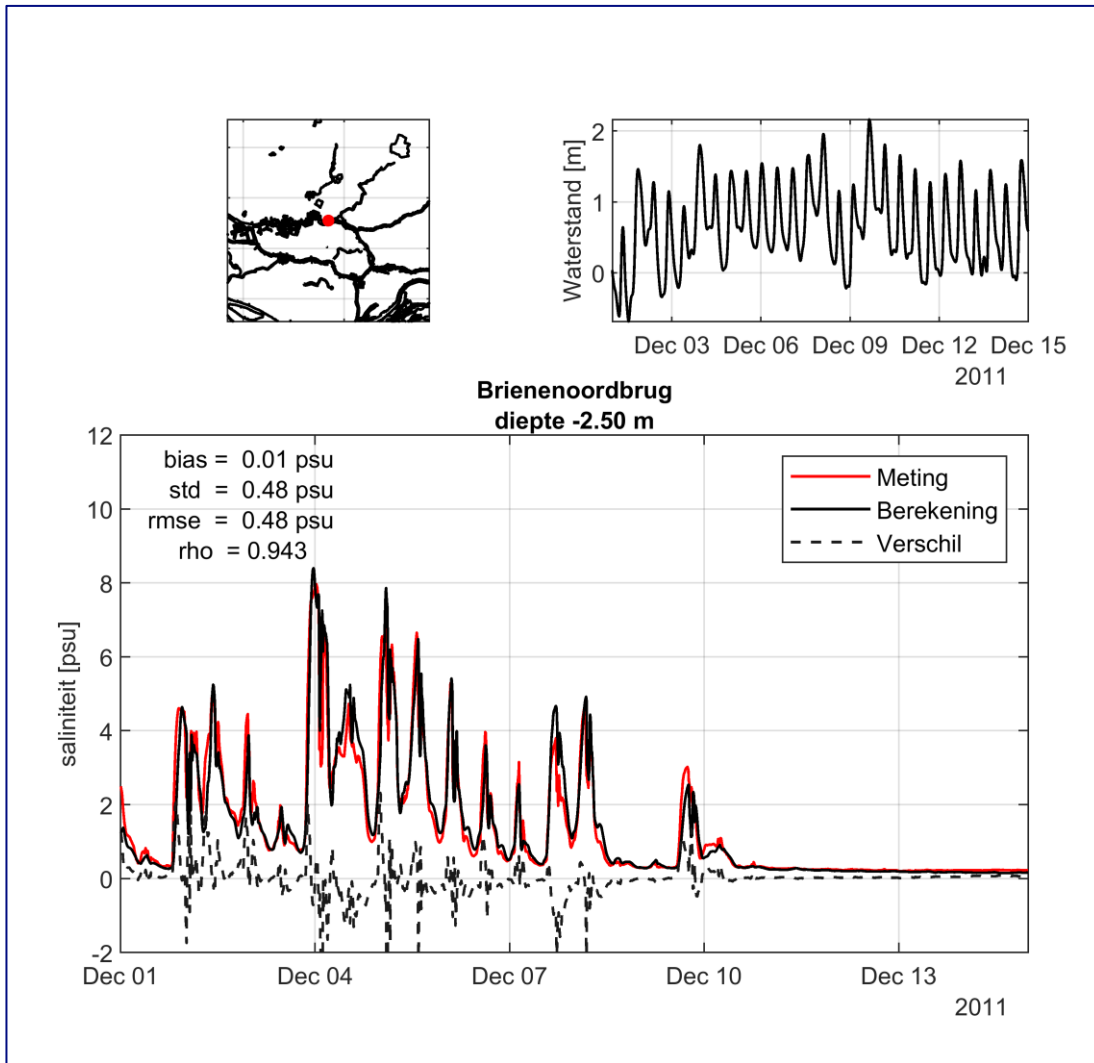
Figuur C-4: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Lekhaven; Diepte -2.5 m NAP



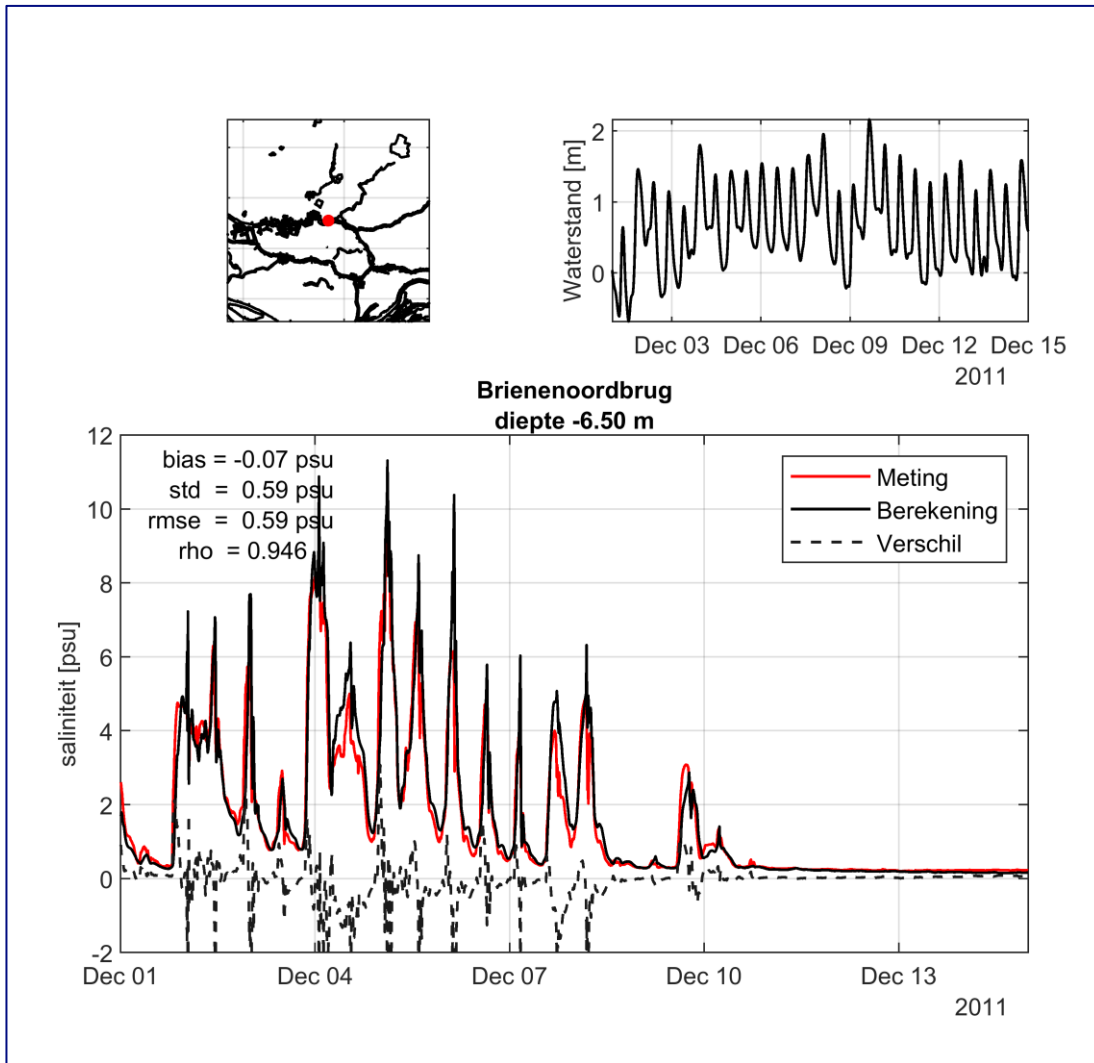
Figuur C-5: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Lekhaven; Diepte -5.0 m NAP



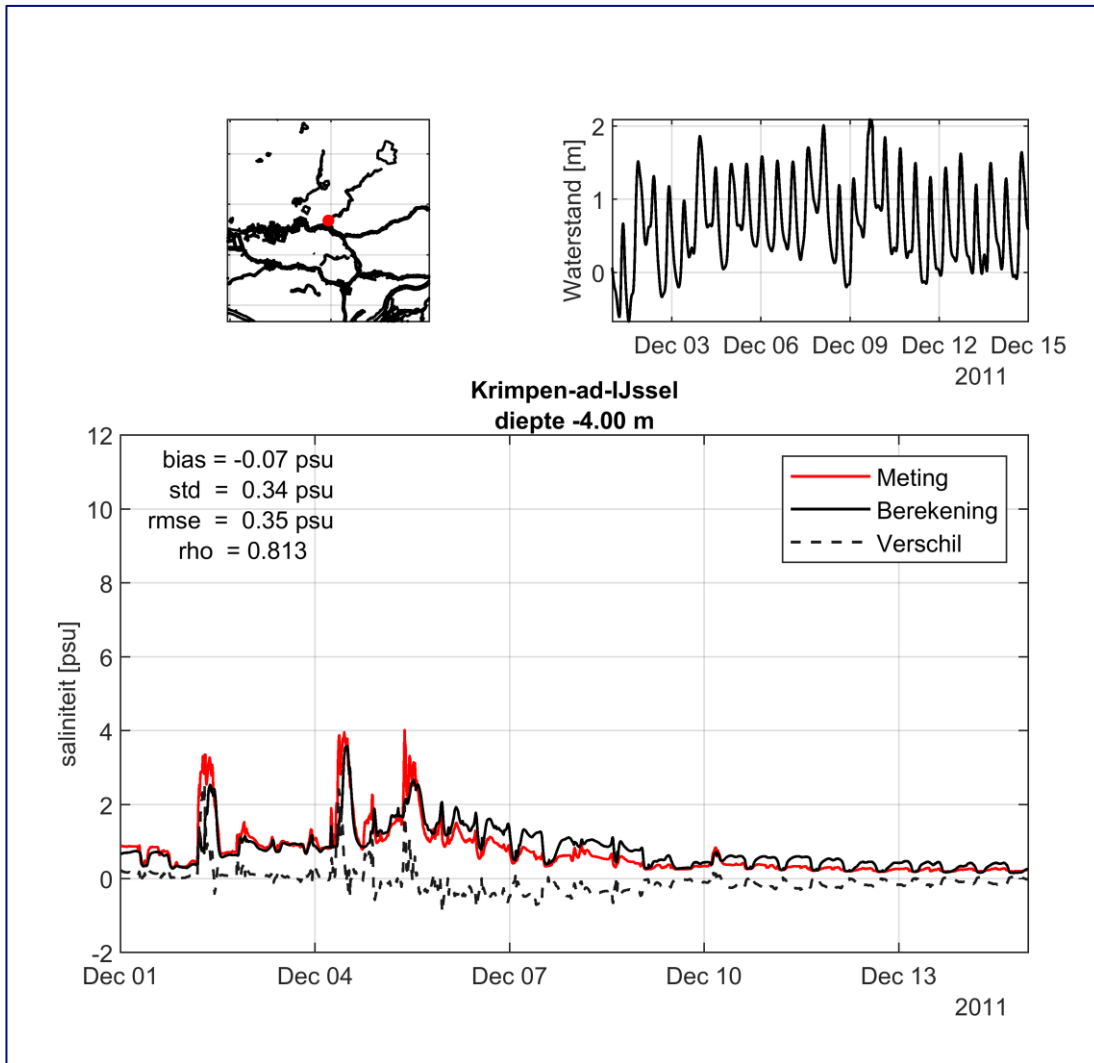
Figuur C-6: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Lekhaven; Diepte -7.0 m NAP



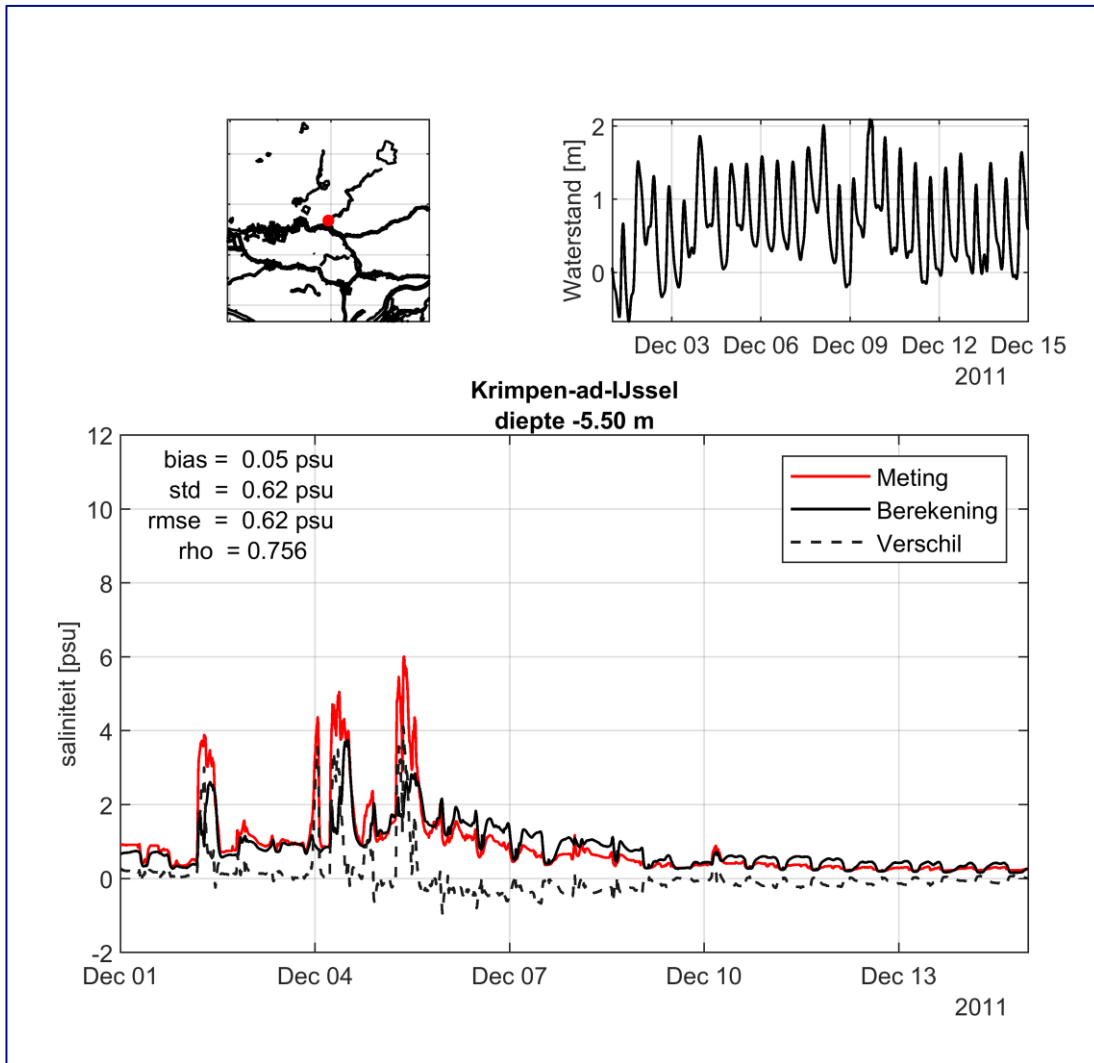
Figuur C-7: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Brienoordbrug; Diepte -2.5 m NAP



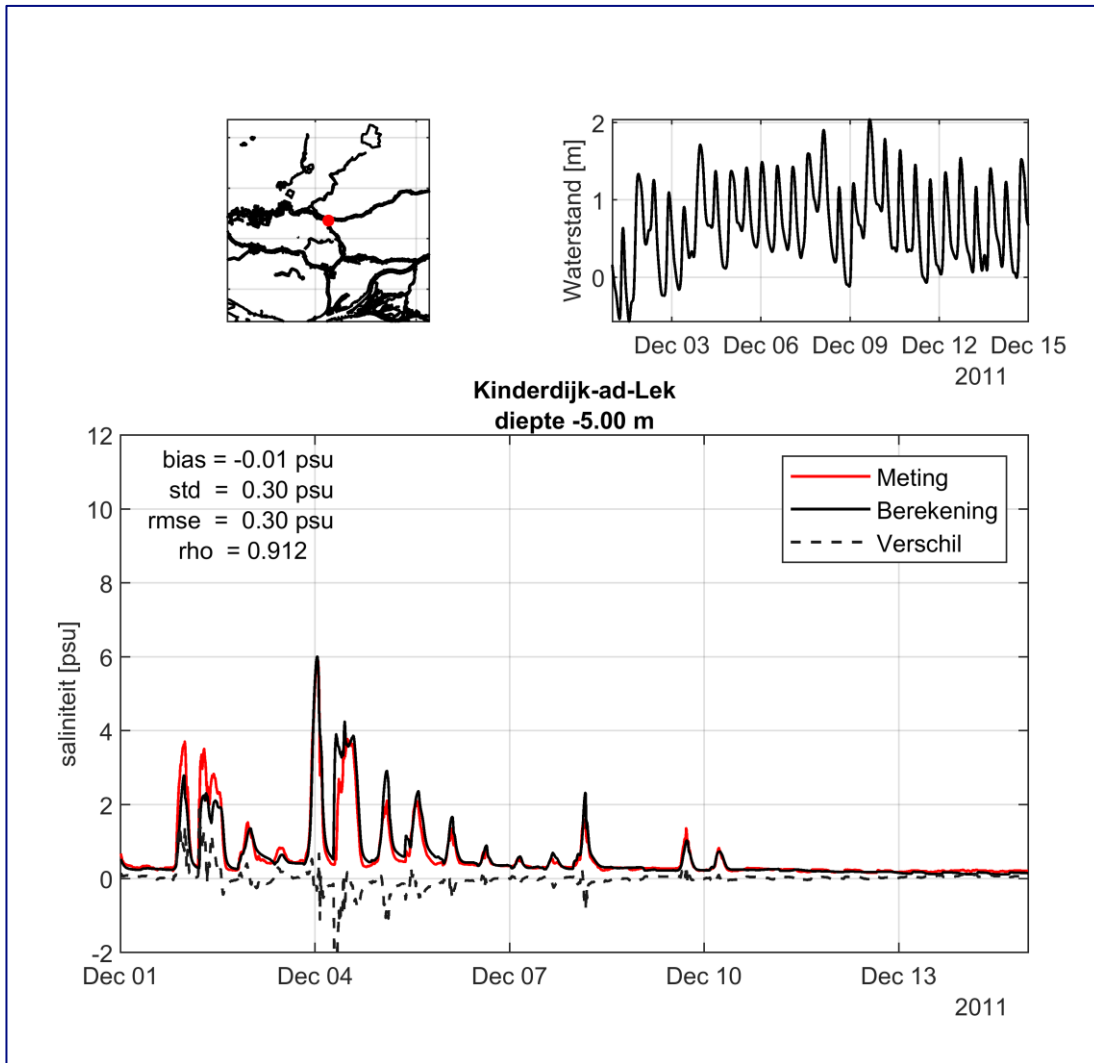
Figuur C-8: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Brienenoordbrug; Diepte -6.5 m NAP



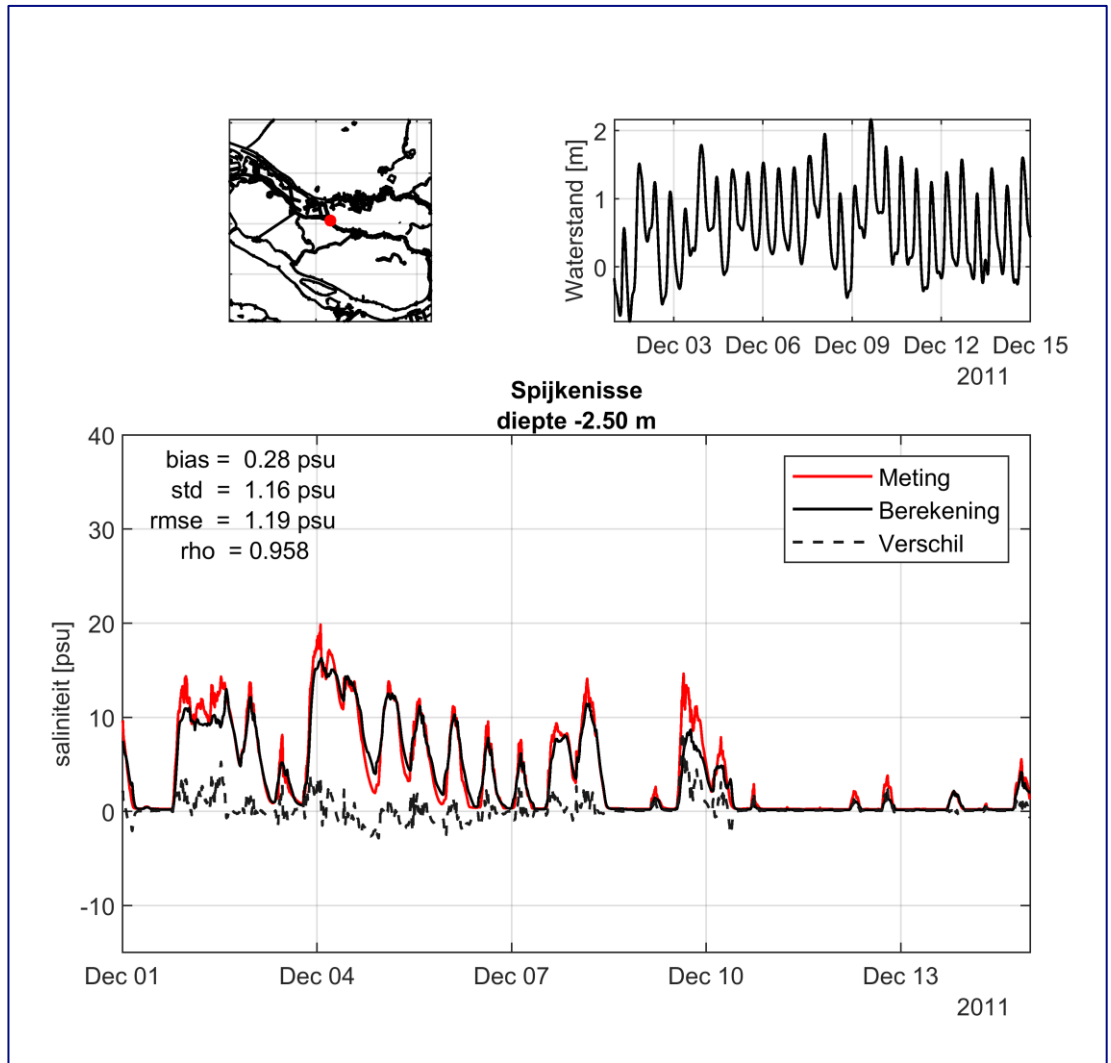
Figuur C-9: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Krimpen aan de IJssel; Diepte -4.0 m NAP



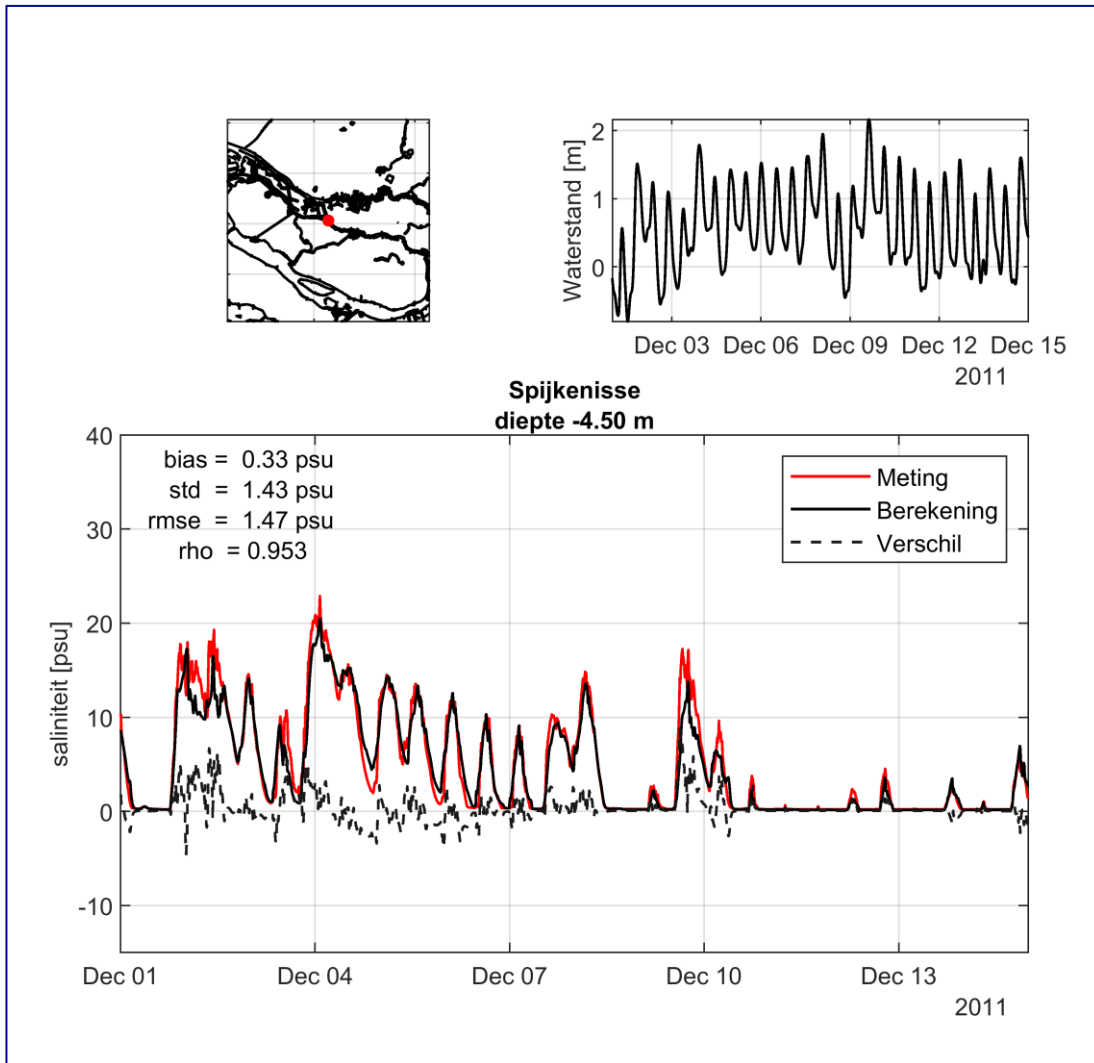
Figuur C-10: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Krimpen aan de IJssel; Diepte -5.5 m NAP



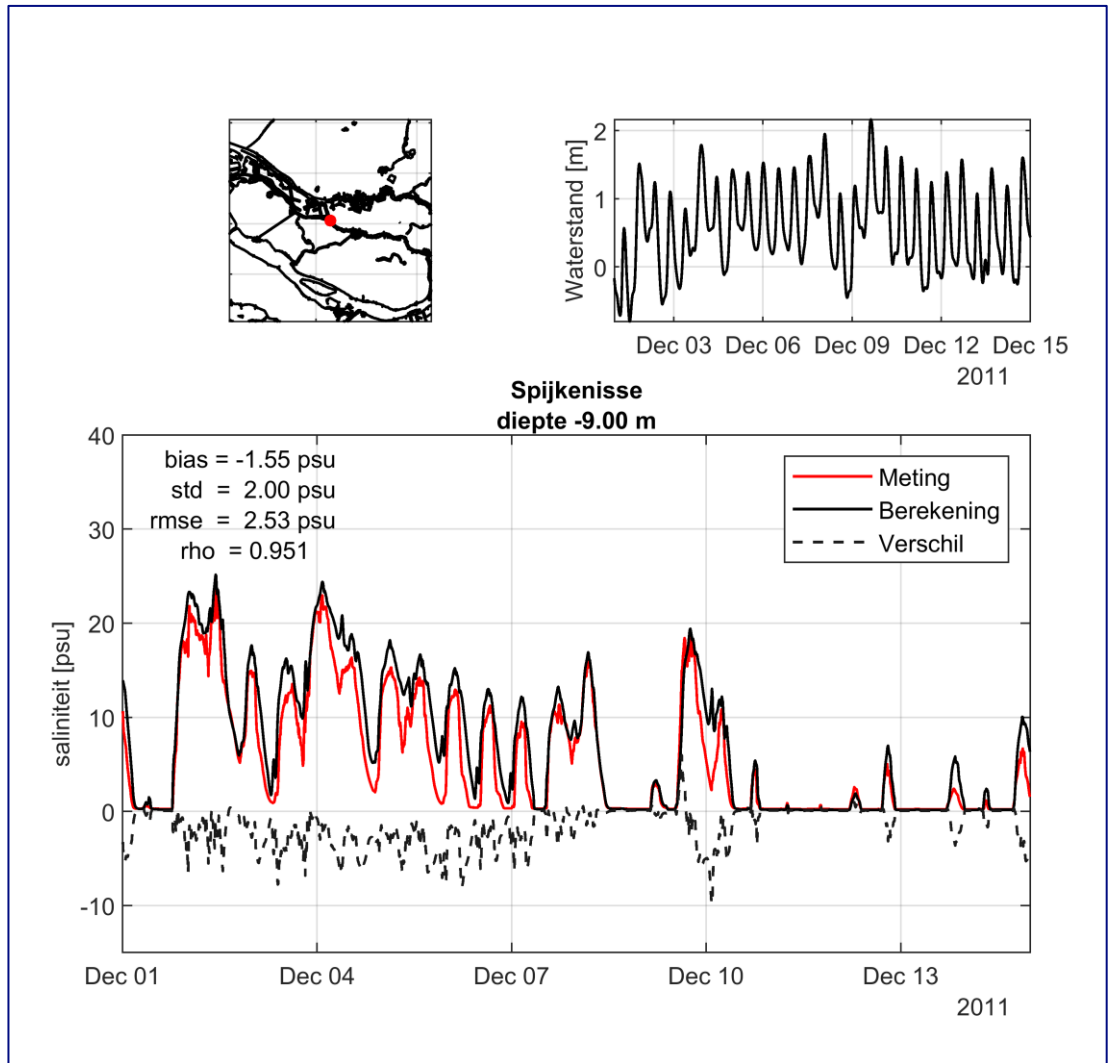
Figuur C-11: Gemeten en berekende saliniteit, 1^o helft December 2011, station: Kinderdijk aan de lek; Diepte -4.0 m NAP



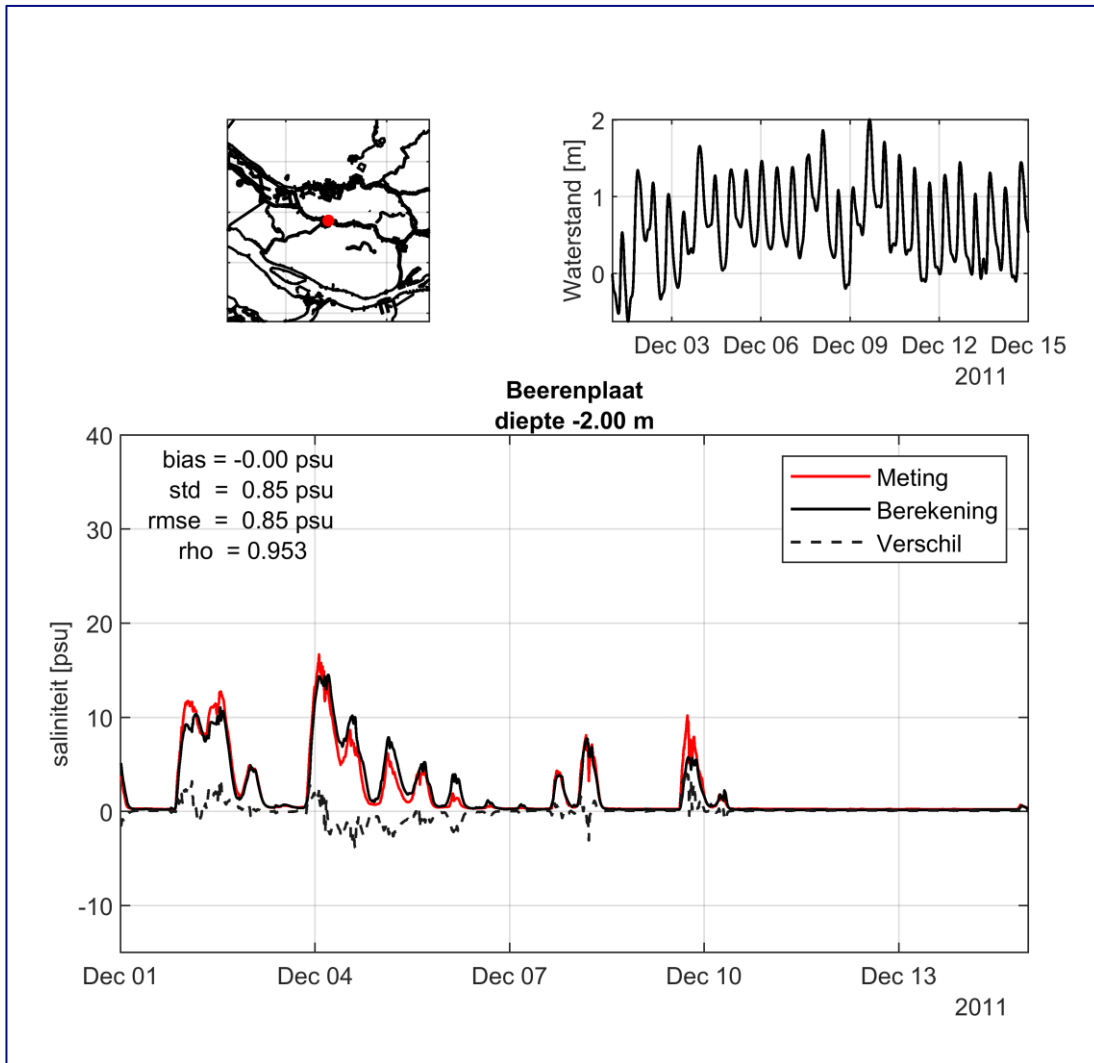
Figuur C-12: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Spijkenisserbrug; Diepte -2.5 m NAP



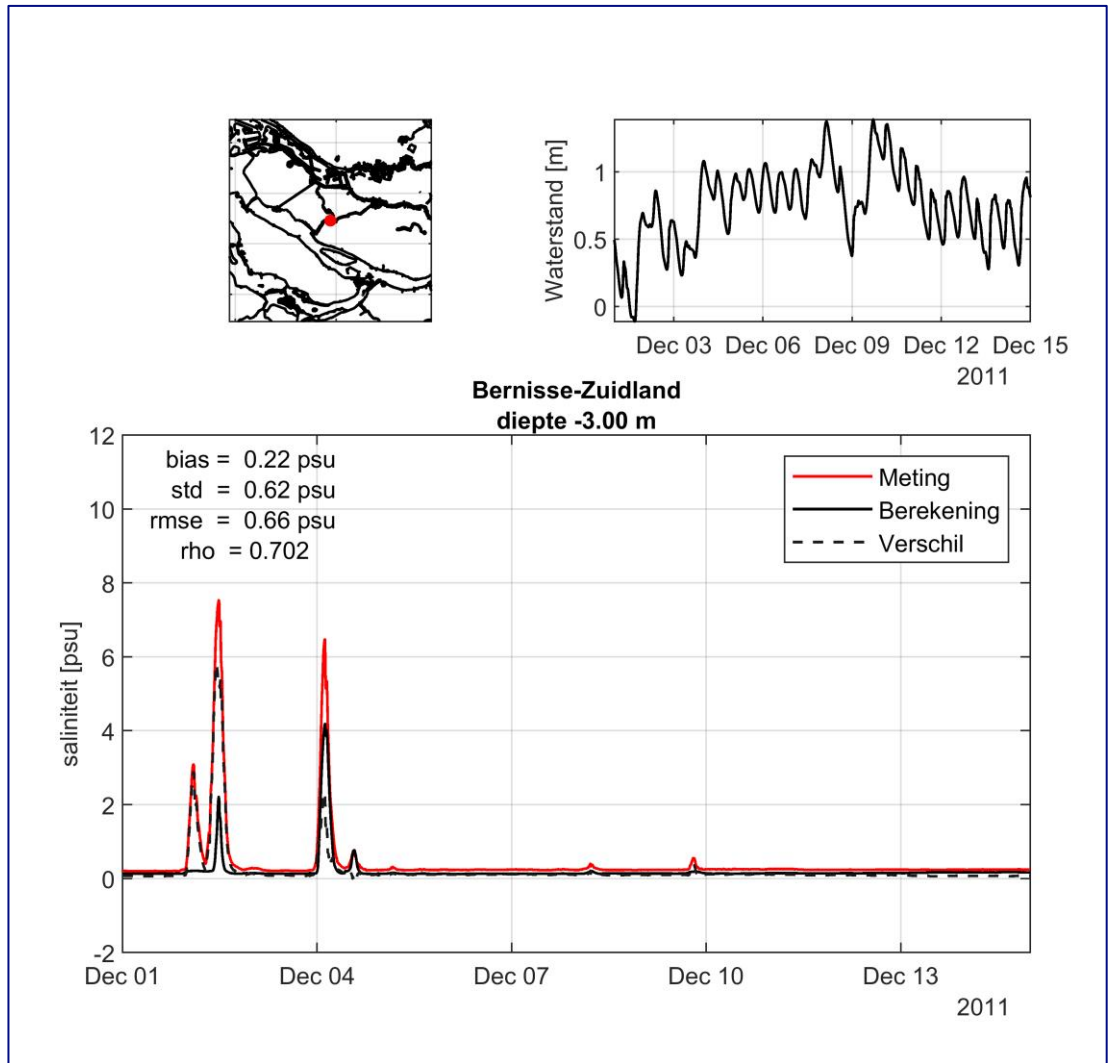
Figuur C-13: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Spijkenisserbrug; Diepte -4.5 m NAP



Figuur C-14: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Spijkenisserbrug; Diepte -9.0 m NAP



Figuur C-15: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Beerenplaat; Diepte -2.0 m NAP



Figuur C-16: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft December 2011, station: Zuidland; Diepte -3.0 m NAP

D Pearson Correlatie coëfficiënt

De Pearson correlatie coëfficiënt $R(ho)$ drukt de sterkte van een lineaire samenhang tussen twee variabelen uit in een getal. Wiskundig is deze parameter gedefinieerd als:

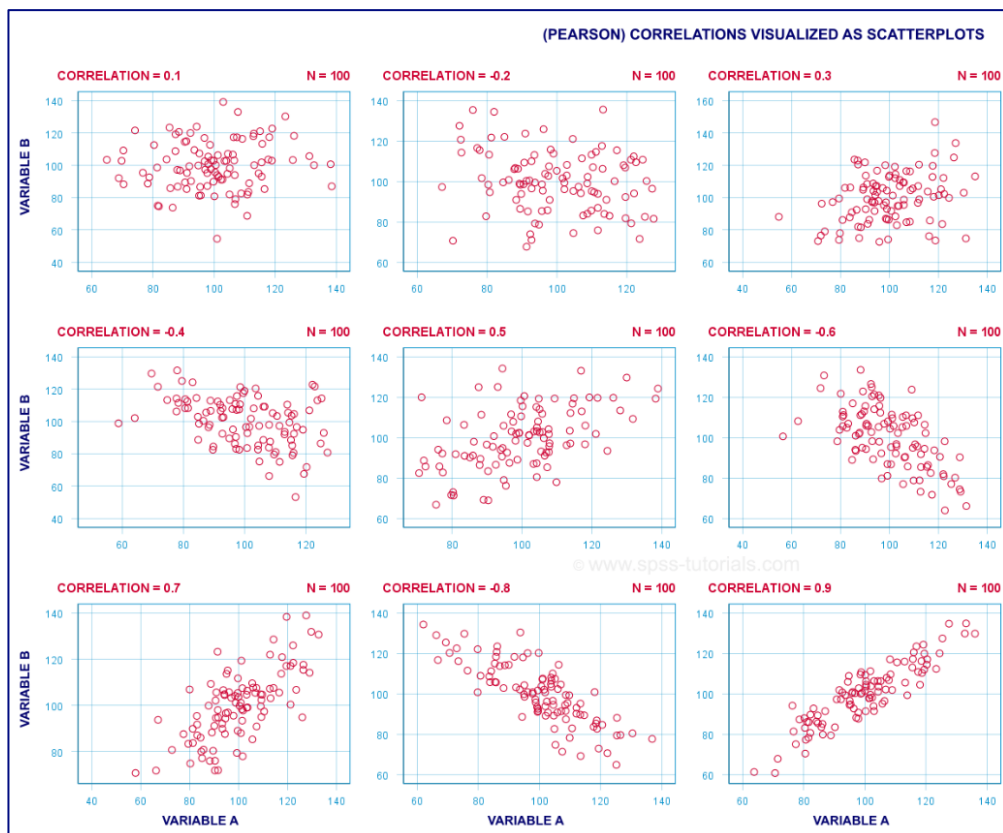
$$R(ho) = \frac{\sum(x - m_x)(y - m_y)}{\sqrt{\sum(x - m_x)^2 \sum(y - m_y)^2}}$$

Waarin:

- $R(ho)$ = Correlatiecoëfficiënt [-]
- (x,y) = De te correleren variabelen, bijvoorbeeld de gemeten saliniteit (x) en de berekende saliniteit (y) [psu]
- (m_x, m_y) = Gemiddelde waarden van variabelen x en y , bijvoorbeeld gemiddelde van de gemeten saliniteit (m_x) en het gemiddelde van de berekende saliniteit (m_y) [psu]

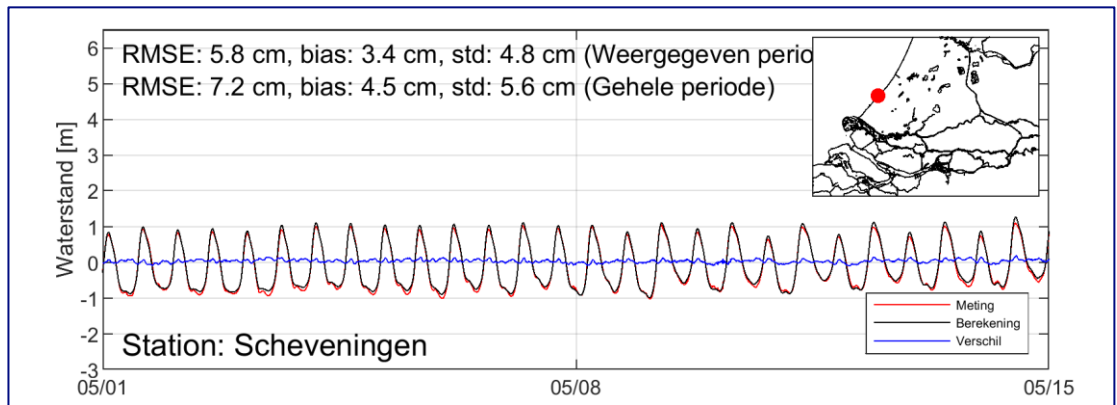
Een correlatiecoëfficiënt gelijk aan 1 betekent een lineair verband tussen de twee variabelen, dus de berekende saliniteit is altijd exact gelijk aan de gemeten waarde. Een correlatiecoëfficiënt gelijk aan 0 betekent geen lineair verband. Een correlatiecoëfficiënt gelijk aan -1 een negatieve correlatie betekent een hoge gemeten saliniteit waar de berekende waarde laag is en omgekeerd.

Als illustratie van de betekenis van de correlatiecoëfficiënt, geeft Figuur D-1 de waarde van deze coëfficiënt bij verschillende scatterdiagrammen.

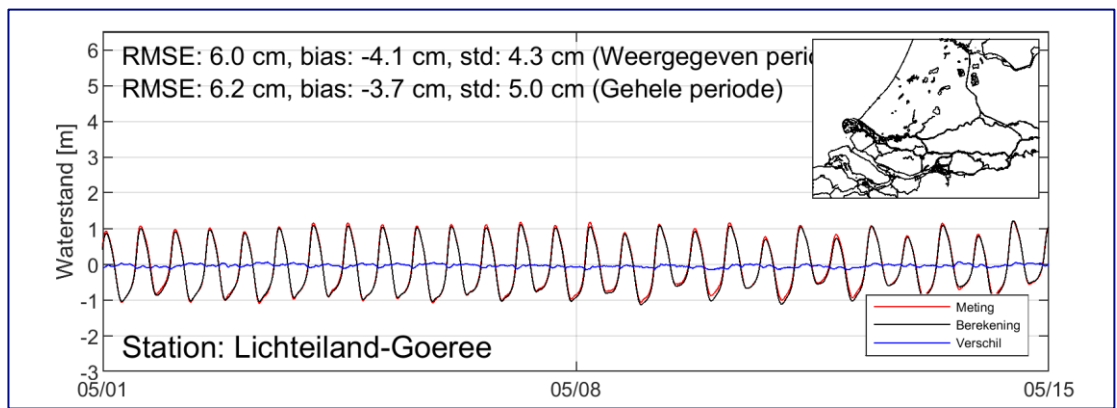


Figuur D-1: Waarde correlatiecoëfficiënt bij verschillende scatterdiagrammen

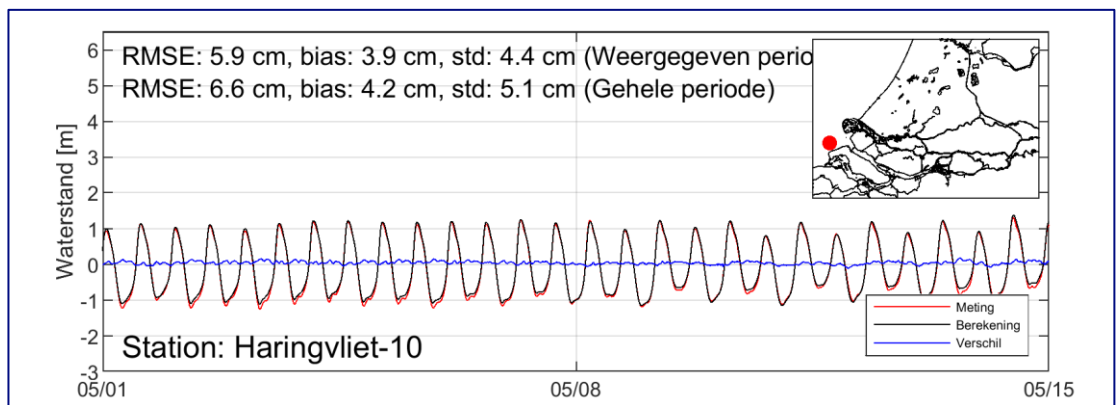
E Tijdreeksen Waterstanden Mei 2011



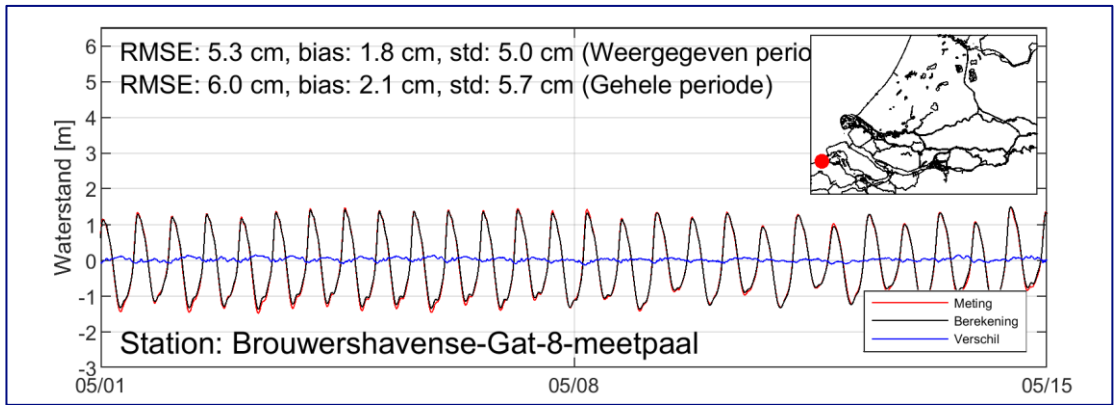
Figuur E-1: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Scheveningen



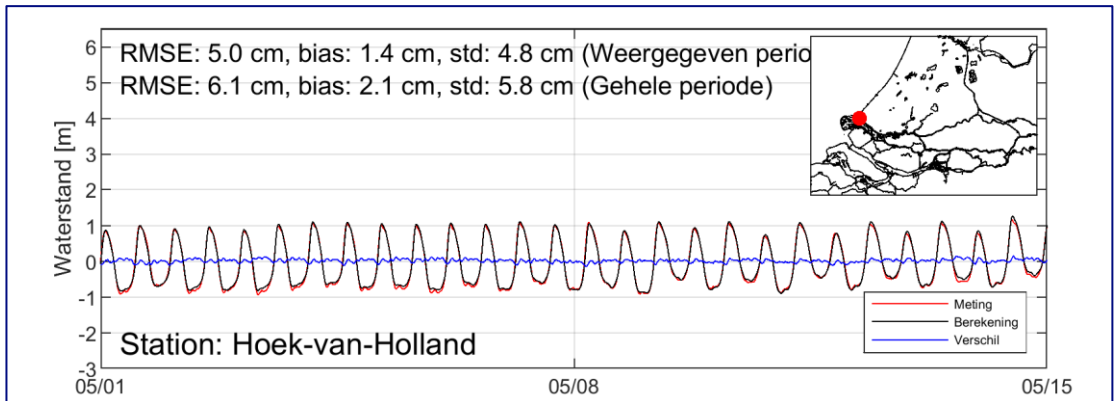
Figuur E-2: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Lichteiland-Goeree



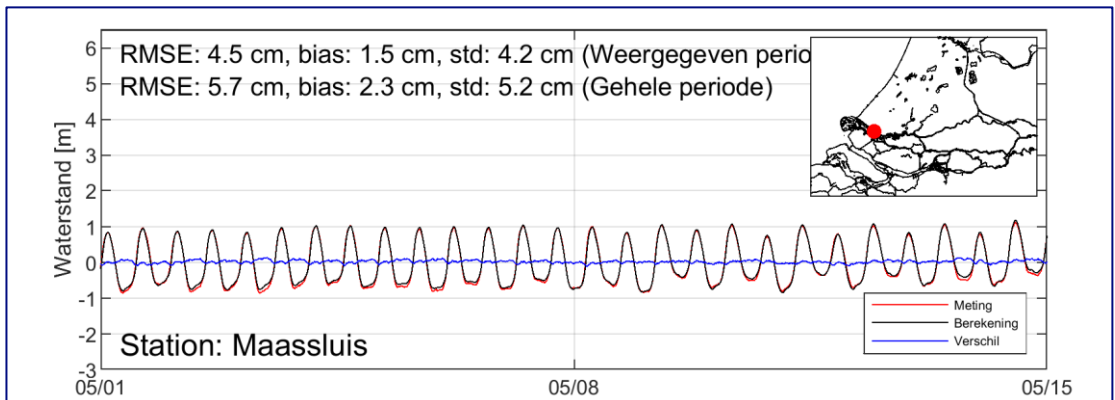
Figuur E-3: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Haringvliet-10



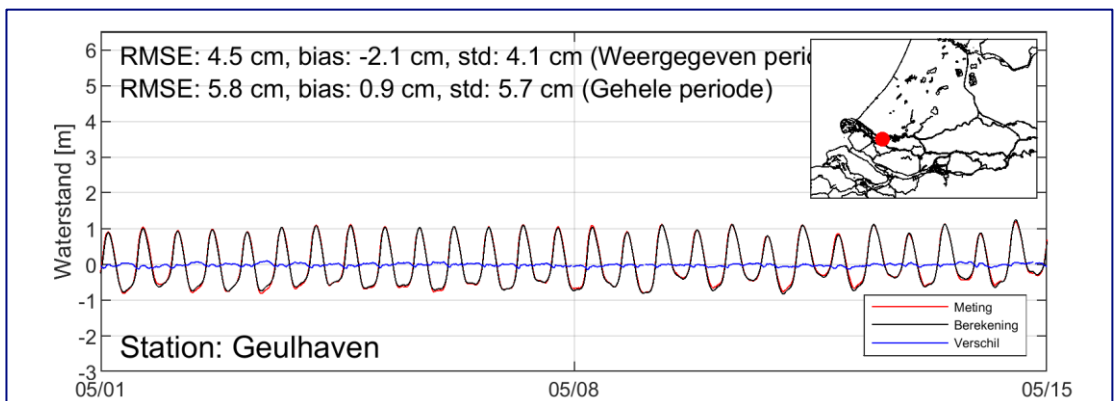
Figuur E-4: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Brouwershavense Gat8



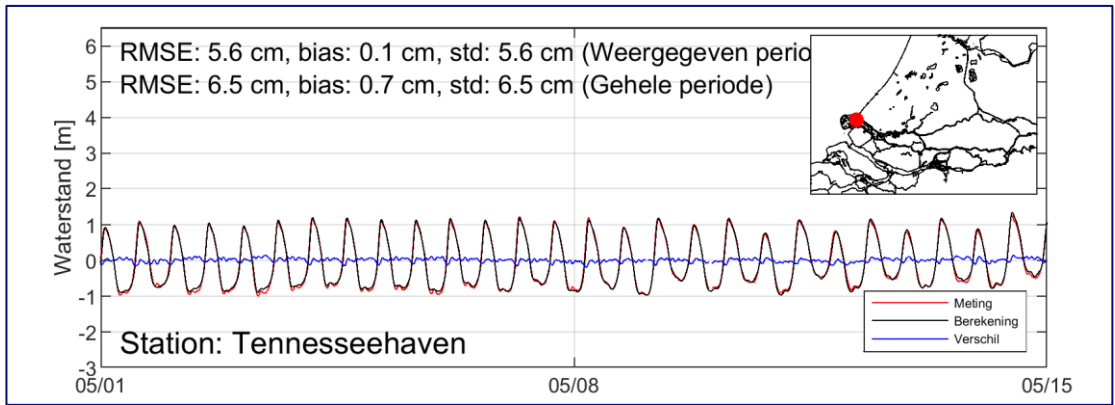
Figuur E-5: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Hoek-van-Holland



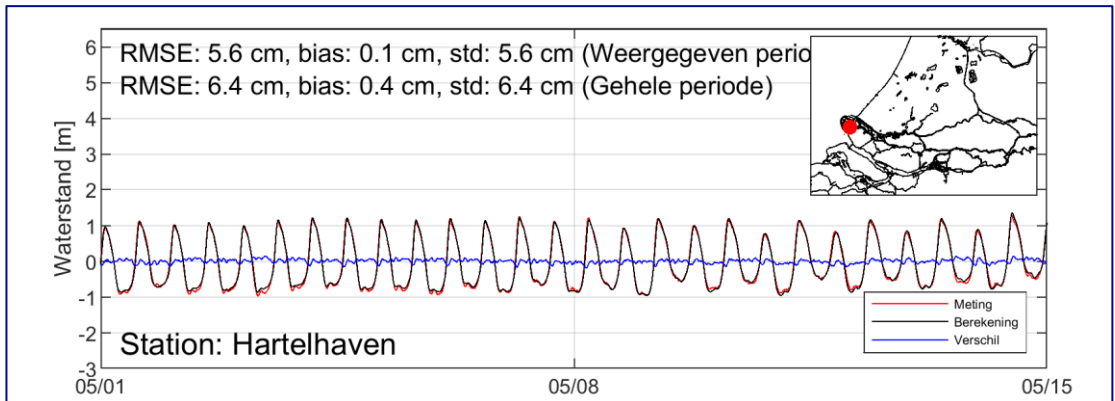
Figuur E-6: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Maassluis



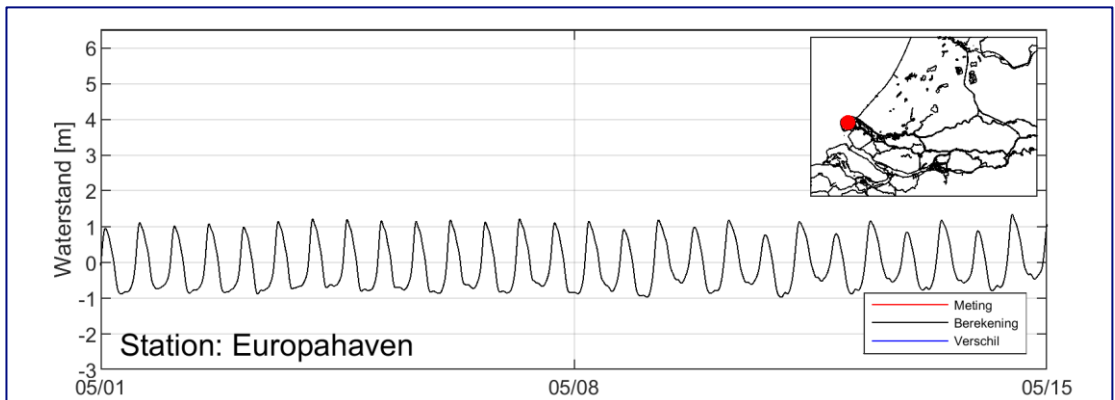
Figuur E-7: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Geulhaven



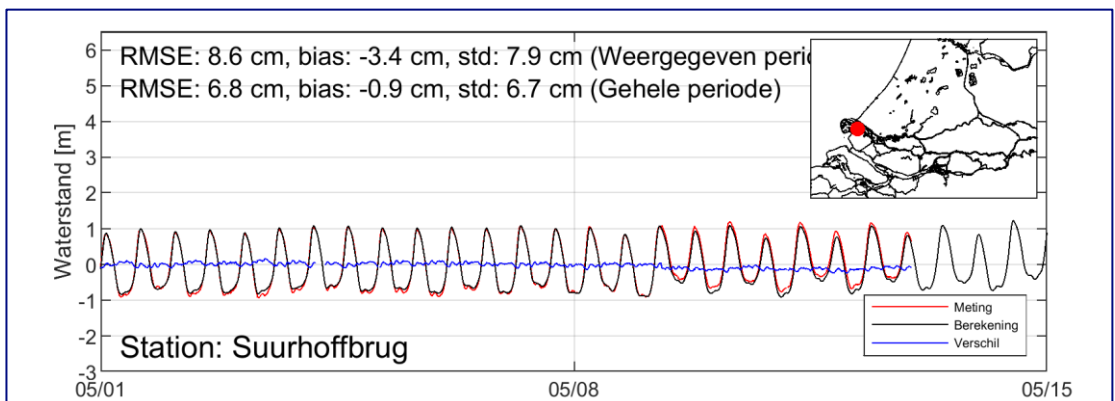
Figuur E-8: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Tennesseehaven



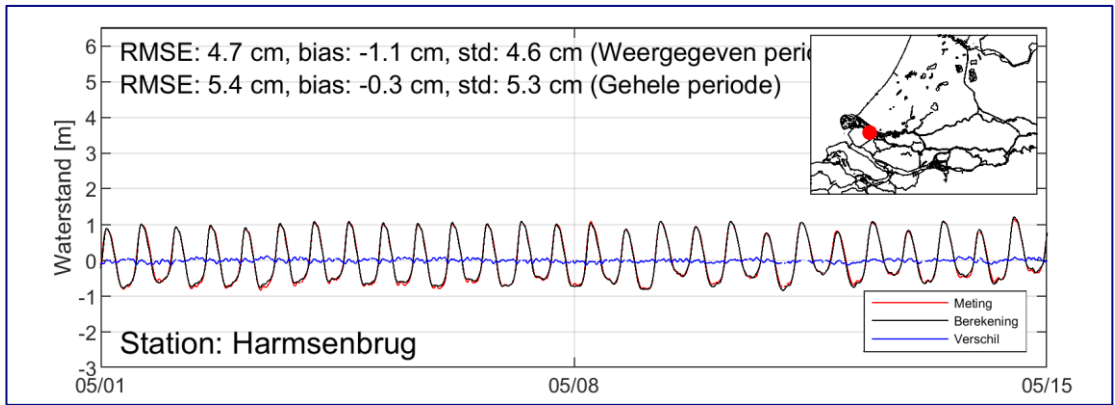
Figuur E-9: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Hartelhaven



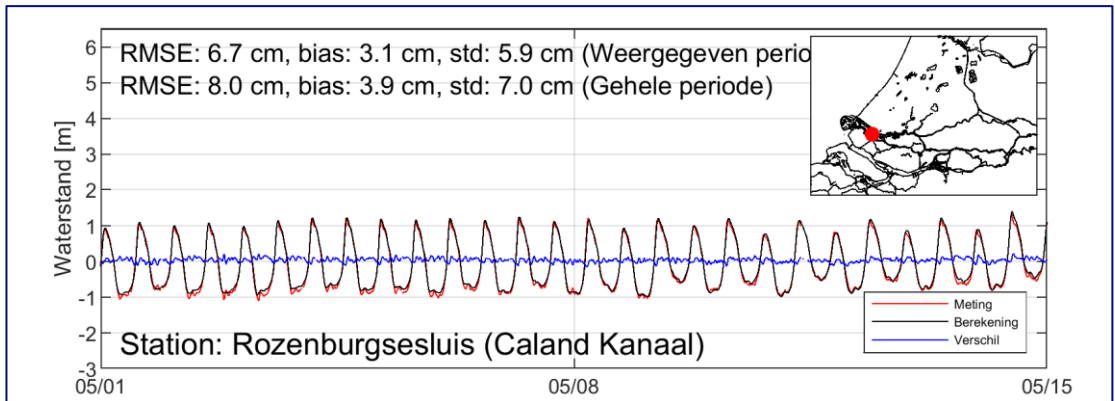
Figuur E-10: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Europahaven



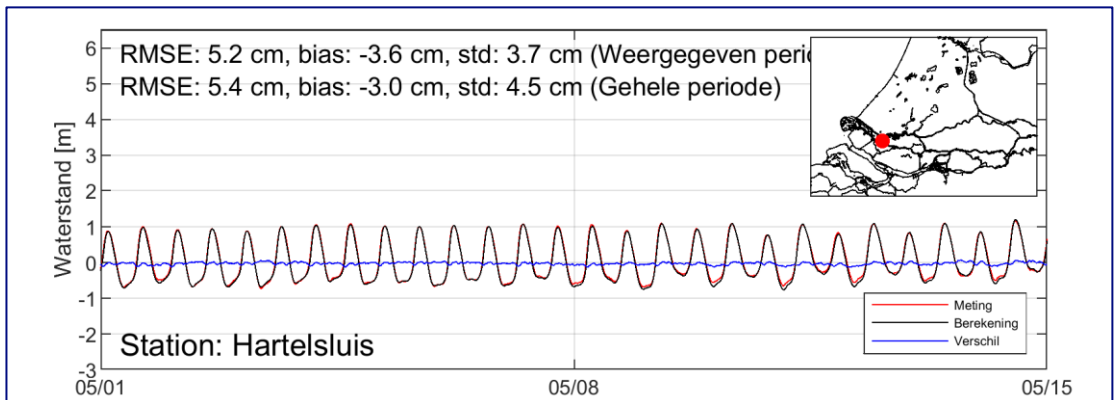
Figuur E-11: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Suurhoffbrug



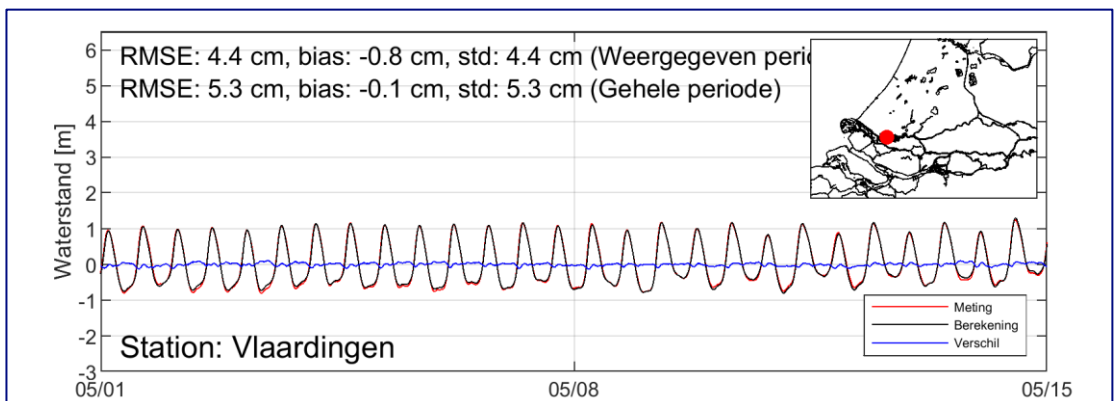
Figuur E-12: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Harmsenbrug



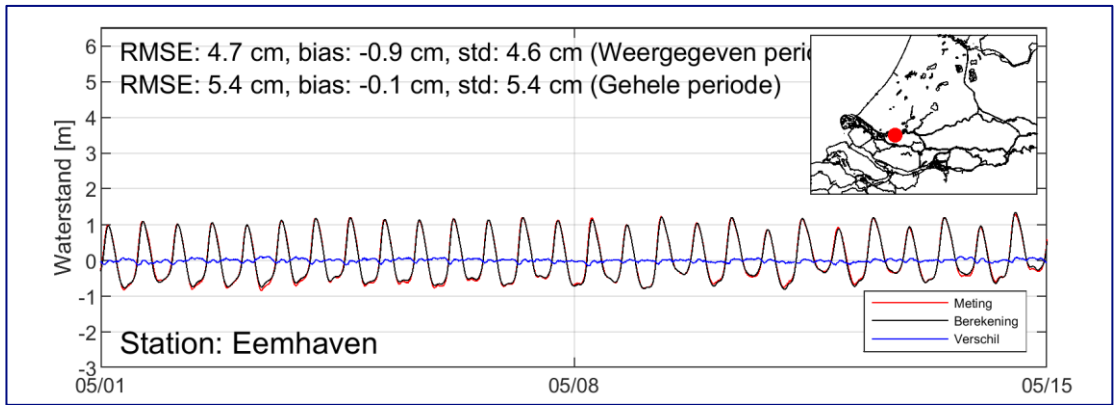
Figuur E-13: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Rozenburgsesluis



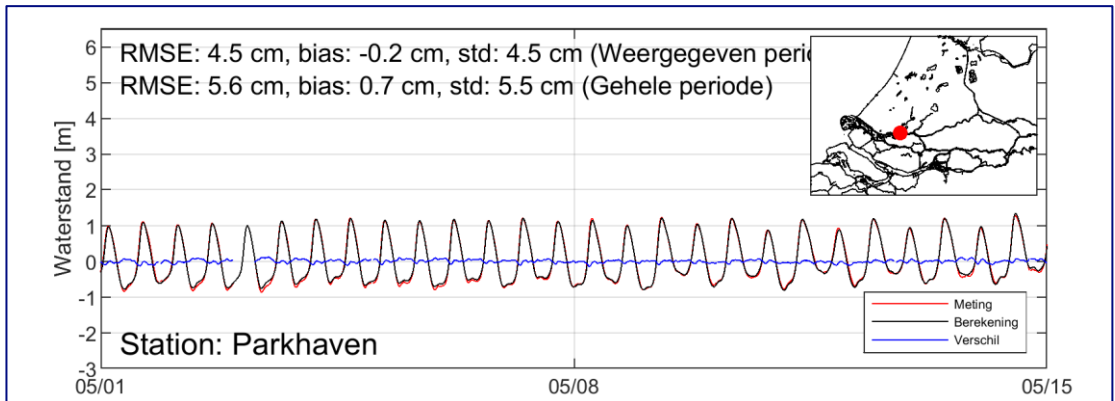
Figuur E-14: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Hartelsluis



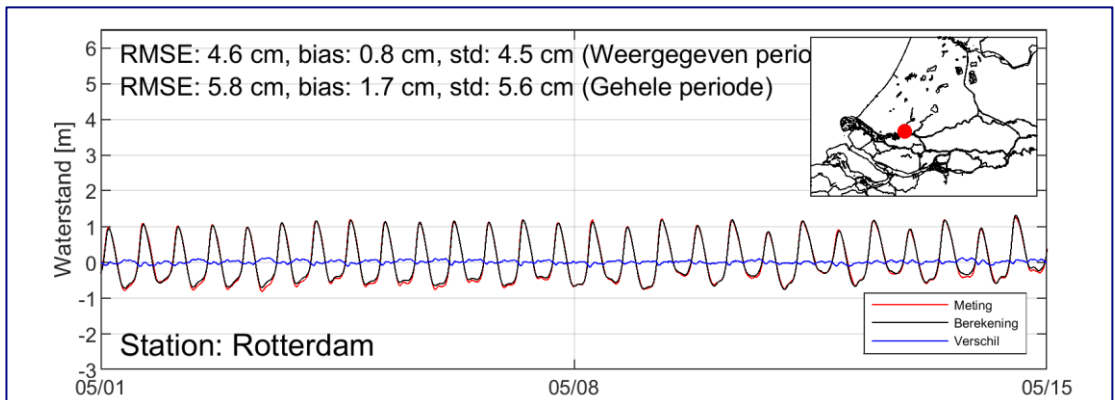
Figuur E-15: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Vlaardingen



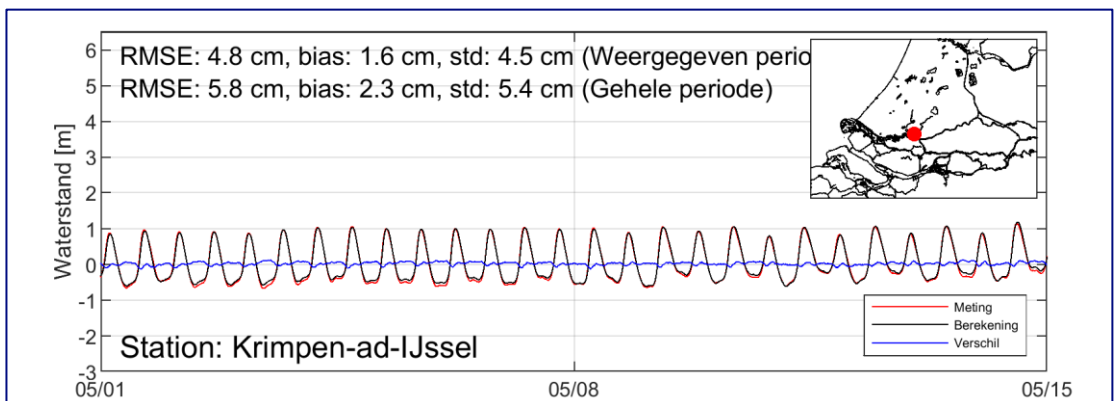
Figuur E-16: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: 1^o-Eemhaven



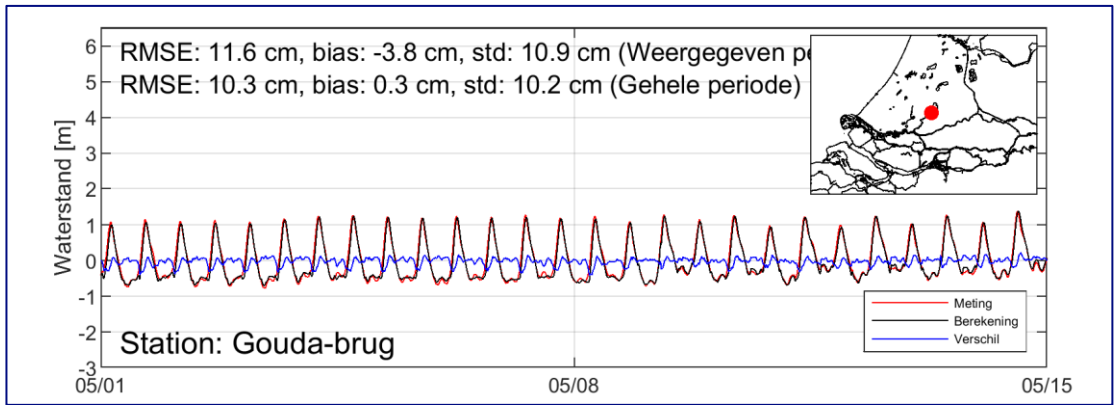
Figuur E-17: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Parkhaven



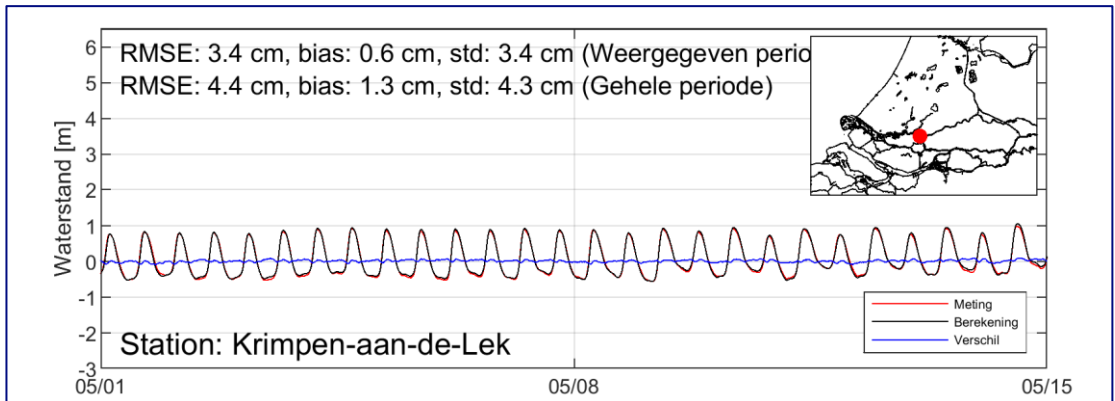
Figuur E-18: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Rotterdam



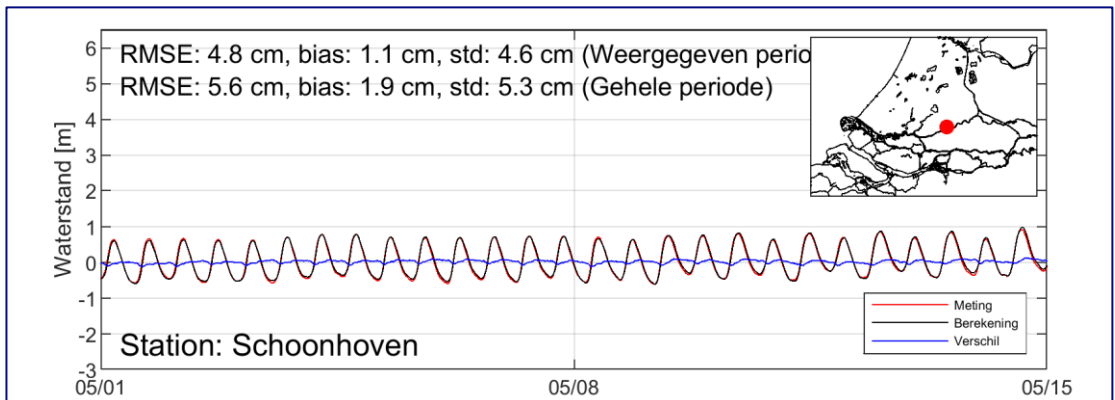
Figuur E-19: Gemeten en berekende waterstanden, 1^o helft Mei 2011, station: Krimpen aan de IJssel



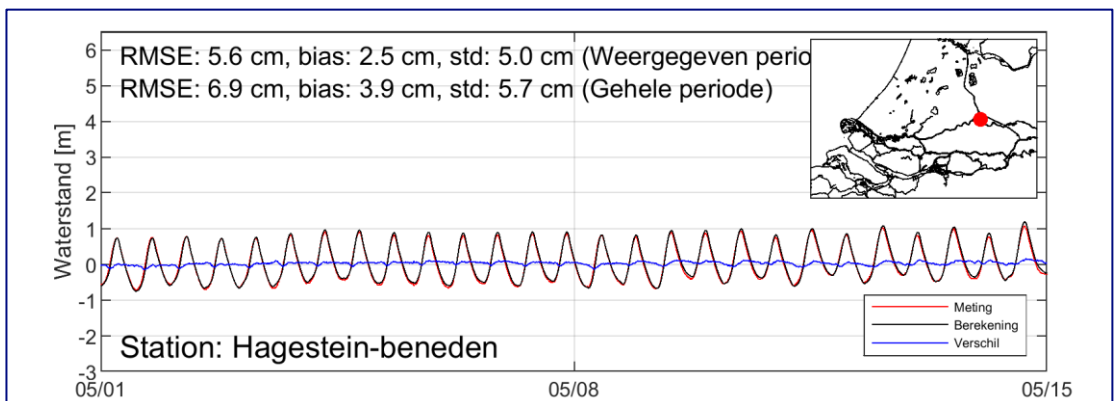
Figuur E-20: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Gouda brug



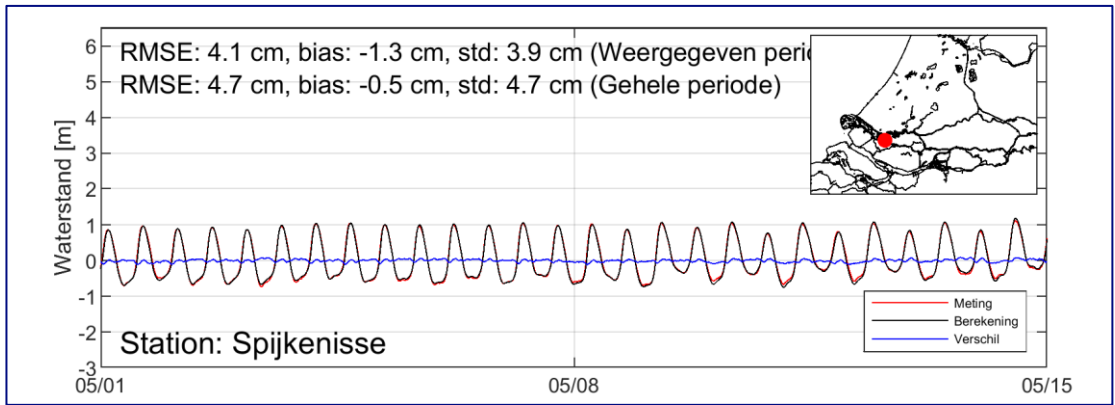
Figuur E-21: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Krimpen aan de Lek



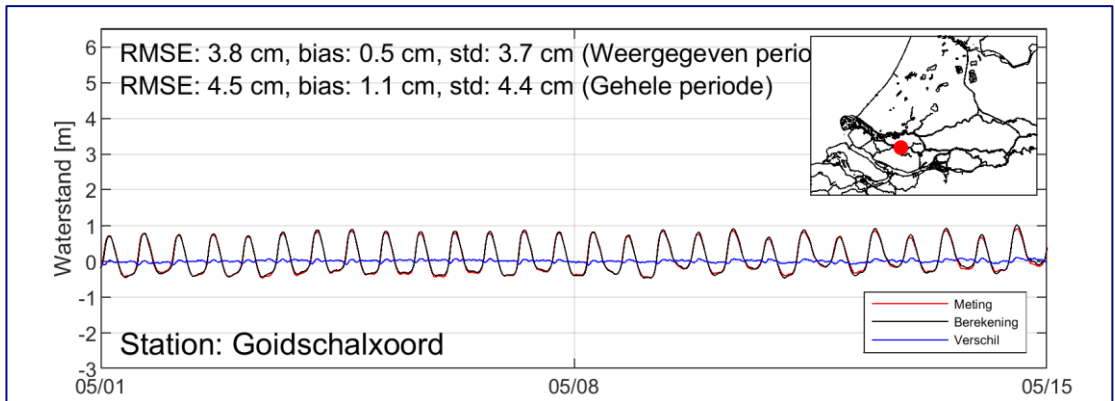
Figuur E-22: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Schoonhoven



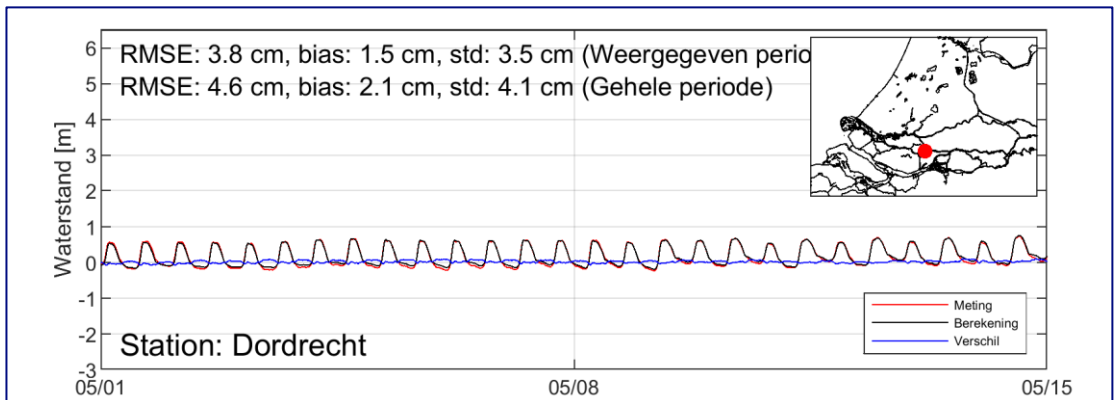
Figuur E-23: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Hagestein beneden



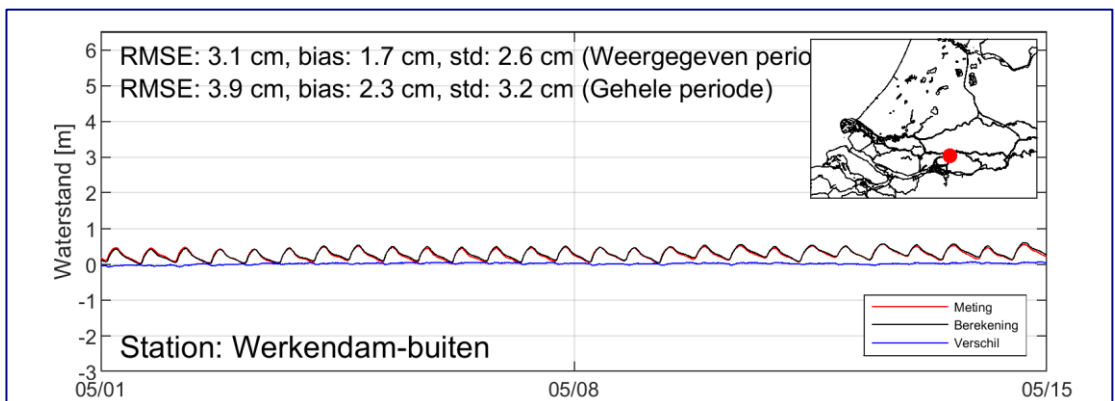
Figuur E-24: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Spijkenisse



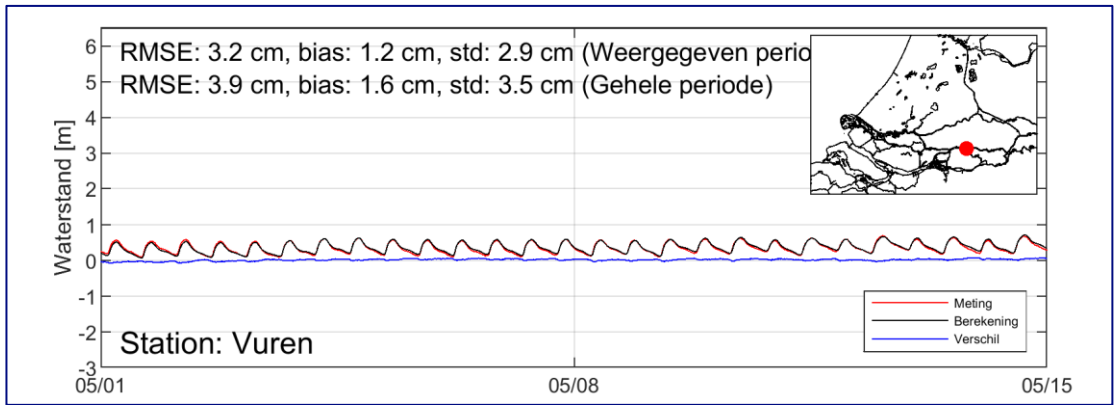
Figuur E-25: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Goidschalxoord



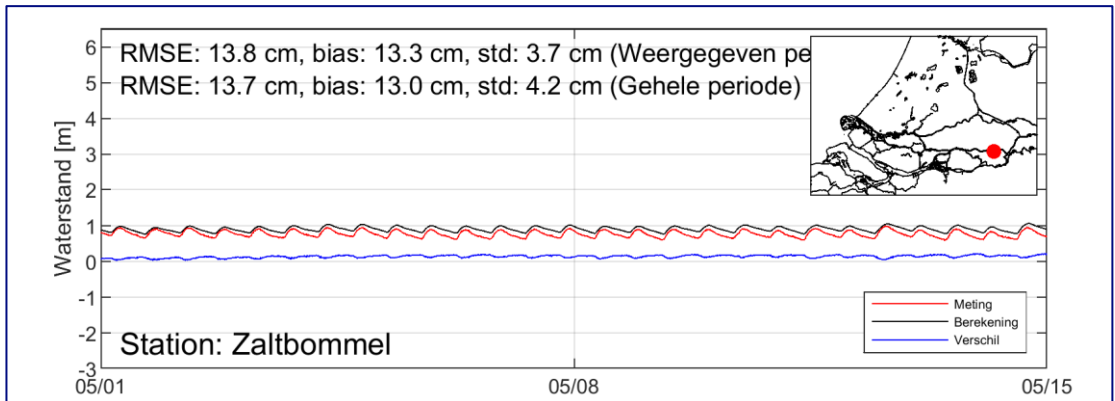
Figuur E-26: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Dordrecht



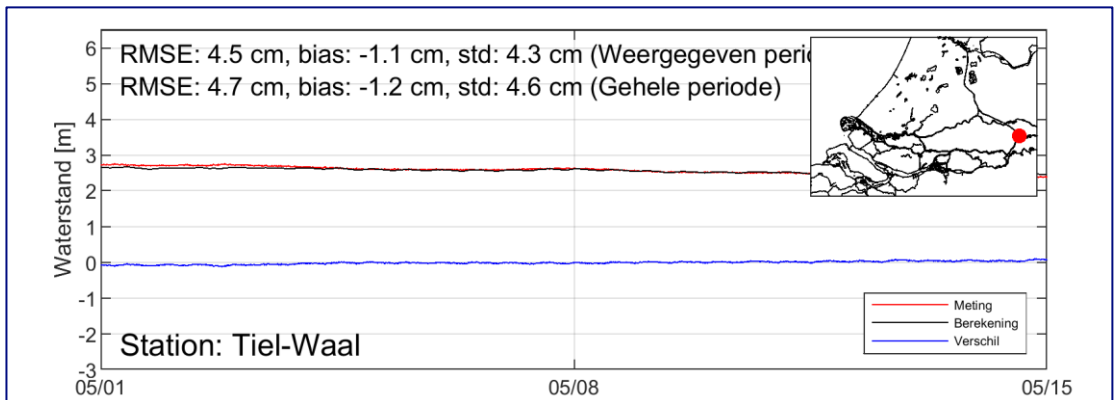
Figuur E-27: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Werkendam buiten



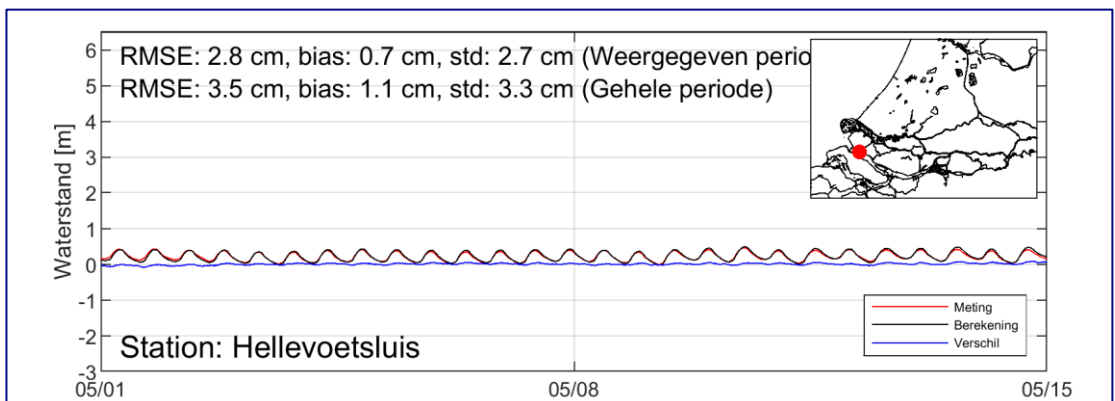
Figuur E-28: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Vuren



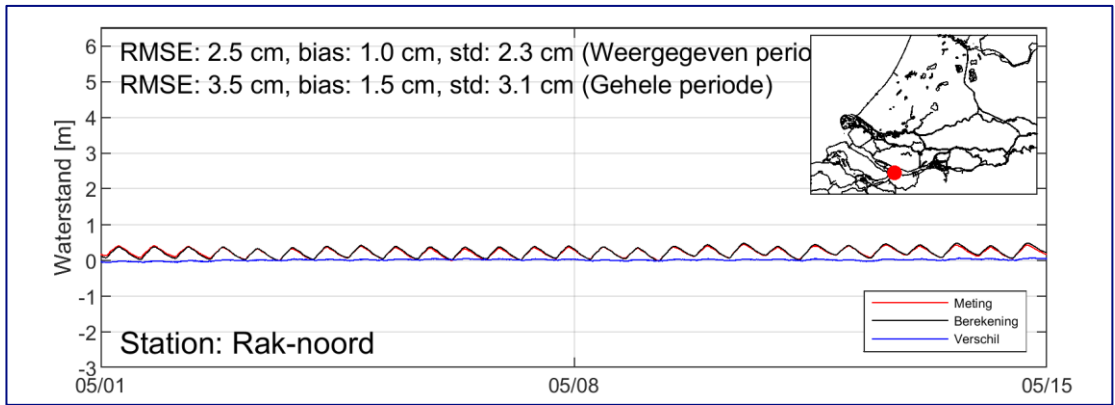
Figuur E-29: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Zaltbommel



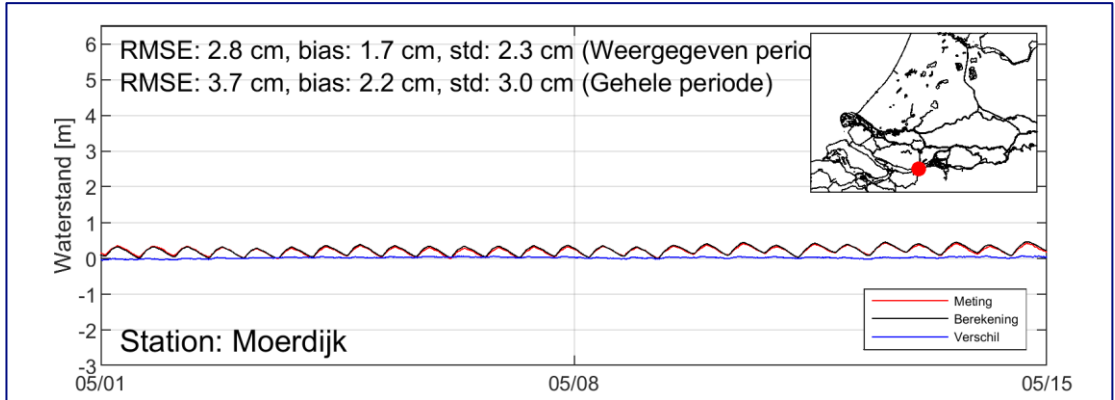
Figuur E-30: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Tiel-Waal



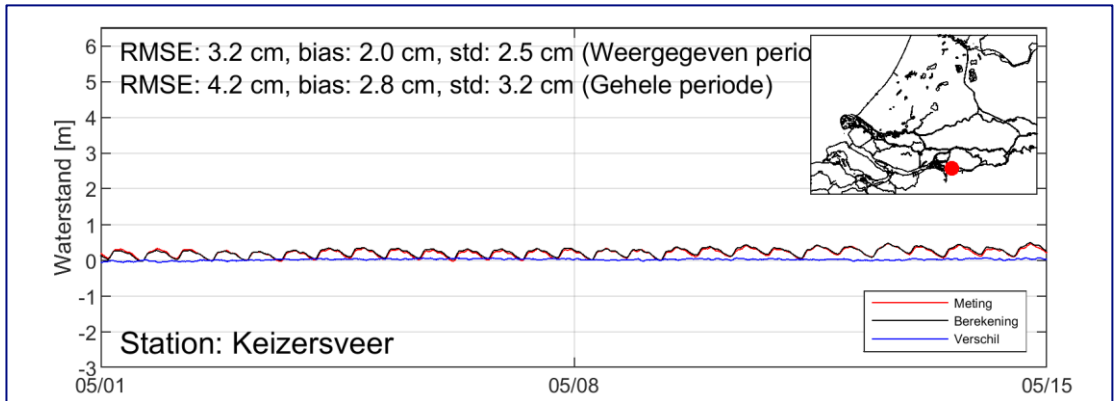
Figuur E-31: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Hellevoetsluis



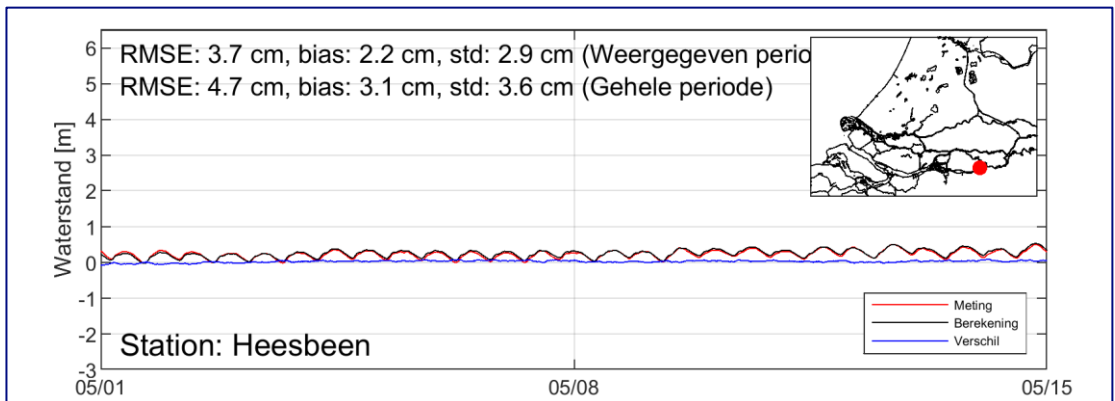
Figuur E-32: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Rak-noord



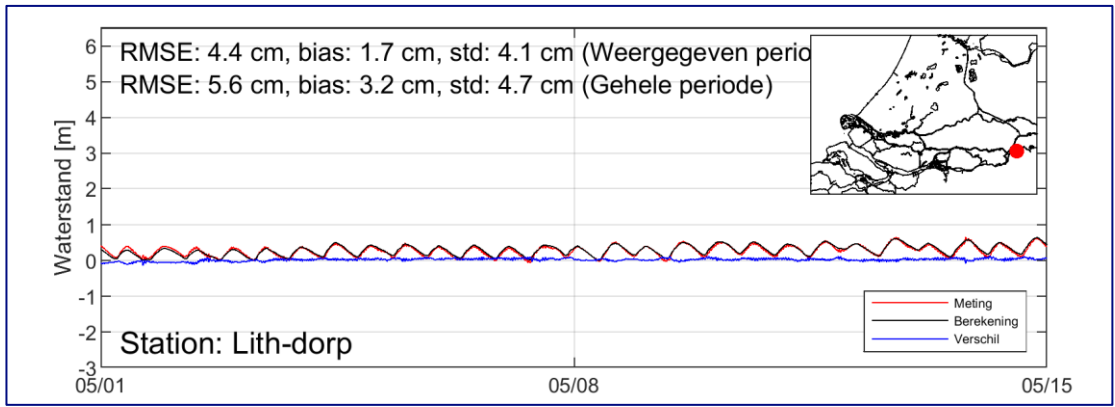
Figuur E-33: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Moerdijk



Figuur E-34: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Keizersveer

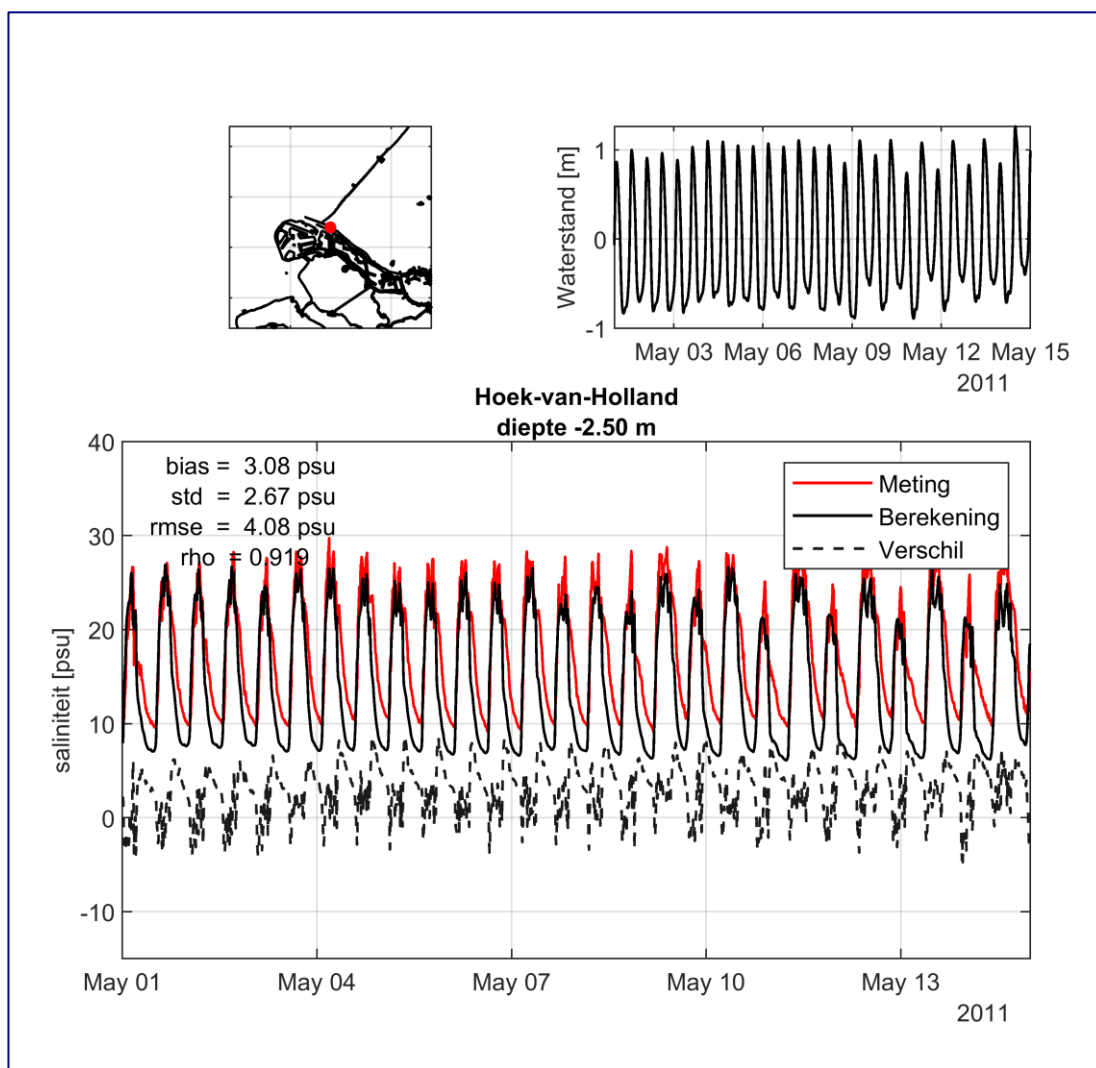


Figuur E-35: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Heesbeen

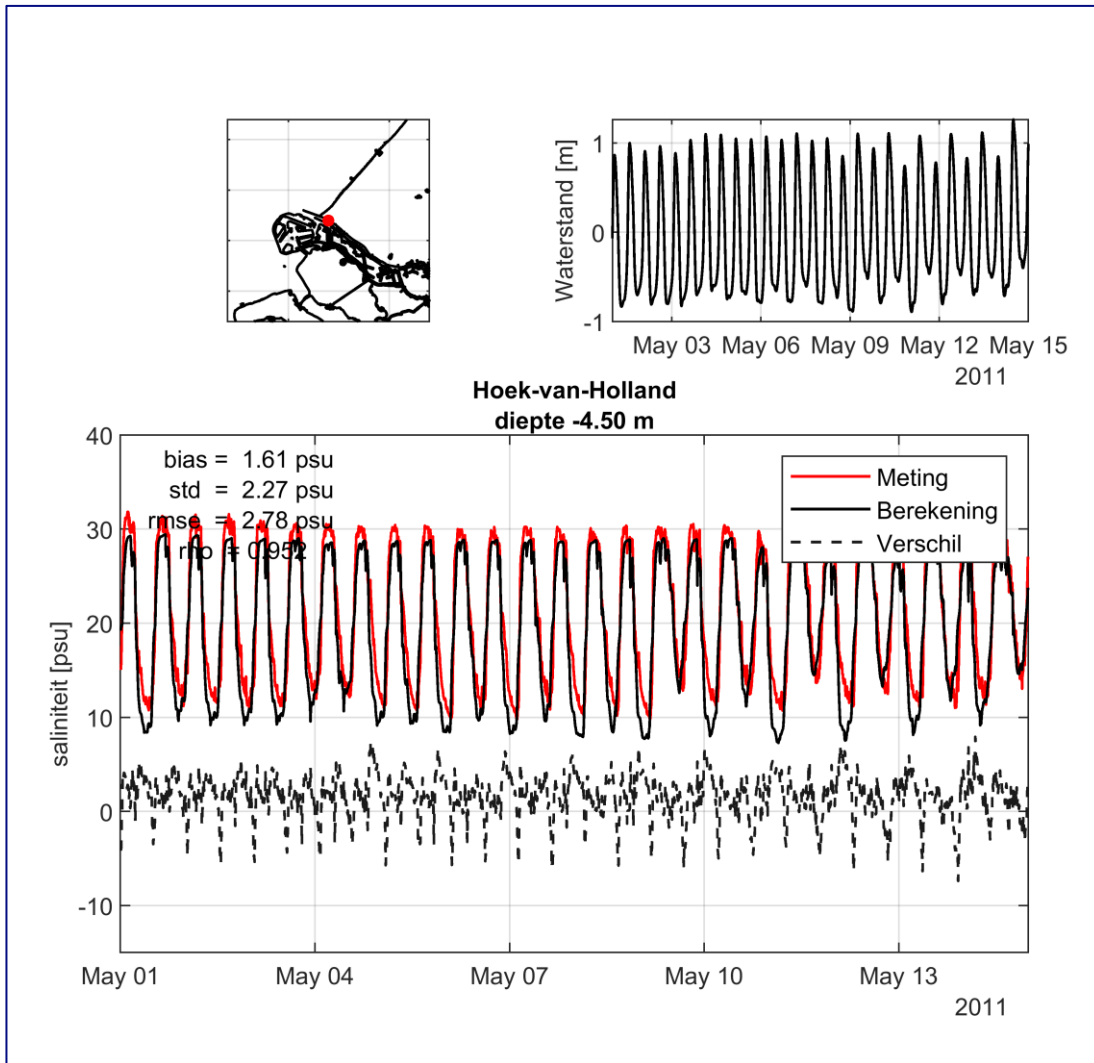


Figuur E-36: Gemeten en berekende waterstanden, 1^e helft Mei 2011, station: Lith-dorp

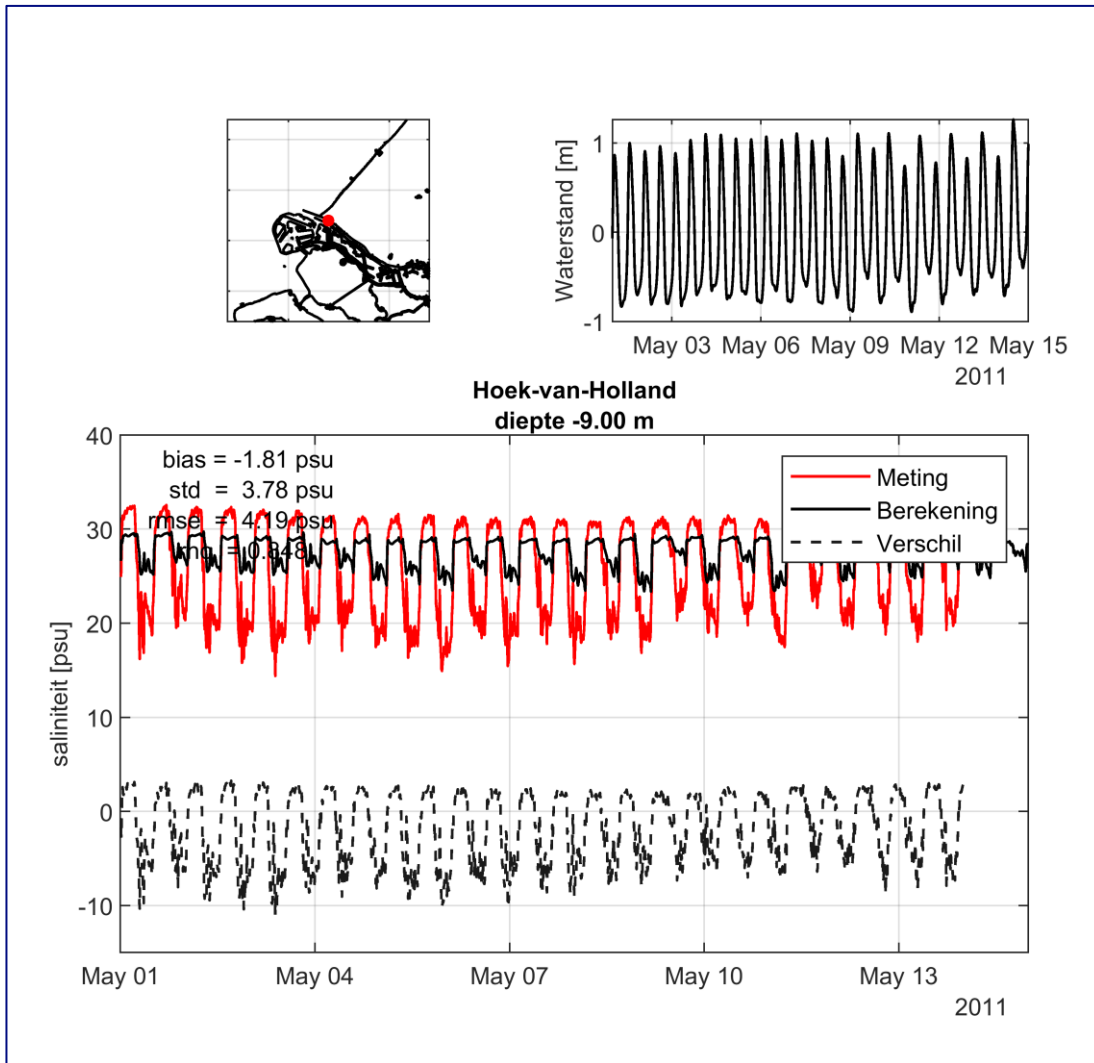
F Tijdsreeksen Saliniteit Mei 2011



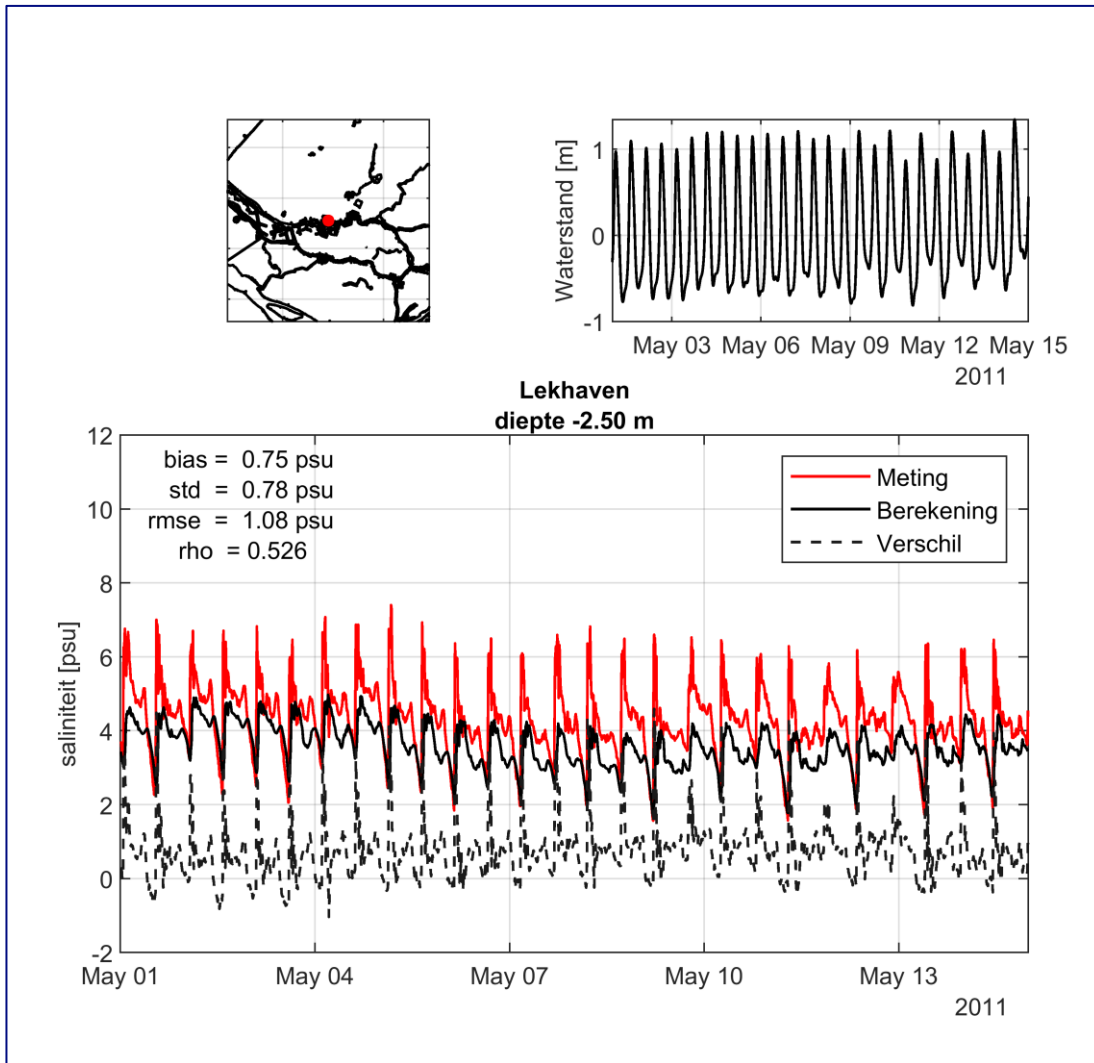
Figuur F-1: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Hoek van Holland; Diepte -2.5 m NAP



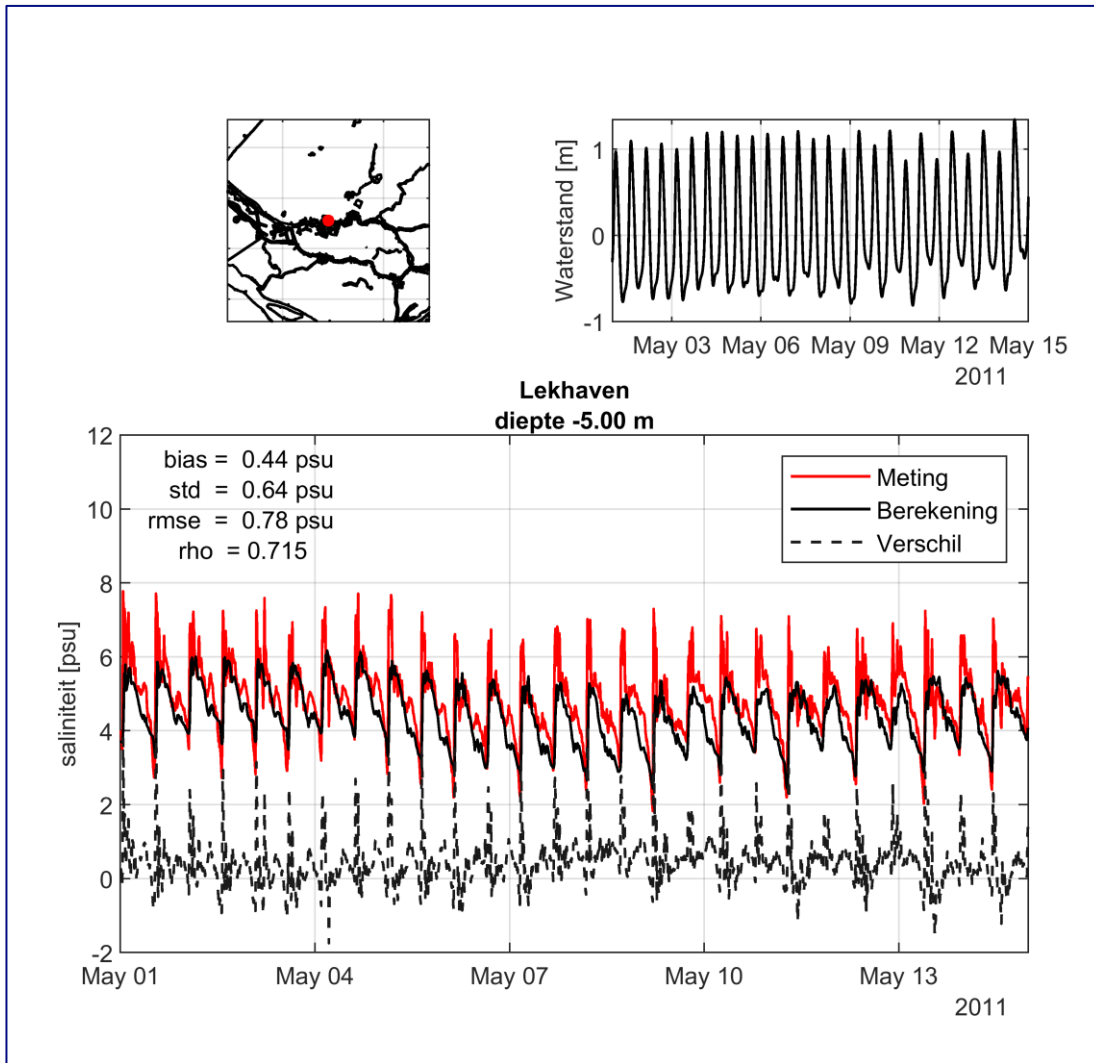
Figuur F-2: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Hoek van Holland; Diepte -4.5 m NAP



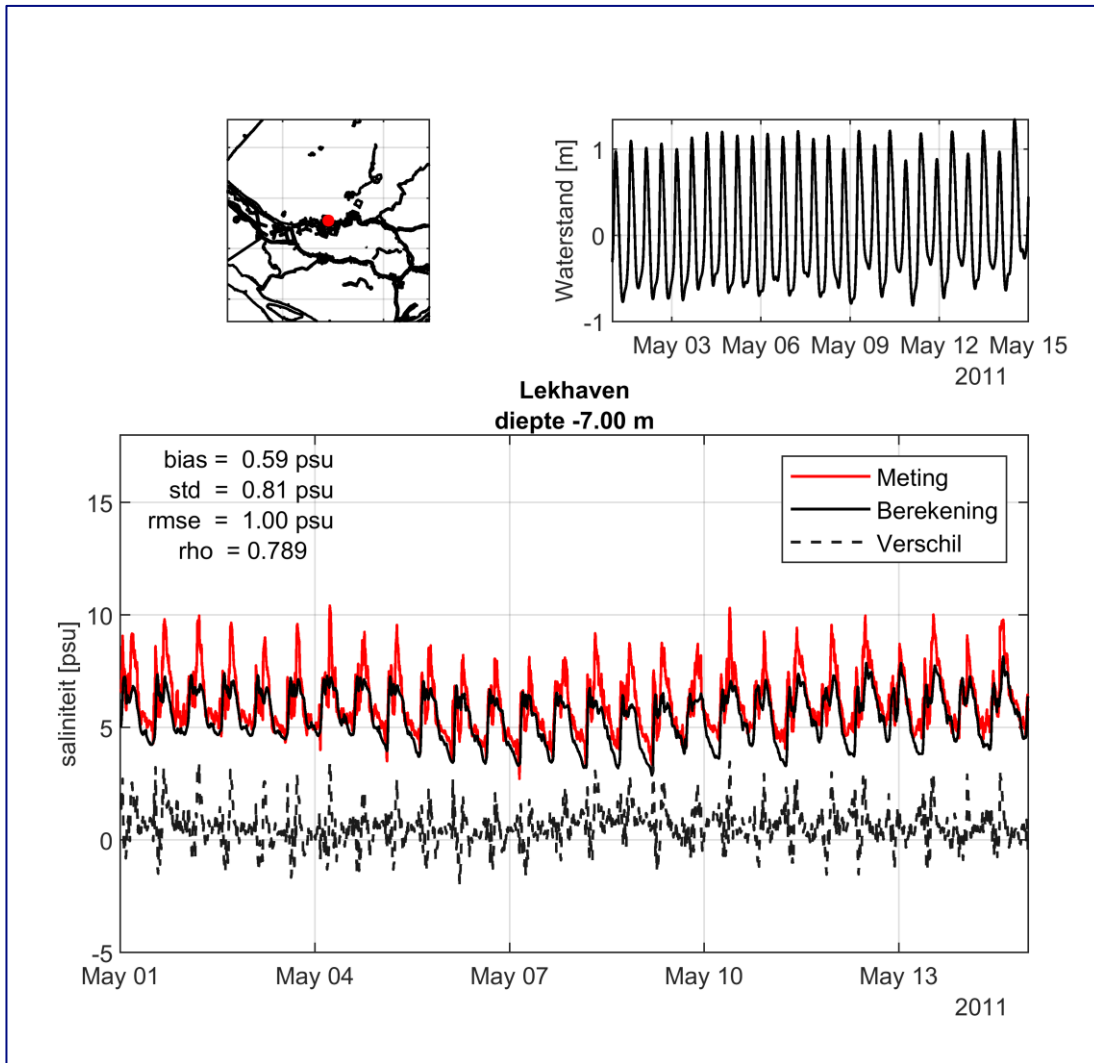
Figuur F-3: Gemeten en berekende saliniteit, 1^o helft Mei 2011, station: Hoek van Holland; Diepte -9.0 m NAP



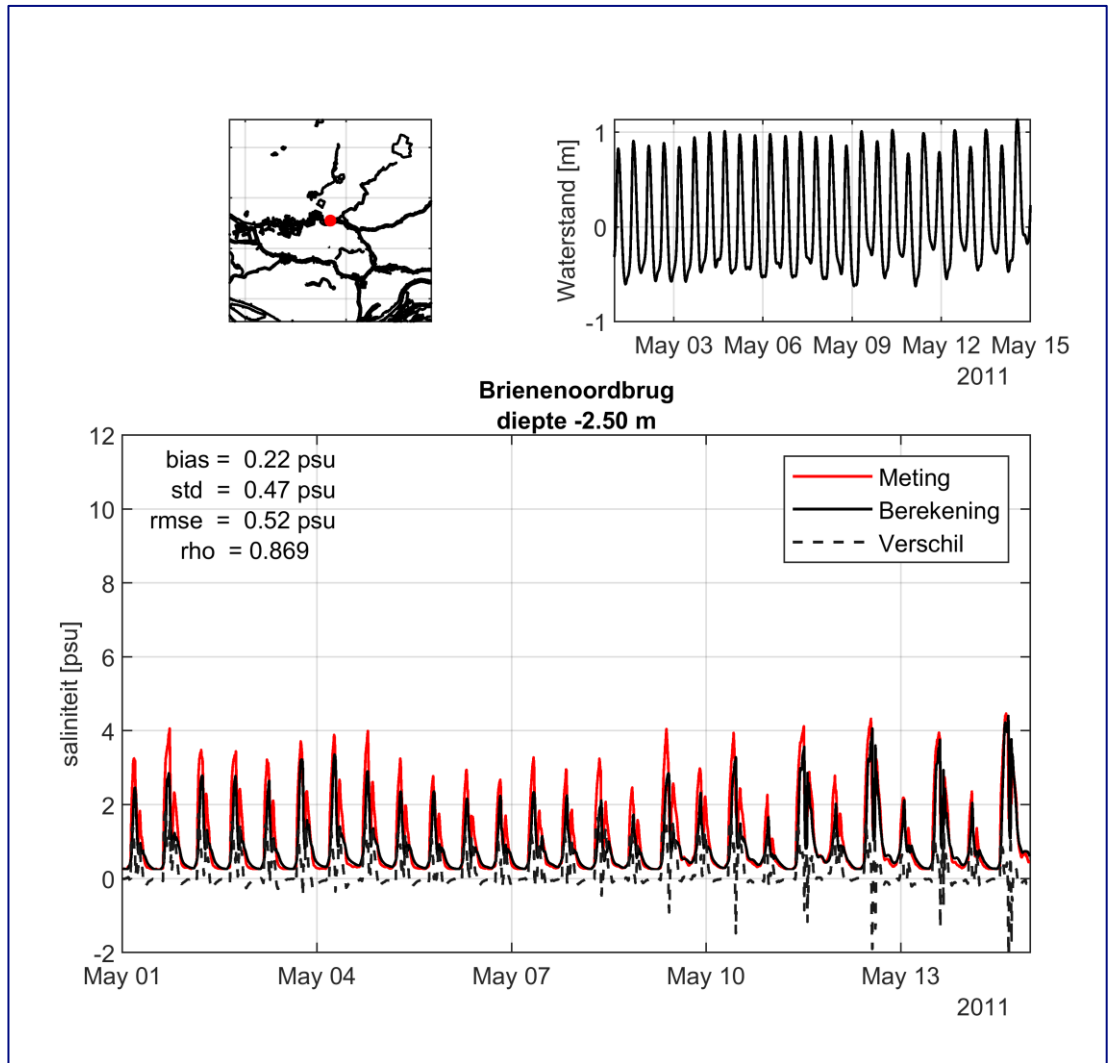
Figuur F-4: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Lekhaven; Diepte -2.5 m NAP



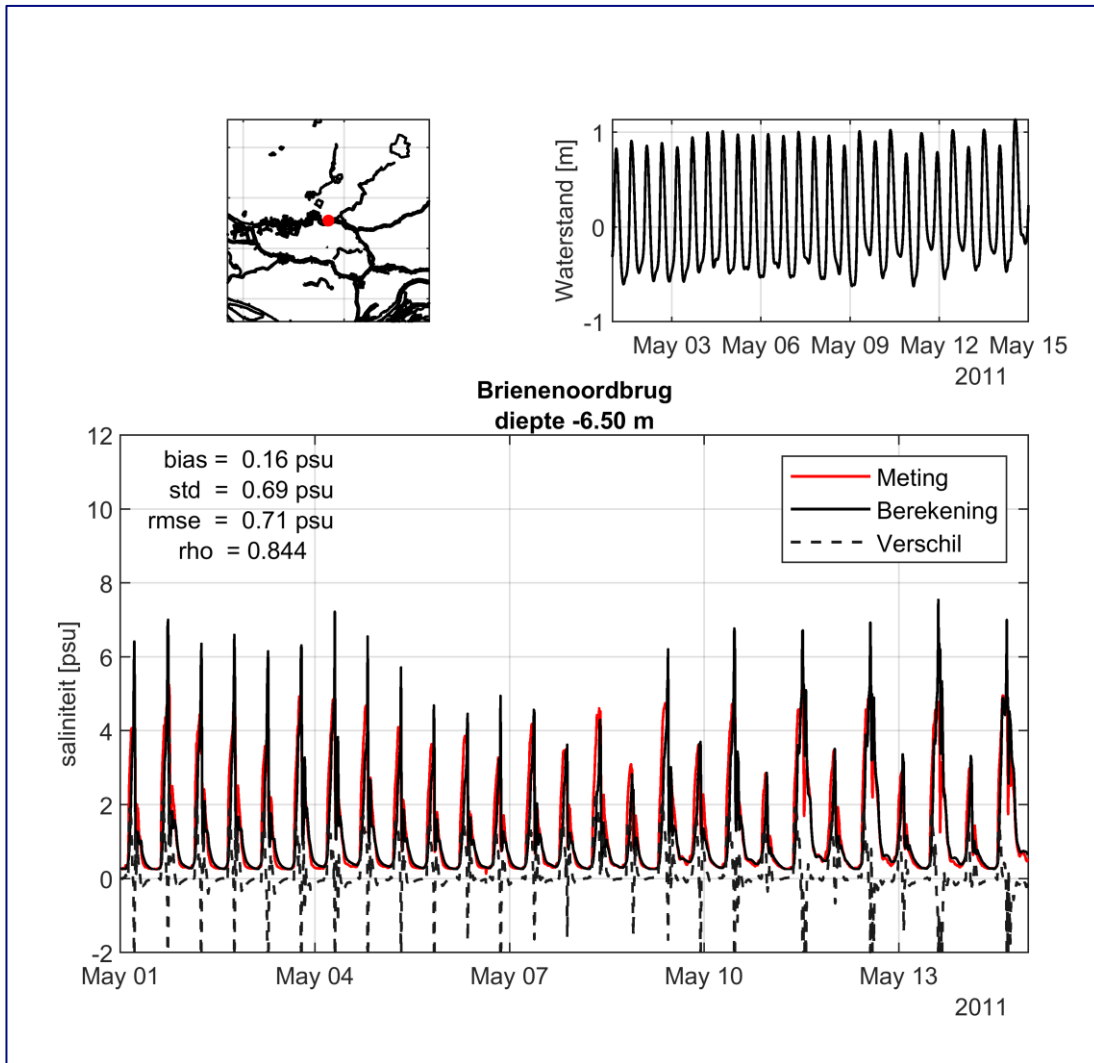
Figuur F-5: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Lekhaven; Diepte -5.0 m NAP



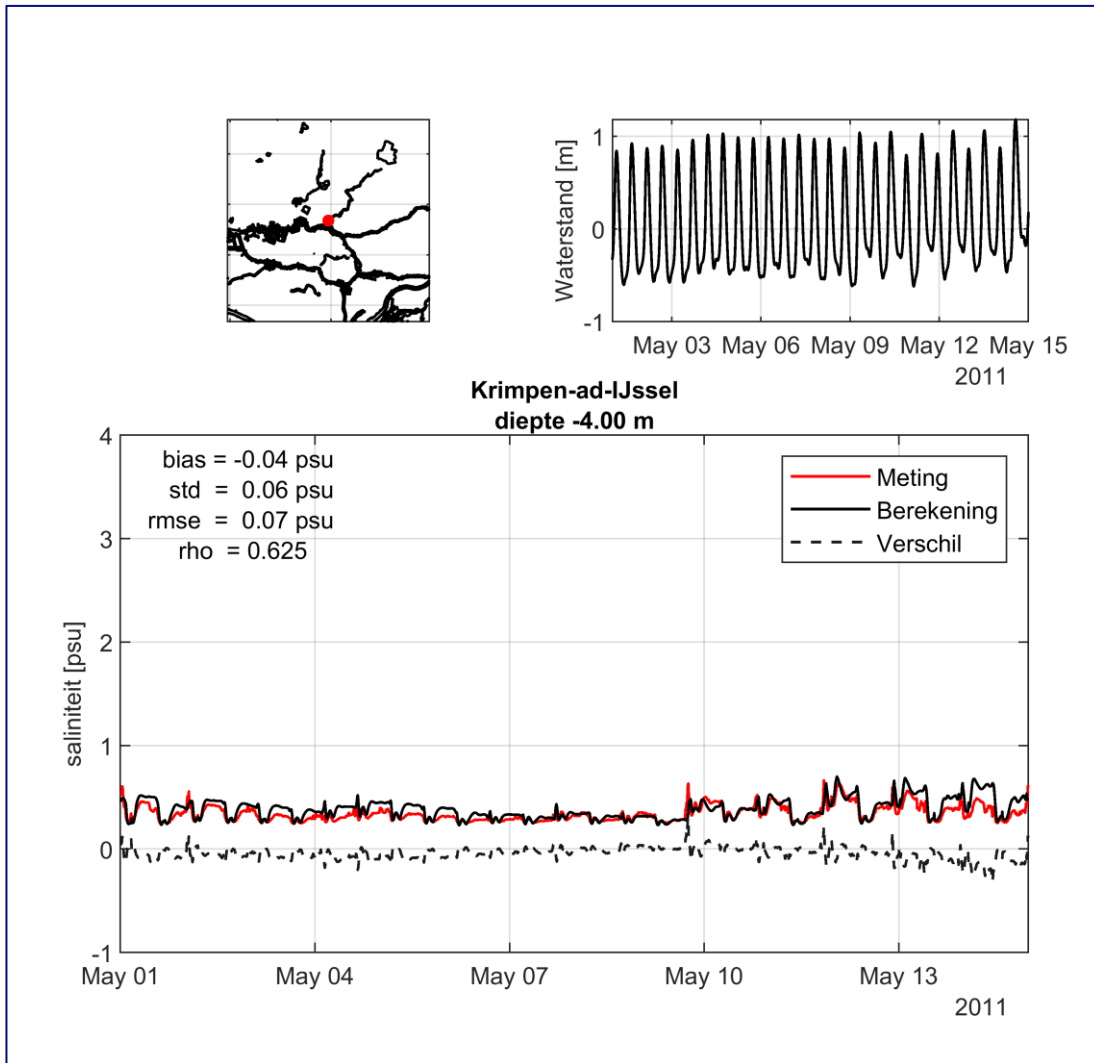
Figuur F-6: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Lekhaven; Diepte -7.0 m NAP



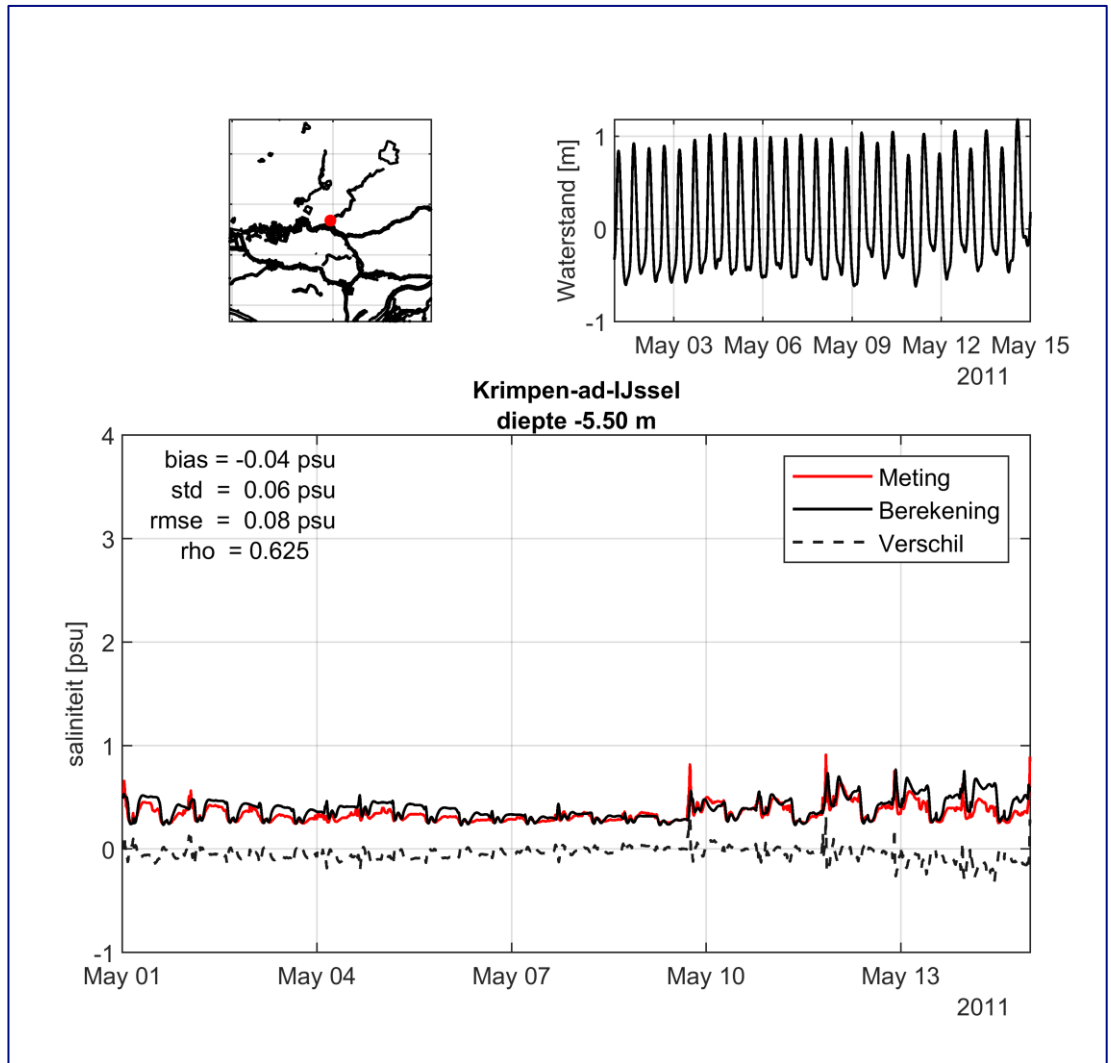
Figuur F-7: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Brienoordbrug; Diepte -2.5 m NAP



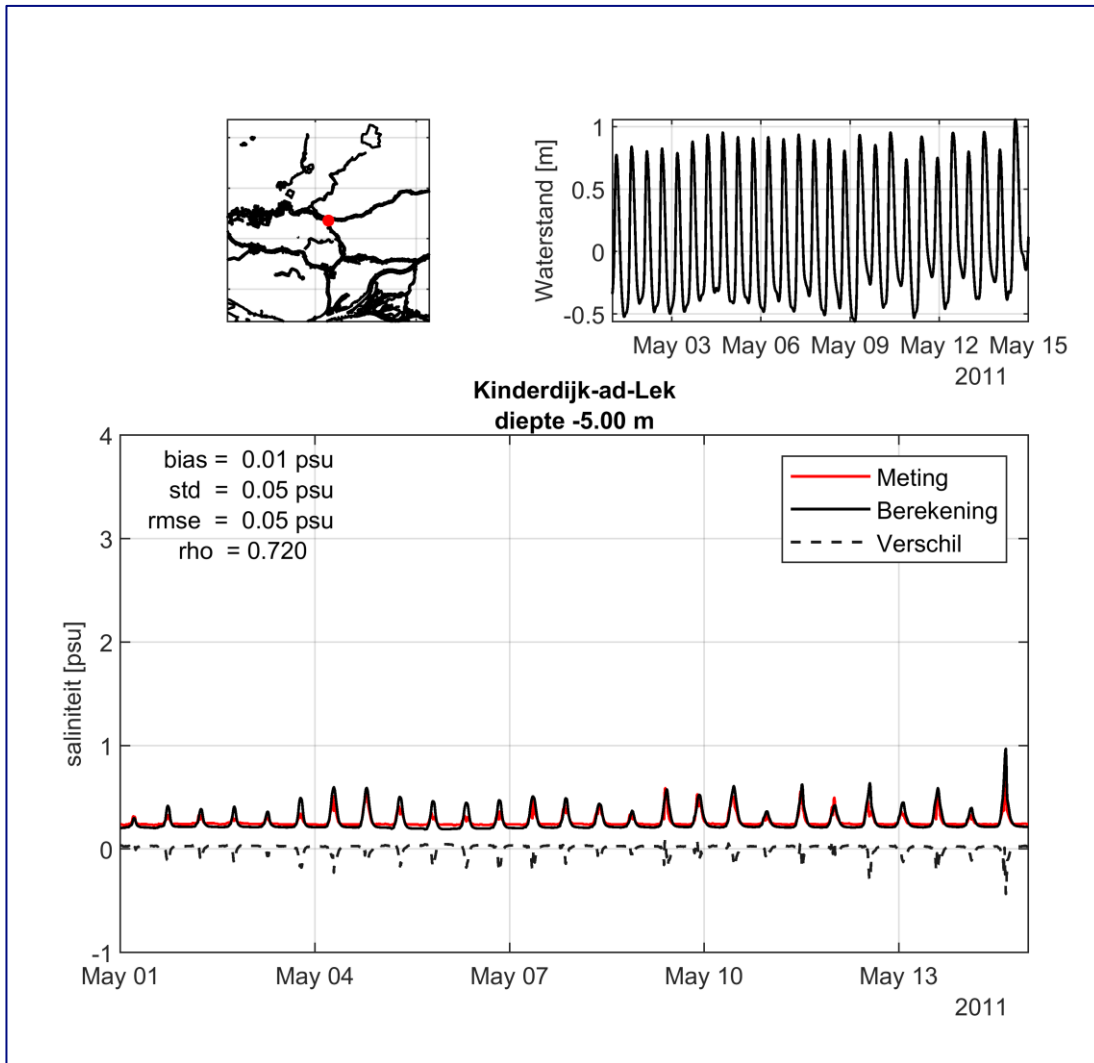
Figuur F-8: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Brienoordbrug; Diepte -6.5 m NAP



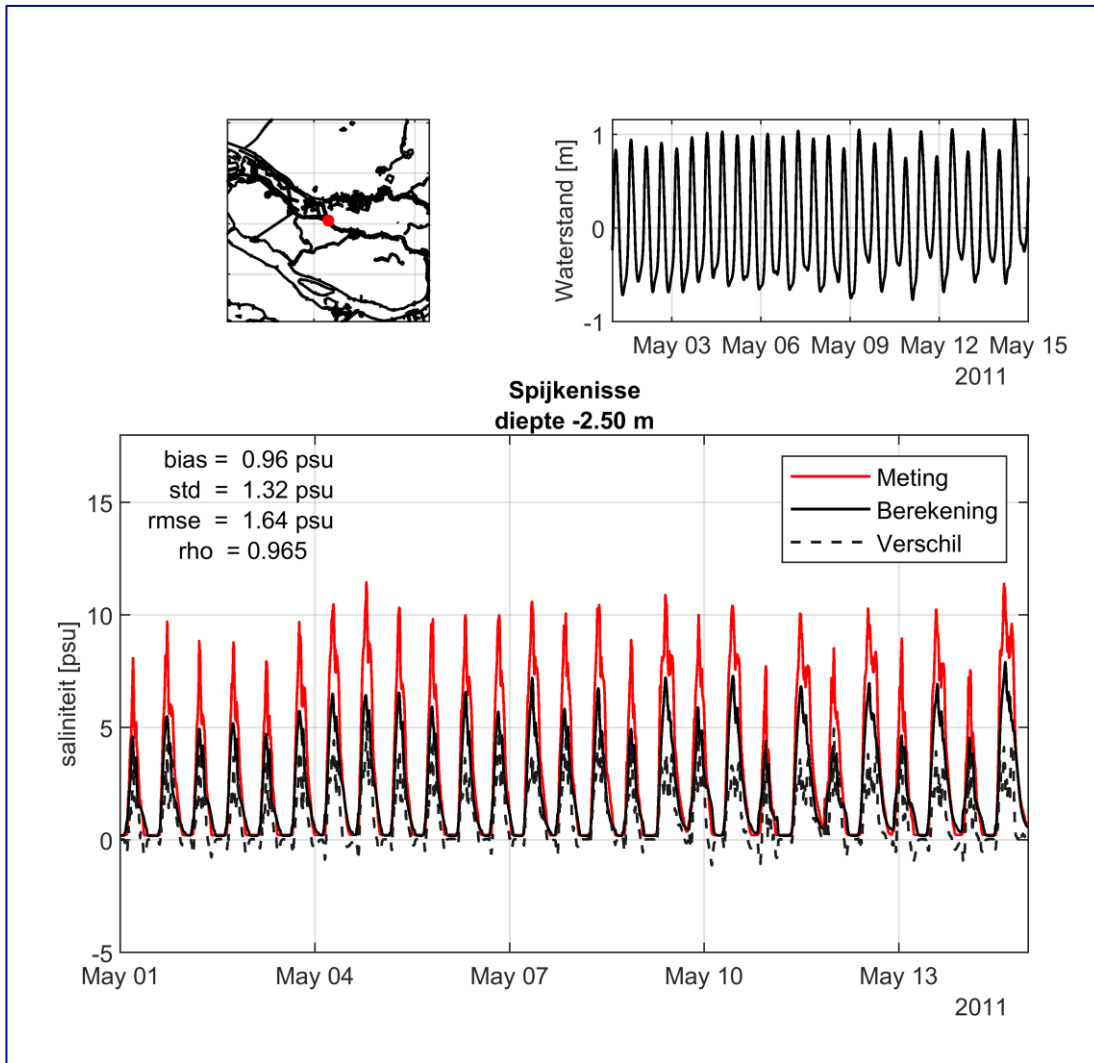
Figuur F-9: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Krimpen aan de IJssel; Diepte -4.0 m NAP



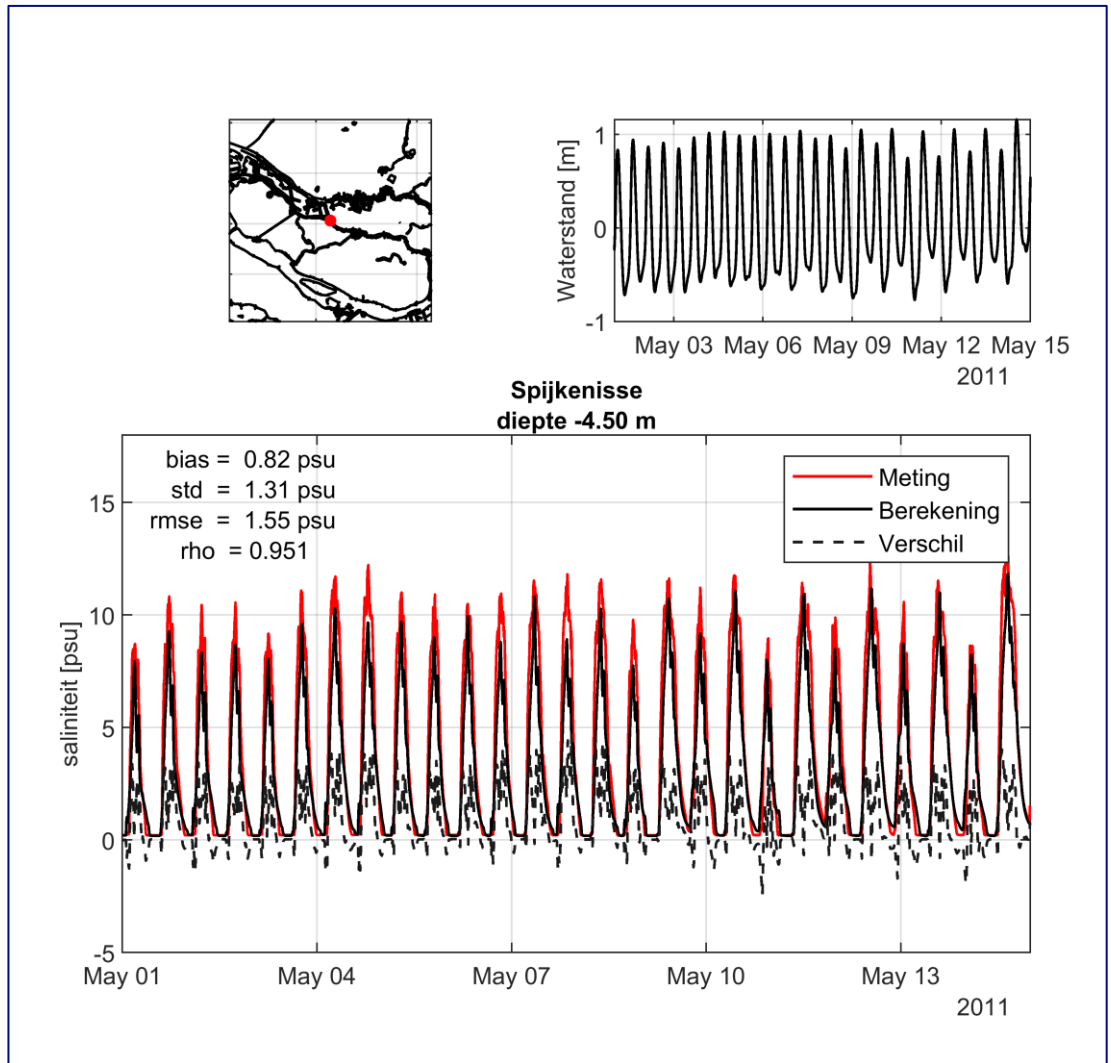
Figuur F-10: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Krimpen aan de IJssel; Diepte -5.5 m NAP



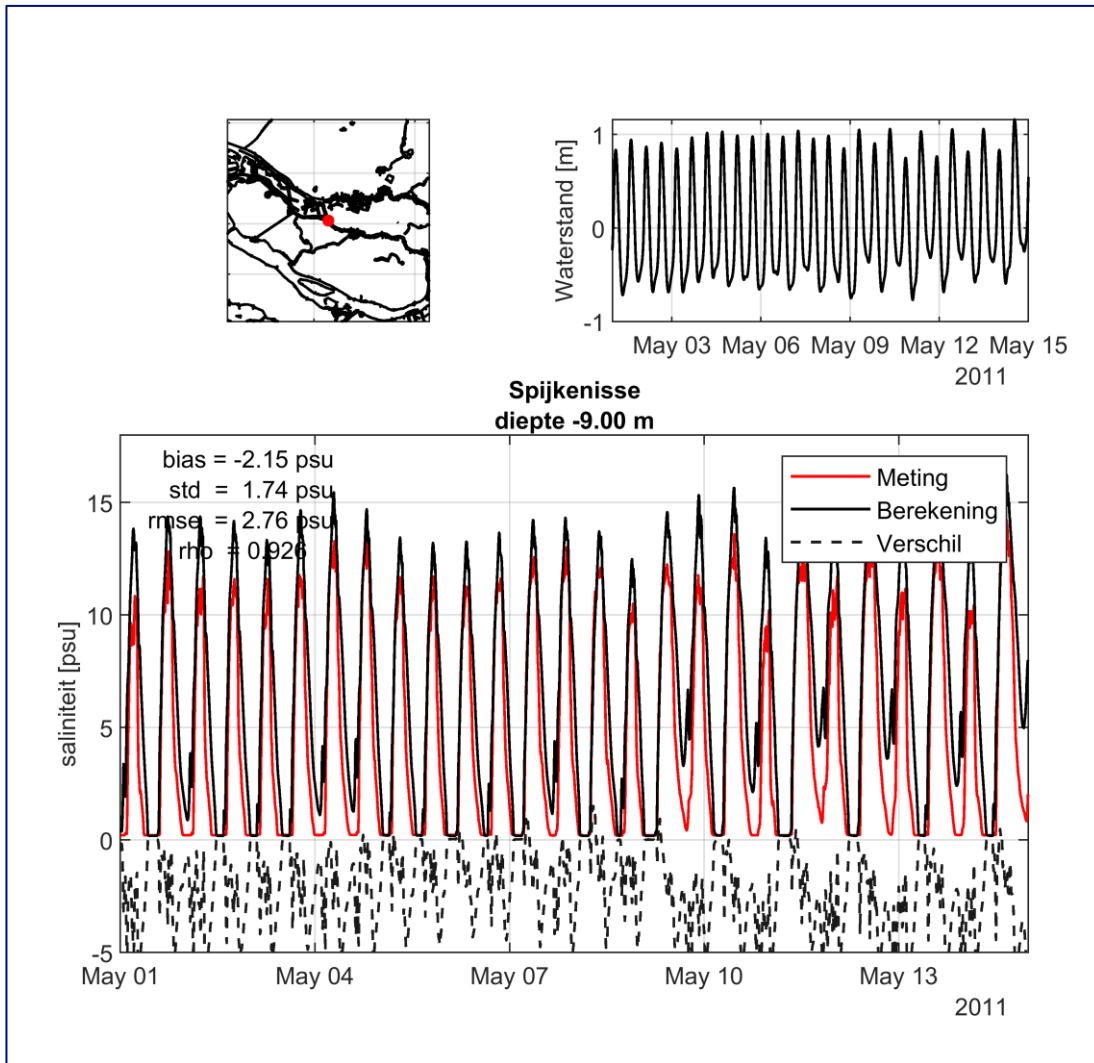
Figuur F-11: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Kinderdijk aan de Lek; Diepte -4.0 m NAP



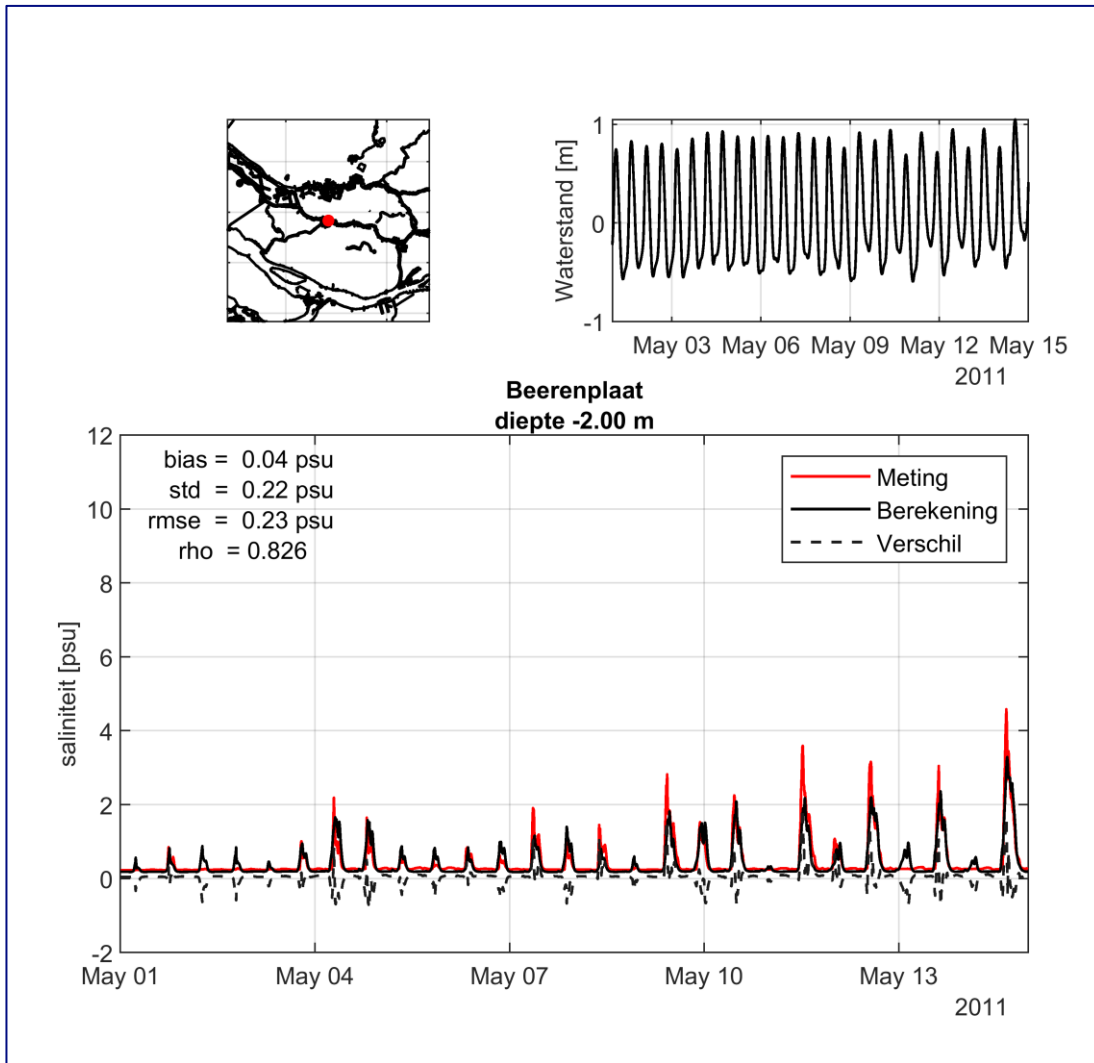
Figuur F-12: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Spijkenisserbrug; Diepte -2.5 m NAP



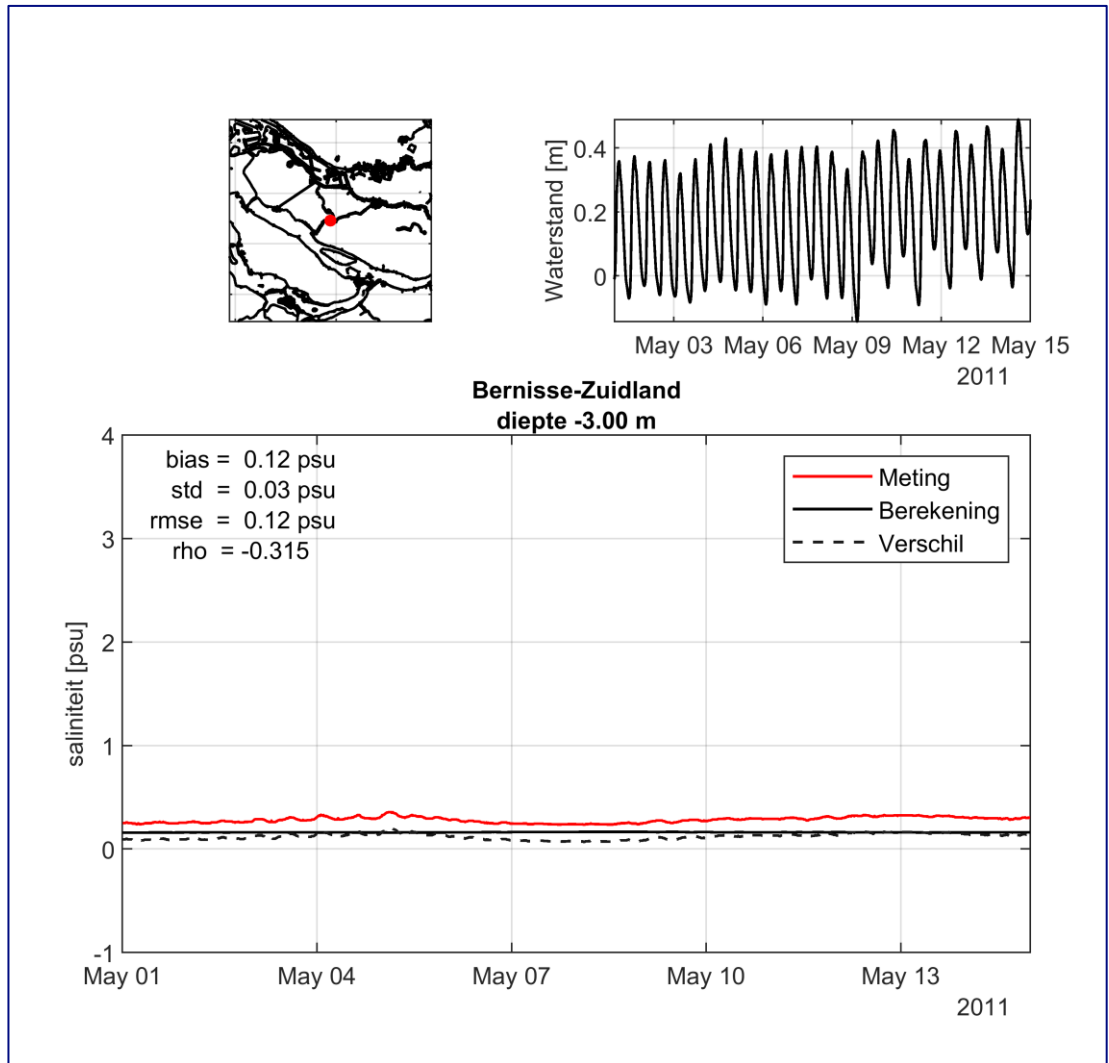
Figuur F-13: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Spijkenisserbrug; Diepte -4.5 m NAP



Figuur F-14: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Spijkenisserbrug; Diepte -9.0 m NAP

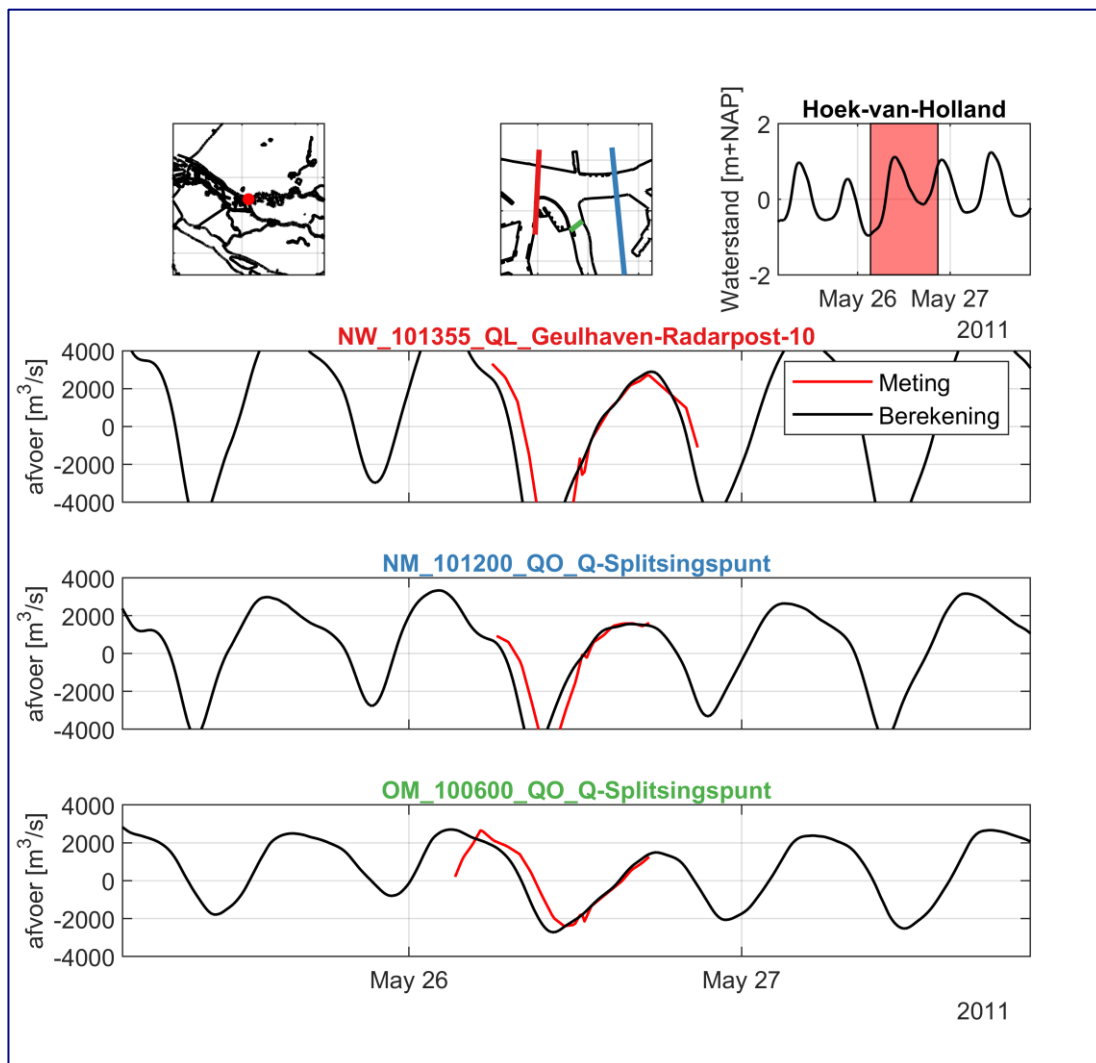


Figuur F-15: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Beerenplaat; Diepte -2.0 m NAP

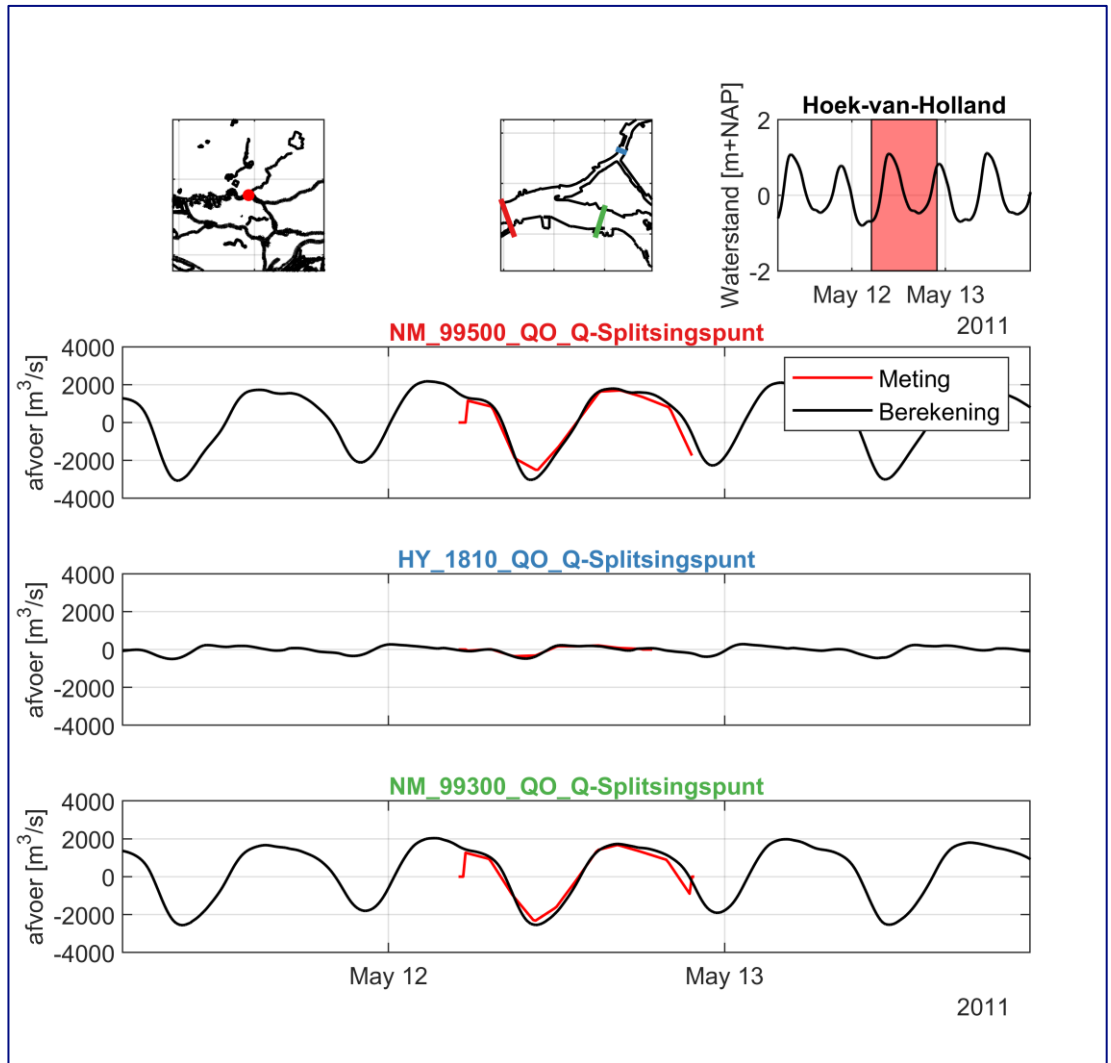


Figuur F-16: Gemeten en berekende saliniteit, 1^e helft Mei 2011, station: Zuidland; Diepte -3.0 m NAP

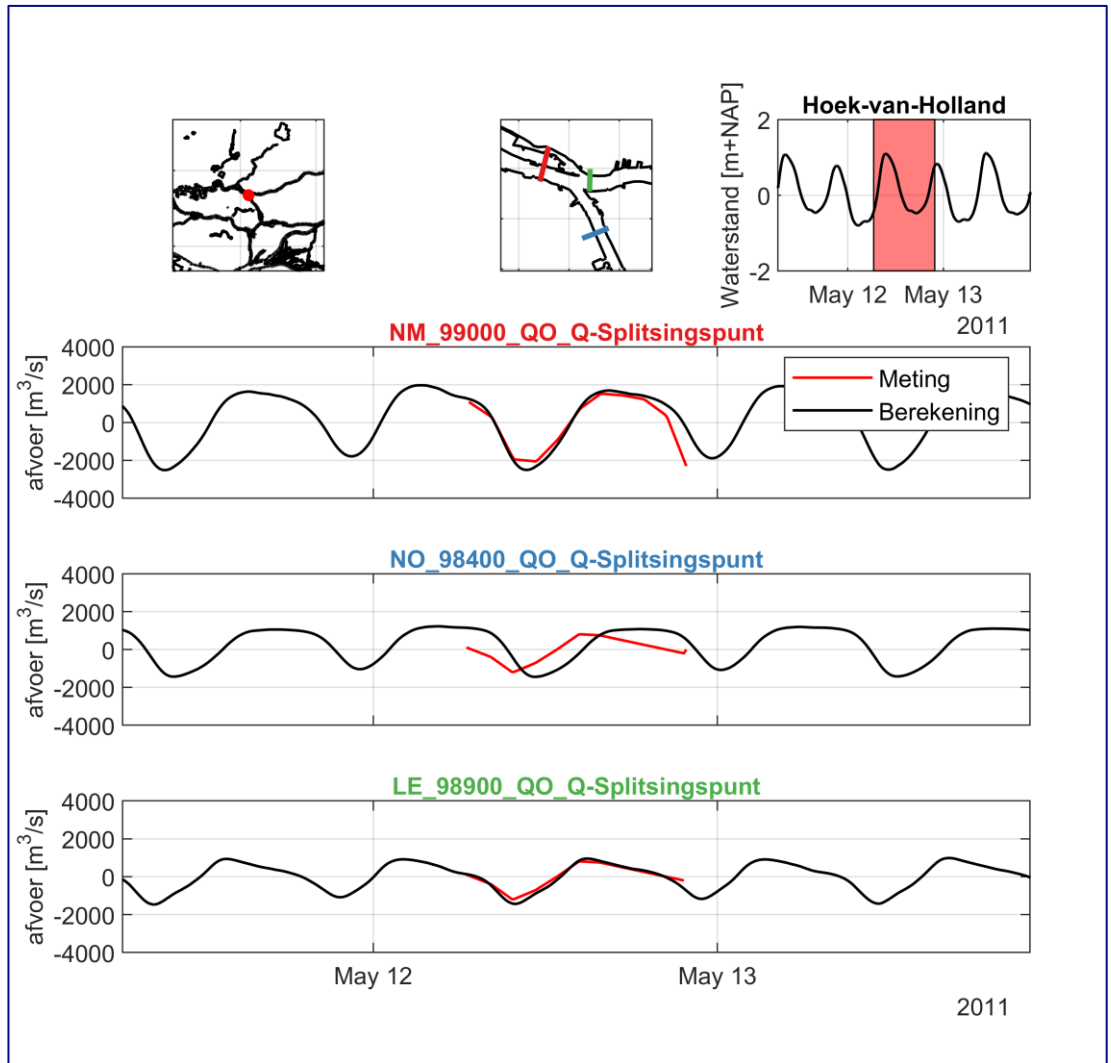
G Tijdreeksen debieten op splitsingspunten Mei 2011



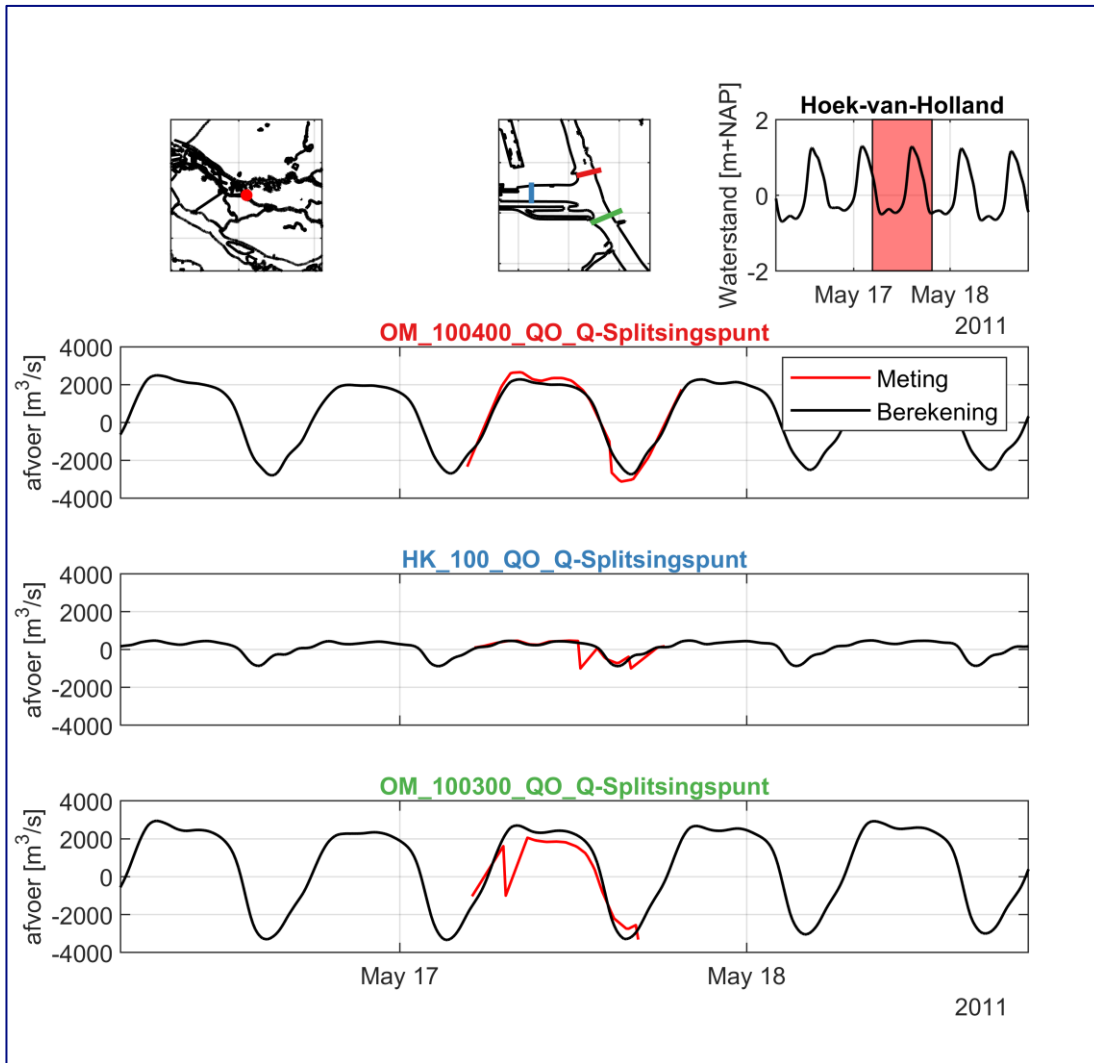
Figuur G-1: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Nieuwe Maas; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



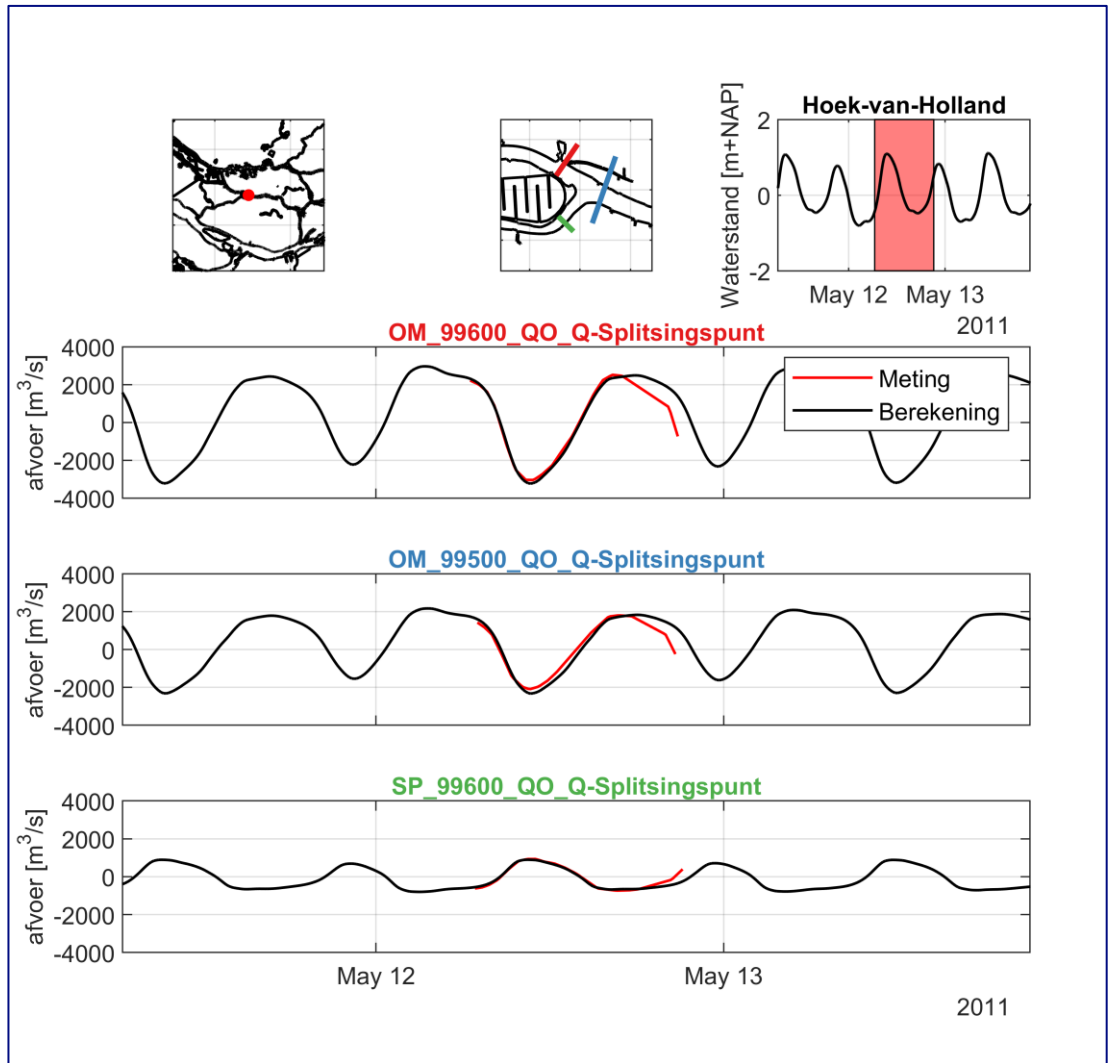
Figuur G-2: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



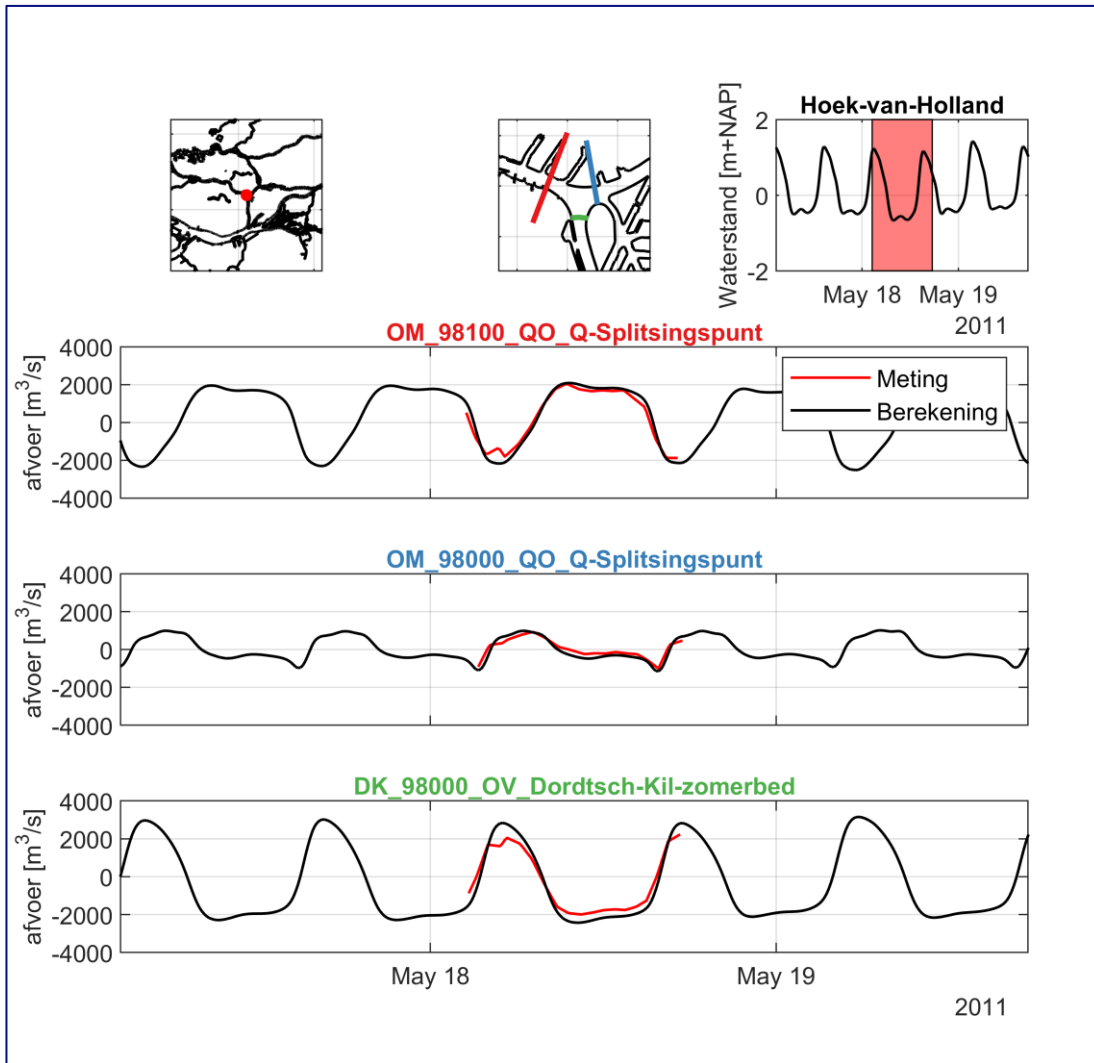
Figuur G-3: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Lek, Noord; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



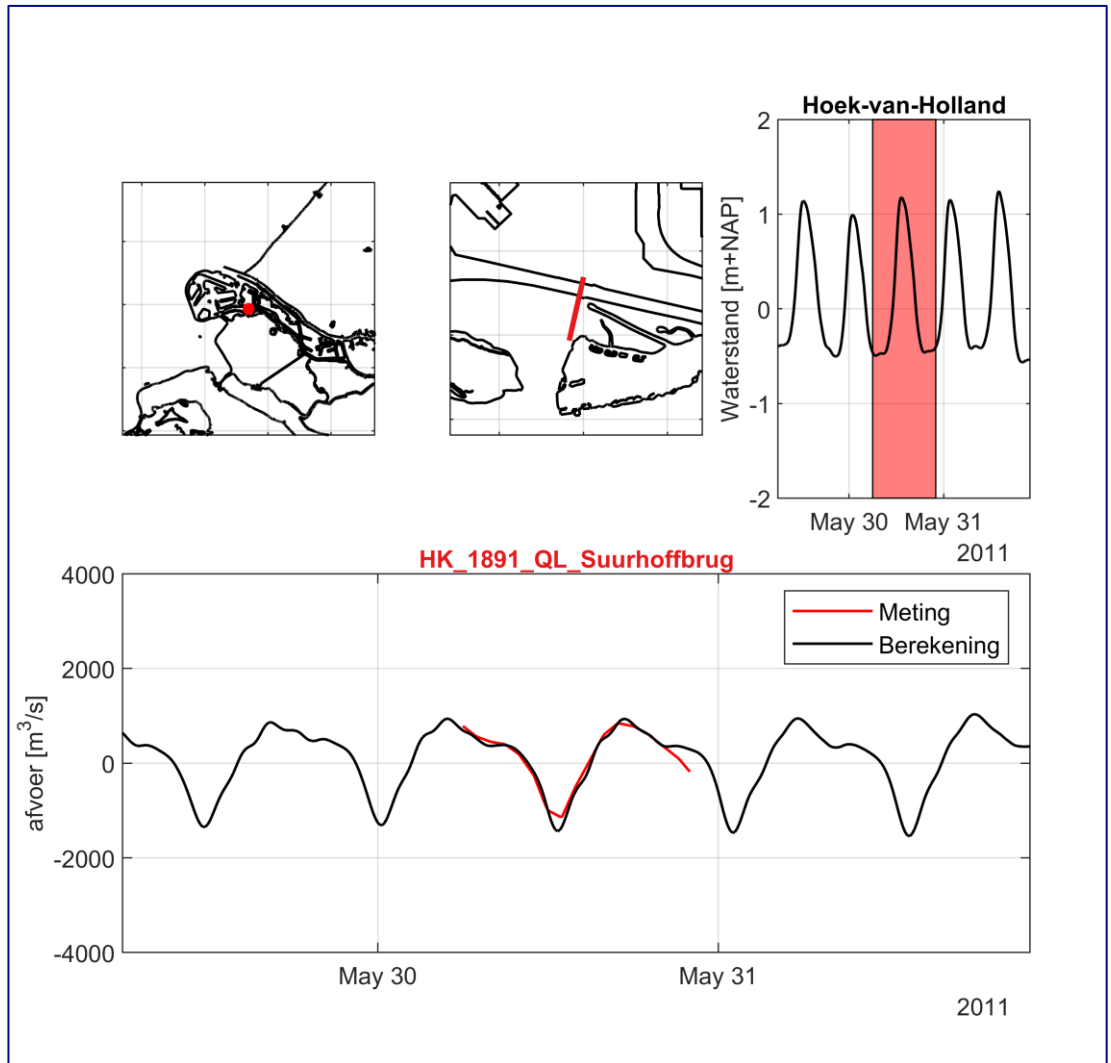
Figuur G-4: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Hartelkanaal; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



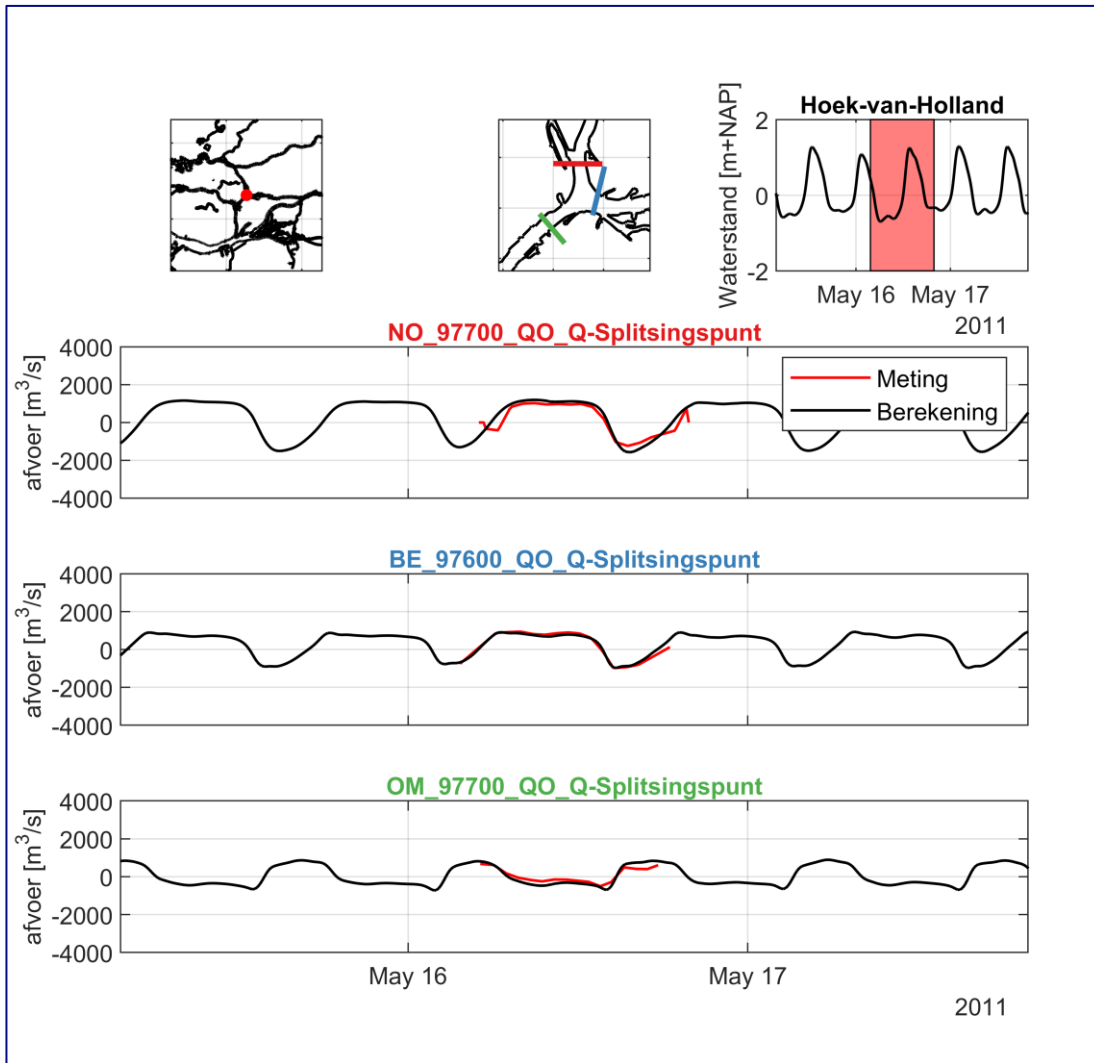
Figuur G-5: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Spui; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



Figuur G-6: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Dordtsche Kil; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



Figuur G-7: Gemeten en berekende afvoeren Beerkanaal; Positief eb richting, Negatief vloedrichting



Figuur G-8: Gemeten en berekende afvoeren Splitsingspunt Oude Maas, Beneden Merwede; Positief eb richting, Negatief vloedrichting