

Prognostisch versus diagnostisch rekenen in RMM 2D

Analyse van impact prognostisch rekenen op zoutvelden en waterstanden



Prognostisch versus diagnostisch rekenen in RMM 2D

Analyse van impact prognostisch rekenen op zoutvelden en waterstanden

Auteur(s)

Tammo Zijlker

Jelmer Veenstra

Remi van der Wijk

Prognostisch versus diagnostisch rekenen in RMM 2D

Analyse van impact prognostisch rekenen op zoutvelden en waterstanden

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M. Scholten
Referenties	
Trefwoorden	Rijn-Maasmonding, zesde-generatie model, D-HYDRO, saliniteit, 2D, prognostisch, diagnostisch zoutveld

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	13-10-2023
Projectnummer	11208053-004
Document ID	11208053-004-ZWS-0023
Pagina's	44
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Tammo Zijlker	
	Jelmer Veenstra	
	Remi van der Wijk	

Samenvatting

Begin 2022 is het 2D RMM model opgeleverd, waarmee de modelbouw, kalibratie en validatie ervan zijn afgerond. Omdat tijdens de modelbouw is geconstateerd dat het zouttransport in 2D om meerdere redenen niet naar behoren werkte, is destijds gekozen om bij het simuleren een zoutveld op te leggen dat constant is in de tijd, ook wel *diagnostisch rekenen* genoemd. Nieuwe softwarefunctionaliteiten maken het mogelijk stoftransport wel expliciet mee te nemen: *prognostisch rekenen*. Uit de theorie is bekend dat saliniteit invloed heeft op waterstanden, vanwege het dichtheidsverschil (ca 2.5%) tussen zoet en zout water.

Dit rapport beschrijft de resultaten van onderzoek naar de impact van prognostisch rekenen in RMM 2D. In het onderzoek zijn vier testberekeningen uitgevoerd en geanalyseerd: de kalibratieperiode december 2013, de validatieperiode 2018 en twee modelberekeningen met extreme testcondities voor BOI (hoge afvoer en zeer hoge stormopzet).

Voor de modelberekeningen zijn de uitkomsten van diagnostisch en prognostisch rekenen met elkaar vergeleken. Daarbij is primair gekeken naar effecten op waterstanden, ook in termen van modelkwaliteit (indien er metingen beschikbaar waren).

De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn:

- Het effect van prognostisch rekenen tijdens de kalibratieperiode 2013 is gemiddeld beperkt. Het diagnostische zoutveld past zoals verwacht goed bij het gemiddelde prognostische zoutveld van deze periode. Er zijn wel momenten dat het prognostisch zoutveld sterk afwijkt, zoals tijdens de Sinterklaasstorm.
- Prognostisch rekenen tijdens de validatieperiode 2018 levert een verbetering op van modelkwaliteit. Zowel de dagelijkse variatie door het getij als laagfrequentie variaties van de waterstand worden door prognostisch te rekenen beter gerepresenteerd
- De resultaten van de validatieperiode 2018 geven geen directe aanleiding om opnieuw te kalibreren bij overstap naar prognostisch rekenen.
- Bij testsommen onder extreme condities met een afgesneden zeedomein heeft prognostisch rekenen significante invloed op waterstanden. In de Nieuwe Waterweg worden verschillen in waterstand tot 20 cm geobserveerd. Het is echter niet te zeggen of deze modelresultaten dichterbij de waarheid liggen. Dat komt omdat de opgelegde saliniteit op de zeerand zeker bij hoge afvoeren een sterke lokale gradiënt in de waterstand nabij de zeerand veroorzaakt.
- De rekentijd van DFLOW-FM neemt met ca. een factor 2.5 toe voor prognostisch rekenen ten opzichte van diagnostisch rekenen.
- In de implementatie van prognostisch rekenen zijn twee issues gesignaleerd met betrekking tot stabiliteit van het model:
 - Er zijn sporadische sprongen van het zoutgehalte, simultaan in de tijd en over het grootste deel van het domein te vinden. Dit wordt verder onderzocht.
 - Het gebruik van `lateral_discharges` bij Gouda zorgt voor foutieve zoutgehaltenes nabij de lateraal. In de toekomst moet gebruik gemaakt worden van `source-sinks`.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	6
2	Aanpak en gebruikte testsommen	7
2.1	Initieel zoutveld	7
2.2	Dispersieveld	8
2.3	Zout- en temperatuurranden voor prognostische berekening	9
2.4	Numerieke instellingen DFLOW-FM	9
3	Resultaten	10
3.1	Kalibratie-omstandigheden december 2013	10
3.1.1	Saliniteit in de Nieuwe Maas	10
3.1.2	Effect prognostisch rekenen op waterstanden Nieuwe Maas	11
3.1.3	Temporele ontwikkeling van het prognostisch zoutveld	12
3.1.4	Impact op statistiek waterstanden	13
3.2	Validatie-omstandigheden jaar 2018	15
3.2.1	Saliniteit in de Nieuwe Maas	15
3.2.2	Saliniteitssprongen in prognostische modelrun	19
3.2.3	Saliniteit rond lateraal Gouda	20
3.2.4	Impact op statistiek waterstanden	22
3.2.5	Impact op langzaam variërend residu van de waterstand	27
3.3	Testsom extreme afvoer 24.000m/s bij Lobith, geen opzet, geen wind	30
3.3.1	Saliniteit in de Nieuwe Maas en de Nieuwe waterweg	30
3.3.2	Prognostisch zoutveld	31
3.3.3	Effect prognostisch rekenen op waterstanden	32
3.4	Testsom extreme stormopzet (piekwaterstand 8 meter) en lage afvoer van 600 m/s.	35
3.4.1	Saliniteit in de Nieuwe Maas	35
3.4.2	Prognostisch zoutveld	36
3.4.3	Effect prognostisch rekenen op waterstanden	37
3.5	Impact prognostisch rekenen op de rekentijd van DFLOW-FM	40
3.6	Conclusies	41
4	Literatuur	43

1 Introductie

Begin 2022 is het 2D RMM model opgeleverd, waarmee de modelbouw, kalibratie en validatie ervan zijn afgerond. Omdat tijdens de modelbouw is geconstateerd dat het zouttransport in 2D om meerdere redenen niet naar behoren werkte is destijds gekozen om bij het simuleren een zoutveld op te leggen dat constant is in de tijd, ook wel *diagnostisch rekenen* genoemd. Dit zoutveld heeft met deze optie dus een effect op de gemiddelde waterstand, variërend in de ruimte maar zonder variatie in de tijd. Inmiddels is de stabiliteit en snelheid van de software verbeterd en is er een variant beschikbaar waarmee de simulatie met stoftransport doorgerekend kan worden (*prognostisch rekenen*). Met deze optie is het mogelijk het effect van zout op de waterstand variërend in de tijd mee te nemen, zoals ook met het vijfde generatie WAQUA model werd gedaan.

Het doel van het modelleren van zout is om dichtheidseffecten van saliniteit op waterstanden beter mee te nemen. Het meenemen van 2D transport van zout en temperatuur heeft naar verwachting een belangrijk lokaal effect op gebieden waar de temporele variatie van de saliniteit significant is, bijvoorbeeld in de Nieuwe Waterweg omdat daar een sterke invloed van het getij gecombineerd wordt met een grote (ruimtelijke) gradiënt van het zoutveld. Omdat het gebruikte diagnostische zoutveld afgeleid is onder gemiddelde condities (december 2013), is het een waterstandseffect van prognostisch rekenen vooral te verwachten onder extremere condities zoals een stormopzet of een lage of hoge afvoer.

Dit rapport brengt de invloed van prognostisch rekenen op de berekende waterstanden van het RMM model in kaart. Hiervoor worden de volgende deelvragen gesteld:

- Wat is het effect van prognostisch rekenen onder:
 - Kalibratie omstandigheden (december 2013)
 - Validatie omstandigheden (heel jaar 2018)
 - Extreme condities (Hydraulische randvoorwaarden 2023 BOI)
- Geven de modelresultaten aanleiding om opnieuw te kalibreren en te valideren?
- Wat is het effect op de rekentijd (en stabiliteit) van het model?

Het werk is uitgevoerd door Tammo Zijlker, Jelmer Veenstra en Remi van der Wijk. Het voorliggende rapport is gereviewed door Firmijn Zijl.

2 Aanpak en gebruikte testsommen

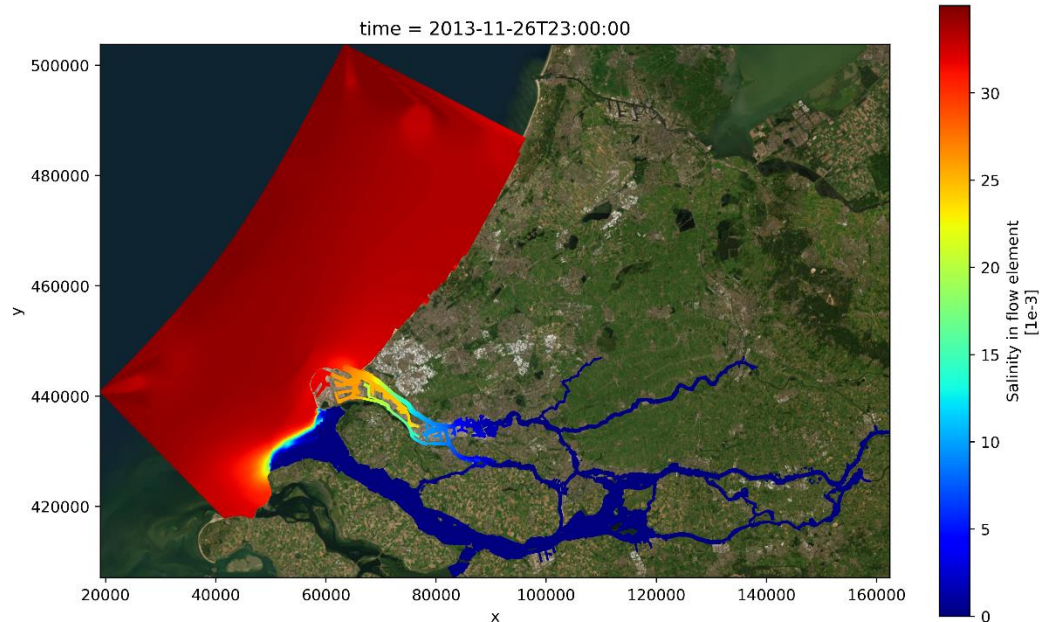
Om de impact van prognostisch rekenen te onderzoeken, worden vier testsommen gebruikt:

- Kalibratieperiode (december 2013) met werkelijk opgetreden condities.
- Schematisatie: **dflowfm2d-rmm_vzm-j13_6-w5**.
- Validatieperiode 2018 met werkelijk opgetreden condities, met een vrij hoge en langdurig lage afvoer wordt hier door het jaar heen een sterk wisselende bias waargenomen. Schematisatie: **dflowfm2d-rmm_vzm-j19_6-v2d**.
- Testsom met extreem hoge afvoer (24.000 m³/s bij Lobith), geen opzet op zee en geen wind. Er wordt een gemiddelde getijreeks opgelegd voor de waterstand op de zeerand. Schematisatie: **dflowfm2d-rmm_vzm-hr2023_6-v1c**, afgeknipt zeedomein.
- Testsom met hoge stormopzet (piekwaterstand 8 meter), hoge windsnelheid (pot wind 47 m/s, WNW D293) en lage afvoer (600 m³/s bij Lobith). Er wordt een gemiddelde getijreeks opgelegd voor de waterstand op de zeerand.
- Schematisatie: **dflowfm2d-rmm_vzm-hr2023_6-v1c**, afgeknipt zeedomein.

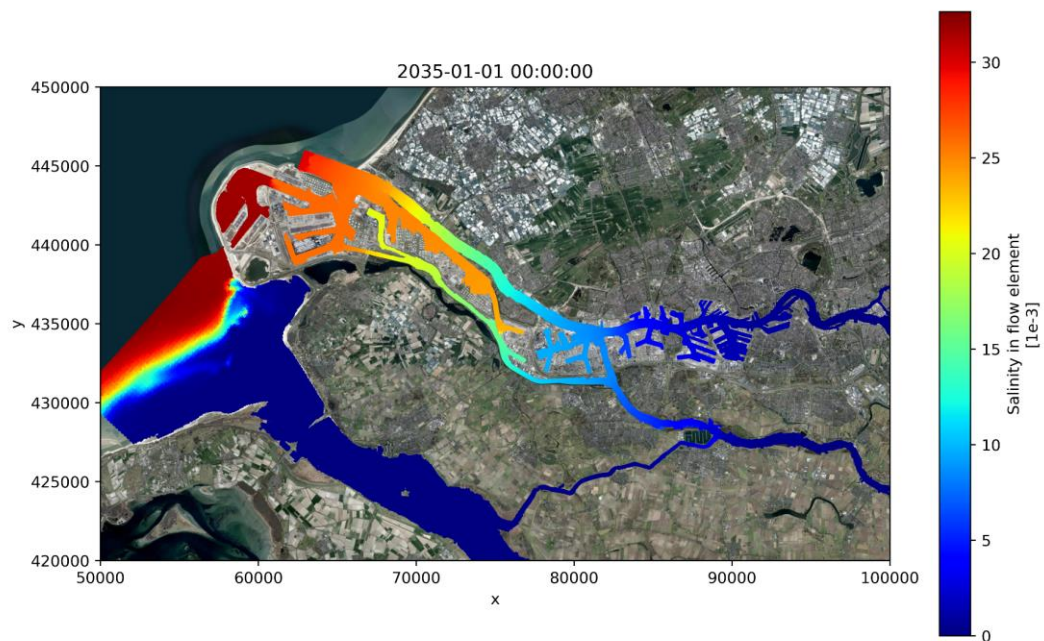
Alle sommen worden doorgerekend met de kalibratiefactoren zoals afgeleid in Veenstra et al. (2022). Deze methode is alleen geldig als de invloed van prognostisch rekenen op de kalibratieperiode beperkt is, wat aannemelijk is omdat het gemiddelde (prognostisch afgeleide) zoutveld voor diezelfde periode is afgeleid. Er is overwogen om een berekening zonder kalibratiefactoren als uitgangspunten te nemen. Echter, omdat de getijvoortplanting en daarmee het hele systeemgedrag zeer sterk wordt beïnvloedt door de (gekalibreerde) ebruwheid in de Nieuwe Waterweg en de ongekalibreerde resultaten significant slechter zijn, is ervoor gekozen de kalibratiefactoren te gebruiken voor alle sommen.

2.1 Initieel zoutveld

Het initiële zoutveld komt overeen met het diagnostische zoutveld dat afgeleid is in (Van der Kaaij, 2019). Figuur 2.1 toont dit initiële zoutveld. Figuur 2.2 toont het zoutveld dat hoort bij het RMM-VZM model met het kleine zeedomein waar het domein wordt afgeknipt bij de Nieuwe Waterweg en op zee buiten het Haringvliet. De zoutvelden zijn identiek in de gebieden waar het rekenrooster overlapt. Aan dit zoutveld is opvallend dat de voordelta van het Haringvliet volledig zoet is. In werkelijk is het water daar vaak zouter.



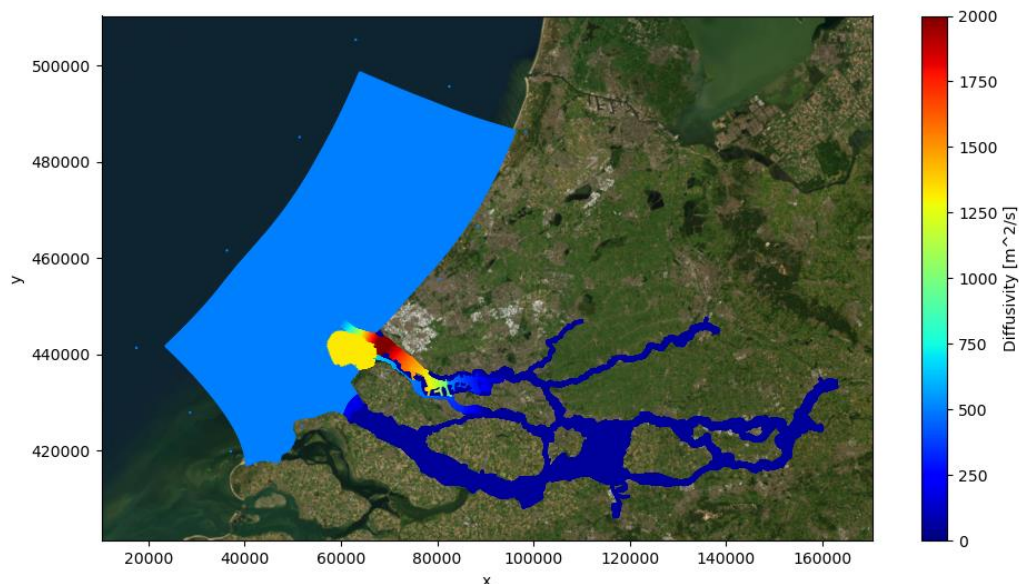
Figuur 2.1: Initieel zoutveld van het 2D RMM-VZM model met het grote zeedomein.



Figuur 2.2: Initieel zoutveld van het 2D RMM-VZM model met het afgesneden zeedomein bij de Maasmond en de zeedelta voor het Haringvliet.

2.2 Dispersieveld

Om prognostisch te kunnen rekenen is voorts een horizontaal (constant) dispersieveld nodig voor het zoutgehalte. Hiermee wordt het effect van dieptegemiddeld rekenen op de zoutindringing in combinatie met zout stratificatie geparametriseerd. Figuur 2.3 toont dit dispersieveld. Er worden met name hoge waarden gehanteerd in de Nieuwe Waterweg waar sprake is van stratificatie. Het dispersieveld is afkomstig uit het WAQUA RMM-model.



Figuur 2.3: Dispersieveld in het 2D RMM model.

2.3 Zout- en temperatuurranden voor prognostische berekening

Voor de prognostische sommen is het noodzakelijk zout- en temperatuurrandvoorwaarden op te leggen. Voor de prognostische sommen over de kalibratieperiode 2013 en de validatieperiode 2018 wordt dezelfde modelopzet gebruikt als toegelicht in het kalibratie- en validatierapport van RMM 2D (Veenstra, 2022).

Voor de twee prognostische testsommen met hoge afvoer en hoge stormopzet wordt gebruik gemaakt van het afgesneden zeedomein (Figuur 2.2). De randvoorwaarde voor zout wordt in dit model geïmplementeerd als een Thatcher-Harleman randvoorwaarde met een return time van 5400s (1,5 uur). Dit wordt gedaan om te voorkomen dat bij omkering van de stromingsrichting op de rand sprongen in het zoutgehalte ontstaan. De voorgeschreven saliniteit op de randen is constant, 31 ppt bij de Maasmond en 34 ppt buiten het Haringvliet. Deze zourand komt overeen met het SOBEK RMM-model (Fujisaki, A 2018) . Bovenstrooms wordt geen zourandvoorwaarde opgelegd. Het model laat zoet water instromen via de rivieranden (0 ppt).

2.4 Numerieke instellingen DFLOW-FM

Om te rekenen met een prognostisch zoutveld worden twee wijzigingen gedaan aan de numerieke instellingen van DFLOW-FM:

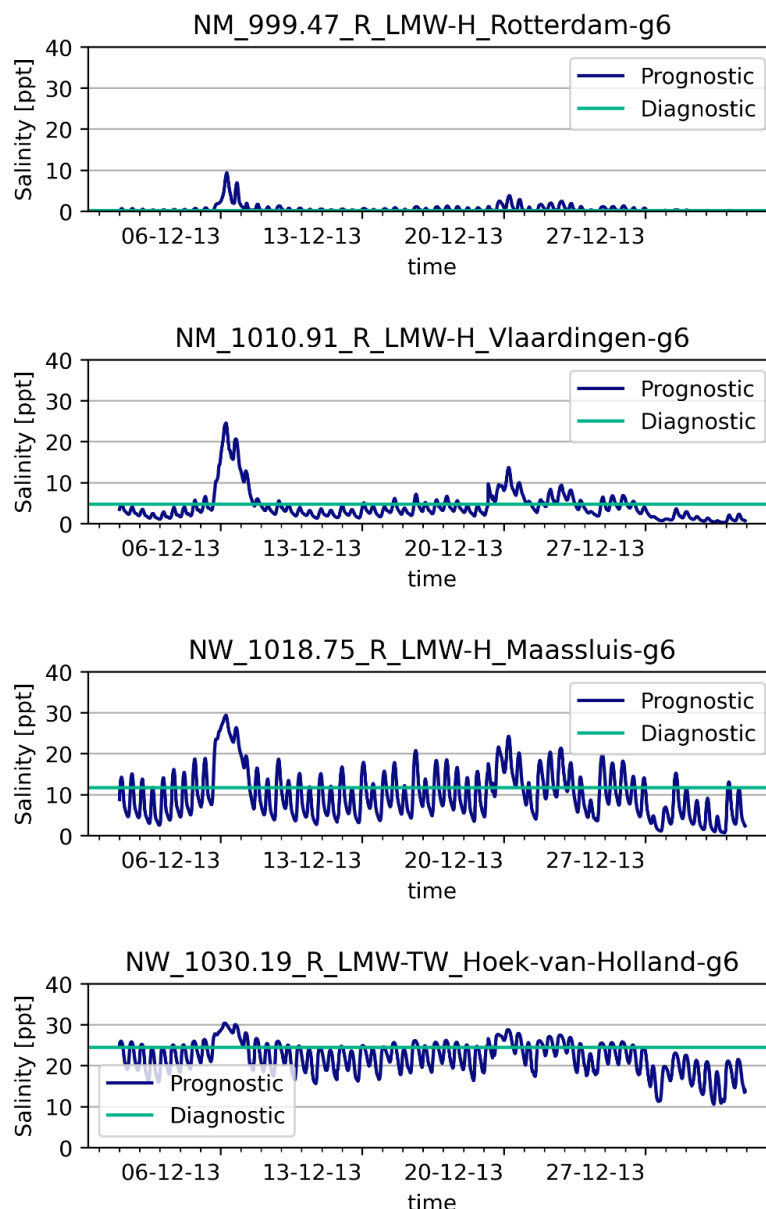
	Default	Diagnostisch	Prognostisch
Transportmethod	1	2	1
TransportAutoTimestepdiff	0	-	3

3 Resultaten

3.1 Kalibratie-omstandigheden december 2013

3.1.1 Saliniteit in de Nieuwe Maas

Figuur 3.1 toont de berekende saliniteit voor verschillende stations in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas gedurende de kalibratieperiode december 2013, voor de prognostische en diagnostische modelrun. Bij alle stations is een oscillatie van de saliniteit door het getij duidelijk zichtbaar in de prognostische resultaten. Dit effect wordt stroomopwaarts sterk kleiner. Tijdens de Sinterklaasstorm op 6 december vindt sterke zoutindringing plaats. Dit effect valt tot Rotterdam duidelijk te zien. Daar wordt een dieptegemiddelde saliniteit van 10 ppt berekend in de prognostische run tijdens de storm. De diagnostische (opgelegde) saliniteit komt goed overeen met de gemiddelde prognostische saliniteit onder normale omstandigheden.

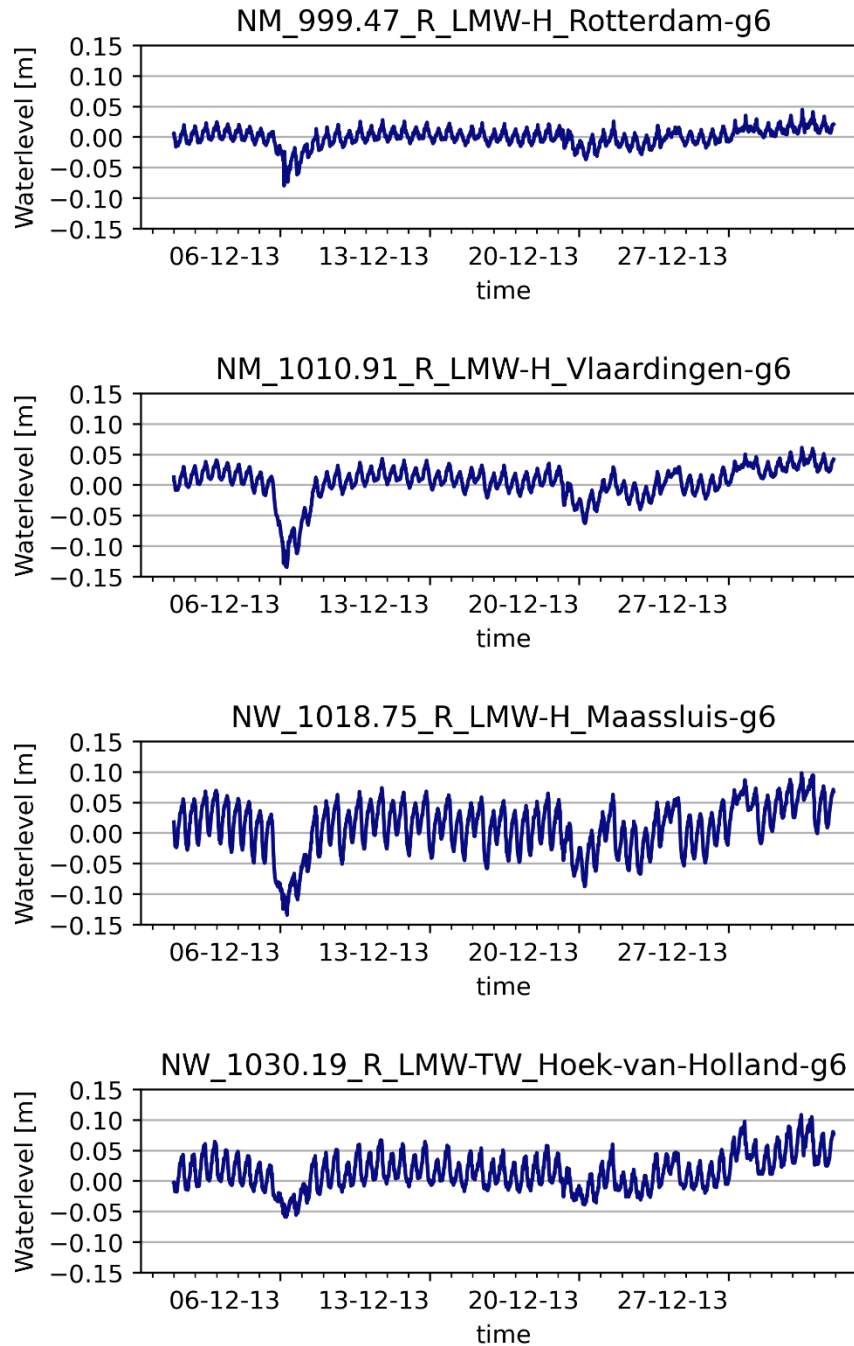


Figuur 3.1: Berekende saliniteit in stations aan de Nieuwe Maas gedurende de kalibratieperiode december 2013.

3.1.2

Effect prognostisch rekenen op waterstanden Nieuwe Maas

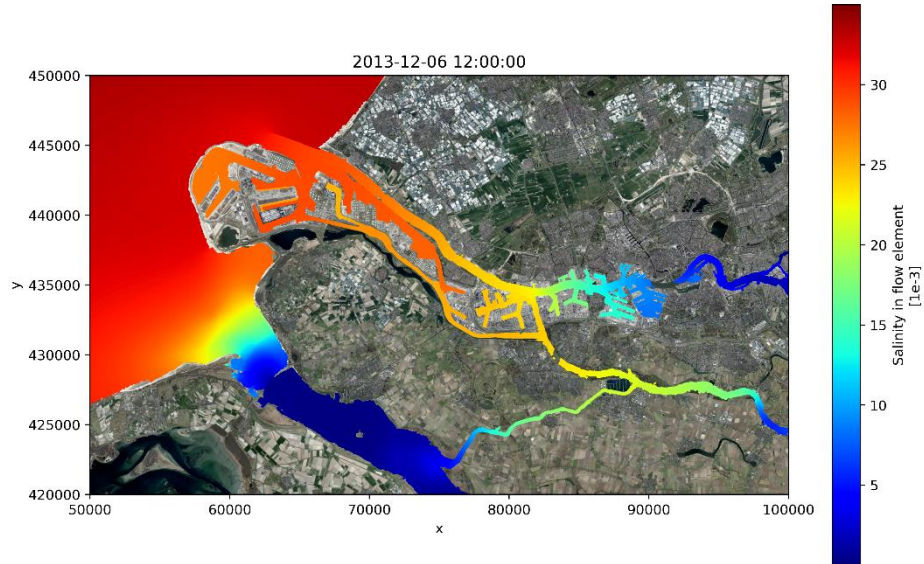
Figuur 3.2 toont het verschil tussen de waterstand in het prognostische en diagnostische model. In deze figuur zijn duidelijke oscillaties te zien die samenhangen met het getij en grotere afwijkingen die ontstaan bij stormopzet, met name gedurende de Sinterklaasstorm. De verschillen zijn in Maassluis het grootst. Op het moment van grootste saliniteit in het prognostische model is de waterstand daar ca. 13 cm lager dan het diagnostische model. Het verschil op de tijdschaal van het getij heeft een amplitude van max 5 cm. De grootste amplitude is bij Maassluis te vinden.



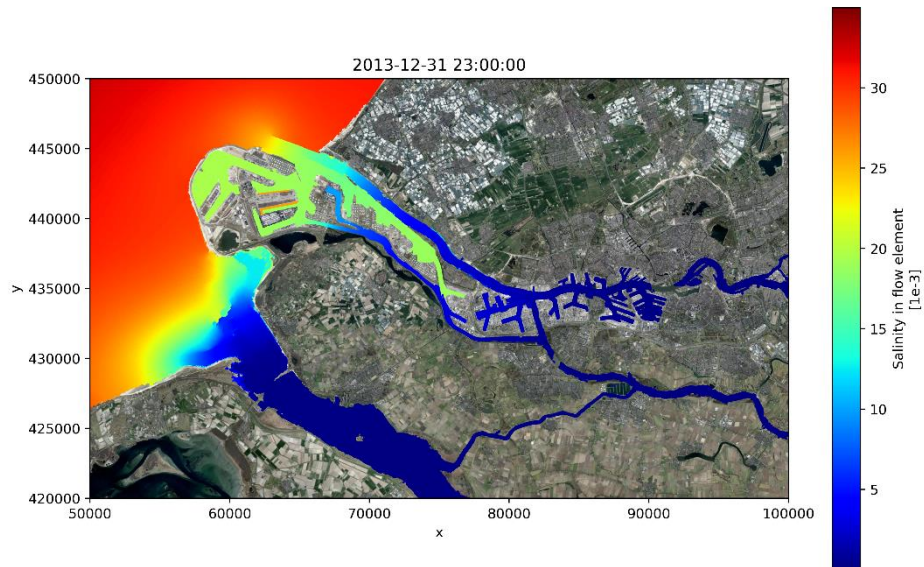
Figuur 3.2: Verschil in waterstand tussen de prognostische en diagnostische run over december 2013. Bij toegenomen saliniteit in het prognostische model is de gemodelleerde waterstand lager.

3.1.3 Temporele ontwikkeling van het prognostisch zoutveld

Er is onderzocht hoe het prognostisch zoutveld zich in de tijd ontwikkelt. Figuur 3.3 en Figuur 3.4 tonen de saliniteit in de prognostische modelrun op 6 december 2013 om 11:00 en het einde van de kalibratieperiode. Uit Figuur 3.3 blijkt dat tijdens de Sinterklaasstorm significante zoutindringing heeft plaatsgevonden. Het zout reikt tot ver op de Oude Maas en bereikt via het Spui ook het Haringvliet. Aan het einde van de kalibratieperiode is de zoutindringing grotendeels uitgespoeld. Het domein is zoeter dan in het initiële zoutveld (Figuur 2.1).



Figuur 3.3 Saliniteit in het RMM-VZM model op 6 december om (12:00 MET). Door de hoge stormopzet heeft significante zoutindringing plaatsgevonden in de Nieuwe waterweg en tot ver in de Oude Maas.



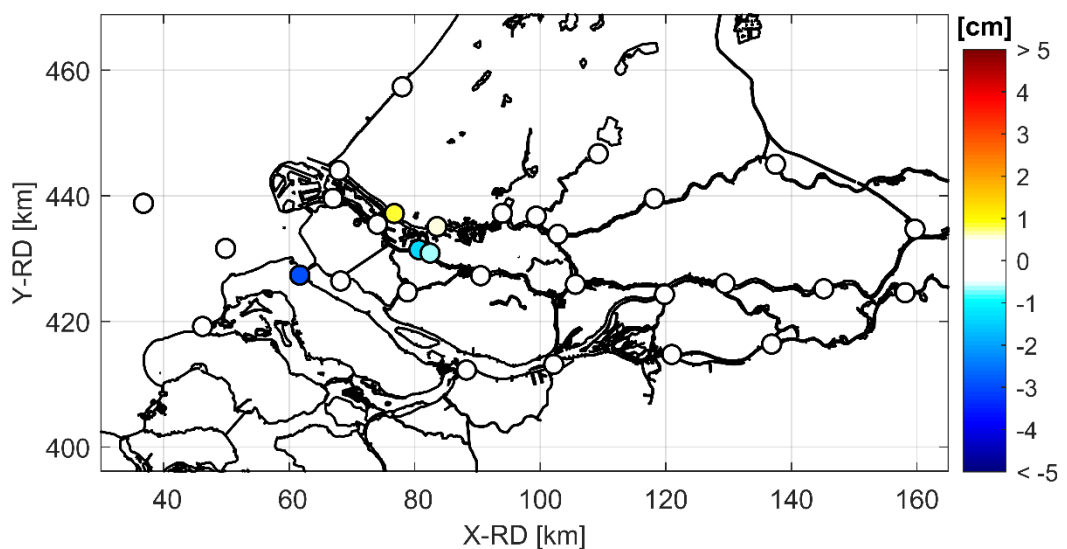
Figuur 3.4: Saliniteit in het RMM-VZM aan het einde van de kalibratieperiode december 2013. De zoutindringing van tijdens de sinterklaasstorm is grotendeels afgenomen.

3.1.4 Impact op statistiek waterstanden

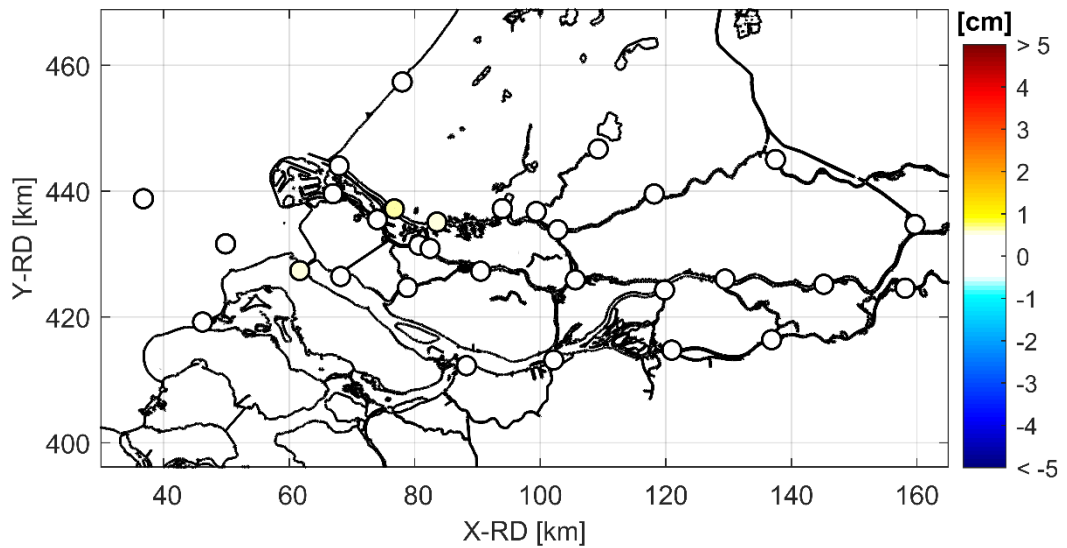
Voor de kalibratieperiode december 2013 zijn waterstandsmetingen beschikbaar. Voor deze periode is onderzocht wat de impact is van prognostisch rekenen op de kwaliteit van de gemodelleerde waterstanden is. Deze resultaten worden in termen van verandering in RMSE in Figuur 3.5 getoond. Uit deze figuur blijkt dat prognostisch rekenen de kwaliteit van de waterstanden in met name in de Nieuwe Waterweg en Oude Maas verandert. In de rest van het domein is het effect kleiner dan 0.5 cm.

De waterstand RMSE vermindert met name bij Stellendam, bij dat station is echter sprake van een sterke, constante bias veroorzaakt door meetproblemen met betrekking tot het referentieniveau. Daarnaast vermindert de RMSE van de waterstand bij Spijkenisse en Hartelbrug met respectievelijk 0.6 cm (van 5.3 naar 4.7 cm) en 1.3 cm (van 6.3 naar 5.3 cm). De RMSE van de waterstand bij Maassluis neemt met 0.8 cm toe (van 4.6 naar 5.4 cm). De piek van de waterstand tijdens de Sinterklaasstorm wordt door prognostisch rekenen sterker onderschat dan in de diagnostische run (zie Figuur 3.7 en Figuur 3.8).

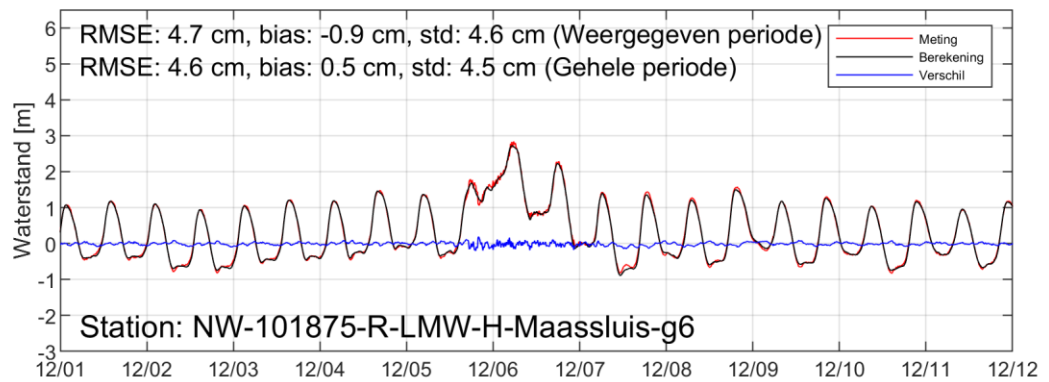
Het verschil in RMSE kan ontstaan door een verandering van de bias of de standaarddeviatie van de waterstanden in het prognostische model. Figuur 3.6 toont de verandering van de standaarddeviatie van de waterstanden. De verandering hiervan is klein en vooral zichtbaar in de Nieuwe Waterweg. De standaarddeviatie neemt in kleine mate toe bij sommige stations in de Nieuwe Waterweg (<1 cm). Dit wijst erop dat in het prognostische model de temporele variatie slechter gerepresenteerd wordt. Dit kan komen omdat de kalibratie gedaan is met een diagnostisch zoutveld.



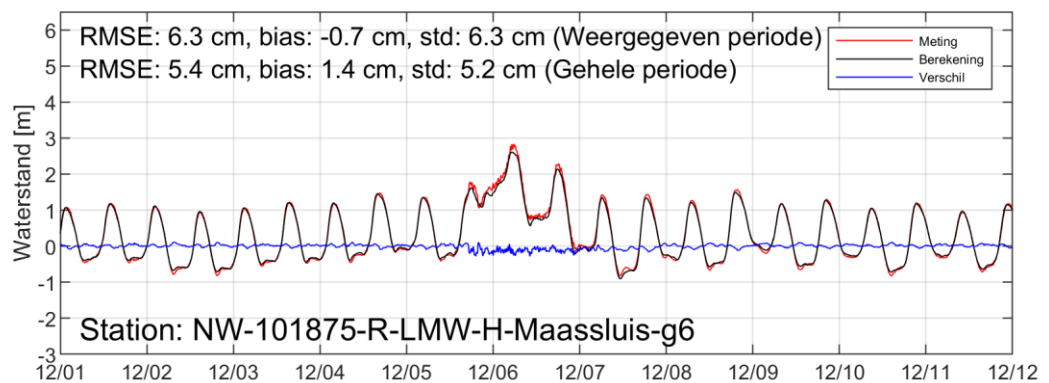
Figuur 3.5: Verandering van RMSE van waterstanden door prognostisch rekenen in de kalibratieperiode december 2013.



Figuur 3.6: Verandering van standaard deviatie van waterstanden door prognostisch rekenen in de kalibratieperiode december 2013.



Figuur 3.7: Tijdreeks van waterstanden bij station Maassluis gedurende de kalibratieperiode in het diagnostische model.

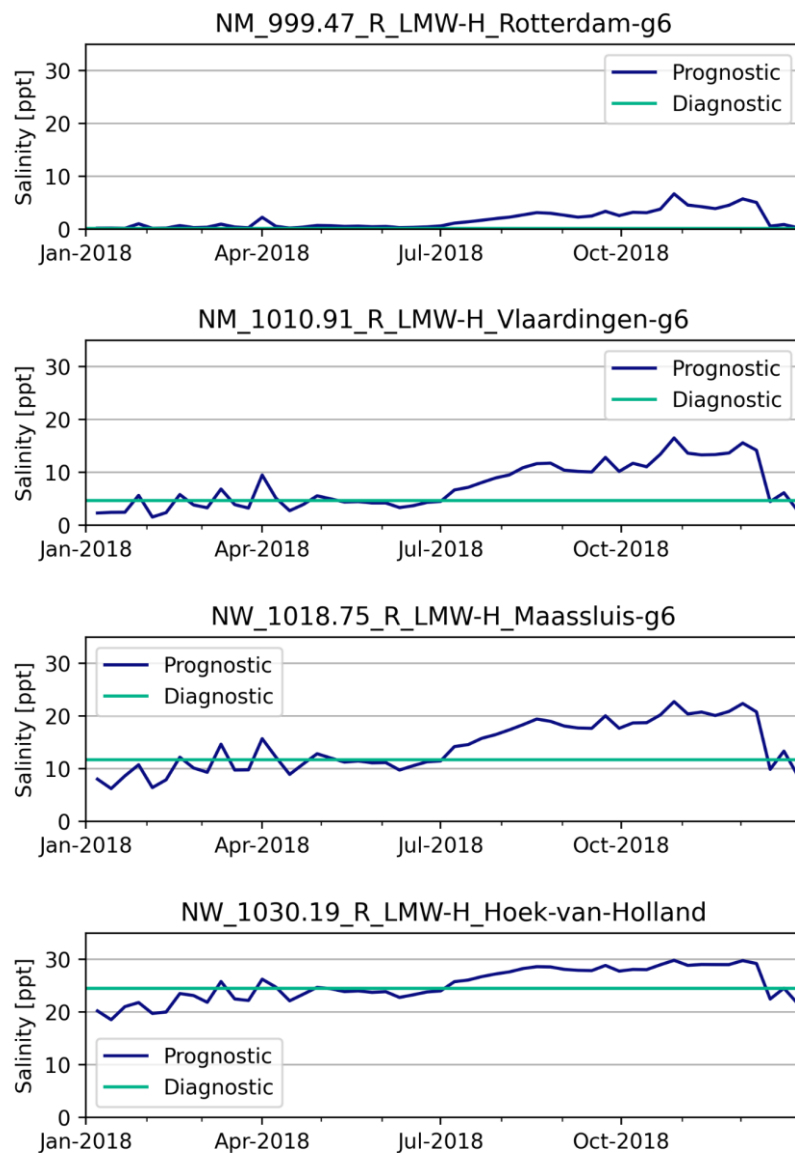


Figuur 3.8: Tijdreeks van waterstanden bij station Maassluis gedurende de kalibratieperiode in het prognostische model.

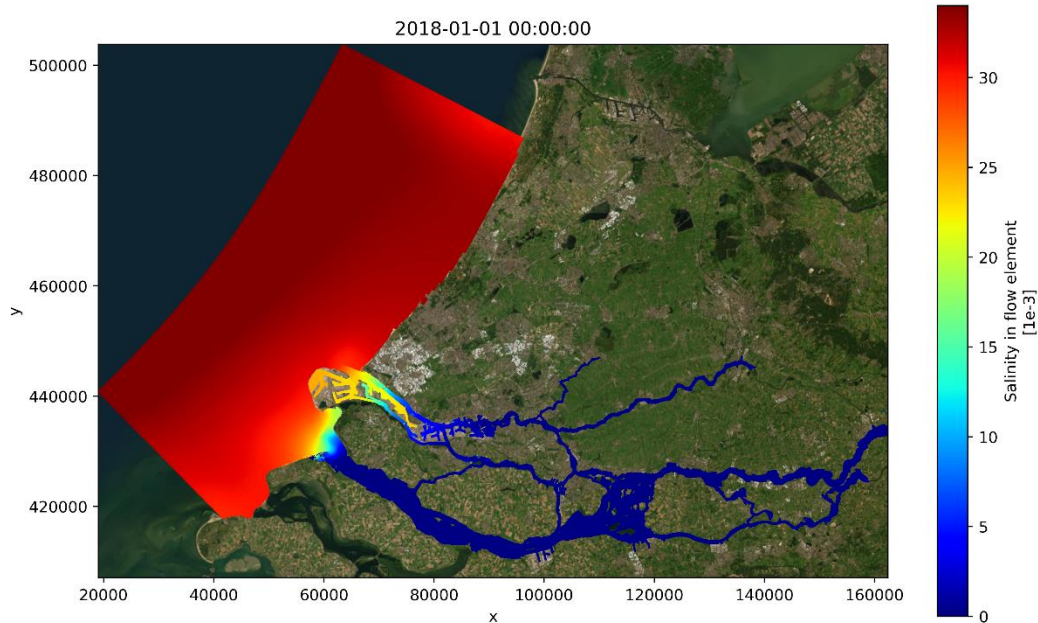
3.2 Validatie-omstandigheden jaar 2018

3.2.1 Saliniteit in de Nieuwe Maas

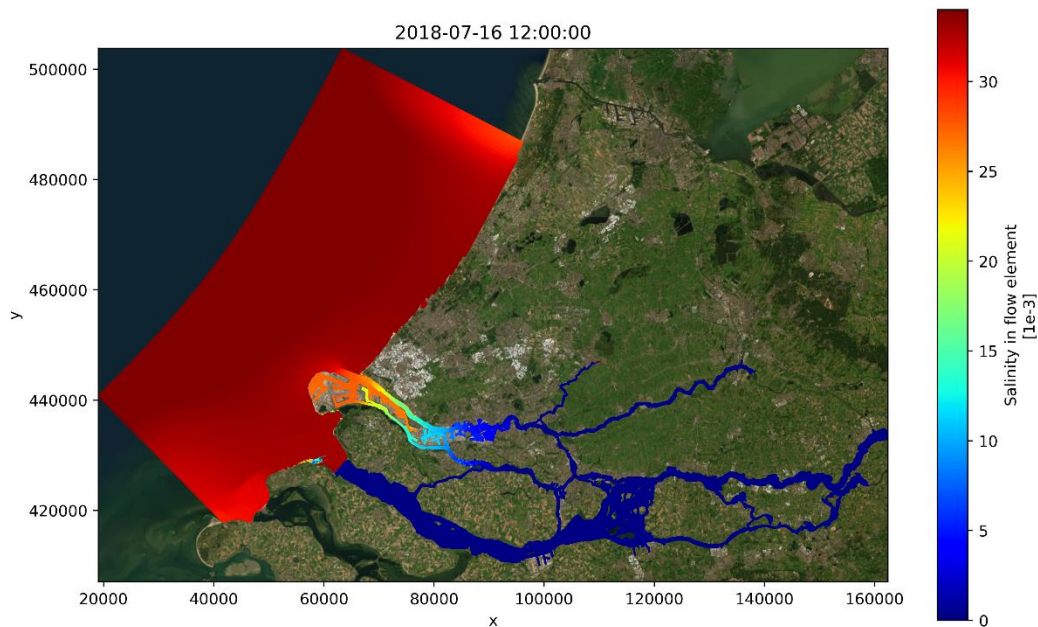
Figuur 3.9 toont de wekelijks gemiddelde saliniteit voor vier locaties in de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg gedurende de validatieperiode 2018. Uit deze figuren blijkt significante verzilting op te treden in de maanden juli tot en met november 2018 (zie Figuur 3.11). In deze periode was er sprake van zeer lage rivierafvoer. De gemiddelde prognostische en diagnostische saliniteit in januari tot en met juni 2018 zijn voor alle stations goed in overeenstemming. Deze periode is wat betreft rivierafvoer vergelijkbaar met de kalibratieperiode december 2013, waarvoor het diagnostische zoutveld is afgeleid (zie Figuur 3.10).



Figuur 3.9: Berekende saliniteit, wekelijks gemiddeld in stations aan de Nieuwe Maas gedurende de validatieperiode 2018.

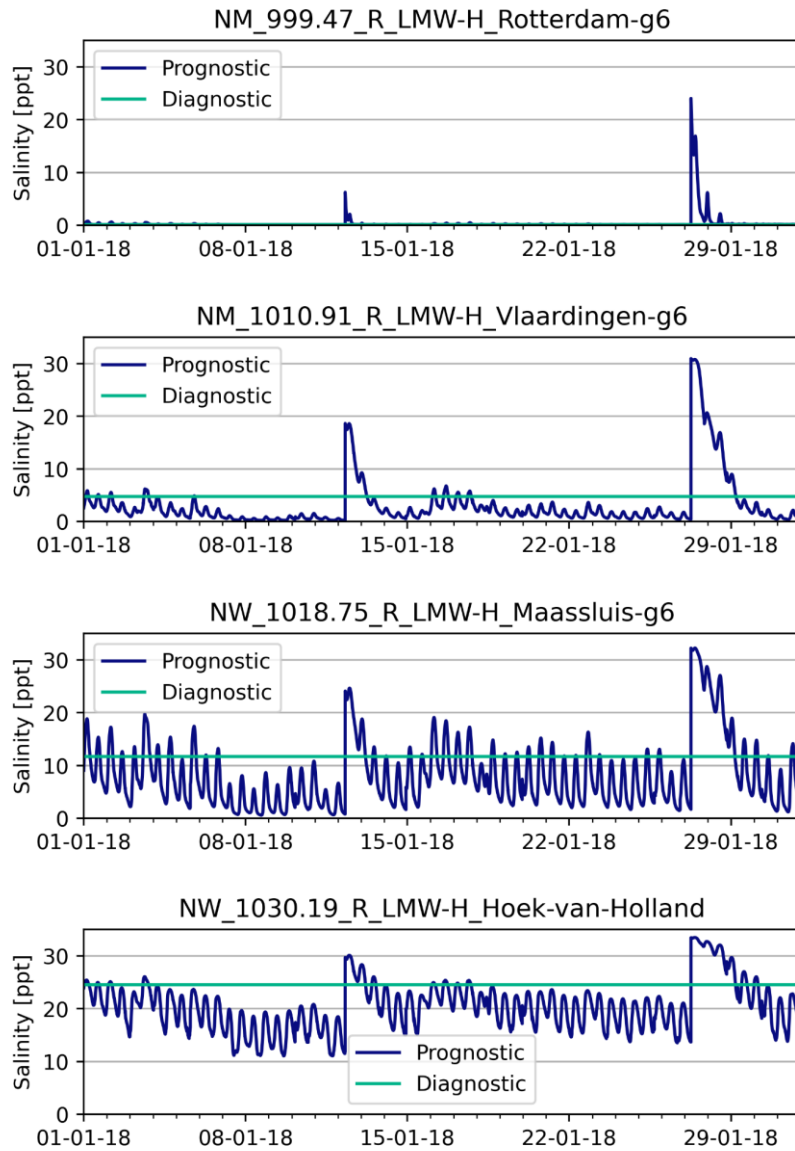


Figuur 3.10: Saliniteit in het RMM gebied op 1 januari 2018 om 00:00



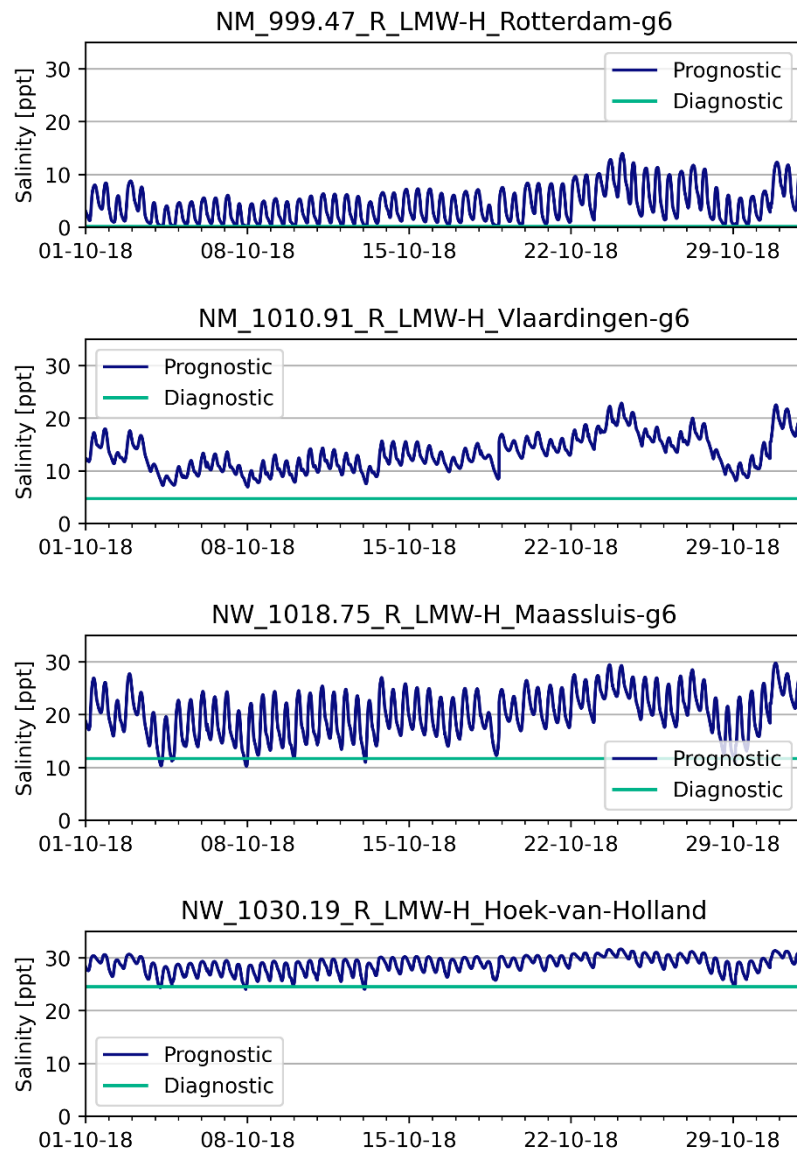
Figuur 3.11: Saliniteit in het RMM-gebied op 16 juli 2018 om 12:00

Figuur 3.12 toont de prognostisch en diagnostisch berekende saliniteit in januari 2018 in de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg. In de tijdreeksen bij Vlaardingen, Maassluis en Hoek van Holland is een duidelijke oscillatie van de saliniteit zichtbaar die hoort bij de getijdebeweging. Op twee momenten is er een discontinuïteit van saliniteit zichtbaar, op 12 januari en op 27 januari. Paragraaf 3.2.2 gaat dieper in op dit verschijnsel.



Figuur 3.12: Berekende saliniteit in stations aan de Nieuwe Maas gedurende de maand januari 2018 in de validatieperiode.

Figuur 3.13 toont de prognostisch en diagnostisch berekende saliniteit in oktober 2018 in de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg. Tijdens deze periode is sprake van verhoogde saliniteit in alle stations ten opzicht van de diagnostisch berekende saliniteit. In deze maand zijn er geen discontinuïteiten zichtbaar zoals in voor januari het geval was.

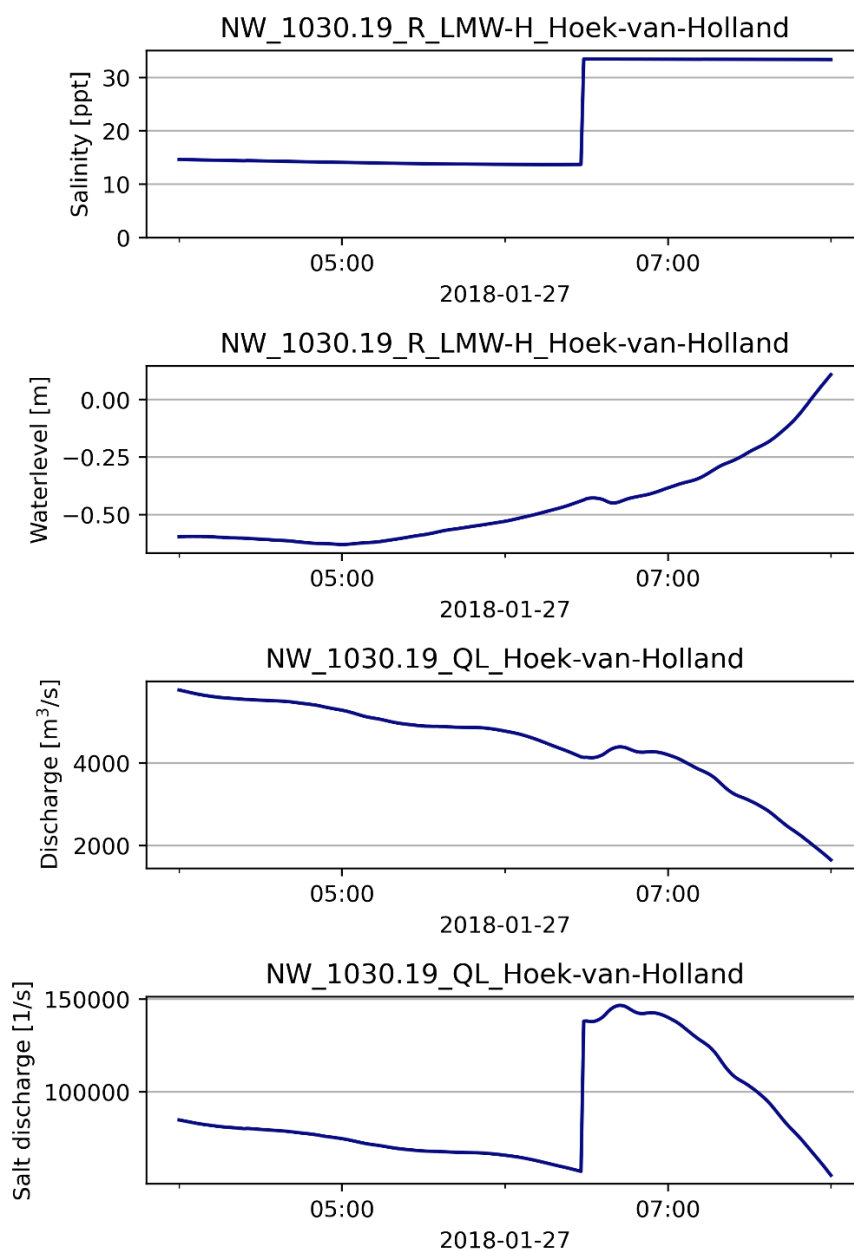


Figuur 3.13: Berekende saliniteit in stations aan de Nieuwe Maas gedurende de maand oktober 2018 in de validatieperiode.

3.2.2 Saliniteitssprongen in prognostische modelrun

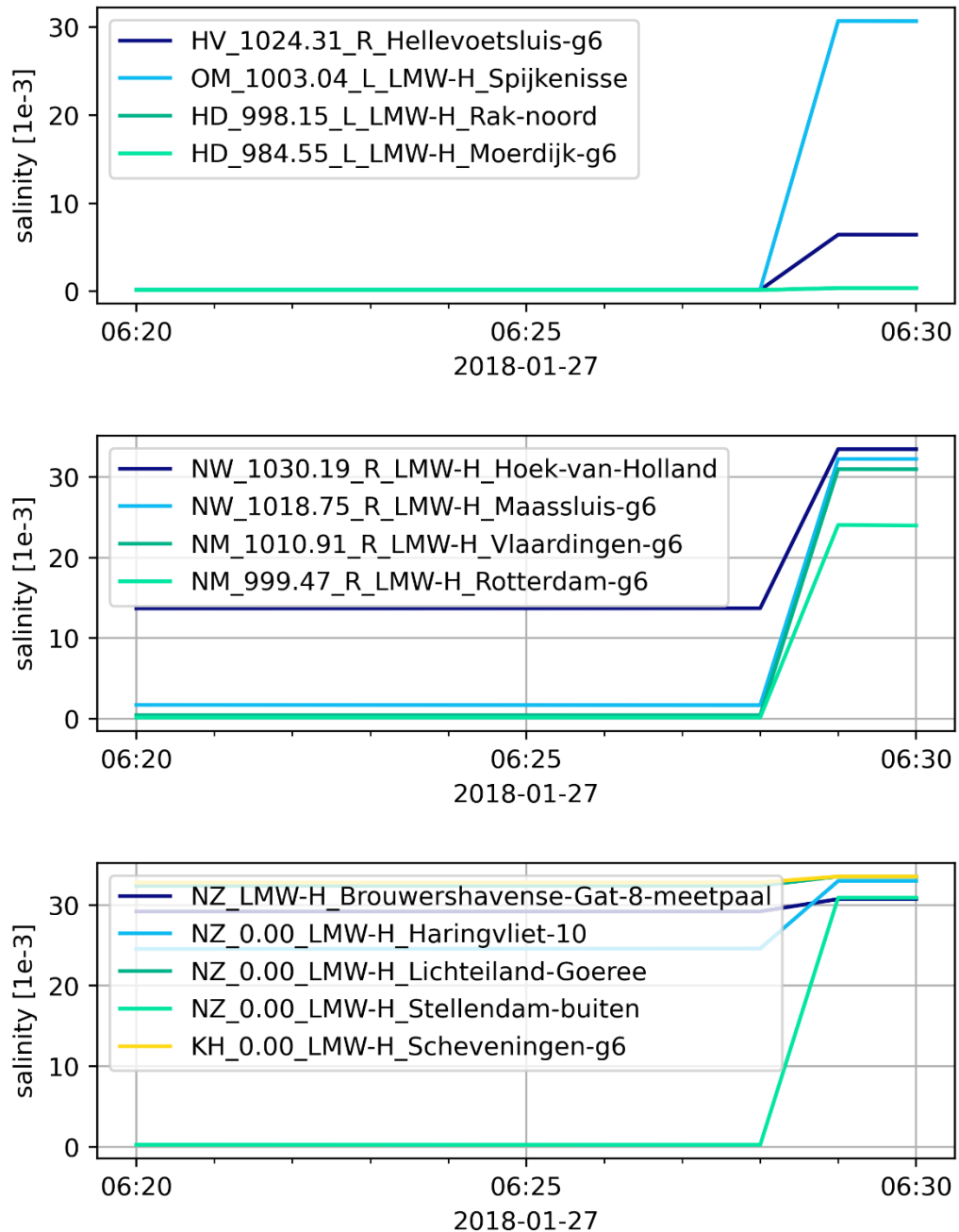
Zoals in Figuur 3.12 te zien is, lijkt er in de prognostische modelrun sprake van plotselinge sprongen van saliniteit. Deze sectie beschrijft dit fenomeen in meer detail. Eén specifieke sprong van het zoutgehalte vindt plaats op 27 januari 2018, maar het komt ook op andere momenten voor. Figuur 3.14 toont de sprong bij Hoek van Holland. Er is alleen sprake van een discontinuïteit in het zoutgehalte, de afvoer en waterstand bij Hoek van Holland vertonen geen dergelijke sprong. Na de schok past de waterstand zich binnen ca 10 min. aan het nieuwe zoutveld aan. De verwachting is dat de schokken op de statistiek van de waterstand over een jaar weinig impact hebben. Dat is omdat de schokken maar sporadisch voorkomen en het zoutveld zich snel (ca 3 dagen) weer aanpast aan de situatie voor de schok. Schokken zo extreem als in januari komen alleen eind maart nog twee keer voor in de modelrun over 2018.

De schokken blijken veroorzaakt te worden door een software-bug in D-Flow FM. Deze is verholpen in wekelijkse release 2.23.08.78303 (Issue UNST-6783).



Figuur 3.14: Saliniteit, waterstand, debiet en zoutdebiet op 27 januari 2018 bij Hoek van Holland.

De sprong van het zoutgehalte wordt door het hele domein op precies hetzelfde moment gezien. De grootte van de sprong verschilt wel per locatie zoals in Figuur 3.15 te zien is.



Figuur 3.15: Saliniteit in verschillende stations in het RMM domein op 27 januari 2018 rond de sprong van saliniteit tussen 06:28 en 06:29.

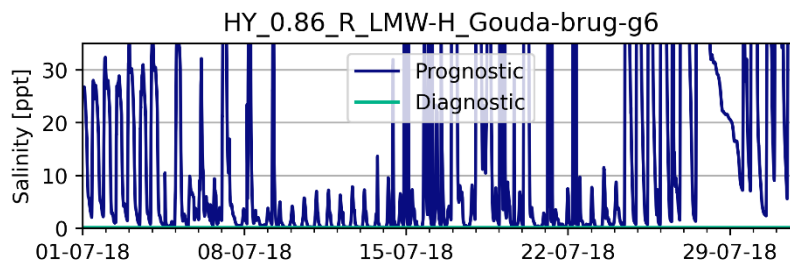
3.2.3 Saliniteit rond lateraal Gouda

De prognostische modelrun over 2018 toont op verschillende momenten, specifiek gedurende de zomermaanden foutief een zeer hoge saliniteit, zie Figuur 3.16 en Figuur 3.17. De oorzaak hiervoor lijkt te liggen in het gebruik van *discharge laterals* in de huidige model. Het model bevat een lateraal bij Gouda om toe- en afvoer aan de Hollandsche IJssel te modelleren. In de zomermaanden zijn er periodes van negatieve afvoer door de lateraal, er

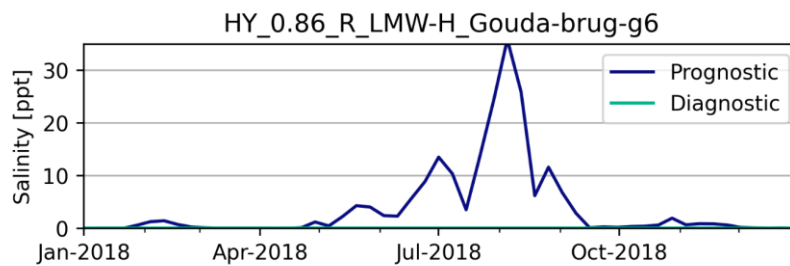
wordt water aan de Hollandsche IJssel onttrokken. Op deze momenten wordt zeer hoge saliniteit bij het observatiepunt Gouda Brug geobserveerd. De D-HYDRO implementatie van lateralen is in de huidige opzet vooral geschikt voor neerslag en verdamping. Het in- en uitstromende water wordt gemodelleerd met een concentratie van 0 ppt. zout. Hierdoor neemt bij onttrekking van water de zoutconcentratie ongewenst toe.

Alternatieve implementaties in D-HYDRO voor de afvoerlateraal zijn *source-sinks* en *discharge boundaries*. Gebruik van *source-sinks* ligt het meest voor de hand, deze implementatie wordt ook in RMM 3D gebruikt

- Een *source-sink* kan gebruikt worden als alternatief voor de *discharge lateral*. Bij een positieve afvoer kunnen saliniteit en temperatuur worden opgegeven. Bij negatieve afvoer (onttrekking) wordt de saliniteit en temperatuur van het model gebruikt. Bij relatief grote debieten ten opzichte van het volume van de cel dient de afvoer over meerdere punten te worden verdeeld om te voorkomen dat de afvoer gelimiteerd wordt door DFLOW-FM.
- Een *discharge boundary* kan alleen aan de rand van het modelnetwerk worden opgelegd. De bathymetrie moet dan zodanig worden aangepast dat het water vanaf de rand ook goed het model in kan stromen. Op dit moment zijn de cellen aan de rand van het netwerk daarvoor op sommige plaatsen te ondiep. Het gebruik van een *discharge boundary* ligt dan ook niet voor de hand, zeker gezien de relatief kleine debieten. Bij een *discharge boundary* kan voor het instromende water de saliniteit en temperatuur wel gewoon worden opgegeven en voor het uitstromende water de saliniteit en temperatuur van het model ter plaatse wordt gebruikt. Bij onttrekking ontstaan dan geen problemen.



Figuur 3.16: Saliniteit bij het observatiepunt Gouda Brug in juli 2018



Figuur 3.17: Wekelijks gemiddelde saliniteit bij het observatiepunt Gouda Brug over 2018

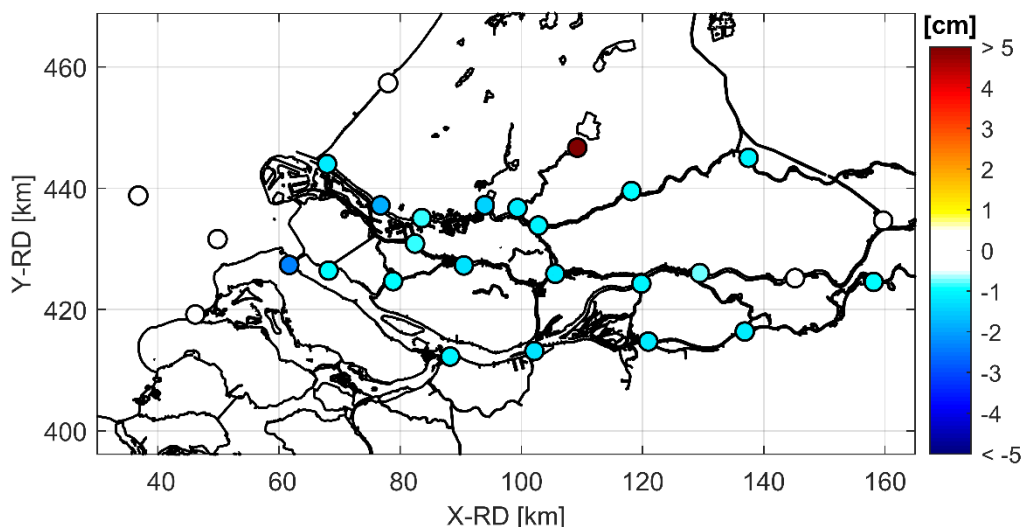
3.2.4 Impact op statistiek waterstanden

Voor de validatieperiode 2018 zijn de gemodelleerde waterstanden vergeleken met metingen. Deze sectie vergelijkt de statistiek van waterstanden tussen de diagnostische en prognostische modelberekening. De gehanteerde validatiemethodiek komt overeen met het aanvullende validatierapport van RMM 2D (Zijlker 2022). Voor de getij-analyse is gebruik gemaakt van getijcomponenten met korte tijdschalen (dagelijks en hoger-frequent). Laag-frequente getijcomponenten zoals SA, SSA, MSM, MM, MSF en MF zijn niet meegenomen.

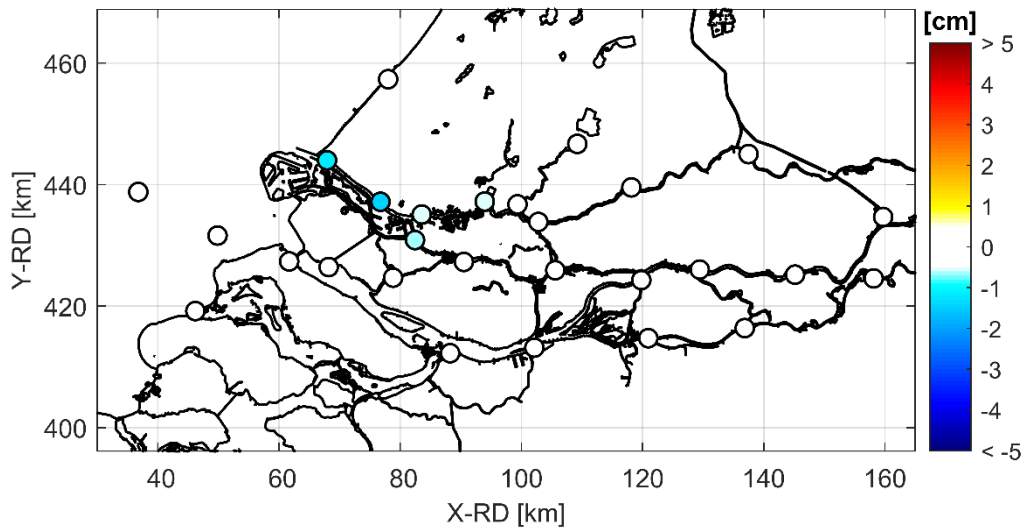
Figuur 3.18, Figuur 3.19 en Figuur 3.20 tonen de procentuele verandering van de RMSE van de waterstand, getij en opzet. Tabel 3.1, Tabel 3.2 en Tabel 3.3 tonen de RMSE en Bias van waterstand, opzet en getij voor alle stations voor zowel de prognostische als diagnostische modelrun.

Uit de resultaten blijkt dat de RMSE van de waterstand voor alle stations, behalve Gouda en Brouwershavensche Gat 08 afneemt. Voor station Gouda is dat te verklaren door de fouten in zoutconcentraties rond de lateraal (zie 3.2.2). Bij Brouwershavensche Gat 08 is sprake van toegenomen bias en problemen met het referentieniveau van de metingen. De RMSE van de benedenstroomse stations neemt af van 6.2 naar 5.2 cm. De RMSE voor bovenstroomse stations verandert van 10.4 naar 9.5 cm.

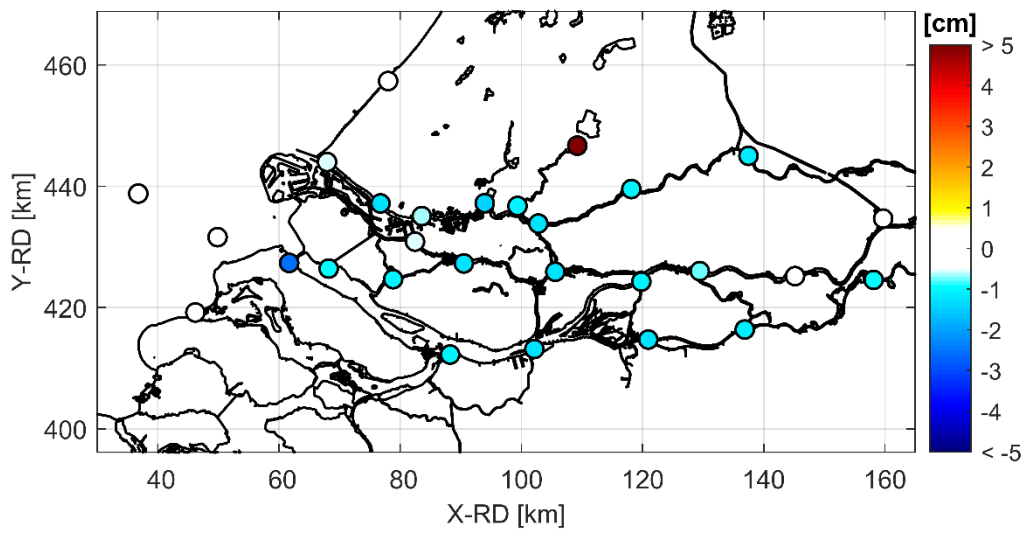
Er treedt verbetering op van het getijsignaal in de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas. De RMSE verbetert bij Hoek van Holland van 4.4 naar 3.2 cm, bij Maassluis van 3.8 naar 2.4 cm en bij Rotterdam van 3.7 naar 3.2 cm. Verder bovenstrooms wordt de verbetering kleiner. Door prognostisch te rekenen neemt de amplitude van het getijsignaal af. Bij het station Maassluis is de diagnostisch berekende M2-amplitude 76 cm, prognostisch berekend 74.2 cm en geobserveerd 72.8 cm. De fase van het M2-getij verandert met ca. 2°.



Figuur 3.18: Verandering RMSE waterstand door prognostisch rekenen over het jaar 2018.

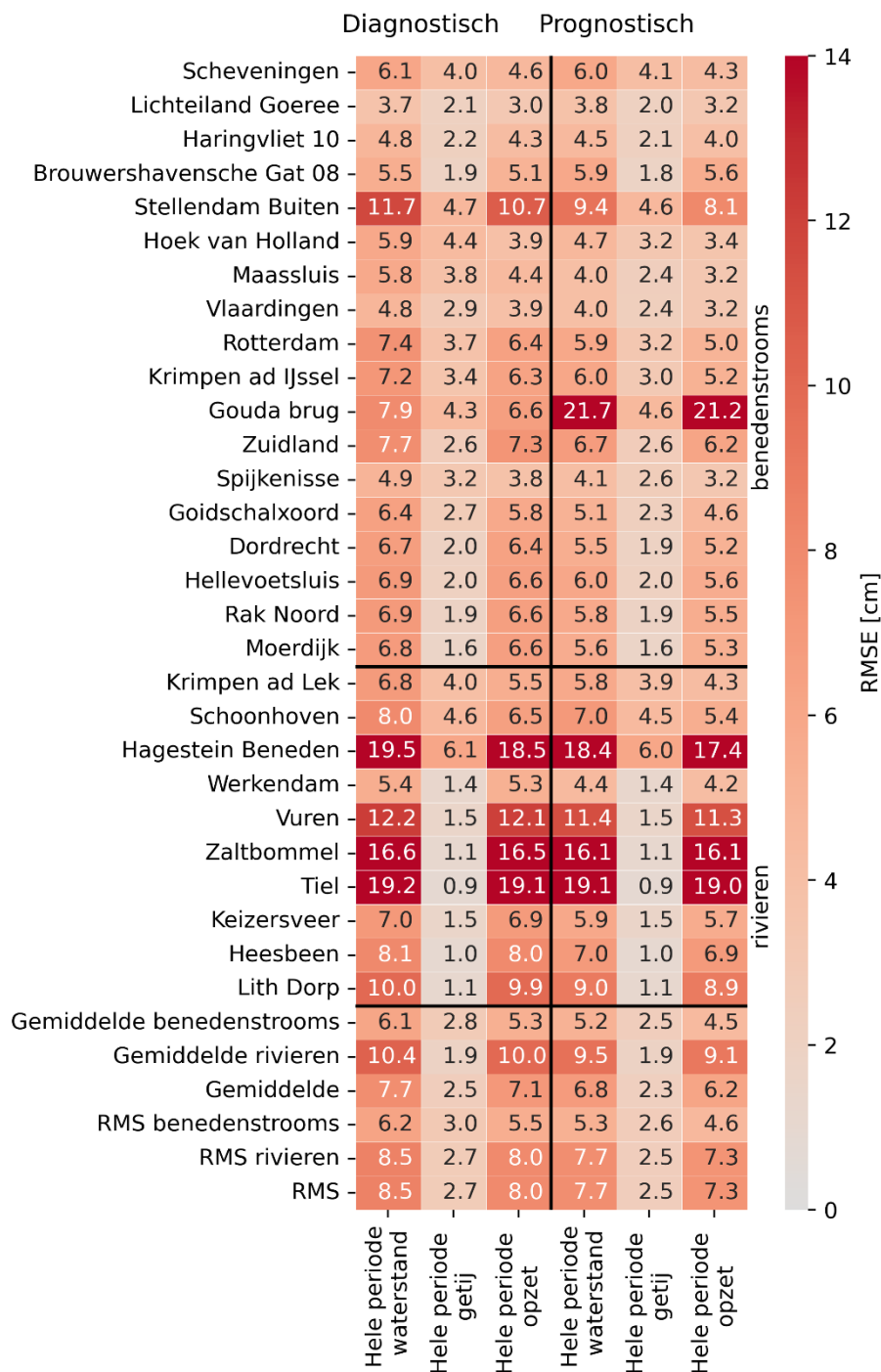


Figuur 3.19: Verandering RMSE getij door prognostisch rekenen over het jaar 2018.

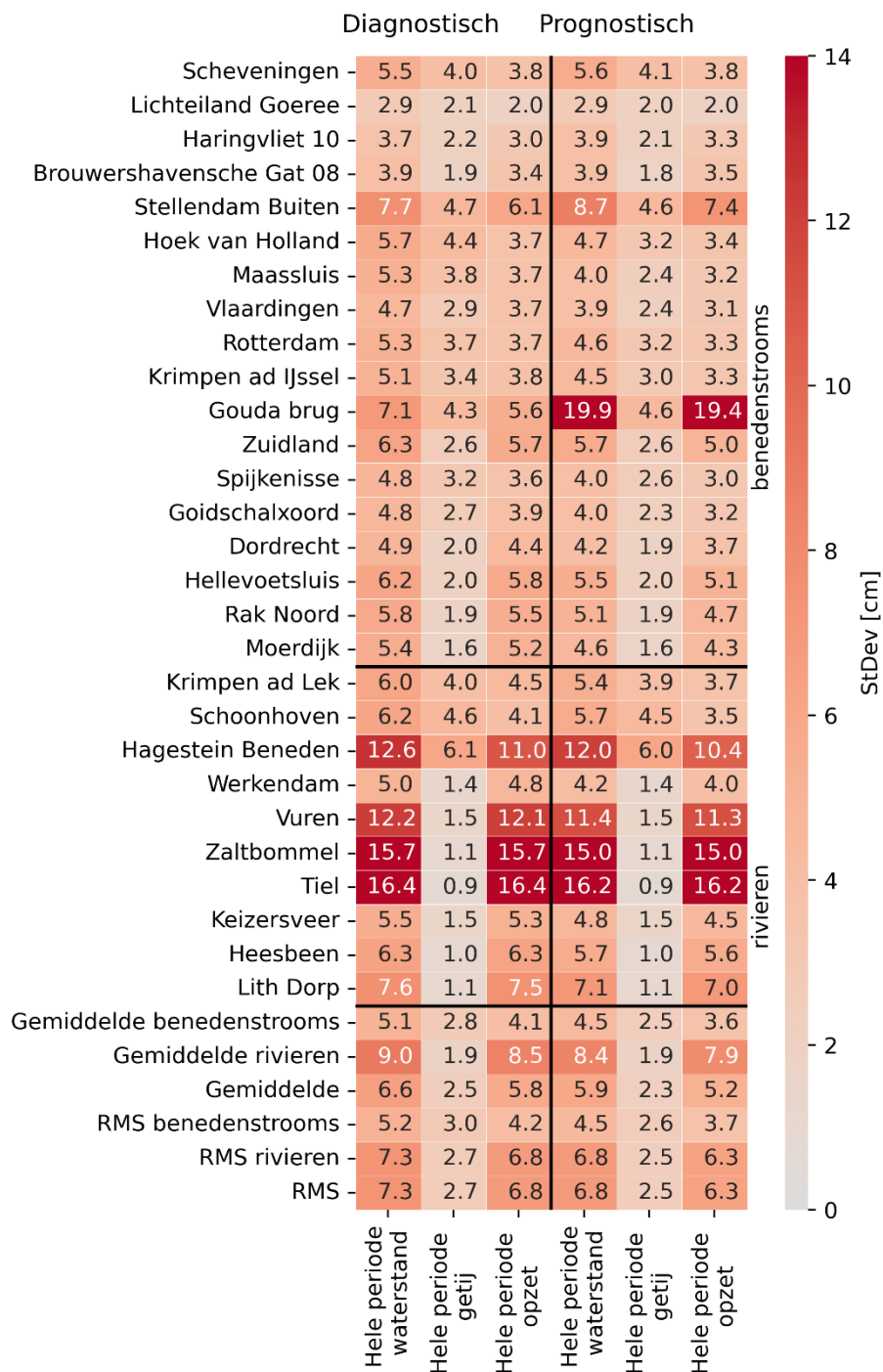


Figuur 3.20: Verandering RMSE opzet door prognostisch rekenen over het jaar 2018.

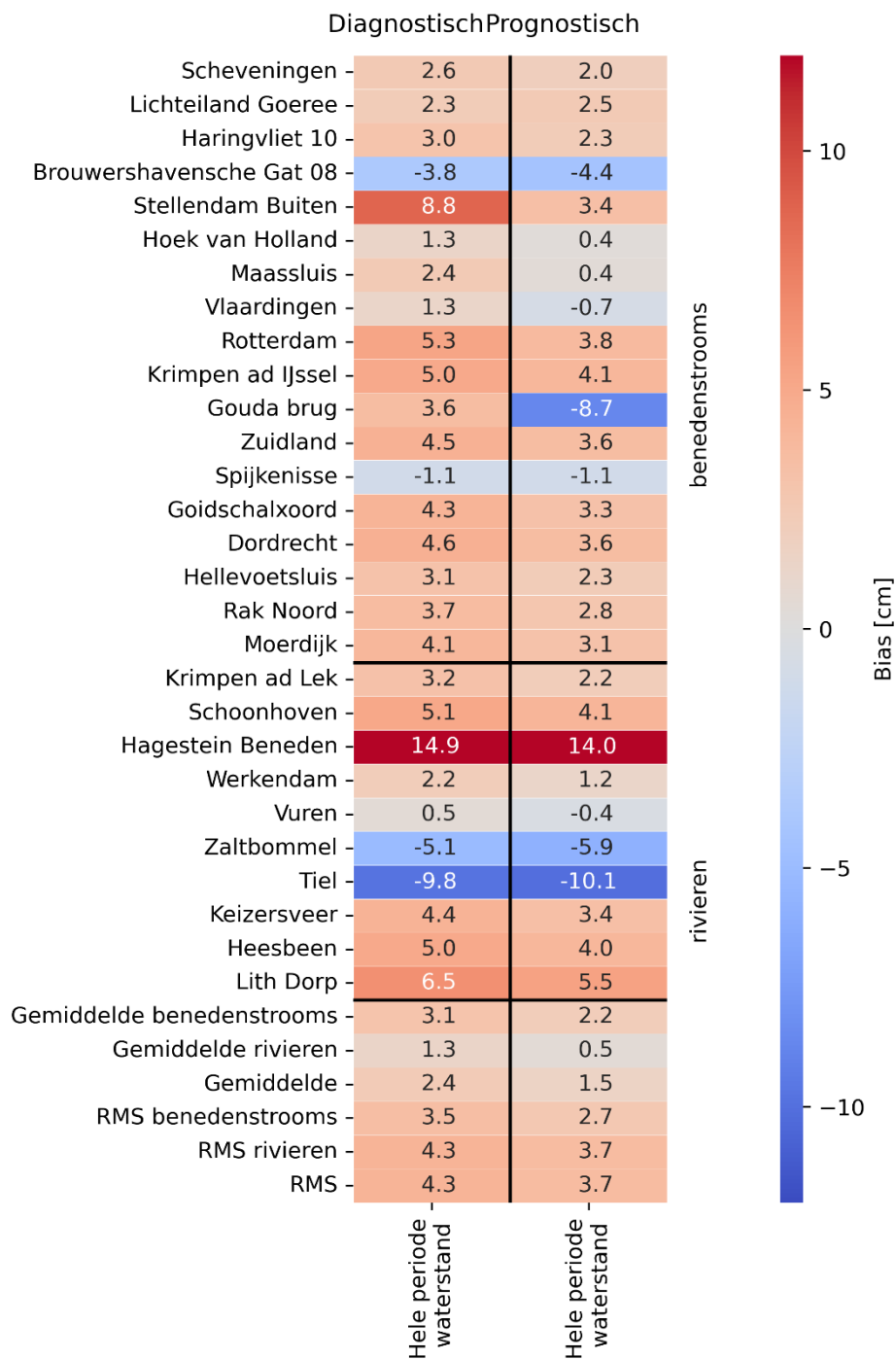
Tabel 3.1: RMSE van de waterstand, getij en opzet voor diagnostisch en prognostisch rekenen over 2018. Omdat referentieniveaus van de gemeten waterstand bij Brouwershavensche Gat 08, Stellendam Buiten en Hagestein beneden niet betrouwbaar zijn, worden deze stations niet meegenomen voor de gemiddelde statistiek onderaan de tabel. Ook station Gouda Brug wordt buiten beschouwing gelaten door de numerieke fout in saliniteit rond de lateraal aldaar.



Tabel 3.2: Standaarddeviatie van het residu van de waterstand, getij en opzet voor diagnostisch en prognostisch rekenen over 2018. Omdat referentieniveaus van de gemeten waterstand bij Brouwershavensche Gat 08, Stellendam Buiten en Hagestein beneden niet betrouwbaar zijn, worden deze stations niet meegenomen voor de gemiddelde statistiek onderaan de tabel. Ook station Gouda Brug wordt buiten beschouwing gelaten door de numerieke fout in saliniteit rond de lateraal aldaar.



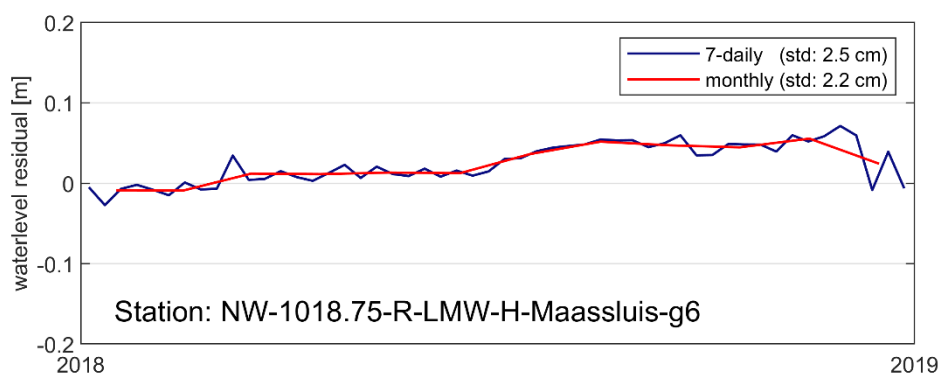
Tabel 3.3: Bias van de waterstand, getij en opzet voor diagnostisch en prognostisch rekenen over 2018. Omdat referentieniveaus van de gemeten waterstand bij Brouwershavensche Gat 08, Stellendam Buiten en Hagestein beneden niet betrouwbaar zijn, worden deze stations niet meegenomen voor de gemiddelde statistiek onderaan de tabel. Ook station Gouda Brug wordt buiten beschouwing gelaten door de numerieke fout in saliniteit rond de lateraal aldaar.



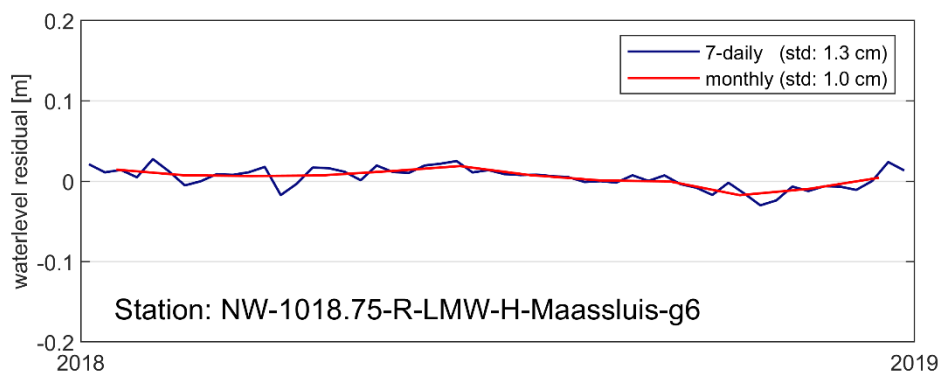
3.2.5 Impact op langzaam variërend residu van de waterstand

Deze paragraaf laat zien dat door prognostisch te rekenen, ook langzame variaties van de waterstand door veranderende saliniteit beter te modelleren zijn. In het validatierapport van RMM 2D over 2018 en 2020 werd langzaam variërende fouten in de gemodelleerde waterstanden geobserveerd (Zijlker, 2022). De grootste fouten zitten op de riviertakken van de Lek, Waal en Maas en worden waarschijnlijk veroorzaakt door fouten in de debietrandvoorwaarden.

Voor de benedenstroomse stations met wisselende saliniteit kunnen langzaam variërende fouten ook door diagnostisch rekenen worden veroorzaakt. Tijdens periodes van langdurig verhoogde saliniteit zal de waterstand in de prognostische modelrun lager zijn dan de diagnostische modelrun en vice versa. Door prognostisch rekenen kunnen daarom mogelijke langzaam variërende componenten van de waterstand beter worden gerepresenteerd. Figuur 3.21 (diagnostisch) en Figuur 3.22 (prognostisch) illustreren dit effect voor station Maassluis. In de maanden juli tot en met november is gemiddeld sprake van te hoge diagnostisch berekende waterstand. In de prognostische modelrun is geen sprake van dit effect, de berekende waterstand is zelfs iets lager dan de gemeten waterstand. De fluctuaties van het residu in de tijd nemen ook duidelijk af.



Figuur 3.21: Residu van gemodelleerde en gemeten waterstand, gemiddeld over zeven dagen en één maand in de diagnostische modelrun voor station Maassluis. Een positief residu geeft aan dat de gemodelleerde waterstand hoger is dan de gemeten waterstand en vice versa.

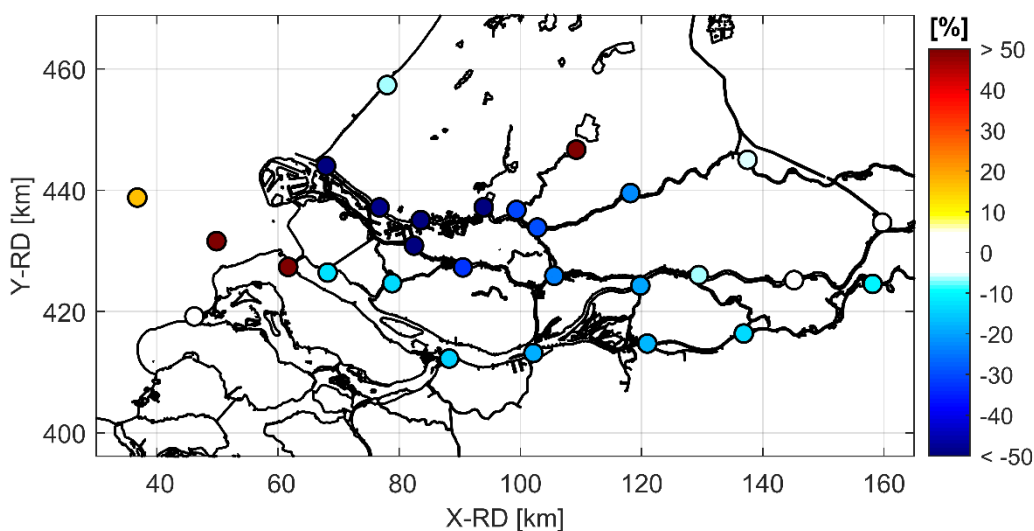


Figuur 3.22: Residu van gemodelleerde en gemeten waterstand, gemiddeld over zeven dagen en één maand in de prognostische modelrun voor station Maassluis. Een positief residu geeft aan dat de gemodelleerde waterstand hoger is dan de gemeten waterstand en vice versa.

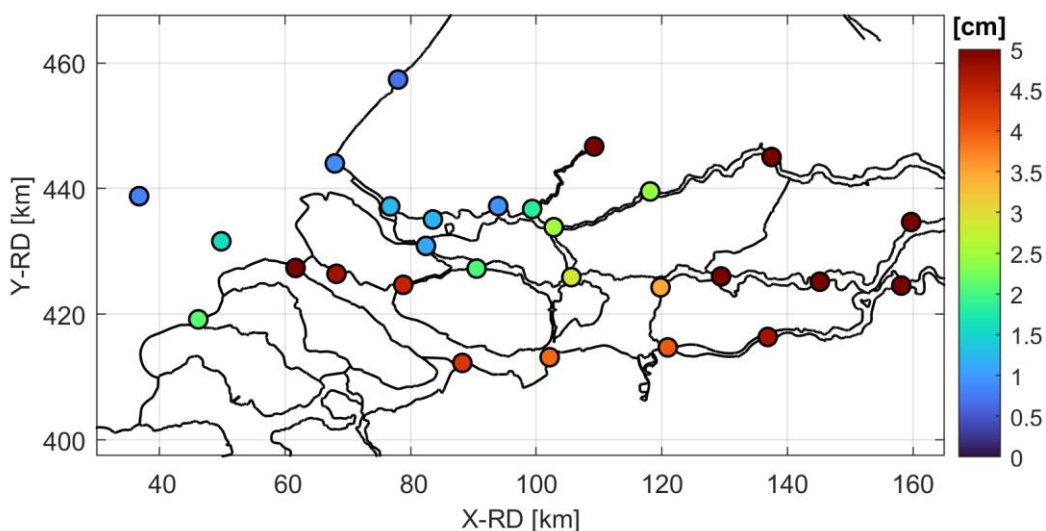
Figuur 3.23 toont de procentuele verandering van de standaarddeviatie van het 7-daags gemiddelde residu per meetlocatie. Tabel 3.4 toont ook de waarden per stations voor de diagnostische en prognostische modelrun, ook voor het maandelijks gemiddelde residu.

Er is met name sprake van verbetering in de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas. Ook bovenstrooms is sprake van enige verbetering, maar de fouten daar blijven zeer groot. Dit komt waarschijnlijk door fouten in de opgelegde debietrandvoorwaarden op de Lek, Waal en Maas (zie ook het validatierapport over 2018 en 2020 (Zijlker, 2022)). Betere benedenstroomse waterstanden hebben waarschijnlijk een klein positief effect op de waterstanden op de riviertakken. De fouten in afvoer kunnen met prognostisch rekenen echter uiteraard niet worden opgelost.

In de voordelta van het Haringvliet neemt de langzaam variërende fout ogenschijnlijk toe. De saliniteit verandert in het model sterker dan in werkelijkheid waarschijnlijk het geval is.



Figuur 3.23: Verandering (procent) van de standaarddeviatie van het 7-daags gemiddeld residu per stations. Deze standaarddeviatie geeft een maat voor de langzaam variërende fout in het model.



Figuur 3.24: Standaarddeviatie van het 7-daags gemiddeld residu per stations. Deze standaarddeviatie geeft een maat voor de langzaam variërende fout in het model.

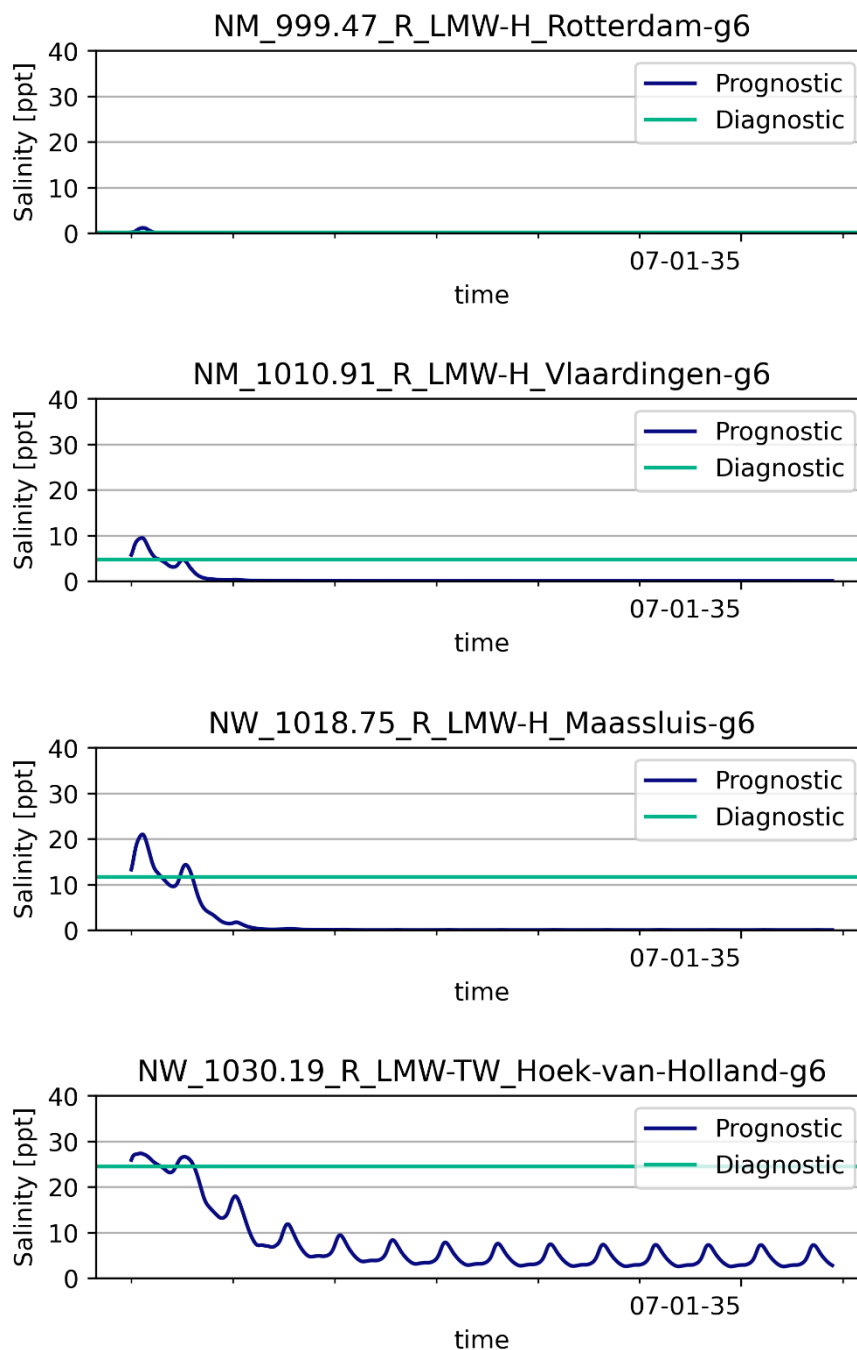
Tabel 3.4: Standaarddeviatie van het 7-daags en maandelijks gemiddelde residu van de waterstand diagnostisch en prognostisch rekenen over 2018. Omdat referentieniveaus van de gemeten waterstand bij Brouwershavensche Gat 08, Stellendam Buiten en Hagestein beneden niet betrouwbaar zijn, worden deze stations niet meegenomen voor de gemiddelde statistiek onderaan de tabel. Ook station Gouda Brug wordt buiten beschouwing gelaten door de numerieke fout in saliniteit rond de lateraal aldaar.

	Diagnostisch		Prognostisch		
	7-daags gemiddeld	1-maand gemiddeld	7-daags gemiddeld	1-maand gemiddeld	
Scheveningen	0.8	0.5	0.7	0.4	benedenstroms
Lichteiland Goeree	0.7	0.5	0.8	0.6	
Haringvliet 10	1.0	0.8	1.6	1.4	
Brouwershavensche Gat 08	2.1	1.5	2.1	1.5	
Stellendam Buiten	2.8	2.3	5.0	4.6	
Hoek van Holland	1.8	1.6	0.9	0.7	
Maassluis	2.5	2.2	1.3	1.0	
Vlaardingen	2.5	2.2	1.2	0.9	
Rotterdam	2.0	1.7	0.9	0.6	
Krimpen ad IJssel	2.6	2.4	1.8	1.6	
Gouda brug	3.0	2.5	17.6	16.2	
Zuidland	5.2	4.8	4.5	4.1	
Spijkenisse	2.5	2.2	1.1	0.8	
Goidschalxoord	3.0	2.7	2.0	1.8	
Dordrecht	3.8	3.4	2.9	2.5	
Hellevoetsluis	5.4	5.0	4.7	4.3	
Rak Noord	5.1	4.6	4.3	3.9	
Moerdijk	4.8	4.3	3.9	3.5	
Krimpen ad Lek	3.5	3.2	2.5	2.2	
Schoonhoven	3.2	2.6	2.4	1.9	
Hagestein Beneden	10.3	9.7	9.7	9.1	
Werkendam	4.3	4.0	3.4	3.1	
Vuren	11.6	11.0	10.8	10.3	
Zaltbommel	15.1	14.2	14.3	13.5	
Tiel	15.7	14.4	15.5	14.2	
Keizersveer	4.8	4.4	4.0	3.6	rivieren
Heesbeen	5.5	4.8	4.7	4.0	
Lith Dorp	6.0	5.1	5.4	4.4	
Gemiddelde benedenstroms	2.9	2.6	2.2	1.9	
Gemiddelde rivieren	7.7	7.1	7.0	6.4	
Gemiddelde	4.7	4.3	4.0	3.6	
RMS benedenstroms	3.3	3.0	2.6	2.3	
RMS rivieren	6.1	5.6	5.6	5.1	
RMS	6.1	5.6	5.6	5.1	

3.3 Testsom extreme afvoer 24.000m/s bij Lobith, geen opzet, geen wind

3.3.1 Saliniteit in de Nieuwe Maas en de Nieuwe waterweg

Figuur 3.3 toont de saliniteit bij vier stations in de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas voor de diagnostische en prognostische testsom met zeer hoge afvoer. In deze som verdwijnt zout volledig bij Rotterdam, Vlaardingen en Maassluis. Bij Hoek van Holland neemt het zoutgehalte sterk af. Slechts bij hoogwater neemt het zoutgehalte enigszins toe, maar de saliniteit blijft onder 10 ppt.

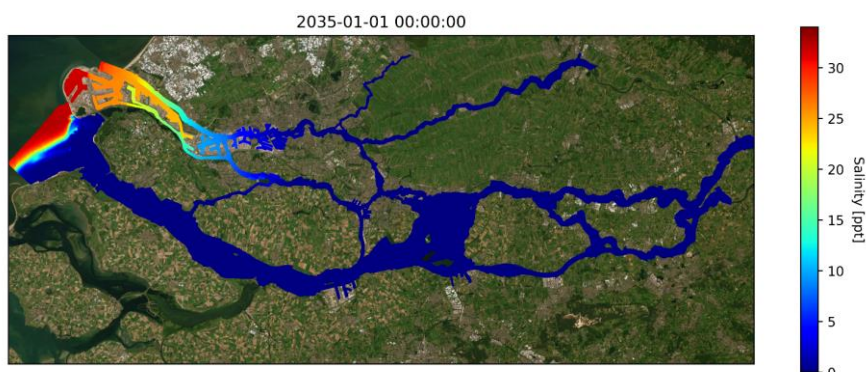


Figuur 3.25: Saliniteit in stations aan de Nieuwe Maas.

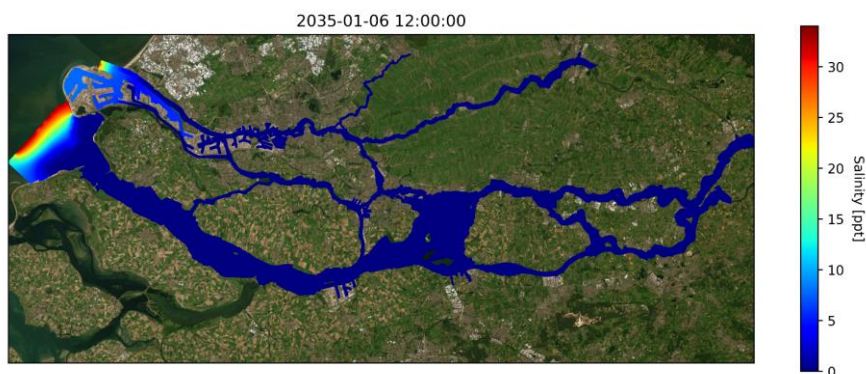
3.3.2 Prognostisch zoutveld

Figuur 3.26 en Figuur 3.27 tonen het zoutveld aan het begin en aan het einde van de testsom met zeer hoge afvoer. Figuur 3.28 toont het verschil in saliniteit tussen het prognostisch berekende en diagnostische zoutveld op hetzelfde moment. De Nieuwe Waterweg wordt volledig zoet. In de Rotterdamse havens, waar minder doorstroom is neemt het zoutgehalte ook sterk af, er blijft wel een restgehalte van circa 10 ppt. Aan de zeerland van het domein is in Figuur 3.27 een scherpe zoutgradiënt te zien. Dit wordt veroorzaakt door de locatie van de zeerland direct in de Maasmond. Dit is waarschijnlijk bepalend voor de waterstanden. De waterstand en (en in mindere mate) de saliniteit op de rand staan immers vast. Door de hoge afvoer wordt de Nieuwe Waterweg grotendeels zoet en ontstaat een sterke saliniteitsgradiënt dichtbij de rand in het model. Dit resulteert in het model in een sterke gradiënt in de waterstand.

De invloed van de gradiënt in het zoutgehalte nabij de zeerland is dat de waterstand in de Nieuwe Waterweg hoger wordt gemodelleerd dan op de zeerland. In werkelijkheid is het water op de positie van de randvoorwaarde bij deze condities naar verwachting ook veel zoeter en wordt een dergelijk verschil in waterstand, opgewekt door de gradiënt in het zoutgehalte niet gezien.



Figuur 3.26: Saliniteit in het RMM-VZM model in de testsom met hoge afvoeren aan het begin van de simulatieperiode.



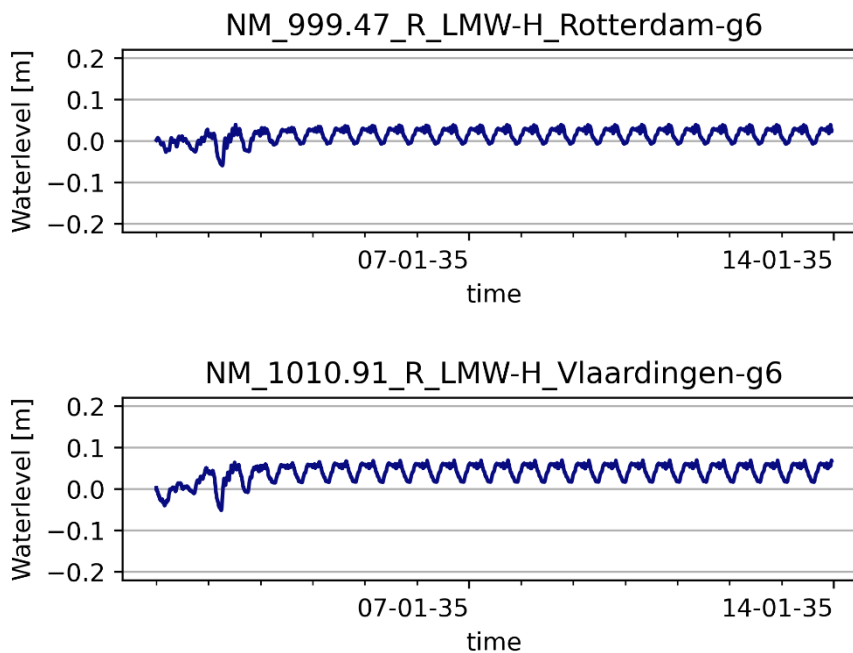
Figuur 3.27: Saliniteit in het RMM-VZM na zes dagen hoge afvoer. Bijna het hele domein is zoet geworden.

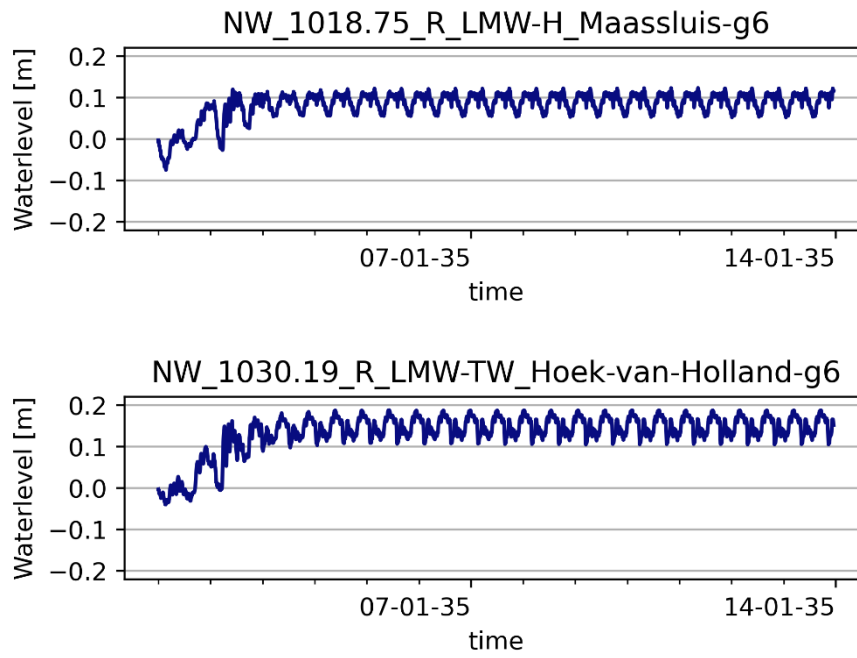


Figuur 3.28: Het verschil tussen prognostisch en diagnostisch berekende saliniteit in het RMM-VZM na zes dagen hoge afvoer.

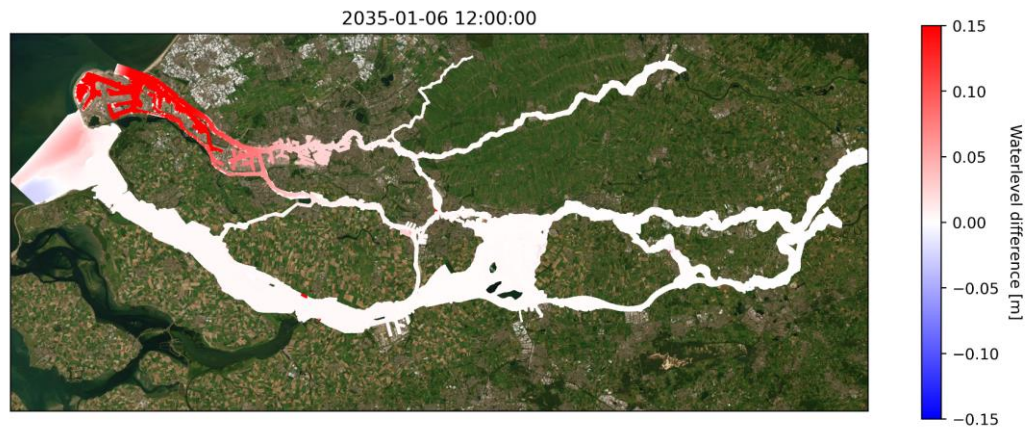
3.3.3 Effect prognostisch rekenen op waterstanden

Figuur 3.29 toon het verschil van de waterstand tussen de prognostische en diagnostische testsom voor verschillende stations. De grootste verschillen zijn zoals verwacht zichtbaar waar de saliniteit in de prognostische run het meest afwijkt van de diagnostische testsom. Het water is in de prognostische som zoeter, de bijbehorende waterstand is daarom hoger. Bij Maassluis loopt het verschil op tot meer dan 10 cm. Bij Hoek van Holland loopt het verschil op tot bijna 20 cm. Figuur 3.30 toont het waterstandsverschil tussen diagnostisch en prognostisch rekenen na zes dagen rekenen. De verschillen bevinden zich voornamelijk in de Nieuwe Waterweg, Oude Maas en Nieuwe Maas.





Figuur 3.29: Verschil in waterstand tussen de prognostische en diagnostische run.



Figuur 3.30: Waterstandsverschil tussen prognostisch en diagnostisch rekenen na zes dagen simulatie van extreme afvoer.

Tabel 3.5 toont het hoogste peil per station in de testsom met extreme afvoer voor de diagnostisch en prognostische berekening. Verschillen in piekwaterstand tussen de diagnostisch en prognostische berekening treden vooral op in de Nieuwe Waterweg, de Nieuwe Maas en Oude Maas. Hier wijkt het prognostisch berekende zoutveld af van het diagnostische zoutveld. Op de riviertakken bestaat geen verschil tussen de piekwaterstanden uit de diagnostisch en prognostische berekening.

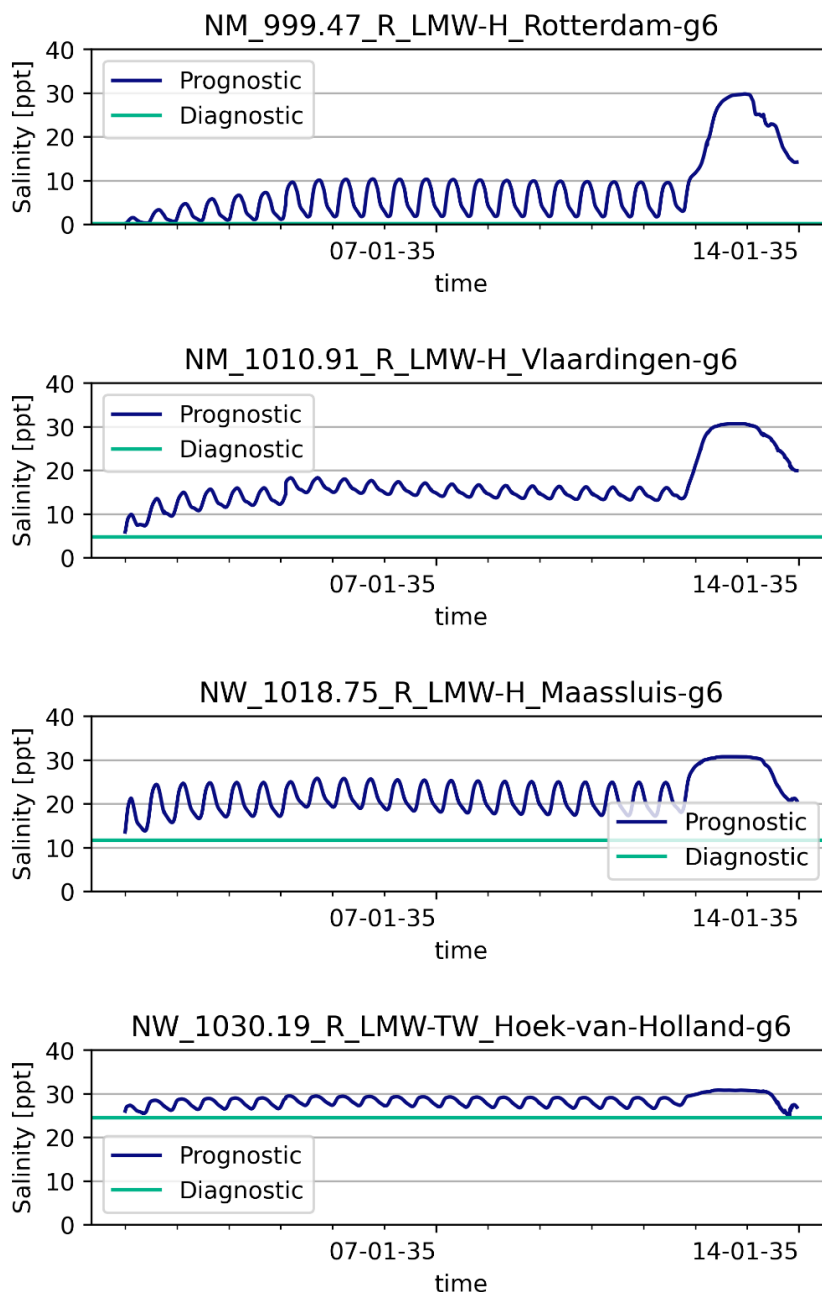
Tabel 3.5: Hoogste waterstand in testsom met extreme afvoer 24.000 m³/s en zonder stormopzet voor de diagnostisch en prognostisch berekening.

Station	Piek-waterstand diagnostisch	Piek-waterstand prognostisch	Vershil [m]
NW_1030.19_R_LMW-H_Hoek-van-Holland	1.31	1.44	0.13
NW_1018.75_R_LMW-H_Maassluis-g6	1.56	1.66	0.10
OM_1003.04_L_LMW-H_Spijkenisse	1.8	1.87	0.07
NM_1010.91_R_LMW-H_Vlaardingen-g6	1.84	1.89	0.06
NM_999.47_R_LMW-H_Rotterdam-g6	2.19	2.22	0.03
OM_992.53_L_LMW-H_Goidschaloord-g6	2.14	2.16	0.02
HY_17.99_R_LMW-H_Krimpen-ad-IJssel-g6	2.59	2.61	0.02
OM_976.25_L_LMW-H_Dordrecht-g6	2.88	2.89	0.01
LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-aan-de-Lek-g6	2.82	2.84	0.01
HD_984.55_L_LMW-H_Moerdijk-g6	2.59	2.59	0.01
HD_998.15_L_LMW-H_Rak-noord	2.27	2.28	0.01
SP_1007.13_R_LMW-H_Zuidland-g6	1.96	1.97	0.01
HY_0.86_R_LMW-H_Gouda-brug-g6	2.45	2.46	0
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden	8.5	8.51	0
NZ_0.00_LMW-H_Haringvliet-10	1.29	1.29	0
MA_230.61_L_LMW-H_Heesbeen	6.99	6.99	0
HV_1024.31_R_Hellevoetsluis-g6	1.8	1.8	0
MA_247.60_R_LMW-H_Keizersveer	4.38	4.38	0
MA_202.37_L_LMW-H_Lith-dorp	9.71	9.71	0
LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven	5.63	5.64	0
NZ_0.00_LMW-H_Stellendam-buiten	1.64	1.64	0
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal-g6	13.47	13.47	0
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren	7.34	7.34	0
SG_0.90_L_LMW-H_Werkendam-buiten-g6	4.37	4.37	0
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel	10.59	10.59	0

3.4 Testsom extreme stormopzet (piekwaterstand 8 meter) en lage afvoer van 600 m/s.

3.4.1 Saliniteit in de Nieuwe Maas

Figuur 3.31 toont de saliniteit voor vier stations in de Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg in de testsom met zeer lage afvoer en extreme stormopzet met een piekwaterstand van 8 meter. Er wordt gerekend met open keringen. De hoge stormopzet wordt pas op 12 januari 2035 in de testsom relevant. Hiervoor is het effect van de zeer lage afvoer zichtbaar. Bij Hoek van Holland is het water bijna even zout als het zeewater. Ook bij Maassluis, Vlaardingen en Rotterdam is het water in de prognostische som veel zouter dan tijdens gemiddelde afvoer. Bij Rotterdam is een zeer sterke invloed van het getij op de saliniteit zichtbaar. Bij de hoge stormopzet wordt de saliniteit in alle stations bijna 31 ppt, de saliniteit die als benedenstroomse randvoorwaarde is opgelegd.

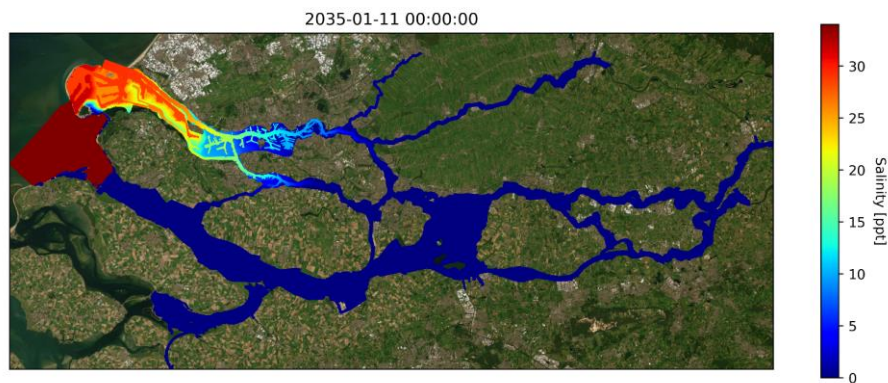


Figuur 3.31: Saliniteit in stations aan de Nieuwe Maas.

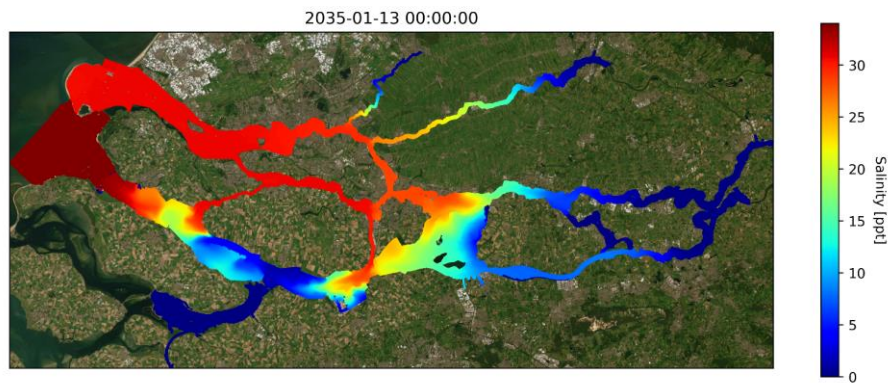
3.4.2 Prognostisch zoutveld

Figuur 3.32 en Figuur 3.33 tonen het zoutveld vlak voor en na de hoge stormopzet. Ten opzichte van het diagnostische zoutveld (Figuur 2.2) is het zoutgehalte voor de storm al hoger in het benedenstroomse domein. Het zout reikt tot delen van de Oude en Nieuwe Maas. Na de storm is het RMM-domein met uitzondering van de riviertakken en de Biesbosch zeer zout geworden, bijna overal zo zout als de benedenstroomse randvoorwaarden. Ook het Haringvliet is gedeeltelijk zout geworden, bij de stormopzet van 8 meter stroomt er zout water over de deuren van de Haringvlietssluisen. Ook komt er via het Spui zout binnen in het Haringvliet en via de Dordtsche Kil in het Hollands Diep. Met name in het Haringvliet is een zeer sterke gradiënt van het zoutveld te zien. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het dispersieveld, met zeer kleine waarden in het Haringvliet. Dit dispersieveld is waarschijnlijk niet geschikt voor de zeer extreme condities in deze testsom. Het zoutveld op het Haringvliet is naar verwachting überhaupt te complex om in 2D nauwkeurig te kunnen berekenen.

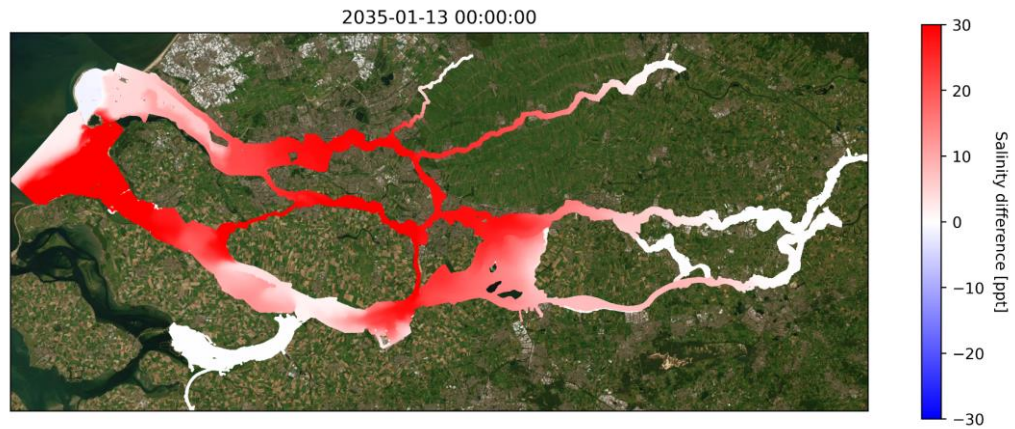
Figuur 3.34 toont het verschil tussen het diagnostische en prognostische zoutveld na de hoge stormopzet. De verzilting is ver op de riviertakken zichtbaar.



Figuur 3.32: Saliniteit in het RMM-VZM model op 11 januari 2035 00:00 lokale tijd in de testsom met zeer lage afvoer. De hoge stormopzet is nog niet geweest.



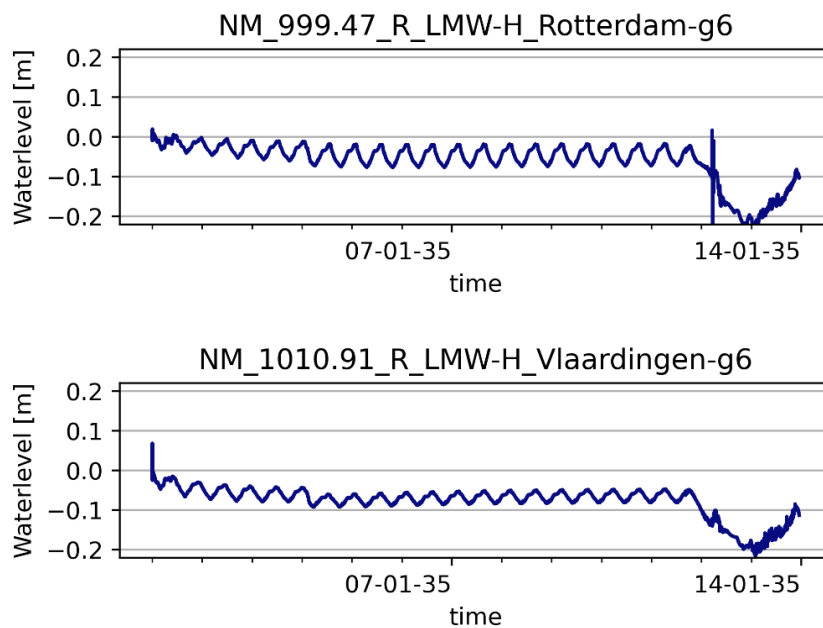
Figuur 3.33: Saliniteit in het RMM-VZM model op 13 januari 2035 om 00:00 lokale tijd tijdens de hoge stormopzet.

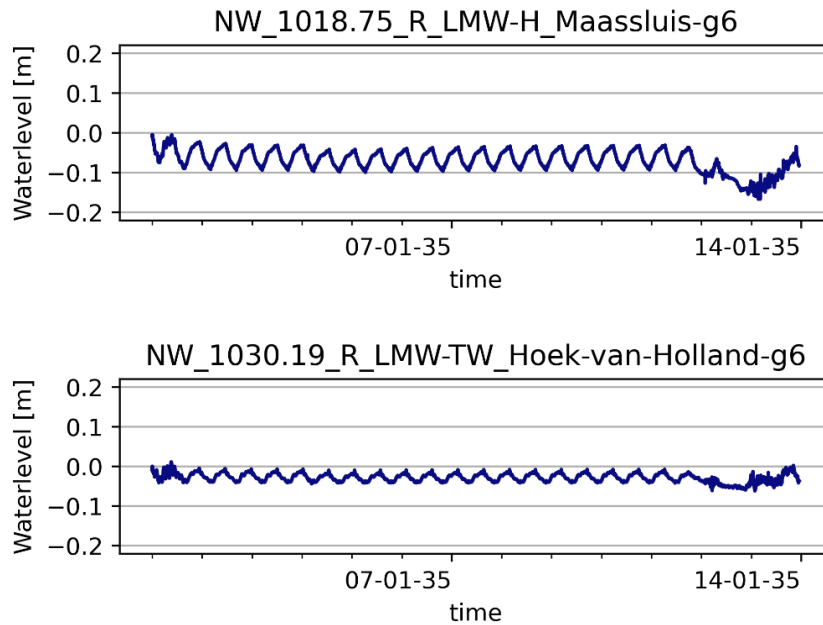


Figuur 3.34: Het verschil tussen de prognostische en diagnostische saliniteit in het RMM-VZM model op 13 januari 2035 om 00:00 lokale tijd tijdens de hoge stormopzet.

3.4.3 Effect prognostisch rekenen op waterstanden

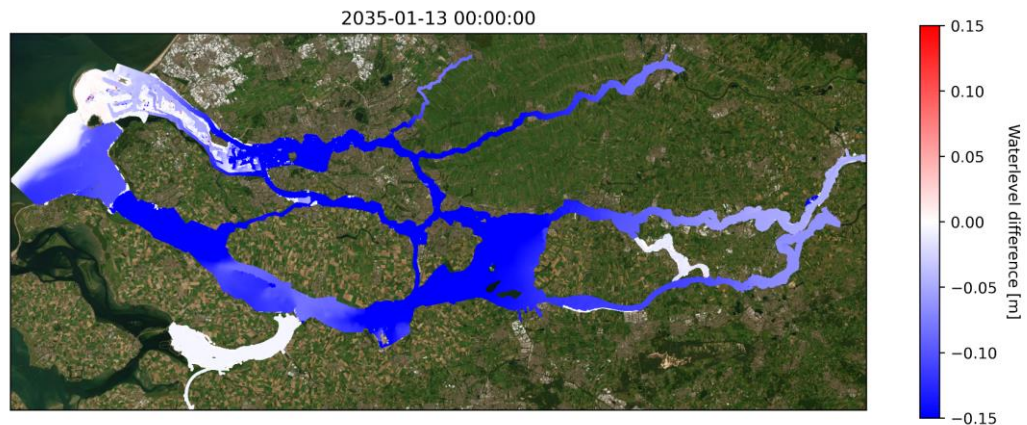
Figuur 3.29 toon het verschil tussen de waterstand in het prognostische en het diagnostische model voor de testsom met zeer lage afvoer en een hoge stormopzet aan het einde van de run. In de prognostische run is het water zouter, de bijbehorende waterstand is lager. Bij vloed is het prognostische model zouter en de waterstand lager in de prognostische run. Bij eb geldt het omgekeerde. De amplitude van het getij neemt daarom af in de prognostische run. Er ontstaat geen faseverschil. Bij Maassluis en Vlaardingen is de waterstand ca 5-10 cm lager dan in de diagnostische run. In de tijdreeks van het verschil van de waterstand bij Rotterdam is op 12 januari een plotselinge piek te zien. Deze sprong is alleen zichtbaar in de prognostische modelrun en duidt op een instabiliteit. Tijdens de extreme stormopzet zijn de berekende waterstanden in het prognostisch model 5 cm lager in Hoek van Holland. Dit verschil loopt op tot ca. 20 cm in Vlaardingen en Rotterdam.





Figuur 3.35: Verschil in waterstand tussen de prognostische en diagnostische run over december 2013. Bij toegenomen saliniteit in het prognostische model is de gemodelleerde waterstand lager.

Figuur 3.36 toont het waterstandsverschil tussen de prognostische en diagnostische modelberekening in de som met extreme stormopzet op het tijdstip dat de storm net voorbij is. Aan de figuur valt duidelijk te zien dat de verzilting door een heel groot deel van het domein een duidelijk waterstandeffect heeft gehad.



Figuur 3.36: Waterstandsverschil tussen de prognostische en diagnostische modelberekening op 2035-01-13 om 00:00 lokale tijd in de testsom met extreme stormopzet.

Tabel 3.6 toon het hoogste peil per station in de prognostische en diagnostische berekening in de testsom met extreme stormopzet. Het hoogste peil wordt in de prognostische berekening tot 20 cm lager berekend, het grootste verschil treedt op plaatsen waar het diagnostische zoutveld volledig zoet is en de prognostische berekening sterke verzilting laat zien, zoals Hellevoetsluis.

Tabel 3.6: Hoogste waterstand in meter in testsom met extreme stormopzet en lage afvoer voor de diagnostisch en prognostisch berekening.

Station	Piek-waterstand diagnostisch	Piek-waterstand prognostisch	Vershil
HV_1024.31_R_Hellevoetsluis-g6	4.45	4.26	-0.20
SP_1007.13_R_LMW-H_Zuidland-g6	4.38	4.17	-0.20
HD_984.55_L_LMW-H_Moerdijk-g6	4.93	4.74	-0.19
OM_992.53_L_LMW-H_Goidschaloord-g6	6.19	6.02	-0.17
HY_17.99_R_LMW-H_Krimpen-ad-IJssel-g6	6.97	6.80	-0.17
NM_999.47_R_LMW-H_Rotterdam-g6	7.45	7.28	-0.17
LE_988.7_R_LMW-H_Krimpen-aan-de-Lek-g6	6.97	6.81	-0.16
NZ_0.00_LMW-H_Stellendam-buiten	8.77	8.62	-0.15
NM_1010.91_R_LMW-H_Vlaardingen-g6	7.48	7.32	-0.15
SG_0.90_L_LMW-H_Werkendam-buiten-g6	5.45	5.30	-0.15
OM_976.25_L_LMW-H_Dordrecht-g6	5.49	5.35	-0.14
LE_971.6_R_LMW-H_Schoonhoven	7.80	7.67	-0.13
MA_247.60_R_LMW-H_Keizersveer	5.58	5.46	-0.12
MA_230.61_L_LMW-H_Heesbeen	6.15	6.04	-0.11
NW_1018.75_R_LMW-H_Maassluis-g6	7.20	7.09	-0.11
HD_998.15_L_LMW-H_Rak-noord	4.71	4.60	-0.11
OM_1003.04_L_LMW-H_Spijkenisse	6.82	6.71	-0.11
HY_0.86_R_LMW-H_Gouda-brug-g6	6.64	6.56	-0.08
WL_951.8_R_LMW-H_Vuren	5.73	5.65	-0.08
MA_202.37_L_LMW-H_Lith-dorp	6.78	6.72	-0.06
NW_1030.19_R_LMW-H_Hoek-van-Holland	8.05	8.00	-0.05
WL_934.8_L_LMW-H_Zaltbommel	6.66	6.62	-0.04
LE_947.1_R_LMW-H_Hagestein-beneden	8.92	8.89	-0.03
WL_913.3_R_LMW-H_Tiel-Waal-g6	7.33	7.30	-0.03
NZ_0.00_LMW-H_Haringvliet-10	7.79	7.79	0.00

3.5 Impact prognostisch rekenen op de rekentijd van DFLOW-FM

Prognostisch rekenen heeft impact op de rekentijd van DFLOW-FM. Voor de verschillende testsommen is deze impact onderzocht. Het resultaat staat in onderstaande tabel. De rekentijd blijkt door prognostisch rekenen met een factor 2.4 toe te nemen tijdens de kalibratieperiode december 2013. Bij de testsommen met de afgeknipte zeerand is de factor respectievelijk 2.1 en 2.3. Voor de modelrun over de validatieperiode 2018 kan geen vergelijking gemaakt worden omdat de diagnostische en prognostische modelruns op verschillende rekenclusters werden uitgevoerd.

	Rekentijd per dag simulatie [minuten]		
	Kalibratie december 2013	Testsom hoge afvoer	Testsom lage afvoer en hoge stormopzet
Diagnostisch	18.7	69.5	28.4
Prognostisch	41.9	144.9	66.0
Factor	2.4	2.1	2.3

3.6 Conclusies

Wat is het effect van prognostisch rekenen onder kalibratie omstandigheden (december 2013)?

- De impact op de kwaliteit van de waterstand is beperkt.
 - Onder kalibratie omstandigheden heeft prognostisch rekenen voor stations buiten de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas weinig effect op de RMSE van de waterstanden. De RMSE van de waterstand verandert daar minder dan 0.5 cm ten opzichte van diagnostisch rekenen.
 - Bij stations Spijkenisse en Hartelbrug verbetert de RMSE van de waterstand maar bij station Maassluis verslechtert dit. Door prognostisch rekenen wordt de temporele variatie van de waterstand iets slechter gerepresenteerd. De standaarddeviatie van de waterstand neemt in kleine mate toe in de Nieuwe Waterweg (overal minder dan 1 cm).
- Het diagnostische zoutveld past goed bij het gemiddelde prognostisch zoutveld in deze periode, met uitzondering van de voordelta van het Haringvliet. Er zijn wel momenten dat het prognostisch zoutveld sterk afwijkt van het diagnostische zoutveld. Tijdens de Sinterklaasstorm wordt bij prognostisch rekenen wel sterke zoutindringing gezien. De piekwaterstand tijdens deze storm wordt in het prognostische model ca 13 cm lager berekend bij Maassluis. Dit leidt tot verdere onderschatting van de piek van de waterstand.

Wat is het effect van prognostisch rekenen onder validatie-omstandigheden in het jaar 2018?

- In 2018 is duidelijke verzilting zichtbaar in de droge maanden juli tot en met november. In het diagnostisch model, waarin deze verzilting niet meegenomen wordt, zorgt dit ervoor dat de gemiddelde waterstand in die periode overschat wordt.
- Onder validatie-omstandigheden levert prognostisch rekenen een duidelijke verbetering op van de modelkwaliteit:
 - De RMSE van waterstand verbetert in bijna alle stations, met de grootste verbetering in de Maasmonding, RMSE bij Maassluis verandert van 5.8 cm naar 4.4 cm.
 - Het dagelijks getijdesignaal verbetert in de Maasmonding (RMSE bij Maassluis 3.8 naar 2.4 cm). Dit komt hoofdzakelijk door een accuratere en kleinere amplitude van het M2-getij in de Maasmonding.
 - De langzaam variërende fout in waterstanden, veroorzaakt door zoutindringing in de zomermaanden, wordt met prognostisch rekenen sterk verkleind in de Nieuwe Waterweg en Oude Maas. (Standaarddeviatie van 7-daags gemiddeld residu van 2.5 cm naar 1.3 cm bij Maassluis).

Geven de modelresultaten aanleiding om opnieuw te kalibreren en te valideren?

- Gezien het feit dat de resultaten over het jaar 2018 prognostisch beter zijn dan diagnostisch, lijkt overstap op prognostisch rekenen als zodanig niet te vragen om nieuwe kalibratie.
- Het feit dat de kwaliteit van het getij over 2018 verbeterde door prognostisch te gaan rekenen terwijl dat in december 2013 niet het geval was, duidt er op dat de kalibratieperiode december 2013 mogelijk niet helemaal representatief is. Als ervoor wordt gekozen om opnieuw te kalibreren, kan er gekozen worden voor een langere periode met ook lagere rivierafvoeren.

Wat is het effect van prognostisch rekenen onder extreme condities?

- Onder extreme condities heeft prognostisch rekenen significante invloed op de waterstanden in het RMM model.
 - Bij zeer hoge afvoeren wordt de waterstand bij Hoek van Holland tot 15 cm hoger gemodelleerd dan in het diagnostisch model.

- Bij sterke zoutindringing door hoge opzet gecombineerd met lage afvoeren wordt de waterstand in de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Oude Maas tot 20 cm lager gemodelleerd dan in het diagnostische model.
- Het is niet te zeggen of de prognostische modelresultaten onder de extreme condities dichter bij de waarheid liggen dan de diagnostische modelresultaten. Twee belangrijke problemen met prognostisch rekenen in de testsommen zijn:
 - Het kleine zeedomein zorgt voor een zeer scherpe gradiënt bij condities met hoge afvoer. Met het kleine zeedomein wordt de waterstand dicht bij Hoek van Holland vastgezet met de saliniteit van het zeewater. In werkelijkheid zou het water daar veel zoeter zijn onder condities met extreme afvoer. Er zou geen sterke gradiënt in saliniteit aanwezig zijn met een dito effect op de waterstand.
 - Het dispersieveld is niet geschikt voor deze extreme omstandigheden. In de som met een zeer hoge stormopzet stroomt er bijvoorbeeld veel zout water het Haringvliet in, via het Spui en over de Haringvlietsluizen. Het afgeleide dispersieveld heeft hier zeer lage waardes die onder deze omstandigheden waarschijnlijk niet gepast zijn.

Wat is het effect op de rekentijd en stabiliteit van het model?

- Prognostisch rekenen verhoogt de rekentijd van DFLOW-FM met een factor 2.4 onder kalibratieomstandigheden. In de testsommen met een afgeknipt zeedomein was deze factor 2.1 en 2.3.
- In de testsom met zeer hoge opzet is in de prognostische modelrun een plotselinge variatie in de waterstand zichtbaar die wijst op een instabiliteit.
- In de validatieperiode 2018 zijn twee technische problemen te zien die te maken hebben met de implementatie van prognostisch rekenen in DFLOW-FM. De eerste issue vraagt om een aanpassing van de modelopzet, de tweede issue wordt onderzocht met de software afdeling.
 - De gehanteerde implementatie van lateralen heeft onverwacht effect op de saliniteit rond deze lateraal. Dit probleem wordt bij Gouda gezien. Bij gebruik van *discharge laterals* wordt gerekend met een saliniteit van 0 ppt bij in- en uitstroom. Gebruik van *source-sinks*, of *discharge-boundaries* zou wel een oplossing bieden.
 - Er zijn op verschillende momenten in de tijd sprongen te zien in saliniteit op verschillende plaatsen in het model. Deze sprongen zijn simultaan te zien door het hele benedenstroomse deel van het domein. De grootste sprong van saliniteit is bij Spijkenisse, deze sprong van saliniteit is ca. 30 ppt. Ondanks deze sprongen verbetert de modelkwaliteit bij Spijkenisse in termen van totale waterstand, getij en opzet.

Aanbevelingen

Gezien de resultaten van prognostisch rekenen doen we de volgende aanbevelingen:

- Voordat prognostisch rekenen wordt toegepast is het noodzakelijk om de 2 issues met betrekking tot zouttransport op te lossen (lateralen en discontinuïteiten in het zoutveld).
- Er kan worden onderzocht of het effect van prognostisch rekenen ook op een andere manier in het model verwerkt kunnen worden. Het model wordt dan nog wel diagnostisch doorgerekend. Er kunnen bijvoorbeeld verschillende gemiddelde zoutvelden worden afgeleid voor specifieke afvoercondities. Bij bijvoorbeeld testsommen met extreem hoge afvoer, kan een constant zoutveld worden opgelegd dat hierbij past (hier is bijna het hele afgesneden rekendomein zoet).

4 Literatuur

Van der Kaaij, T. (2019a): Diagnostisch versus prognostisch rekenen zesde-generatie RMM. Deltares-rapport 11203714-007-ZWS-0009, september 2019.

Veenstra, J, Van der Kaaij, T., Visser, T., Becker, A., Van der Wijk, R. (2022). Ontwikkeling zesde-generatie Rijn-Maasmonding-model; Modelbouw, kalibratie en validatie 2D model. Deltares rapport 11208053-004-ZWS-0003, maart 2022.

Fujisaki, A (2018): Aanpassing, herkalibratie en verificatie SOBEK 3 model van de Rijn-Maasmonding. Deltares rapport 11202220-006-ZWS-0012, december 2018

Zijlker, T., Veenstra, J., Van der Wijk, R. (2022) Aanvullende validatie RMM 2D, Validatieperiode 2018 en 2020. Deltares rapport 11208053-004-ZWS-0020, december 2018

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

Deltares

www.deltares.nl