

## D-HYDRO deelmodel IJsselmeer

modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D



## **D-HYDRO deelmodel IJsselmeer**

modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D

### **Auteur(s)**

Menno Genseberger

Asako Fujisaki

Carlijn Eijsberg-Bak

## D-HYDRO deelmodel IJsselmeer

modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Martin Scholten en Yann Friocourt
<b>Referenties</b>	-
<b>Trefwoorden</b>	IJsselmeer, IJssel Vecht Delta (IJVD), D-HYDRO, D-Flow FM, ondiep water

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.3
<b>Datum</b>	06-10-2020
<b>Projectnummer</b>	11205258-008
<b>Document ID</b>	11205258-008-ZWS-0005
<b>Pagina's</b>	129
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Menno Genseberger Asako Fujisaki Carlijn Eijsberg-Bak	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.2	Menno Genseberger Asako Fujisaki Carlijn Eijsberg-Bak	Migena Zagonjoli Arnout Bijlsma	Renée Talens	
1.3	Menno Genseberger Asako Fujisaki Carlijn Eijsberg-Bak	Arnout Bijlsma	Gerard Blom	

# Samenvatting

Dit rapport beschrijft een eerste versie van een D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer. Met deze versie kan de waterbeweging in 2DH (dieptegemiddeld) en in 3D (inclusief het zouttransport) gesimuleerd worden. Zowel de modelbouw als de eerste modelresultaten voor waterstanden en zoutconcentraties worden hier gerapporteerd.

Het deelmodel moet onderdeel worden van de nieuwe zesde-generatie modelschematisatie IJVD (IJsselmeer, IJssel-Vechtdelta & Overijsselse Vecht) voor Rijkswaterstaat (RWS). Alle zesde-generatie modelschematisaties voor de Nederlandse Rijkswateren zijn gebaseerd op het nieuwe simulatiesoftwarepakket D-HYDRO (ook wel Delft3D FM genoemd). Kern van D-HYDRO is de D-Flow Flexible Mesh module (D-Flow FM) waarmee eendimensionale (1D, netwerk), tweedimensionale (2DH, dieptegemiddeld) en driedimensionale (3D) hydrodynamische simulaties gemaakt kunnen worden op ongestructureerde roosters. Tijdens de ontwikkeling van de zesde-generatie D-HYDRO modelschematisaties wordt zoveel mogelijk rekening gehouden met de verschillende voor Rijkswaterstaat relevante toepassingen en primaire processen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de door RWS opgestelde Programma van Eisen (PvE), de landelijk afgestemde generieke technische en functionele specificaties voor de zesde-generatie watermodellen 2D en 3D en is gebruik gemaakt van Baseline-NL. De werkzaamheden voor de ontwikkeling van alle zesde-generatie modelschematisaties van heel Nederland vinden plaats in de periode 2017-2021.

Het hier gerapporteerde D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer betreft een eerste versie. Voor toepassingen in 3D en/of met transport (waaronder zout) zal dit model eerst verder verbeterd moeten worden. Voor toepassingen met waterstanden in 2DH (o.a. BOI - Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium) is een uitbreiding van het gebied gewenst en wordt een meer uitgebreide validatie aanbevolen. Voor operationele hoogwatervoorspelling kan met resultaten van dit rapport al wel een indruk verkregen worden van de te verwachten rekestijden van het deelmodel. Later zal het deelmodel voor het IJsselmeer opgenomen moeten worden in de zesde-generatie D-HYDRO modelschematisatie van de IJssel Vecht Delta (IJVD).

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doel	8
1.3	Gebuchte programmatuur en hardware	8
1.4	Organisatie en bijdragen	9
1.5	Leeswijzer	9
1.6	Terminologie	9
<b>2</b>	<b>Aanpak</b>	<b>10</b>
2.1	Algemeen	10
2.2	Modelbouw	10
2.3	Methodiek voor bepalen modelperformance waterstand	10
2.4	Methodiek voor bepalen modelperformance zoutverspreiding	11
2.5	Aanvullende casus lokale zoutverspreiding	11
<b>3</b>	<b>Gebiedsbeschrijving</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Modelbouw</b>	<b>15</b>
4.1	Inleiding	15
4.2	Rekenrooster	15
4.2.1	Eerste opzet voor hoogwaterveiligheid	16
4.2.2	Aanpassingen voor zoutverspreiding	20
4.2.3	Aantal roosterpunten	27
4.2.4	Inbedding in IJVD	27
4.2.5	Aansluiting bij Waddenzee	28
4.3	Bodemruwheid	28
4.4	Waterstanden in 2DH	28
4.4.1	Lateralen en kunstwerken	30
4.4.2	Wind	36
4.4.3	Initiële condities	36
4.5	Zoutverspreiding in 3D	36
4.5.1	Lateralen en kunstwerken	36
4.5.2	Wind	45
4.5.3	Temperatuur	45
4.5.4	Initiële condities	45
4.6	Aanvullende casus lokale zoutverspreiding in 3D	47
4.6.1	Beschrijving aanvullende casus	47
4.6.2	Analyse en karakterisering condities	47
4.6.3	Aanpak	48
4.6.3.1	Simulatieperiode	48
4.6.3.2	Randvoorwaarden	48
<b>5</b>	<b>Modelresultaten, tijdstap analyse en rekestijden</b>	<b>51</b>
5.1	Waterstanden in 2DH	51
5.1.1	Modelperformance	51
5.1.2	Tijdstap analyse	51
5.1.3	Rekestijden en parallelisatie	52

5.2	Zoutverspreiding in 3D	56
5.2.1	Modelperformance m.b.t. reproductie waterbalans door model en software	56
5.2.2	Ruimtelijke verspreiding chloride	56
5.2.2.1	Modelresultaten gehele gebied	56
5.2.2.2	Modelresultaten noorden	56
5.2.2.3	Modelresultaten noordoosten	56
5.2.3	Variatie van chloride in de tijd	57
5.2.4	Duiding modelresultaten en bruikbaarheid deelmodel voor zoutverspreiding	57
5.3	Aanvullende casus lokale zoutverspreiding in 3D	58
5.3.1	Waterstand	58
5.3.2	Stroomsnelheden	59
5.3.3	Ruimtelijke verspreiding chloride	59
5.3.4	Variatie van chloride in de tijd	60
5.3.5	Discussie	62
5.3.6	Conclusies en aanbevelingen	64
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>65</b>
6.1	Conclusies	65
6.2	Aanbevelingen	65
6.2.1	Algemeen	65
6.2.2	Specifiek	66
6.2.2.1	Geometrische gegevens	66
6.2.2.2	Rekenrooster	66
6.2.2.3	Modelverbeteringen	67
6.2.2.4	Modelbeoordeling en uitbreiden gebied	67
<b>7</b>	<b>Referenties/Literatuur</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Lijst met gebruikte model instellingen D-Flow FM</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>Definities modelbeoordeling</b>	<b>73</b>
B.1	Achtergrond	73
B.2	Definities	73
B.2.1	Kalibratie	73
B.2.2	Validatie	73
B.2.3	Verificatie	73
B.3	Goodness-of-fit criteria	74
B.3.1	Bias	74
B.3.2	Standaardafwijking	74
B.3.3	Root Mean Square Error ( <i>RMSE</i> )	74
B.3.4	Relatieve bias	75
B.3.5	Variatiecoëfficiënt	75
B.3.6	Verschil in waarden rond extremen	75
B.3.7	Verschil in tijdstip van extremen	75
B.3.8	Overschrijdingsduur	75
B.3.9	Gemiddelde over stations	75
B.4	Middelingsduur variabelen	76
B.5	Nauwkeurigheidscriterium	76
<b>C</b>	<b>Resultaten waterstanden 2DH</b>	<b>77</b>
<b>D</b>	<b>Resultaten tijdstap analyse waterstanden 2DH</b>	<b>86</b>
<b>E</b>	<b>Tabellen modelbeoordeling waterstanden 2DH</b>	<b>100</b>

<b>F</b>	<b>MATLAB scripts randvoorwaarden 3D</b>	<b>103</b>
F.1	MATLAB script make_balance.m	103
F.2	MATLAB script different_levels.m	107
F.3	MATLAB script read_timeseries.m	108
F.4	MATLAB script read_waterlevel.m	108
<b>G</b>	<b>Resultaten zoutverspreiding 3D</b>	<b>109</b>
G.1	Tijdseries waterstand	109
G.2	Ruimtelijke figuren gehele gebied	111
G.3	Ruimtelijke figuren noordoosten	118
G.4	Tijdseries chloride	124

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In 2017 is begonnen met het beter in samenhang meten, monitoren en modelleren van zoutverspreiding in het IJsselmeer [2]<sup>1</sup>. Door de verzilting van het oppervlaktewater in het IJsselmeer tijdens de droogteperiode van 2018 is dit proces versneld. Daarom is in 2019 een eerste versie van een 3D D-Flow FM deelmodel voor zoutverspreiding in het IJsselmeer gebouwd. Hiervoor is een eerste opzet van een rekenrooster voor toepassing binnen hoogwaterveiligheid aangepast voor zoutverspreiding.

Het voorliggende rapport beschrijft de bouw en een eerste modelbeoordeling op waterstanden (2DH) en op zoutverspreiding (3D) van de eerste versie van dit D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel. Dit vindt plaats binnen de ontwikkeling van de nieuwe zesde-generatie modelschematisaties voor RWS op basis van D-HYDRO. Deze eerste versie zal verder verbeterd moeten worden. Daarna kan het als deelmodel opgenomen worden in de zesde-generatie D-HYDRO modelschematisatie van de IJssel Vecht Delta (IJVD).

## 1.2 Doel

Dit rapport is bedoeld om de status weer te geven van de eerste versie van het D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer. In de modelontwikkeling is gekozen voor een iteratieve aanpak: gerapporteerd is het resultaat van een eerste iteratieslag (gegeven beschikbare meetgegevens, kennis, software en budget). Het rapport dient om voor RWS-toepassingen na te kunnen gaan waar het model al wel bruikbaar voor is en waarvoor verdere ontwikkelingen/verbeteringen nodig zijn in een volgende iteratieslag. Voor toepassing in operationele hoogwatervoorspelling binnen RWsOS Meren zijn daarvoor ook rekentijden en het effect van parallelisatie gerapporteerd.

## 1.3 Gebruikte programmatuur en hardware

- ArcGIS versie 10.1 + SP1 for Desktop (Build 3143)
- Baseline versie 6.1.1.2048
- Bas2FM versie 1.3.4
- voor user interface D-HYDRO / Delft3D FM release 2020.01 (Windows 10 Enterprise)
- voor het draaien van het model is gebruik gemaakt van
  - D-Flow FM uit de D-HYDRO /Delft3D FM release 2020.03 aangestuurd met DIMR versie 2.10.11 (resultaten gerapporteerd in secties 5.1.1, 5.1.2 en 5.1.3) op het Deltares H6 linux-cluster (Linux CentOS-6.5, nodes met elk 4 cores in 1 Intel Xeon E3-1276 v3 processor, 32 GB geheugen per node, 3.60 GHz per core, node aangeduid met **E3-1276 v3 node**)
  - en
  - D-Flow FM versie 64757 (resultaten gerapporteerd in sectie 5.2) en D-Flow FM uit de D-HYDRO / Delft3D FM release 2020.04 (resultaten gerapporteerd in secties 5.1.3 en 5.3) op de nationale supercomputer Cartesius bij SURFsara<sup>2</sup> (Linux bullx/Red Hat Enterprise 7, nodes met elk 32 cores in 2 Intel Xeon E5-2697A v4 processoren, 64 GB geheugen per node, 2.6 GHz per core, node aangeduid met **E5-2697A v4 node**).

---

<sup>1</sup> Dit is geïnitieerd vanuit het zoutoverleg IJsselmeer dat bestaat uit RWS-WVL, RWS-MN, waterschappen rond IJsselmeer, PWN, RIWA en Deltares.

<sup>2</sup> 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.



## 1.4 Organisatie en bijdragen

Het hier gerapporteerde werk is uitgevoerd door Menno Genseberger, Asako Fujisaki en Carlijn Eijsberg-Bak.

## 1.5 Leeswijzer

De gevolgte aanpak wordt op hoofdlijnen beschreven in hoofdstuk 2. Omdat dit deelmodel onderdeel is van een groter geheel met verbindingen naar andere gebieden beschrijft hoofdstuk 3 kort het gebied. Hoofdonderdelen voor de modelbouw in hoofdstuk 4 zijn het rekenrooster en de randvoorwaarden voor toepassing binnen hoogwaterveiligheid en zoutverspreiding. Eerste modelresultaten voor waterstanden en zoutgehalten komen aan bod in hoofdstuk 5. Tevens wordt daar de uitgevoerde tijdstap analyse beschreven en stilgestaan bij rekentijden en parallelisatie. Hoofdstuk 6 sluit af met conclusies en aanbevelingen.

## 1.6 Terminologie

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

Nederlandse term	Beschrijving	Voorbeeld
<b>gebiedsschematisatie</b>	Een beschrijving van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem, voor een specifieke periode	baseline-rijn-j15_5-v1 (software: Baseline, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<b>modelschematisatie</b>	= modelsoftware + gebiedsschematisatie Een rekenkundig model van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem gebouwd met specifieke modelsoftware, voor een specifiek systeem en een specifieke periode	waqua-rijn-j15_5-v1 (software: WAQUA, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<b>modelsoftware</b>	Een software pakket waarmee modelschematisaties kunnen worden doorgerekend aan de hand van een numerieke implementatie van fysische processen	D-Flow FM, WAQUA
<b>modelsoftwaresuite</b>	Een samenhangend geheel van modelsoftware systemen	D-HYDRO, SIMONA

Wanneer alleen het woord 'model' wordt gebruikt, wordt hier specifiek een 'modelschematisatie' mee bedoeld.

## 2 Aanpak

### 2.1 Algemeen

In de modelontwikkeling van het D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer is gekozen voor een iteratieve aanpak. Gegeven beschikbare meetgegevens, kennis, software en budget is een eerste iteratieslag uitgevoerd.

In deze eerste iteratieslag is zowel een eerste versie van het model gebouwd als bepaald - als eerste indruk - wat de kwaliteit daarvan is. De resultaten daarvan dienen om voor RWS-toepassingen na te kunnen gaan waar het model al wel bruikbaar voor is, en waarvoor verdere ontwikkelingen/verbeteringen nodig zijn (in een volgende iteratieslag).

### 2.2 Modelbouw

De modelbouw is uitgesplitst in twee hoofdonderdelen: een tijdsonafhankelijke ruimtelijke schematisatie van het modelgebied en veelal tijdsafhankelijke randvoorwaarden. Voor de ruimtelijke schematisatie is eerst gekeken naar waterstanden voor hoogwatervoorspelling. Vervolgens is de schematisatie aangepast voor zoutgehalten voor zoutverspreiding. De randvoorwaarden hangen af van de doelvariabelen voor de beschouwde toepassing. Daarvoor is tot nu toe gekeken naar waterstanden voor hoogwaterveiligheid en naar zoutgehalten voor zoutverspreiding. De gehanteerde methodiek voor het bepalen van de modelperformance van deze twee doelvariabelen wordt kort uiteengezet in secties 2.3 en 2.4.

### 2.3 Methodiek voor bepalen modelperformance waterstand

Voor een eerste indruk van de modelperformance van het IJsselmeer deelmodel in diepte gemiddelde mode (2DH) is een vergelijking uitgevoerd met metingen en resultaten van het WAQUA model uit [3, 4]. Deze vergelijking is gedaan voor waterstanden tijdens een historische stormperiode in januari 2007. De keuze is gemaakt uit een beperkte set van historische stormperiodes waar voldoende meetgegevens voor zijn op de randen van het (deel)model. De overweging<sup>3</sup> van deze keuze is dat gedurende de stormperiode in januari 2007 zowel harde wind als stroming (o.a. door een afvoergolf) optreedt. Hierdoor wordt het model zowel getoetst op het modelleren van effecten door windopzet als afvoer gedreven stroming. Voor de vergelijking wordt gekeken naar de periode die begint op 15 januari 2007 00:00 en eindigt op 23 januari 2007 00:00. In deze periode draait de wind van westzuidwest naar west en neemt de windkracht toe tot 21 m/s tijdens de piek van de storm, zie ook Figuur 4.33. De storm periode kent 2 pieken: een op 19 januari en een op 21 januari, met opzetten langs de noordoostelijke en oostelijke kust van Kornwerderzand tot Roggebotsluis (met een maximum van gemeten opzet van 1,4 m en 1,1 m bij Roggebotsluis), zie Bijlage C. Bij Den Oever is de afwaaiing dominant (met een minimum van -0,8 m en -0,3 m).

Het model wordt hier vergeleken voor berekende waterstanden met metingen en berekeningen met het WAQUA model. Er wordt vergeleken voor een negental observatiestations in het gebied, zie Figuur 4.21. De vergelijking gebeurt zowel visueel via figuren als getalsmatig via statistische criteria (zie definities modelbeoordeling in Bijlage B).

---

<sup>3</sup> Dit is een pragmatische keuze op basis van beschikbare gegevens. Deze keuze is niet gebaseerd op terugkeertijden noch is een selectie gemaakt uit een volledige verzameling van representatieve stormen voor dit gebied.

## 2.4 Methodiek voor bepalen modelperformance zoutverspreiding

Voor het goed kunnen modelleren van zoutverspreiding is meer nodig. Vlakbij de Afsluitdijk treedt gelaagdheid op en is een drie dimensionale (3D) aanpak nodig. Ook is het essentieel dat de water- en zoutbalans over een langere simulatieperiode door het model gereproduceerd worden. Met de beschikbare meetgegevens is nagegaan wat kwaliteit van het zoutverspreidingsmodel in 3D is voor de volgende belangrijke aspecten:

- a) het goed kunnen reproduceren van de waterbalans,
- b) de voorspelde ruimtelijke verspreiding en gelaagdheid van chloride en
- c) de voorspelde variatie van chloride in de tijd.

Let op dat dit een eerste versie van het zoutverspreidingsmodel in 3D betreft. Naar aanleiding van deze eerste indruk van de modelperformance zal het model verder verbeterd en gevalideerd moeten worden voor deze en andere aspecten.

De periode van 5 juni 2018 tot en met 31 december 2018 wordt beschouwd. In deze periode was er vrij weinig aanvoer van (zoet) water door de IJssel waardoor een droogtesituatie ontstond. In het IJsselmeer kon hierdoor niet altijd gespuid worden bij de Afsluitdijk en werd het oppervlaktewater vanaf de Afsluitdijk steeds zouter. Tijdens deze droogteperiode zijn relatief veel waarnemingen en metingen verricht (zie voor een algemene beschrijving [13]). Deze zijn gebruikt voor het bepalen van de modelperformance.

Voor aspect a) worden berekende en gemeten waterstanden vergeleken bij Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluizen Noord en Lemmer (zie locaties in Figuur 4.21). De beoordeling van de modelperformance is visueel op basis van de tijdseries.

Voor aspect b) wordt de door het model voorspelde chloride verspreiding in de onderste en bovenste rekenlaag vergeleken met metingen van dagelijkse vaartochten. De beoordeling van de modelperformance is visueel op basis van ruimtelijke verspreidingsplots van de simulatie en bollenplots van de metingen.

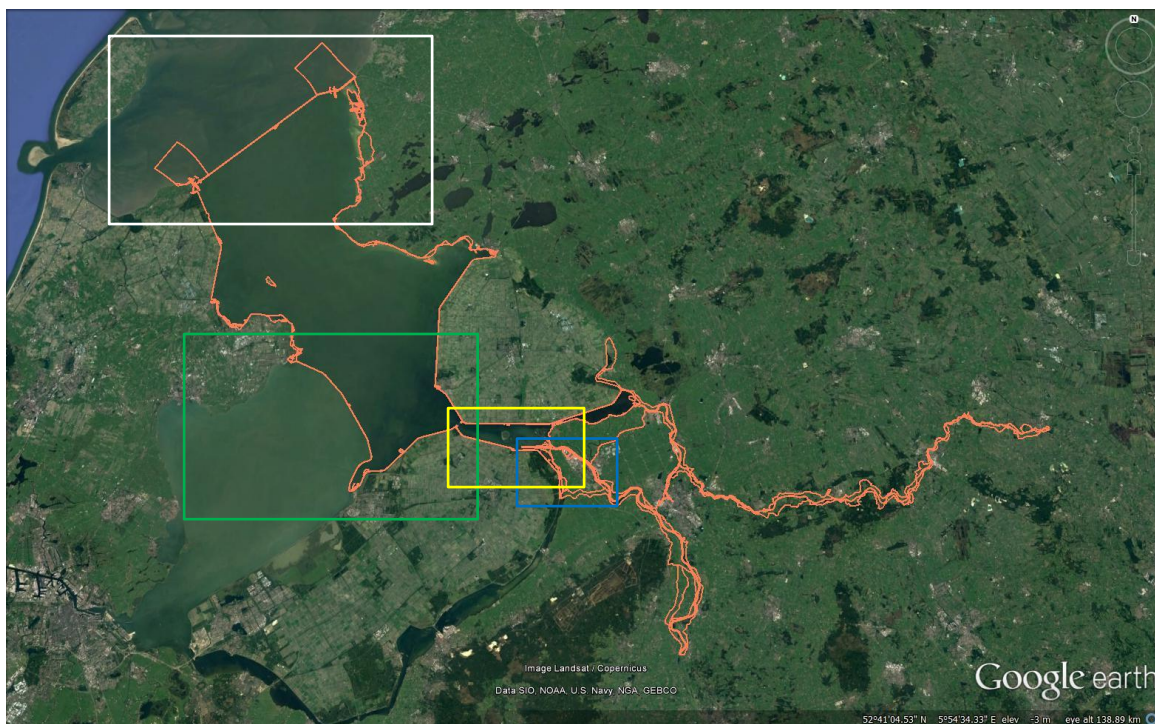
Voor aspect c) is een meer kwantitatieve beoordeling lastiger door onvoldoende meetgegevens. Voor het monitoren van chloride in de tijd zijn observatiestations aangebracht in het model. Dit zijn vooral locaties van bestaande en oude FL en MTWL meetpalen. Zie Figuur 4.34.

## 2.5 Aanvullende casus lokale zoutverspreiding

Tijdens de studie is een aanvullende casus gedefinieerd, waarin de focus ligt op de verhoging van de zoutgehaltenes in het IJsselmeer als gevolg van een lokale lozing. De casus betreft de periode van mei 2020, waarin Gemaal Lely van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) gedurende een aantal dagen zout op het IJsselmeer heeft geloosd, waarna bij PWN bij Andijk verhoogde zoutgehaltenes zijn gemeten. De casus verschilt van de voorgaande doordat een andere benadering is gevolgd: alleen bij de gemalen van HHNK wordt zout geloosd, alle overige zoutbronnen en de initiële conditie kregen een constant (gemiddeld) zoutgehalte. Daarmee richt deze casus zich vooral op de aspecten b en c uit de paragraaf hierboven, terwijl de invloed van een onzekere initiële conditie voor zout en onzekere zoutrandvoorwaarden elders in het model wordt vermeden. Deze casus geeft inzicht in de zoutverspreiding ten gevolge van een lokale lozing.

### 3 Gebiedsbeschrijving

Het IJsselmeer deelmodel is onderdeel van de zesde-generatie D-HYDRO modelschematisatie voor het gebied rondom de IJssel-Vechtdelta (IJVD). Figuur 3.1 laat dit gebied in Google Earth zien. Hierbij zijn de oranje lijnen de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.



*Figuur 3.1* Gebied omvatten door IJsselmeer, IJssel-Vechtdelta & Overijsselse Vecht in Google Earth. De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied. Omkaderd in wit, groen, geel en blauw de uitsneden zoals weergegeven in Figuren 3.2 t/m 3.5.

Het IJsselmeer grenst aan

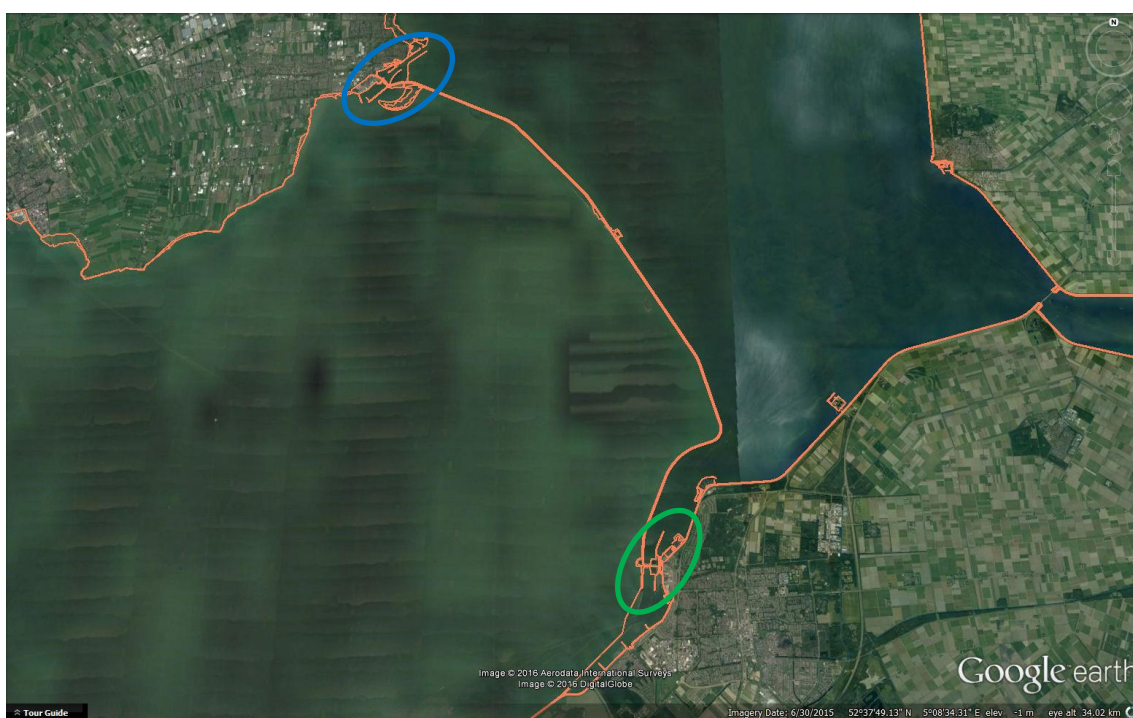
1. de Waddenzee bij de Afsluitdijk met verbindingen via de Stevinssluisen bij Den Oever en de Lorentzsluisen bij Kornwerderzand (zie Figuur 3.2) (De Stevinssluisen bestaat uit drie spuigroepen, de Lorentzsluisen uit twee. Elke spuigroep bestaat uit vijf kokers van 12 m breedte, gescheiden door 4 m brede tussenpijlers.),
2. het Markermeer bij de Houtribdijk met verbindingen via de Krabbersgatssluisen bij Enkhuizen en de Houtribssluisen bij Lelystad (zie Figuur 3.3),
3. het Ketelmeer bij de Ketelbrug.

De zesde-generatie modelschematisaties van IJVD en Rijntakken delen een overlapgebied dat Ketelmeer, Vossemeer, Drontermeer tussen Roggebotsluis en Reevesluis, bypass bij Kampen en een stuk IJssel bevat (Figuur 3.4 en 3.5).

Voor het huidige deelmodel van het IJsselmeer is het gebied beschouwd tussen de Afsluitdijk, de Roggebotsluis, de verbinding van de IJssel met het Ketelmeer, de verbinding van het Kadoelermeer met het Zwarte Meer en de verbinding van het Zwarte Water met het Zwarte Meer. Dit heeft een praktische reden: voor zoutverspreiding zijn er een aantal individueel onderscheidbare lozingen en onttrekkingen in het Ketelmeer en het Zwarte Meer nodig.



*Figuur 3.2* Overgangsgedebied tussen IJsselmeer (onder) en Waddenzee (boven) in Google Earth. Deze uitsnede is wit omkaderd in Figuur 3.1. De scheiding wordt gevormd door de Afsluitdijk die wordt begrensd door de Stevensluizen bij Den Oever (blauwe ellips) en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand (groene ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.



*Figuur 3.3* Overgangsgedebied tussen Markermeer (links) en IJsselmeer (rechts) in Google Earth. Deze uitsnede is groen omkaderd in Figuur 3.1. De scheiding wordt gevormd door de Houtribdijk die wordt begrensd door de Krabbersgatssluzen bij Enkhuizen (blauwe ellips) en de Houtribsluzen bij Lelystad (groene ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.



*Figuur 3.4* Overgangsgedebied tussen IJsselmeer (links) en Ketelmeer (midden), Vossemeer - Drontermeer (rechtsonder) en Ramsdiep - Zwarte Meer (rechtsboven) in Google Earth. Deze uitsnede is geel omkaderd in Figuur 3.1. De scheiding tussen Ketelmeer en Ramsdiep (vaargeul, noordkant) en Ramsgeul (zuidkant) wordt gevormd door de Ramspolkering (blauwe ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.



*Figuur 3.5* Gebied rondom de nieuwe bypass bij Kampen met Drontermeer (linksonder), Vossemeer (linksboven) en de IJssel (rechts) in Google Earth. Deze uitsnede is blauw omkaderd in Figuur 3.1. De oude scheiding tussen Drontermeer en Vossemeer is de Roggebotsluis (blauwe ellips). De nieuwe scheiding wordt gevormd door de Reevesluis en de Reevedam (groene ellips). De oranje lijnen zijn de winterdijk en de oeverlijn uit de laatste versie in Baseline voor dit gebied.

## 4 Modelbouw

### 4.1 Inleiding

De modelbouw bestaat uit twee hoofdonderdelen:

1. een ruimtelijke schematisatie van geometrie en diepte van het IJsselmeer deelmodelgebied in een (tijdsafhankelijk) rekenrooster en
2. het opleggen van (veelal tijdsafhankelijke) voorwaarden op de randen van het (deel)model met omliggende gebieden<sup>4</sup>.

De op te leggen randvoorwaarden in het tweede hoofdonderdeel hangen af van de doelvariabelen voor de beschouwde toepassing en de simulatieperiode. Daarvoor is tot nu toe gekeken naar waterstanden voor hoogwaterveiligheid en naar zoutgehalten voor zoutverspreiding.

In dit hoofdstuk worden de gevolgde werkwijze en de belangrijkste invoer/instellingen van het model besproken. Voor overige modelinstellingen wordt verwezen naar Bijlage A.

### 4.2 Rekenrooster

Voor een rekenrooster van een zesde-generatie modelschematisatie zijn er vanuit RWS twee belangrijke wensen:

- a) zoveel mogelijk bruikbaar voor verschillende RWS toepassingen en
- b) aansluiting van aangrenzende gebieden op roosterniveau.

Ten behoeve van a) is het rekenrooster eerst opgezet voor toepassing binnen hoogwaterveiligheid (sectie 4.2.1) en vervolgens lokaal aangepast voor zoutverspreiding (sectie 4.2.2).

Daarbij is gebruik gemaakt van een roostergeneratie aanpak van de zesde-generatie RWS modellen voor het IJsselmeer deelmodelgebied die eerder voor het Markermeer is uitgewerkt [6, 9]. Uiteindelijk wordt in dit rapport het lokaal aangepaste rekenrooster zowel gebruikt voor het bepalen van de modelperformance in 2DH met een historische storm t.b.v. hoogwaterveiligheid als in 3D met zout voor de droogteperiode uit 2018 t.b.v. zoutverspreiding in het IJsselmeer.

Voor het uitwerken van een roostergeneratie aanpak is het Markermeer gekozen omdat de waterbeweging in dit deelgebied vooral windgedreven is terwijl voor het IJsselmeer ook de afvoer (IJssel, spuien Afsluitdijk) een belangrijke rol speelt. In de uitwerking is uitgezocht wat voor een rekenrooster geschikt is voor toepassingen binnen hoogwaterveiligheid (waterstanden door scheefstand en opzet voor BOI en RWsOS Meren). Er is nagegaan hoeveel rekenresolutie bij de kust vereist is. Verder is gekeken hoe, ten behoeve van rekensnelheid, het aantal rekencellen verminderd kan worden zonder verlies aan nauwkeurigheid door de rekencellen geleidelijk groter te maken richting het midden van het Markermeer.

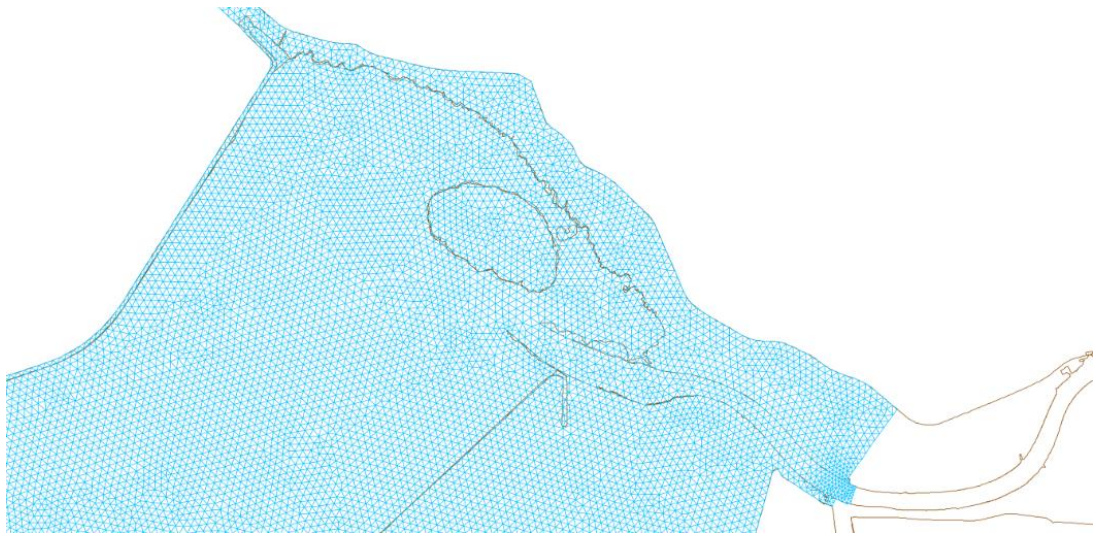
---

<sup>4</sup> Niet alleen in het horizontale vlak: ook in verticale richting, zoals de grens bij het wateroppervlak met de atmosfeer en indien nodig op de grens bij de bodem met de ondergrond, denk voor het laatste bijvoorbeeld aan wegzijging en zoute kwel.

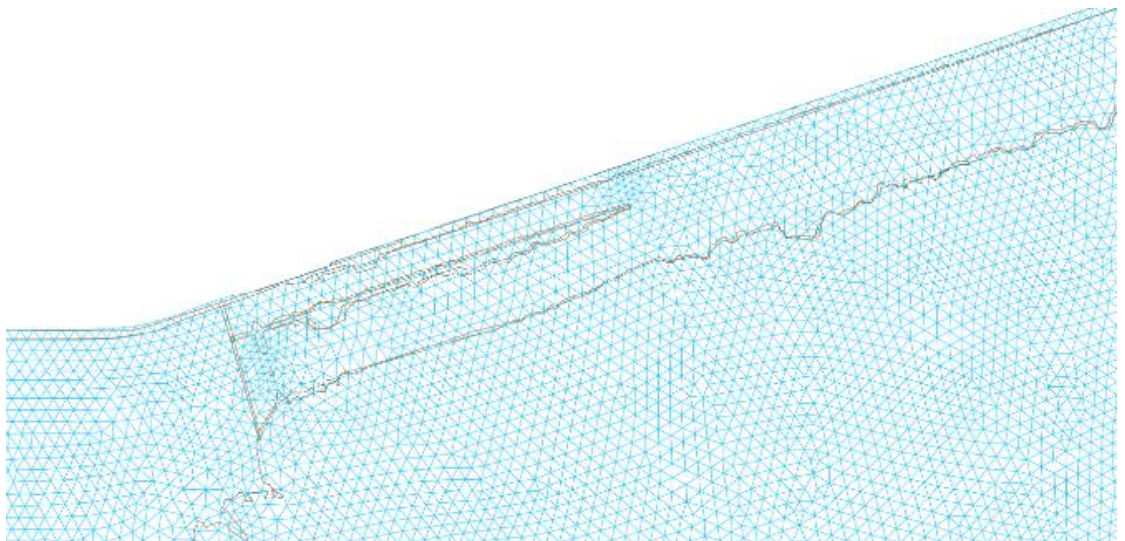
#### 4.2.1 Eerste opzet voor hoogwaterveiligheid

Om zo goed mogelijk aan wensen a) en b) te voldoen is de volgende praktische aanpak gevolgd:

- i. Minimaal dezelfde nauwkeurigheid als de WAQUA modellen in [3, 4] voor hoogwaterveiligheid toepassingen en als het Delft3D-FLOW model in [5] voor stofverspreidingstoepassingen. Omdat in D-Flow FM een ander, lager orde, rekenschema gebruikt wordt dan WAQUA en Delft3D-FLOW, zal in gebieden waar convectie belangrijk wordt (daar waar versnelling optreedt, bijvoorbeeld bij verdiepingen en sluizen) een circa twee keer zo fijn rooster gebruikt moeten worden dan voorheen.
- ii. In het noorden van het IJsselmeer is met de roostergeneratie aanpak uit [6, 9] als startpunt begonnen. Van daaruit is toegewerkt naar het zuidoosten (Ketelmeer, Vossemeer, Zwarte Meer, Zwarte Water, Overijsselse Vecht en IJssel). Voor het deelmodel van het IJsselmeer is voor het zuidoosten vanaf de Ketelbrug gebruik gemaakt van een tijdelijk rekenrooster tot het Zwarte Water (dat al beschikbaar was, zie voorbeelden in Figuur 4.1 en Figuur 4.2).

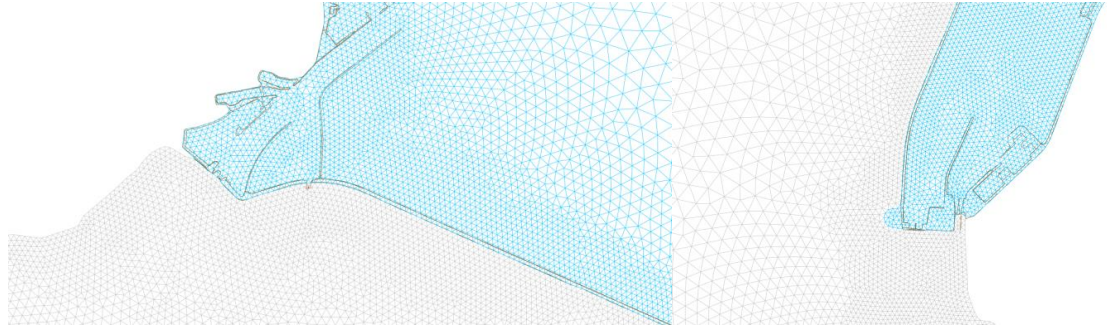


Figuur 4.1 Detail tijdelijk rekenrooster voor deelmodel IJsselmeer bij Zwarte Meer.



Figuur 4.2 Detail tijdelijk rekenrooster voor deelmodel IJsselmeer bij Ramsdiep en Ramsgeul.

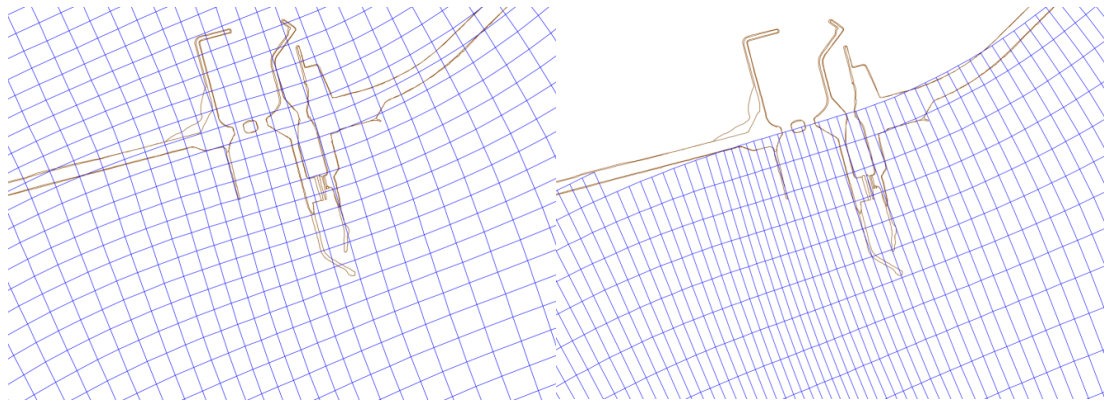




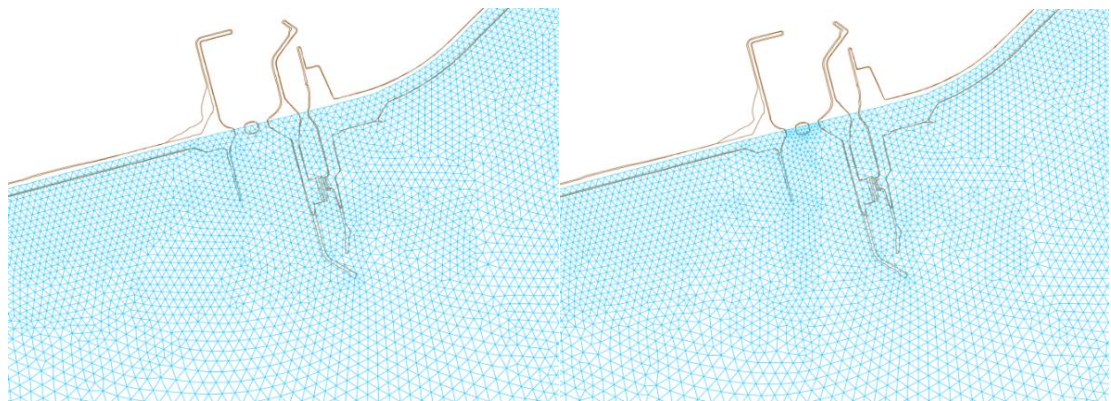
*Figuur 4.3 Detail rekenrooster van deelmodel IJsselmeer (blauw) bij Houtribdijk ter hoogte van de Krabbersgatsluizen bij Enkhuizen (links) en de Houtribsluizen bij Lelystad (rechts) en de aansluiting op het rekenrooster van de zesde-generatie modelschematisatie voor het Markermeer (grijs).*

Belangrijke aspecten zijn de vereiste resolutie bij de kust en het verminderen van het aantal rekencellen met behoud van de nauwkeurigheid en het gebruik van driehoekige rekencellen voor modelleerflexibiliteit (o.a. volgen van onregelmatige kustlijn, d.w.z. een boundary fitted rekenrooster waarbij er een geleidelijke overgang tussen de roostercellen is van 50 m resolutie bij rand naar 400 m in midden van IJsselmeer). Dit heeft geleid tot de volgende roostereigenschappen:

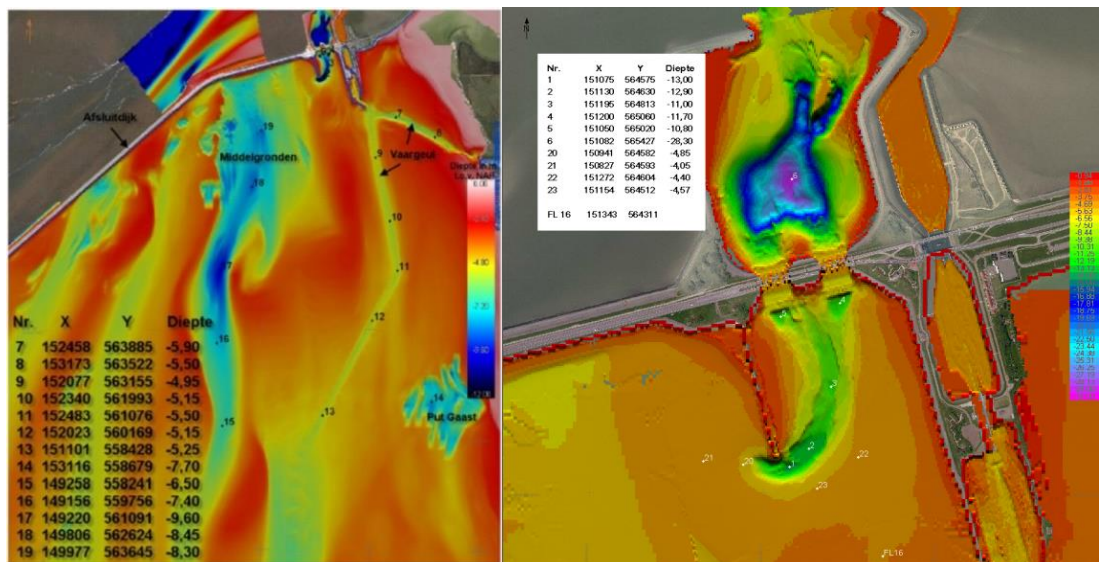
- 50 m resolutie en uitgelijnd langs alle land-water grenzen,
- 400 m resolutie in het open water van het IJsselmeer,
- een aansluiting op roostercel niveau op het rekenrooster van de zesde-generatie modelschematisatie van het Markermeer bij de Houtribdijk (zie voorbeeld in Figuur 4.3),
- een grotere resolutie ter hoogte van de sluizencomplexen van Kornwerderzand en Den Oever dan de vijfde-generatie modelschematisatie met WAQUA [3, 4] en het zoutverspreidingsmodel met Delft3D-FLOW [5] (vergelijk respectievelijk Figuur 4.4, 4.5 en 4.6 en Figuur 4.7, 4.8 en 4.9) (merk op dat met name op deze locaties het rooster verder verfijnd wordt voor zoutverspreiding, zie de volgende sectie).



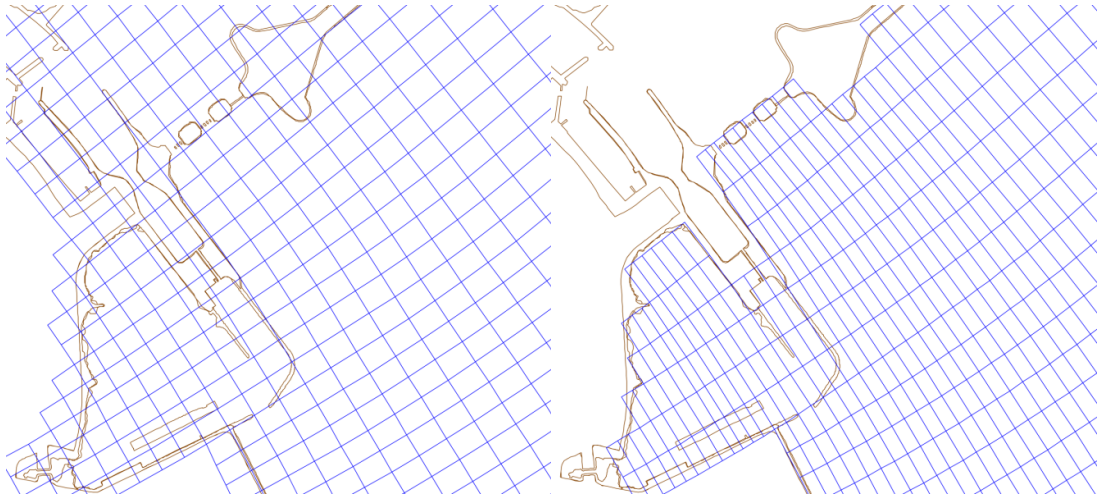
Figuur 4.4 Detail rekenrooster bij Afslutdijk ter hoogte van het sluizencomplex bij Kornwerderzand voor vijfde-generatie modelschematisatie met WAQUA [3, 4] (links) en voor zoutverspreidingsmodel met Delft3D-FLOW [5] (rechts).



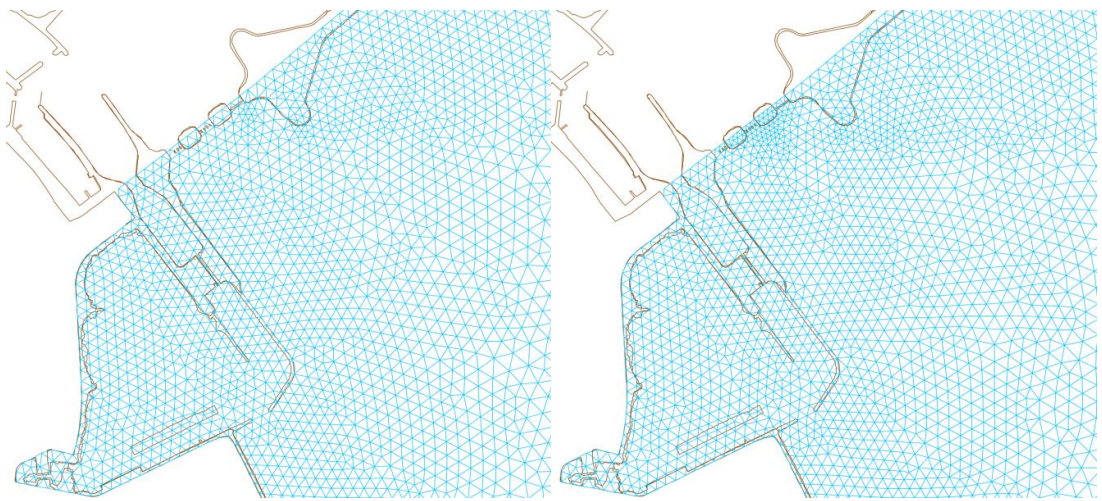
Figuur 4.5 Detail rekenrooster van deelmodel IJsselmeer bij Afslutdijk ter hoogte van het sluizencomplex bij Kornwerderzand (links) en met een lokale roosterverfijning bij de spuikokers van de spuisluisen (rechts).



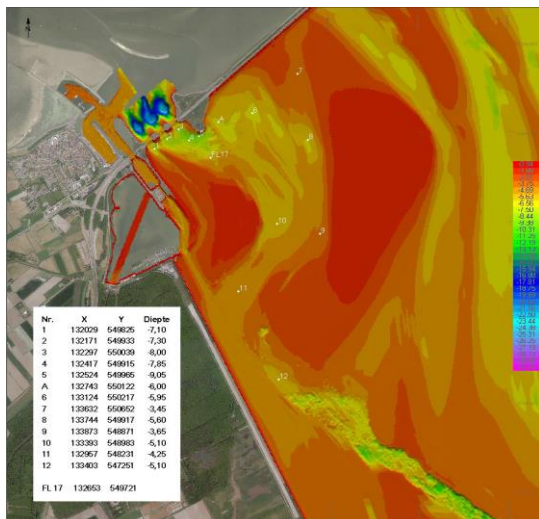
Figuur 4.6 Bathymetrie rondom Kornwerderzand aan IJsselmeer zijde (links) en bathymetrie bij spui- en schutsluisen Kornwerderzand aan Waddenzee en IJsselmeer zijde (rechts) (figuren uit [11]).



Figuur 4.7 Detail rekenrooster bij Afsluitdijk ter hoogte van het sluizencomplex bij Den Oever voor vijfde-generatie modelschematisatie met WAQUA [3, 4] (links) en voor zoutverspreidingsmodel met Delft3D-FLOW [5] (rechts).



Figuur 4.8 Detail rekenrooster van deelmodel IJsselmeer bij Afsluitdijk ter hoogte van het sluizencomplex bij Den Oever (links) en met een lokale roosterverfijning bij de spuikokers van de spuisluzen (rechts).



Figuur 4.9 Bathymetrie rondom Den Oever aan IJsselmeer zijde (figuur uit [11]).

#### 4.2.2 Aanpassingen voor zoutverspreiding

Op basis van de eerste opzet in de vorige sectie is nagegaan hoeveel het horizontale rekenrooster lokaal nog verfijnd moet/kan worden voor zoutverspreiding. Dit betreft vooral de spui- en schutsluizen en de lokale kuilen/geulen bij de Afsluitdijk. Hiervoor zijn door Deltares en RWS-WVL de uitgangspunten en de te hanteren procedure besproken.

De huidige dieptegegevens in Baseline zijn nagelopen op actualiteit en voldoende resolutie, met name rondom Den Oever en Kornwerderzand. In het algemeen is een horizontale resolutie van de diepte van 20 m bij 20 m nodig en op specifieke plaatsen 5 m bij 5 m. De huidige dieptegegevens in Baseline zijn gebaseerd op maatregel ym\_bath17\_a1. De metadata van deze maatregel vermeldt dat het meetgegevens betreffen uit de periode 2013 - 2017. Door deze maatregel ym\_bath17\_a1 zijn de diepten meer gedetailleerd voor de zomerbedhoogte punten dan de standaard 50 m bij 50 m resolutie in het IJsselmeer van Baseline versie ijvd-j16\_5-v1. Veel belangrijke gedeelten rondom (erosie) putten en vaargeulen hebben daardoor al een horizontale resolutie van 5 m bij 5 m, voor de rest is dit 20 m bij 20 m. Zie Figuur 4.10, 4.11 en 4.12 als voorbeeld.

Voor het voldoende kunnen modelleren van de putten met zout vlakbij de Afsluitdijk, lijkt dit voorlopig voldoende. Ook is de verwachting dat de werkelijke diepte in het IJsselmeer, op baggerwerkzaamheden na, weinig veranderd. Daarom zijn de nu in Baseline beschikbare gegevens gebruikt voor de eerste modelopzet. Aanbevolen wordt wel om dit nog expliciet na te gaan voor lopende (waaronder de vernieuwing van de Afsluitdijk) en geplande ontwikkelingen in het IJsselmeer. Verder vallen er irregulariteiten op in Baseline bij de vaargeul ten zuiden van Den Oever (Figuur 4.10). Het wordt aanbevolen na te gaan of dit overeenkomt met de werkelijke situatie.

Met de huidige gegevens in Baseline is het rekenrooster aangepast bij de kunstwerken en geulen/putten bij de Afsluitdijk. Hoogste resolutie is 12 m bij het diepste punt van de put vlakbij de spuisluizen van Kornwerderzand (zie Figuur 4.12 en 4.13, te vergelijken met Figuur 4.5 voor de eerste opzet). Deze neemt geleidelijk af naar 40 m. Een vergelijkbare aanpak en resolutie is gebruikt voor de put vlakbij de spuisluizen van Den Oever (zie Figuur 4.14, te vergelijken met Figuur 4.8 voor de eerste opzet). Zie als voorbeeld hoe de roosterresolutie aangepast is om de lokale diepte goed genoeg te kunnen volgen Figuur 4.15 voor Den Oever.

Voor de spuisluizen van zowel Den Oever als Kornwerderzand is de grens van het rekenrooster bij de grens van de spuisluizen aan de IJsselmeerzijde. De individuele kokers van de spuisluizen worden nu (nog) niet geschematiseerd. Het rekenrooster is gemaakt tot aan de dijk van de Afsluitdijk, voorlopig worden geen delen van de dijk zelf in het model opgenomen. Er moet nog een besluit worden genomen over de formele ligging van de modelgrens tussen IJsselmeer en Waddenzee.

In Figuur 4.16 en 4.17 is te zien hoever de aanpassingen van het rekenrooster voor de geulen doorlopen in het IJsselmeer. Het gehele aangepaste rooster voor het IJsselmeer wordt getoond in Figuur 4.20, de verdichting in de noordwest en noordoost hoek komt door de daar hogere resolutie van rekenrooster.

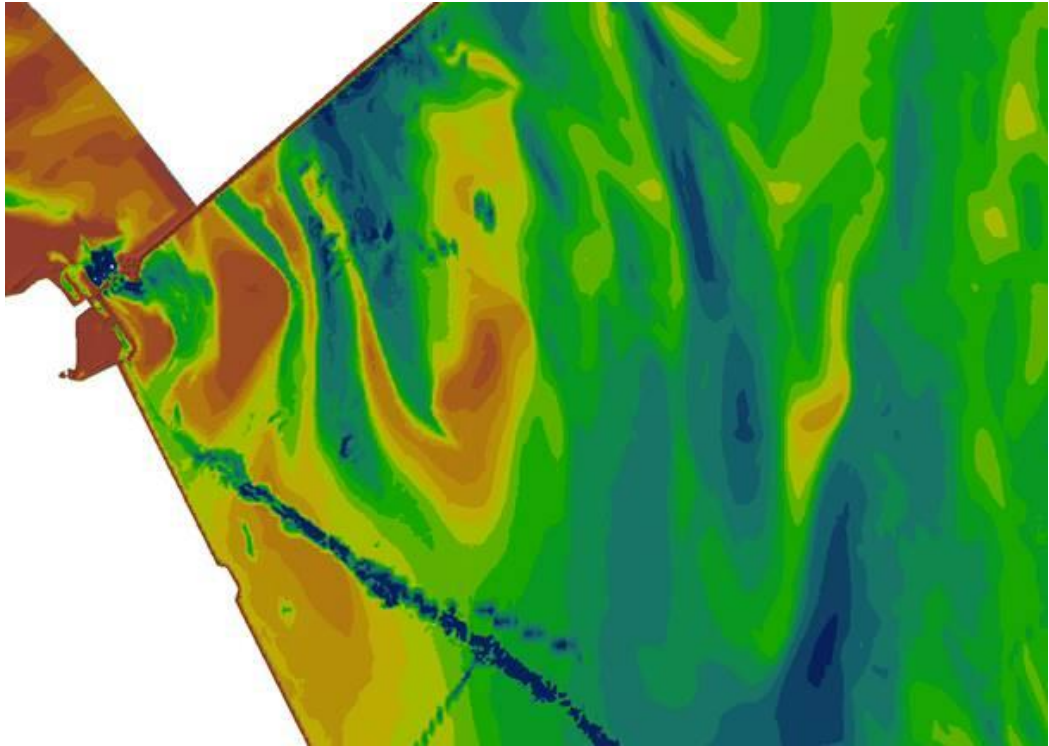
Het rekenrooster is verder uitgelijnd voor de spaarbekkens van drinkwaterbedrijf PWN bij Andijk (zie Figuur 4.18 en 4.19) voor mogelijke toekomstige toepassingen omdat dit ook een belangrijke locatie is voor zoutverspreiding in het IJsselmeer.

Uiteindelijk wordt in dit rapport het op deze wijze lokaal aangepaste rekenrooster zowel gebruikt voor het bepalen van de modelperformance in 2DH met een historische storm t.b.v. hoogwaterveiligheid als in 3D met zout voor de droogteperiode uit 2018 t.b.v. zoutverspreiding in het IJsselmeer.

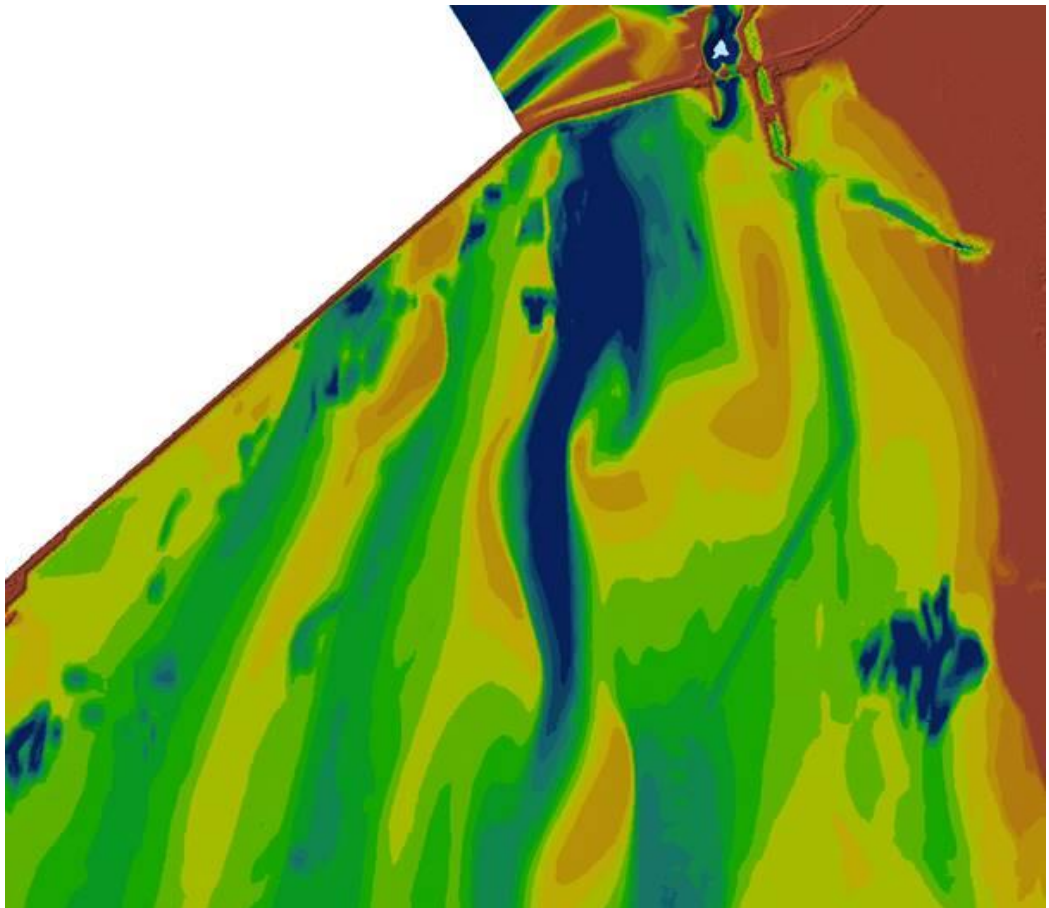
Voor hoogwaterveiligheid wordt het rekenrooster in dieptegemiddelde mode (2DH) gebruikt.

Voor zoutverspreiding wordt dit rekenrooster in drie dimensies (3D) gebruikt. Daarvoor moet ook het verticale rooster gedefinieerd worden. Dat betreft de keuze tussen Z-lagen of sigma-lagen en het aantal lagen. Verder speelt de wijze waarop de randvoorwaarden voor zout bij de scheepvaartsluizen en de spuisluisen worden aangepakt een grote rol. Indien het van belang is dat het vullen, overlopen en ledigen van de diepe ontgrondingskuilen bij de spuisluisen met zout goed gesimuleerd worden dan zal lokaal niet alleen het horizontale rooster daarop afgestemd moeten zijn, maar ook het verticale rooster.

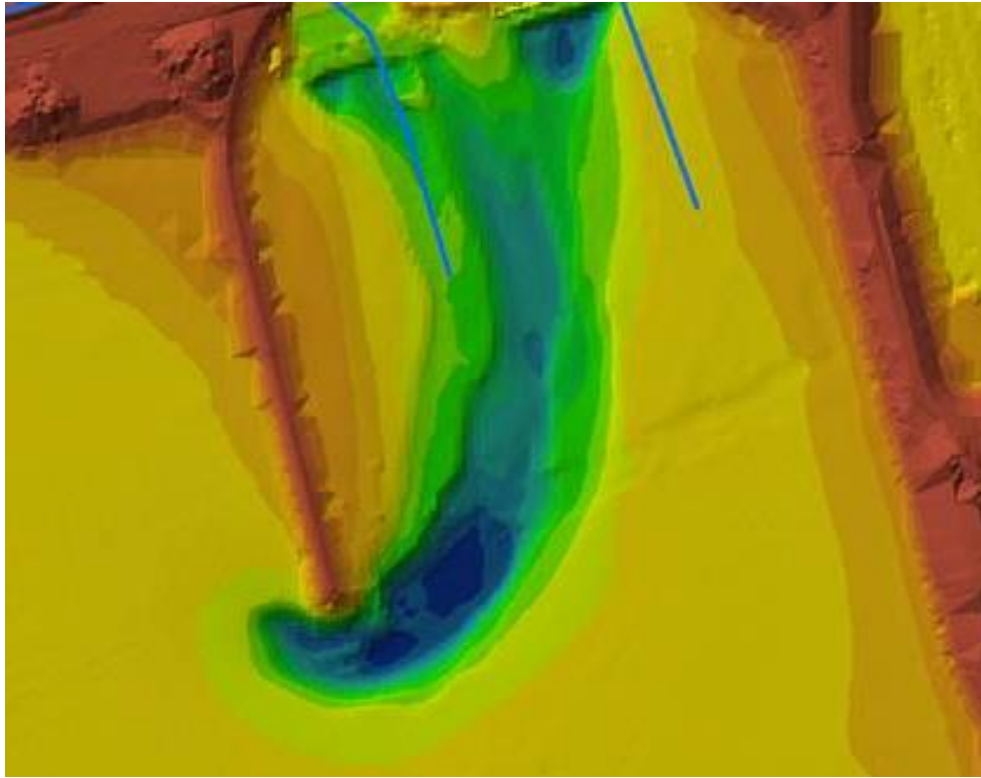
Een verticale resolutie van ca. 1 m is een minimum eis bij maximum dieptes van ruwweg 9 en 11 m. Vanwege een correcte modellering van de zoutverspreiding door dichtheidsstroming via de diepere geulen, beïnvloedt door wind en afvoer, zou in het gebied van interesse (globaal van de Afsluitdijk tot Andijk) voldoende verticale resolutie wenselijk zijn. Echter, in deze eerste iteratie zijn vanwege praktische redenen (nog niet geheel werkende Z-lagen functionaliteit in D-Flow FM software en beperken van rekestijd voor toepassing) nu 5 (equidistante) sigma-lagen in de verticale richting gebruikt. Met name voor de ontgrondingskuilen bij de spuisluisen is dit niet voldoende. Hiervoor zal in de volgende iteratieslag overgegaan moeten worden naar Z-lagen en een groter aantal lagen.



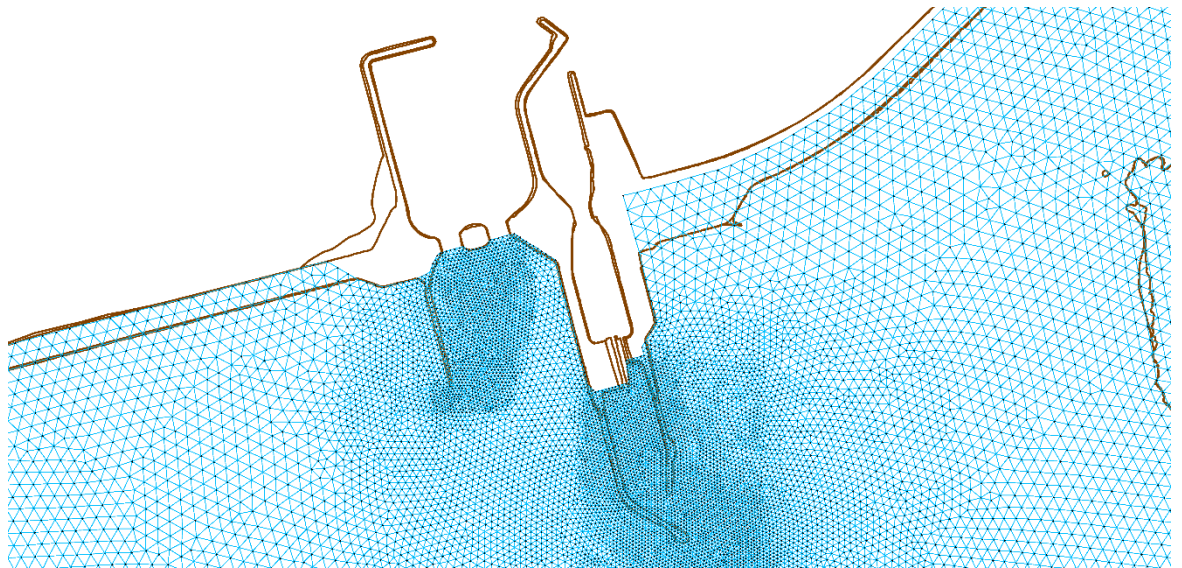
*Figuur 4.10 Dieptegegevens in Baseline rondom Den Oever.*



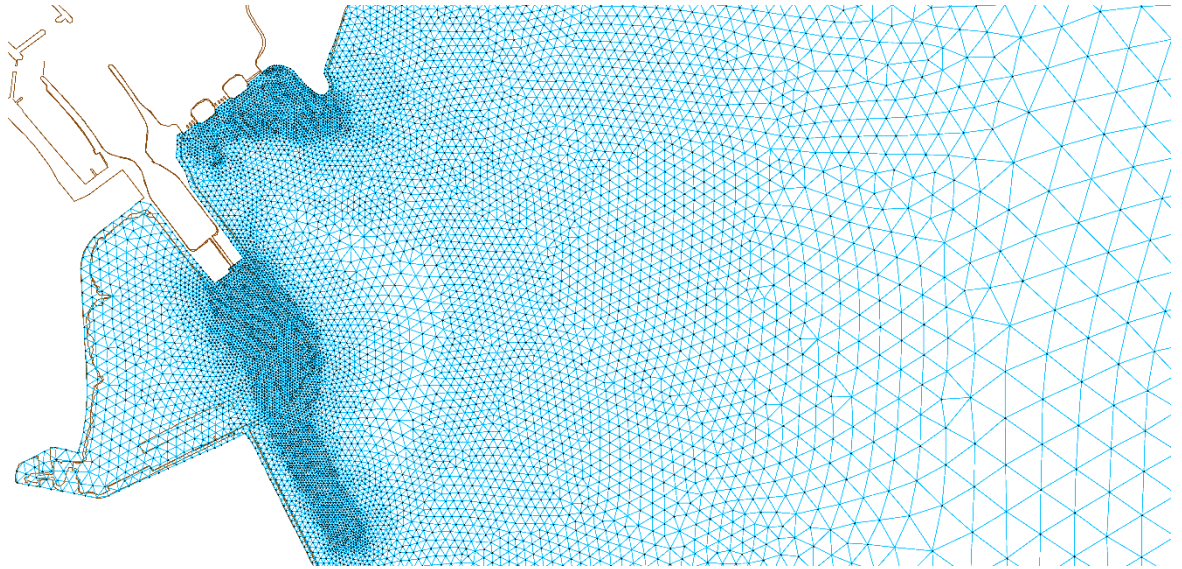
*Figuur 4.11 Dieptegegevens in Baseline rondom Kornwerderzand.*



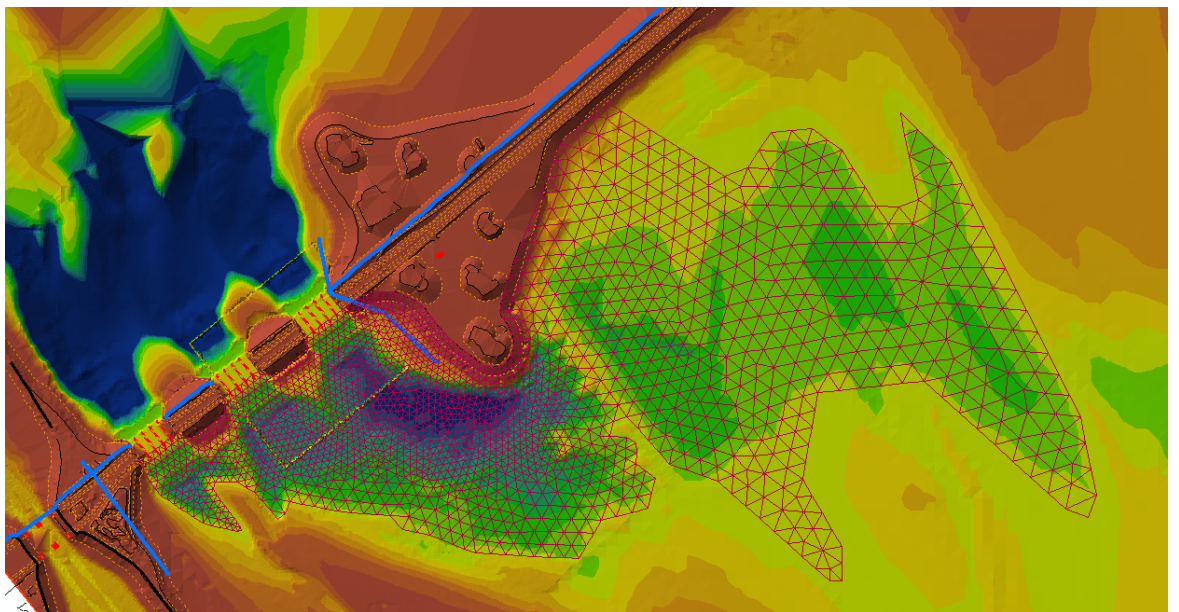
*Figuur 4.12 Dieptegegevens in Baseline van diepe put bij spuisluizen Kornwerderzand (let op: andere kleurschaal dan Figuur 4.10 en 4.11).*



*Figuur 4.13 Aangepast rekenrooster vlakbij sluizencomplex Kornwerderzand.*

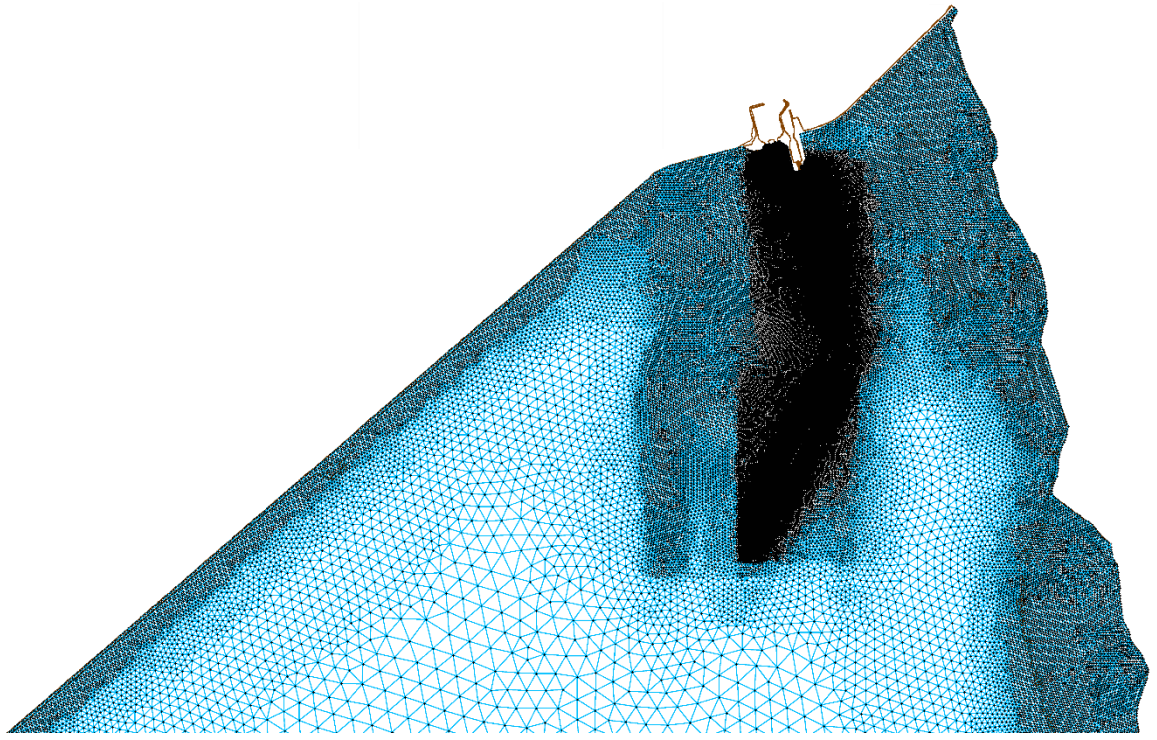


*Figuur 4.14 Aangepast rekenrooster vlakbij sluiscomplex Den Oever.*

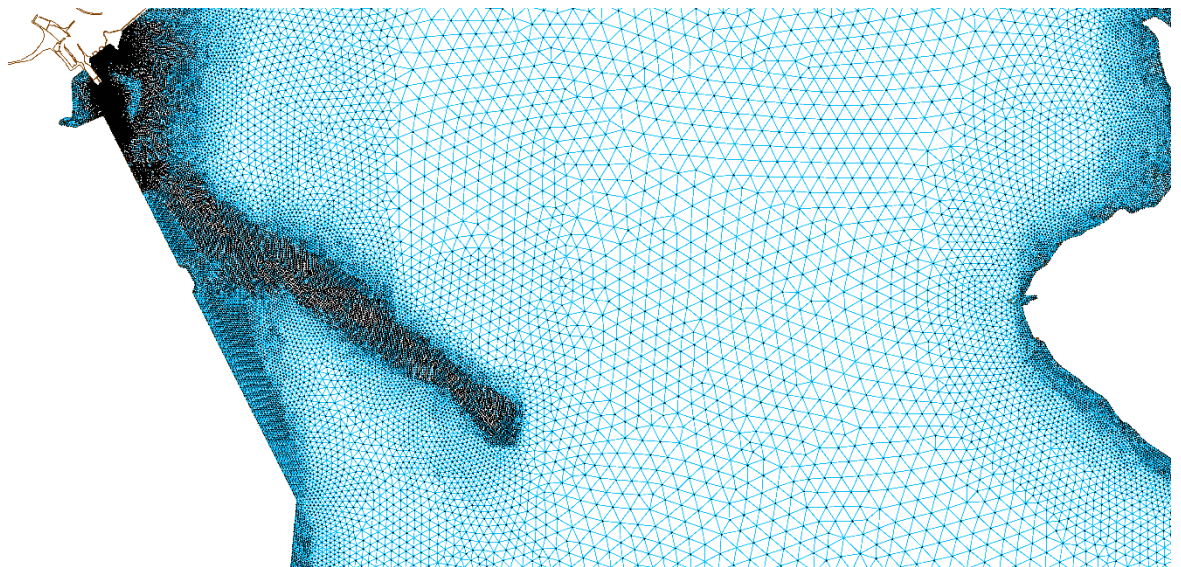


*Figuur 4.15 Voorbeeld van hoe met de roosterresolutie lokale variaties in diepte worden gevolgd bij Den Oever. Resolutie varieert van 12 m in diepste punt onder spuisluis tot 40 m verder weg.*

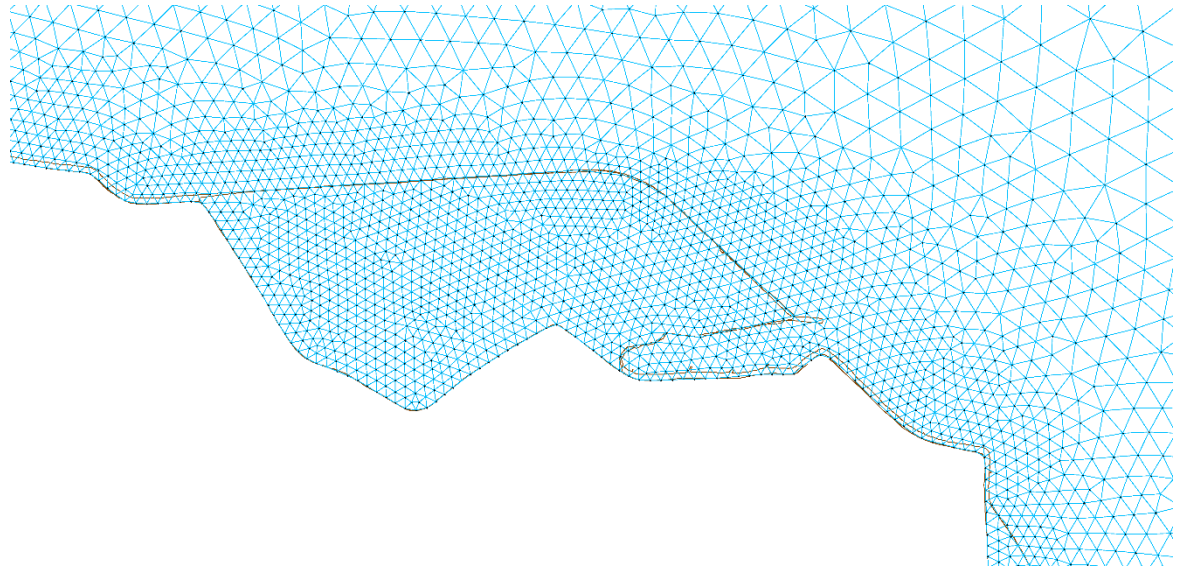




*Figuur 4.16 Aangepast rekenrooster bij de Middelgronden en Kornwerderzand in het noordoosten van het IJsselmeer.*



*Figuur 4.17 Aangepast rekenrooster bij Wieringerhoek en Den Oever in het noordwesten van het IJsselmeer.*



Figuur 4.18 Aangepast rekenrooster bij PWN bij Andijk.



Figuur 4.19 Lokale situatie van PWN bij Andijk met innamepunten psA en WPJ (bron: PWN).



*Figuur 4.20 Aangepast rekenrooster van het IJsselmeer deelmodel.*

#### 4.2.3 Aantal roosterpunten

Het horizontale rekenrooster van de eerste opzet uit sectie 4.2.1 van het D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer bevat 256.164 elementen (rekencellen) en 136.230 nodes (knooppunten). Dit is voor hetzelfde gebied als in Figuur 4.20, inclusief Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Meer.

Figuur 4.20 toont het uiteindelijke horizontale rekenrooster van het D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer. Dit bevat 369.683 elementen (rekencellen) en 193.105 nodes (knooppunten). Voor de weergave van de waterkwaliteitsparameter 'zout' is de omvang van het rooster met ruim 40% toegenomen ten opzichte van het rooster in de eerste opzet. Dit is ook fors meer dan in de oudere modellen:

- Het rekenrooster van het vijfde-generatie WAQUA model [3, 4] voor IJVD (inclusief Zwarte Water en Overijsselse Vecht) bevat 469.040 elementen (rekencellen) waarvan ongeveer de helft in het gebied van het D-Flow FM deelmodel.
- Het Delft3D-FLOW model voor zoutverspreiding in het IJsselmeer [5] bestaat uit twee subdomeinen (t.b.v. een fijner rekenrooster bij de Afsluitdijk): een subdomein bevat 12.225 elementen (rekencellen), de ander 13.043. Dit model rekent met 10 sigma-lagen in de verticale richting.

#### 4.2.4 Inbedding in IJVD

Het deelmodel van het IJsselmeer omvat ook het Ketelmeer, Zwarte Meer en Vossemeer. Vanaf Ketelbrug richting het zuidoosten is daarvoor gebruik gemaakt van een voorlopig rooster.

In de tussentijd is voor het overlapgebied van IJVD en Rijntakken nagegaan welke termen belangrijk worden als aandrijvende krachten van het fysische systeem: scheefstand en opzet door wind en afvoer door rivieren. Dit bepaalt de balans van de verschillende termen in de aanpak van de modellering (met bijbehorende aspecten als roosteraanpak en vereiste nauwkeurigheid). Deze modelaanpak voor het overlapgebied is afgerond [10] en het deelmodel van het IJsselmeer zal hier later op aangesloten moeten worden.

Op het ogenblik loopt er een ander traject om de zesde-generatie modelschematisatie van de Overijssels Vecht Delta ten oosten van de Ramspolkering te realiseren. Als die beschikbaar is zal ook hier op aangesloten moeten worden. Tevens kan dan het effect van sluiten en openen van de Ramspolkering in een modelsimulatie mogelijk gemaakt worden.

#### 4.2.5 Aansluiting bij Waddenzee

De aansluiting bij de Waddenzee is nog niet bepaald. Nagegaan dient te worden in hoeverre een aansluiting op roosterniveau wel realiseerbaar is (voor relevante processen en doelvariabelen per specifieke toepassing). Het wel of niet spuien is afhankelijk van het effect van getij en wind op de waterstand aan de kant van de Waddenzee en het effect van wind en (voornamelijk IJssel) afvoer aan de kant van het IJsselmeer. Hierbij is ook de vraag hoe de werking van de spuisluisen in de Afsluitdijk en Ramspolkering met de nieuwe D-HYDRO software aangestuurd moet worden. Voor zout/chloride verspreiding speelt zowel zoutindringing aan de kant van het IJsselmeer als het effect van een zoetwaterbel aan de kant van de Waddenzee. Deze wisselwerking is nog niet meegenomen: nu worden ingeschatte randvoorwaarden opgelegd bij de sluisen in de Afsluitdijk.

### 4.3 Bodemruwheid

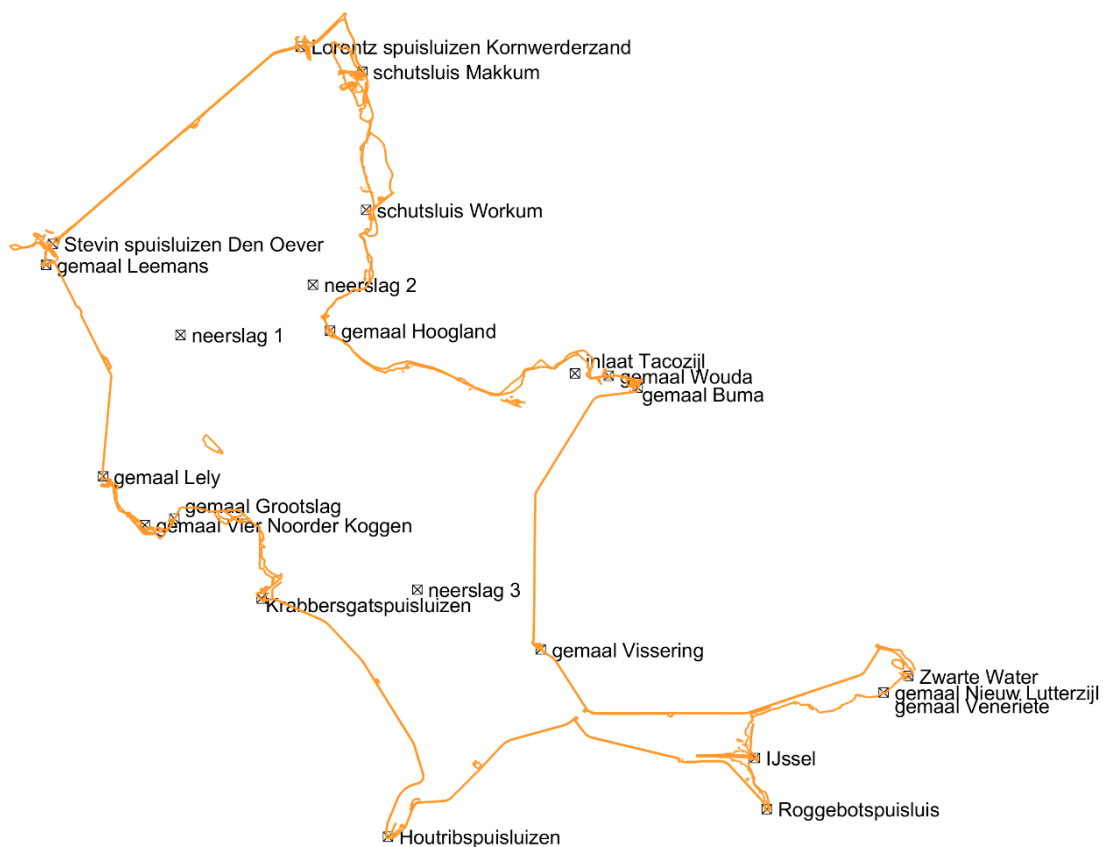
In het vijfde-generatie WAQUA model [3, 4] wordt gebruik gemaakt van een ruimtelijk variërende bodemruwheid. Echter, in het IJsselmeer is de bodemruwheid vrijwel uniform en kan er in 3D nog geen gebruik gemaakt worden van trachytopen in de D-Flow FM software. Daarom is tijdens het bepalen van de modelperformance voor waterstanden in 2DH nagegaan dat volstaan kan worden met een uniforme bodemruwheid met een Manning waarde van  $0.0263 \text{ [s/m}^{1/3}]$ . Voor de historie achter deze waarde in het IJsselmeer zie [6, sectie E.1]. Er is niet recent naar typische ruwheidswaarden voor het IJsselmeer gekeken en historische toepassingen betreffen voornamelijk diepte gemiddelde modellen met WAQUA. (Zie ook de beschouwing in [6, sectie 5.1.2] voor het Markermeer, let hierbij op dat de bodem van het IJsselmeer vooral zandig is terwijl die van het Markermeer leem en klei bevat.)

### 4.4 Waterstanden in 2DH

Zoals in de inleiding van dit hoofdstuk gemeld hangen de op te leggen randvoorwaarden af van de beschouwde simulatieperiode. In deze sectie worden alleen die randvoorwaarden besproken die nodig zijn voor de eerste beoordeling van het model in 2DH op waterstanden. Merk hierbij wel op dat ruimtelijke locaties van deze randvoorwaarden herbruikbaar en uitbreidbaar zijn voor andere simulatieperioden en toepassingen.



Figuur 4.21 Locaties van gebruikte observatiestations voor vergelijking met waterstanden.



Figuur 4.22 Locaties van gebruikte bron-/puttermen voor modelleren stroming in/uit modelgebied voor eerste bepaling modelperformance met stormperiode januari 2007.

#### 4.4.1 Lateralen en kunstwerken

De lateralen voor de stormperiode in januari 2007, de bron-/puttermen voor het meenemen van de stroming in/uit (lozing in/onttrekking uit) het modelgebied, zijn direct overgenomen uit de vijfde-generatie modelschematisatie WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 van IJVD [3, 4] (zie o.a. Tabel 5.3 in [3]). De ruimtelijke locaties hiervan zijn weergegeven in Figuur 4.22 en zijn aangescherpt met behulp van de website <https://www.gemalen.nl> en Google Earth.<sup>5</sup>

Het deelmodel van het IJsselmeer bestrijkt niet het hele IJVD gebied. Daarom zijn gegevens en berekeningen van het WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 model<sup>6</sup> voor de stormperiode in januari 2007 gebruikt om debietrandvoorwaarden af te leiden voor:

- a) de aansluiting van de Waddenzee op het IJsselmeer via de Stevin spuisluizen bij Den Oever,
- b) de aansluiting van de Waddenzee op het IJsselmeer via de Lorentz spuisluizen bij Kornwerderzand,
- c) de aansluiting van de IJssel op het Ketelmeer en
- d) de aansluiting van Zwarte Water op Zwarte Meer.

Ook deze zijn geïmplementeerd in het model als bron-/puttermen. Maar nu wel met meer dan één punt per locatie om de lozing/onttrekking beter over de lengte van het kunstwerk/de riviermonding te verdelen. Merk op dat c) en d) ook als debietrandvoorwaarde opgelegd hadden kunnen worden: het debiet wordt dan automatisch over de breedte van de opening verdeeld.

##### *Implementatie van a) en b)*

In eerste instantie is voor de Stevin spuisluizen bij Den Oever de lozing/onttrekking evenredig verdeeld over 15 punten met één punt per spuikoker (zie Figuur 4.23). Dit om in het model per spuikoker apart het spuidebiet op te kunnen leggen (in de praktijk variëren de spuidebieten ook per spuikoker). Voor de Lorentz spuisluizen bij Kornwerderzand waren dat in eerste instantie 10 punten, ook met één punt per spuikoker (zie Figuur 4.25). Naar aanleiding van de eerste modelbeoordeling voor zoutverspreiding in 3D (zie sectie 4.5.1) is de te hanteren modelaanpak met de huidige software zo goed als mogelijk verbeterd. De afvoer wordt nu verdeeld over drie puttermen per spuikoker in plaats van één. Figuur 4.24 en 4.26 laten zien hoe deze puttermen respectievelijk bij Den Oever en Kornwerderzand zijn aangebracht<sup>7</sup>. Dit is een voorlopige oplossing ("work around"), zie verder sectie 4.5.1.

##### *Implementatie van c) en d)*

Voor de IJssel zijn 7 punten gebruikt (zie Figuur 4.27) en voor het Zwarte Water 4 (zie Figuur 4.28).

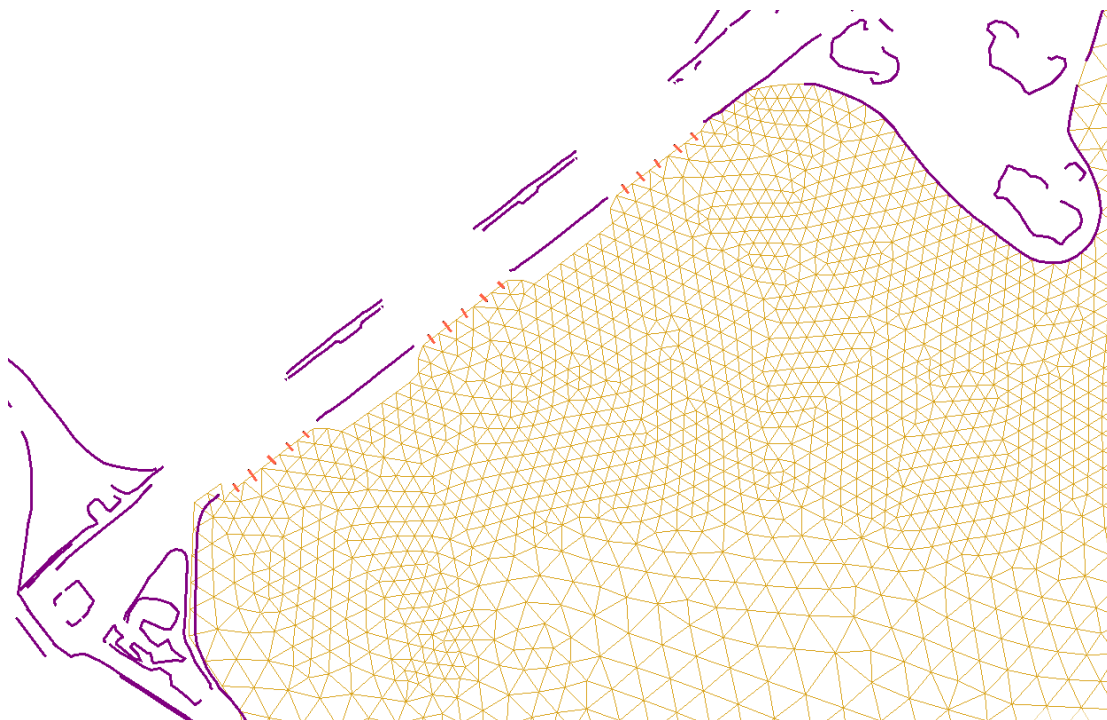
Figuur 4.29 laat van de gebruikte lateralen voor de stormperiode in januari 2007 de grootste lozingen/onttrekkingen zien. Figuren 4.30 en 4.31 de wat kleinere lozingen. Zeer kleine lozingen voor deze periode zijn te zien in Figuur 4.32.

---

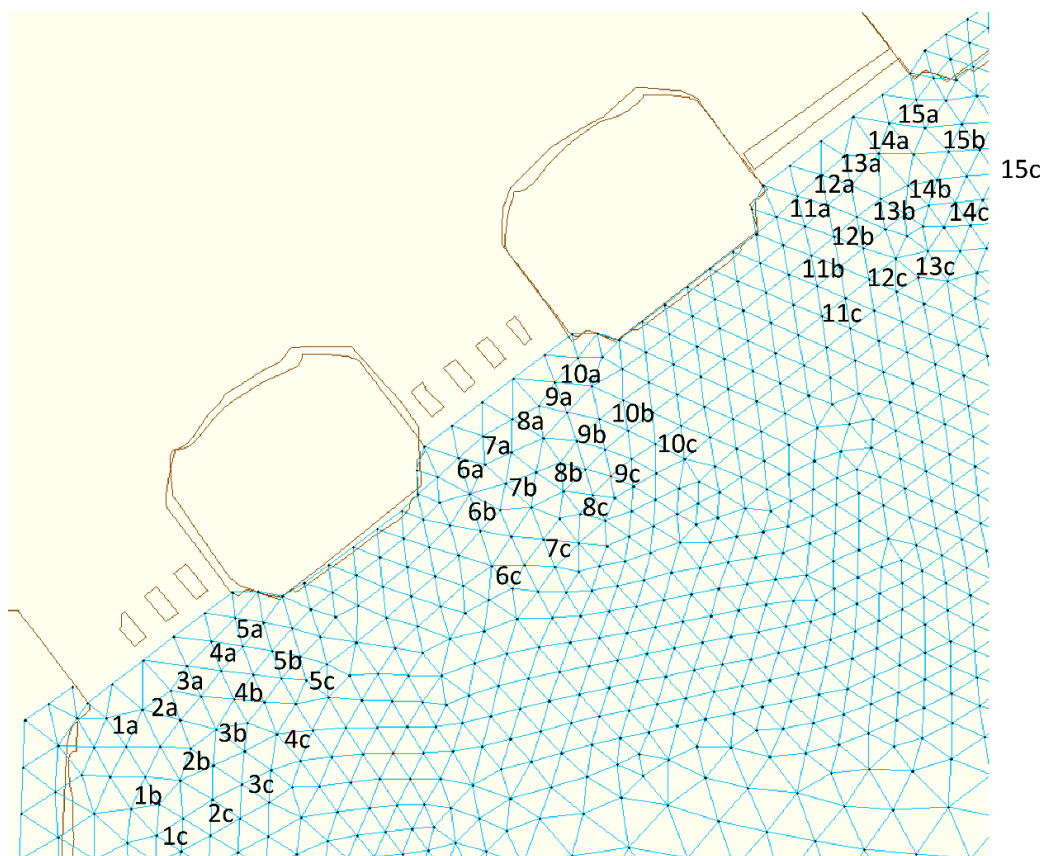
<sup>5</sup>Alle lateralen, bron-/puttermen zijn gericht van het buitengebied naar het binnengebied van het model. De (meest waarschijnlijke) locatie waar het water vandaan komt uit buitengebied zit daarvoor als eerste Rijksdriehoekcoördinaat in het bijbehorende "pli" bestand van de modelinvoer. De locatie waar het water het binnengebied inkomt als tweede Rijksdriehoekcoördinaat. Dit betekent dat water dat het model instroomt (bijvoorbeeld aanvoer vanaf de IJssel) een positief teken heeft in de tijdreeks met debieten in het bijbehorende "tim" bestand van de modelinvoer. Uitstromend water (bijvoorbeeld door spuien bij de Afsluitdijk) heeft een negatief teken.

<sup>6</sup> Het rekenrooster van het WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 model is relatief grof bij de spuisluizen in de Afsluitdijk. Uit pragmatische overwegingen is gekozen voor deze aanpak, bij verdere verbetering van dit (deel)model moet nagegaan worden of dit anders/beter kan worden aangepakt.

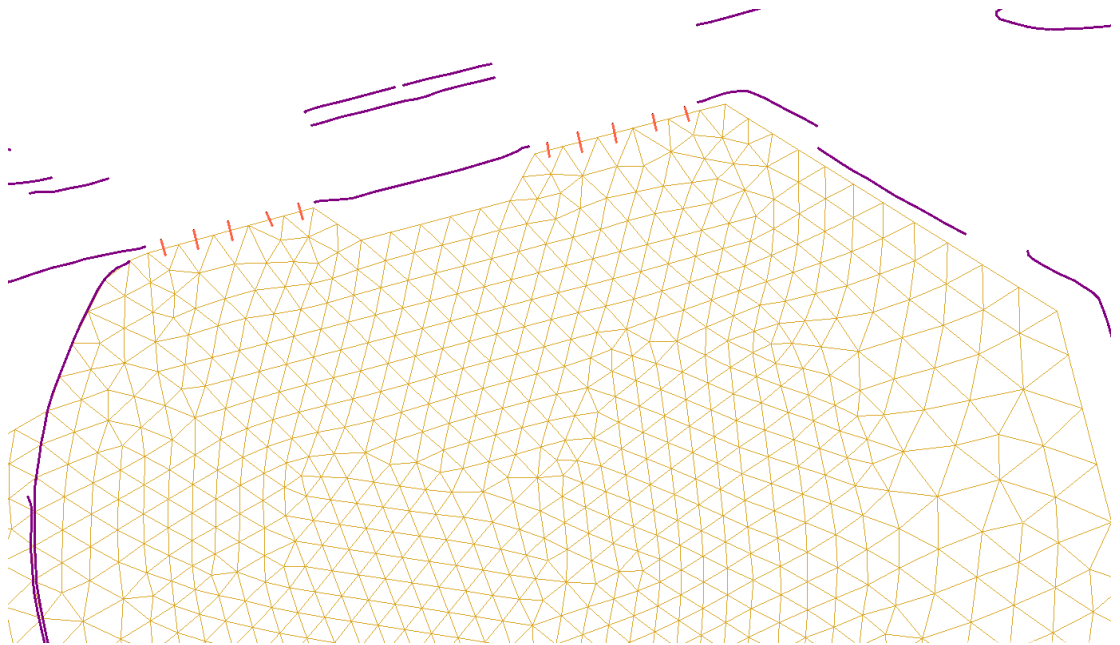
<sup>7</sup> De nummering komt overeen met de nummering van de pli en tim bestanden van de modelinvoer bestanden.



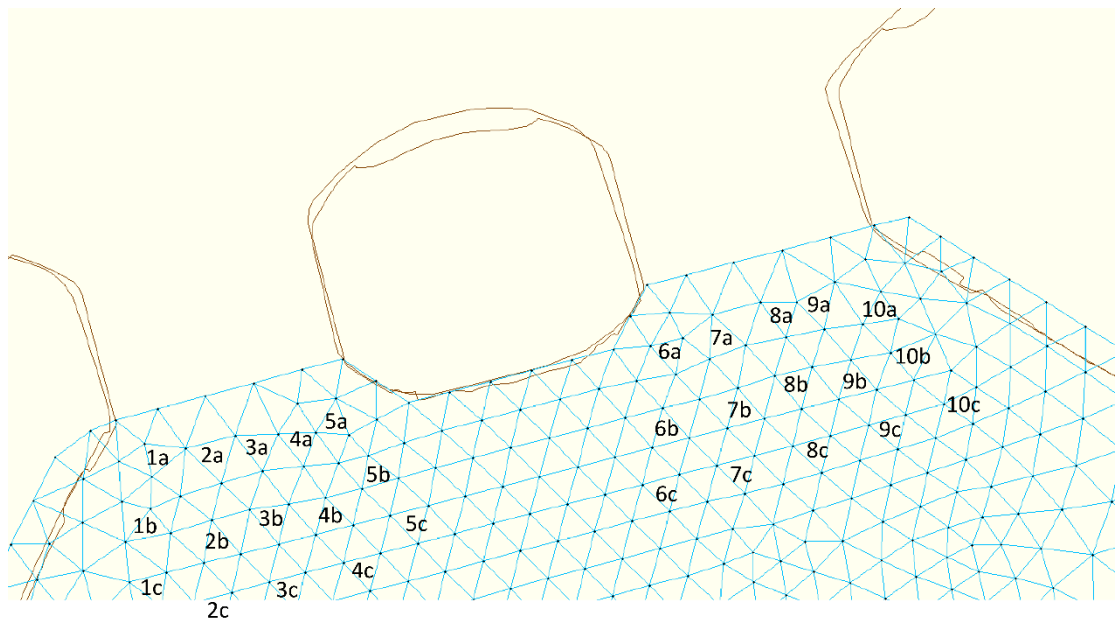
*Figuur 4.23 In eerste instantie gebruikte locaties van bron-/puttermen (oranje lijnstukjes) in rooster (gele driehoeken) voor modelleren in-/uitstroom door individuele kokers van Stevinspuisluizen bij Den Oever voor eerste bepaling modelperformance met stormperiode januari 2007 (in paars de zogenaamde “fixed weirs” zoals weergegeven in Delta Shell).*



*Figuur 4.24 Uiteindelijk gebruikte locaties van puttermen voor spuisluizen bij Den Oever.*



*Figuur 4.25 In eerste instantie gebruikte locaties van bron-/puttermen (oranje lijnstukjes) in rooster (gele driehoeken) voor modelleren in-/uitstroom door individuele kokers van Lorentzspuisluizen bij Kornwerderzand voor eerste bepaling modelperformance met stormperiode januari 2007 (in paars de zogenaamde "fixed weirs" zoals weergegeven in Delta Shell).*

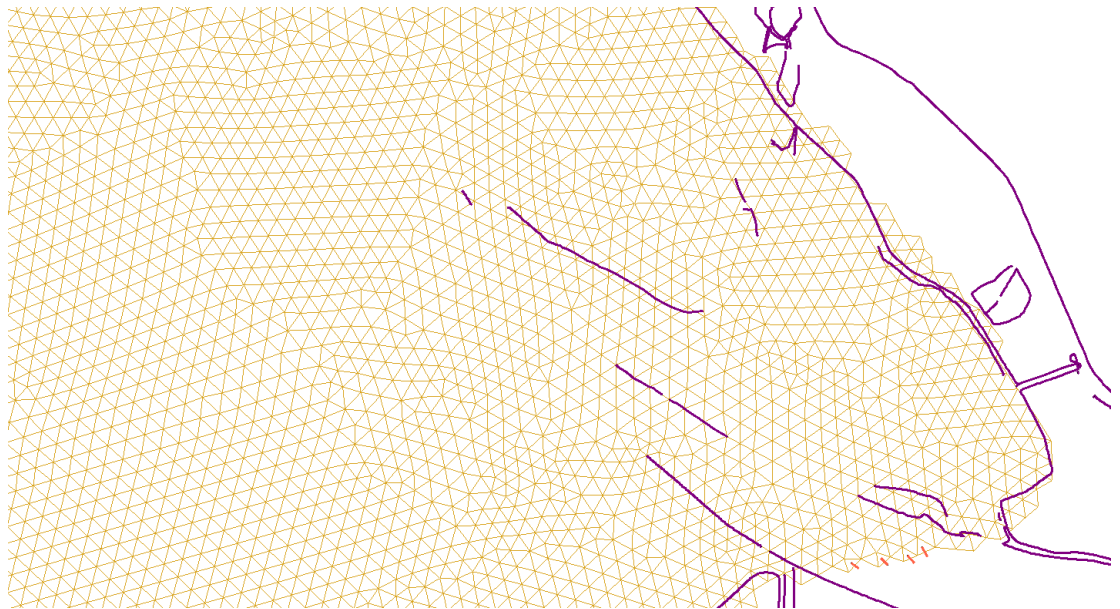


*Figuur 4.26 Uiteindelijk gebruikte locaties van puttermen voor spuisluizen bij Kornwerderzand.*

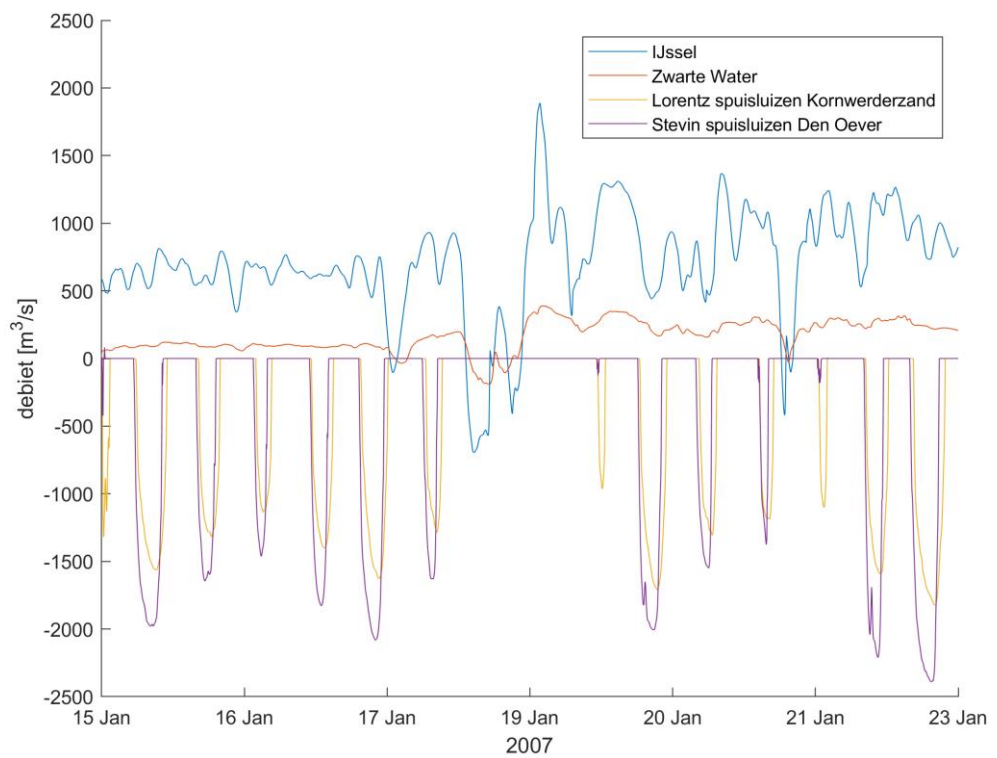




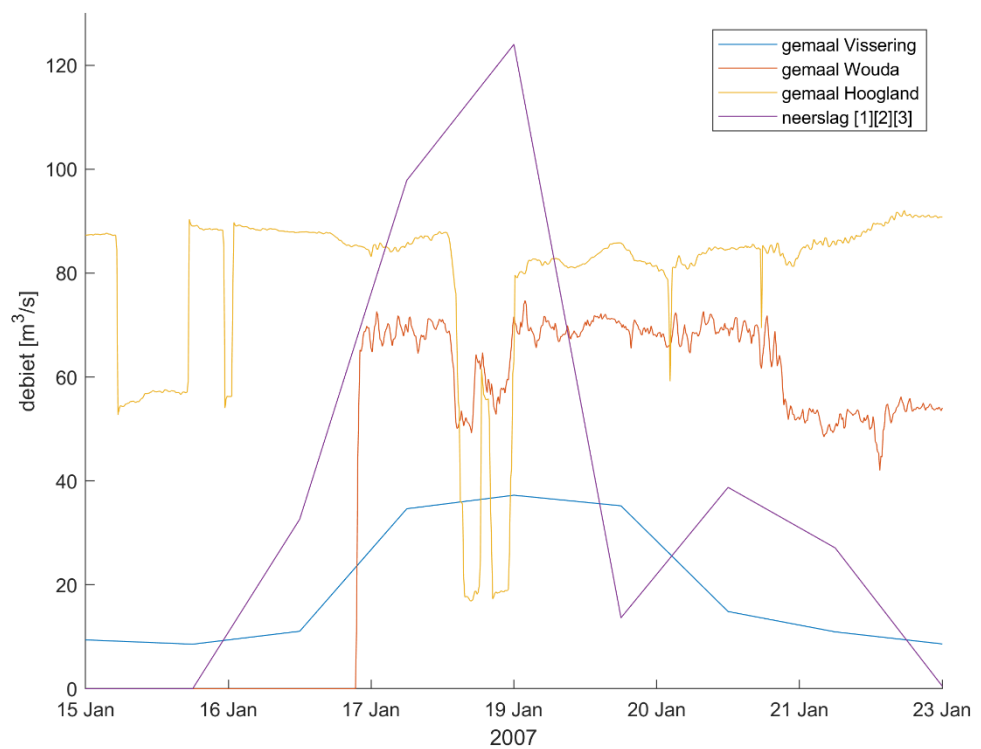
Figuur 4.27 Locaties van bron-/puttermen (oranje lijnstukjes) in rooster (gele driehoeken) voor modelleren in-/uitstroom IJssel in Ketelmeer (in paars de zogenaamde “fixed weirs” zoals weergegeven in Delta Shell).



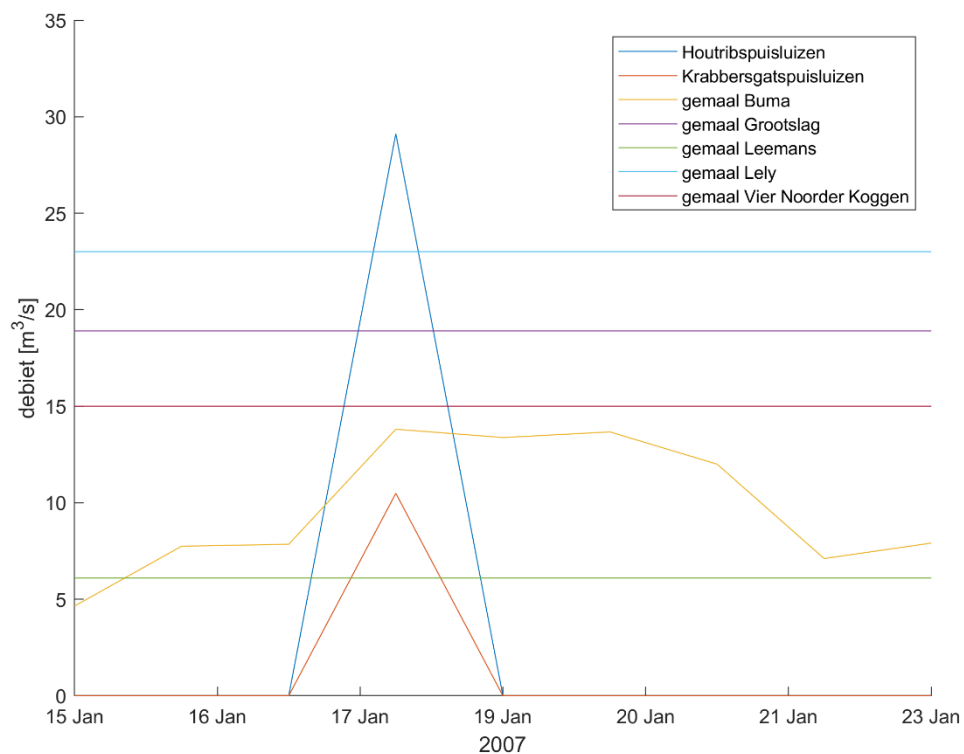
Figuur 4.28 Locaties van bron-/puttermen (oranje lijnstukjes) in rooster (gele driehoeken) voor modelleren in-/uitstroom Zwarte Water in Zwarte Meer (in paars de zogenaamde “fixed weirs” zoals weergegeven in Delta Shell).



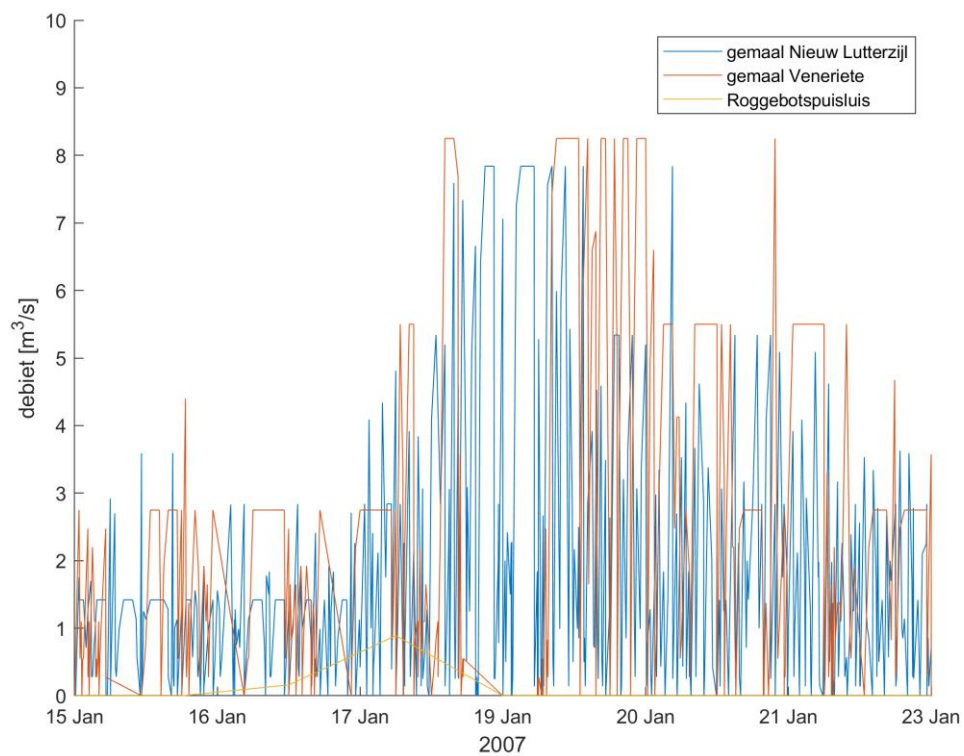
Figuur 4.29 Bron-/puttermen met grootste lozingen/onttrekkingen gedurende stormperiode januari 2007.



Figuur 4.30 Brontermen met kleinere lozingen gedurende stormperiode januari 2007.

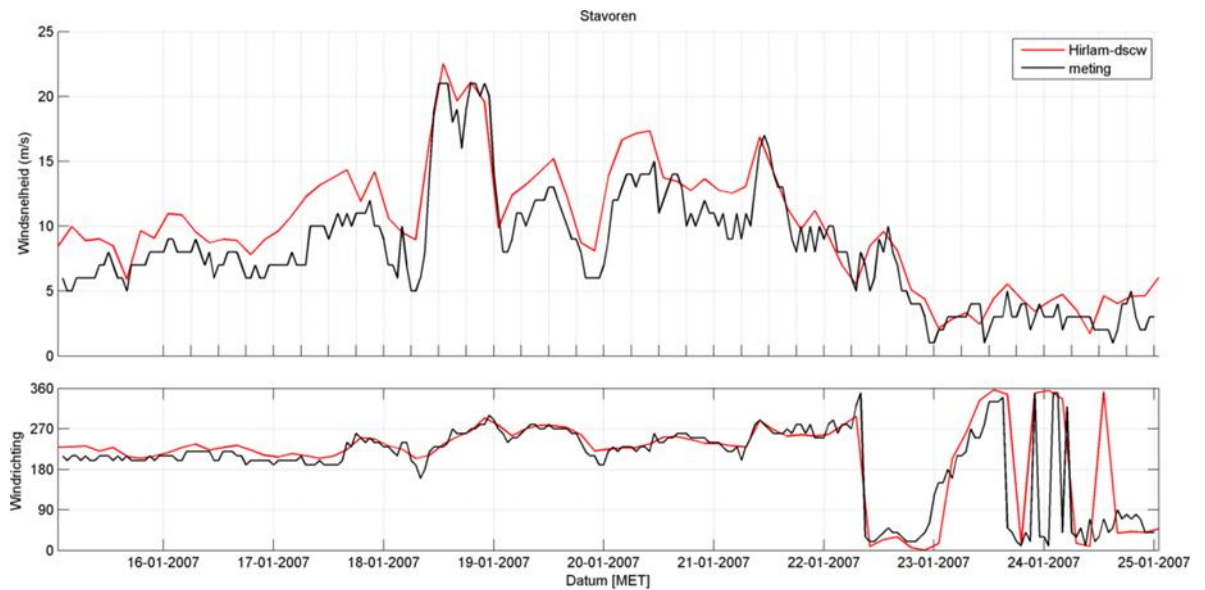


Figuur 4.31 Brontermen met kleinere lozingen gedurende stormperiode januari 2007.



Figuur 4.32 Brontermen met zeer kleine lozingen gedurende stormperiode januari 2007.

#### 4.4.2 Wind



Figuur 4.33 Windverloop tijdens de stormperiode van januari 2007, zoals gemeten door het KNMI bij Stavoren en zoals berekend met HIRLAM11-downscaling (Figuur uit [4]).

Voor de windforcering wordt gebruikt gemaakt van een uniforme wind uit [4]. Ook de windschuifspanningscoëfficiënten zijn overgenomen uit WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1, zie de instellingen voor de parameters Cdbreakpoints en Windspeedbreakpoints in Bijlage A. Omdat eerder voor het WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 model vooral ruimtelijke variërende wind is gebruikt (met HIRLAM11-downscaling wind, zie Figuur 4.33) zijn tijdens het bepalen van de modelperformance zowel uitkomsten hiervan als uitkomsten van WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 met uniforme wind vergeleken met uitkomsten van het nieuwe D-Flow FM model met uniforme wind. Dit is gedaan om het gebruik van een uniforme wind in het D-Flow FM model te onderbouwen.

#### 4.4.3 Initiële condities

De initiële waterstand voor het D-Flow FM (deel)model is verkregen door het exporteren van de initiële waterstand van het WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 model uit [3, 4] naar xyz samples. Door een veranderde ruimtelijke schematisatie van geometrie en diepte in het rekenrooster kan dit tot een enigszins andere initiële verdeling van de waterstand leiden.

### 4.5 Zoutverspreiding in 3D

Er is een leidend principe gehanteerd dat data voor de randvoorwaarden komt van 1) beheerder die verantwoordelijk is voor deelgebied, of indien niet beschikbaar of onvoldoende bruikbaar van 2) balans aanpak, of indien niet beschikbaar of onvoldoende bruikbaar van 3) andere bron.

#### 4.5.1 Lateralen en kunstwerken

In de loop van 2019 is door RWS-WVL en de waterschappen rondom het IJsselmeer data aangeleverd voor debieten (zie overzicht in Tabel 4.1) en chloride/zoutwaarden (zie overzicht in Tabel 4.2). Deze ruwe data moest nog omgezet worden naar een handzaam formaat<sup>8</sup>. Met de MATLAB scripts uit Bijlage F zijn hiermee randvoorwaarden gegenereerd. Uitgangspunt hierbij is een sluitende waterbalans als bouwsteen voor de modelbouw.

<sup>8</sup> Dit betreft ook de conversie van chloride naar saliniteit (en andersom): D-Flow FM rekent in saliniteit. Zie het MATLAB script in sectie F.1, de hier gebruikte conversie is gebaseerd op [12].

Daartoe berekent het MATLAB script `make_balance.m` wat het cumulatieve effect is van al deze lozingen/onttrekkingen op de gemiddelde waterstand. Dit is gecorrigeerd met het meerpeil (op basis van gemeten waterstanden), de resterende sluitterm is vervolgens opgelegd als neerslag/verdamping<sup>9</sup>. Nagegaan is dat deze sluitterm in de droogte periode overeenkomt met een dagelijkse verdamping in de orde van millimeters, wat ook in werkelijkheid is waargenomen.

Tabel 4.1 Overzicht van aangeleverde debieten.

RWS-WVL	Waterschap Zuiderzeeland	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	Wetterskip Fryslân	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Houtribspuisluis IJsselmeer naar Markermeer	gemaal Buma	gemaal Grootslag	Hooglandgemaal	gemaal Kostverlorenzijl
Houtribspuisluis Markermeer naar IJsselmeer	gemaal Colijn hoog		inlaat Makkum	in-/uitlaat Meppelerdiep
Krabbersgatspuisluis IJsselmeer naar Markermeer	gemaal Colijn laag		inlaat Taczijl	gemaal Roggebot
Krabbersgatspuisluis Markermeer naar IJsselmeer	gemaal Vissering		inlaat Teroelsterkolk	gemaal Stroink
spuisluizen Kornwerderzand			inlaat Workum	
IJssel bij Olst			Woudagemaal	
spuisluizen Den Oever				

Tabel 4.2 Overzicht van aangeleverde chloride/zoutwaarden.

Waterschap Zuiderzeeland	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	Wetterskip Fryslân	Waterschap Drents Overijsselse Delta
gemaal Buma	gemaal Grootslag	Hooglandgemaal	gemaal Kostverlorenzijl
gemaal Colijn hoog		Woudagemaal	in-/uitlaat Meppelerdiep
gemaal Colijn laag			gemaal Roggebot
gemaal Vissering			gemaal Stroink

De ruimtelijke locaties van de gebruikte bron-/puttermen zijn weergegeven in Figuur 4.35, hiervoor zijn die uit sectie 4.4.1 aangevuld en aangescherpt met behulp van de website <https://www.gemalen.nl> en Google Earth.

<sup>9</sup> Dit is nu geïmplementeerd door drie separate lozingen/onttrekkingen in het IJsselmeer zoals eerder ook in WAQUA gedaan (op de locaties neerslag 1, neerslag 2 en neerslag 3 in Figuur 4.35). Bij neerslag heeft dit een lokaal effect op de berekende chloride/zoutconcentraties: het lijkt alsof er lokaal een zoetwaterlozing optreedt. In een volgende iteratie zal dit verbeterd moeten worden in het model, bijvoorbeeld door een evenredige verspreiding over het gehele modelgebied.

Zoals al aangegeven in sectie 4.4.1 is tijdens het bepalen van de modelperformance voor zoutverspreiding de implementatie bij Den Oever en Kornwerderzand verbeterd. Bij hogere afvoer bleken rekencellen geregeld leeg te komen staan waardoor niet het volledig opgelegde volume op dat moment afgevoerd kon worden. Hierdoor steeg het meerpeil op basis van de berekende waterstanden met bijna een meter aan het einde van de simulatie ten opzichte van het verwachte meerpeil (op basis van gemeten waterstanden). Daarom is als voorlopige oplossing (“work around”) de afvoer verdeeld over drie puttermen per spuiwerker. Let op dat dit effect, maar dan in veel mindere mate nog kan optreden, zie bijvoorbeeld de Figuur G.1 t/m G.4 in bijlage G na de eerste week in december.

Op dat moment wordt voor een vrij lange aaneengesloten periode veel water afgevoerd door de spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand (zie Figuur 4.36). Om dit effect nog verder te verminderen kan als workaround overwogen worden nog een of twee extra rijen met puttermen te gebruiken (met in totaal dan vier of vijf puttermen verdeeld over vier of vijf aparte rekencellen in een lijn gelegd in het verlengde achter elke spuiwerker zoals in Figuur 4.24 en 4.26).

Ook bleek dat in het model de schutsluis van Makkum op een ondiepe locatie lag. Dit is voorlopig opgelost door deze te verleggen naar de ingang van het Makkumerdiep in het IJsselmeer. Op een later moment zal de diepte in het model voor het Makkumerdiep verbeterd moeten worden.

Figuur 4.36 laat van de aangeleverde debieten (Tabel 4.1) de grote lozingen/onttrekkingen zien tussen juni en december 2018. Figuren 4.37 en 4.38 de kleinere lozingen. Zeer kleine lozingen/onttrekkingen voor deze periode zijn te zien in Figuur 4.39.

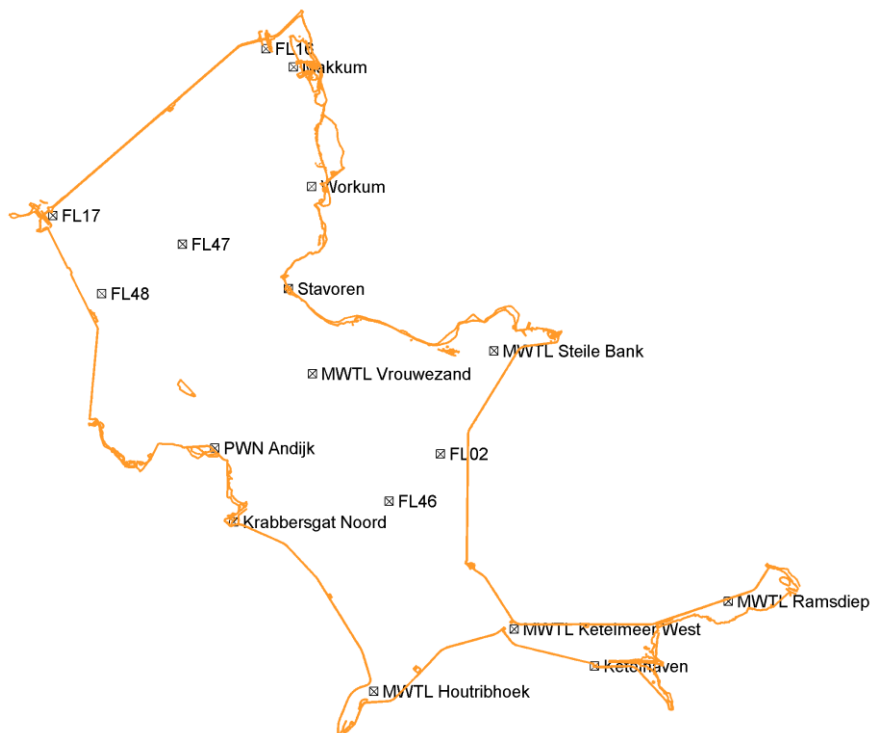
Tevens zijn door RWS-WVL geschatte lozingen/onttrekkingen van lek door schut- en spuisluizen en hevels in de putten bij Den Oever en Kornwerderzand meegenomen, zie Figuur 4.40.

Figuur 4.41 toont de grotere bijdragen aan chloride/zout van deze lozingen/onttrekkingen tussen juni en december 2018. Dit is een combinatie van de aangeleverde gegevens (zie overzicht in Tabel 4.1 en 4.2) en schattingen. Grote bijdragen staan in Figuur 4.42 en kleinere bijdragen in Figuur 4.43. Figuur 4.44 toont de totale som van al deze bijdragen aan chloride/zout van lozingen/onttrekkingen IJsselmeer tussen juni en december 2018. De volgende schattingen en aannamen zijn daarvoor i.o.m. Yann Friocourt van RWS gebruikt:

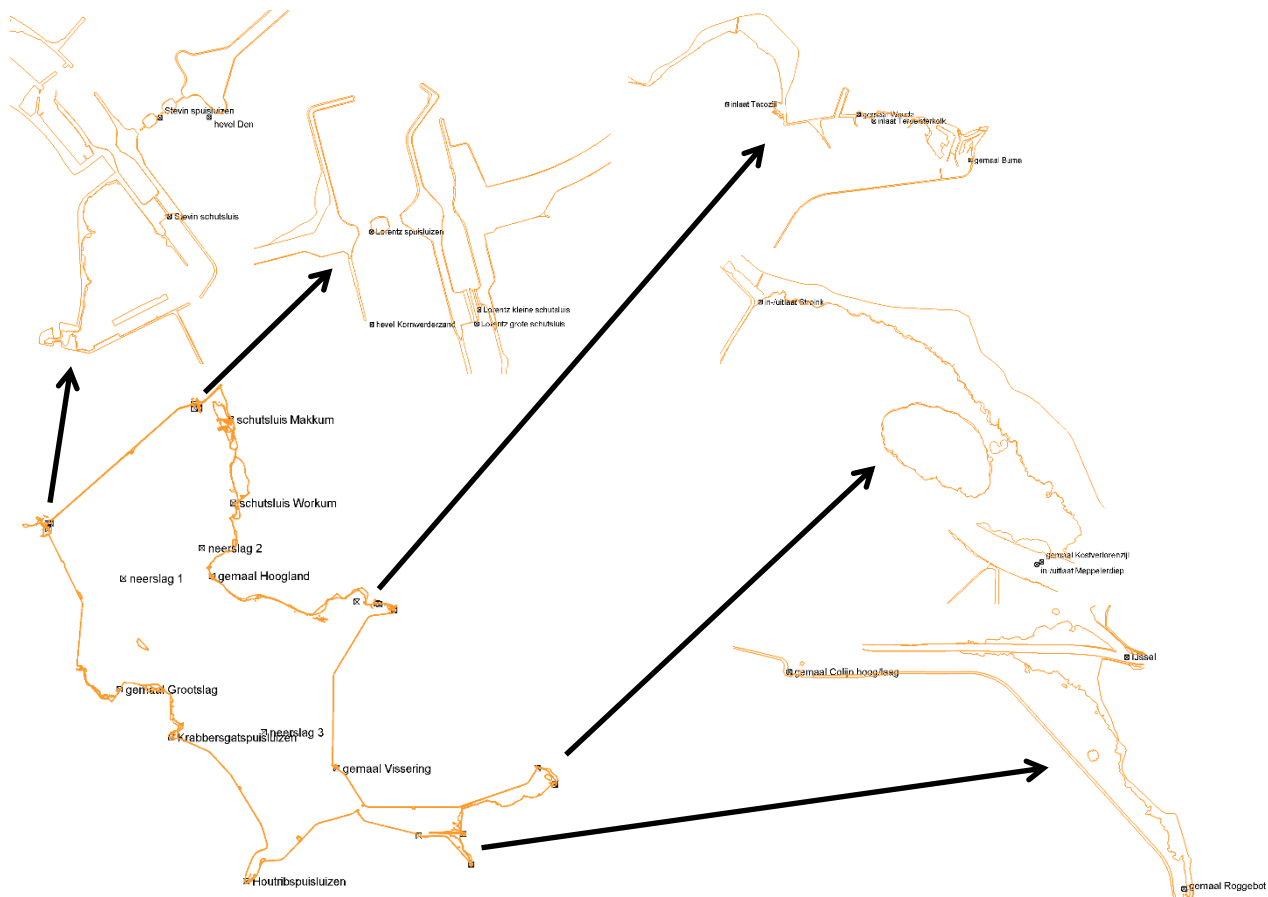
1. achtergrondzoutgehalten van de putten zijn hetzelfde als het achtergrondzoutgehalte in de Waddenzee,
2. lek vanuit Waddenzee in schutsluizen:
  - tot 1 oktober 2018 (zomer situatie):
    - Kornwerderzand groot: 25 kg/s,
    - Kornwerderzand klein: 10 kg/s,
    - Den Oever: 20 kg/s,
  - van 1 december 2018 tot 1 januari 2019 (winter situatie):
    - Kornwerderzand groot: 15 kg/s,
    - Kornwerderzand klein: 5 kg/s,
    - Den Oever: 10 kg/s,
  - tussen 1 oktober 2018 en 1 december 2018:
    - lineaire interpolatie van zomer en winter situatie,

3. lek vanuit Waddenzee in spuisluizen:  
continue lek met
- tot 26 augustus 2018 kleine openingen bij bodem Kornwerderzand en deuren enkel gesloten,
    - zoutlek Kornwerderzand =  $41 + 6$  kg/s,
    - zoutlek Den Oever = 15 kg/s,
  - van 26 augustus 2018 tot 18 september 2018 kleine openingen bij bodem Kornwerderzand en deuren dubbel gesloten,
    - zoutlek Kornwerderzand =  $26 + 4$  kg/s,
    - zoutlek Den Oever = 10 kg/s,
  - vanaf 18 september 2018 geen kleine openingen meer bij bodem Kornwerderzand
    - zoutlek Kornwerderzand = 7 kg/s,
    - zoutlek Den Oever = 10 kg/s,
4. hevels in putten vlakbij spuisluizen:
- tot 1 september 2018 structureel transport van hevels
    - Kornwerderzand = - 2 kg/s,
    - Den Oever = -2 kg/s,
  - vanaf 1 september 2018 zijn er noodpompen geplaatst op de hevels waardoor de transport capaciteit is verdrievoudigd
    - Kornwerderzand = -6 kg/s,
    - Den Oever = -6 kg/s,
  - vanaf 13 december 2018 wordt aangenomen dat weer het gewone structurele transport regiem van de hevels geldt
    - Kornwerderzand = -2 kg/s,
    - Den Oever = -2 kg/s.

(Zie ook MATLAB script make\_balance.m in Bijlage F.)

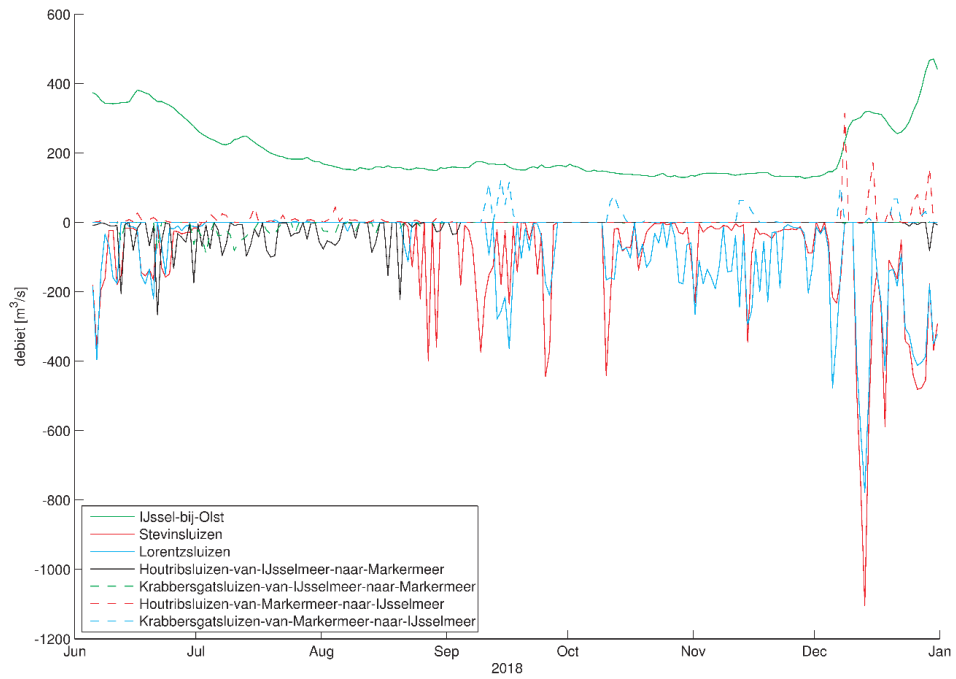


*Figuur 4.34 Locaties van gebruikte observatiestations voor chloride voor vergelijking zoutverspreiding.*

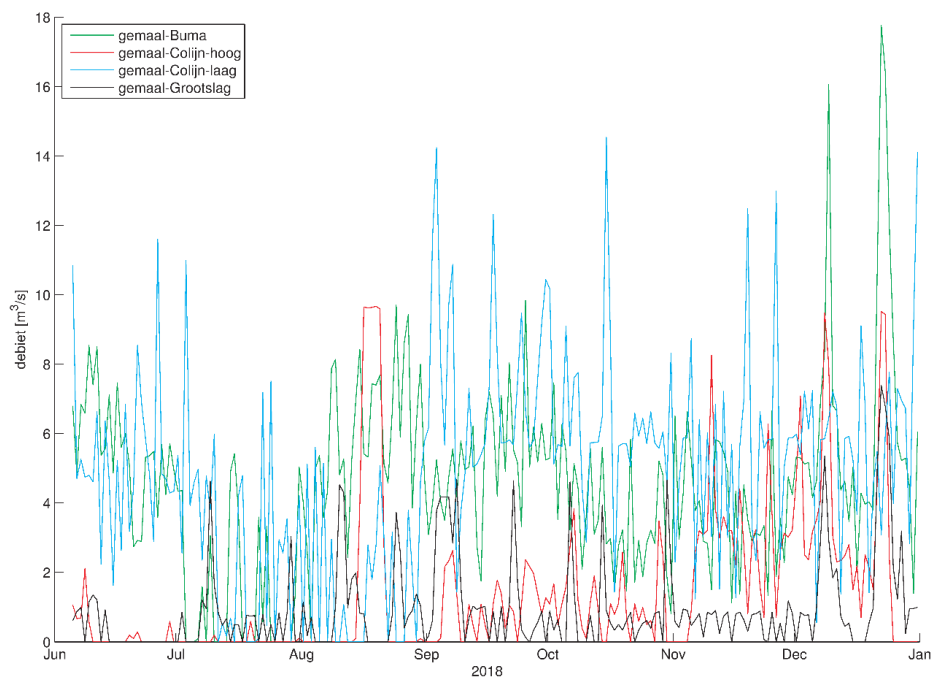


*Figuur 4.35 Locaties van gebruikte bron-/puttermen voor modelleren stroming in/uit modelgebied voor eerste bepaling modelperformance van zoutverspreiding tijdens de droogteperiode 2018.*

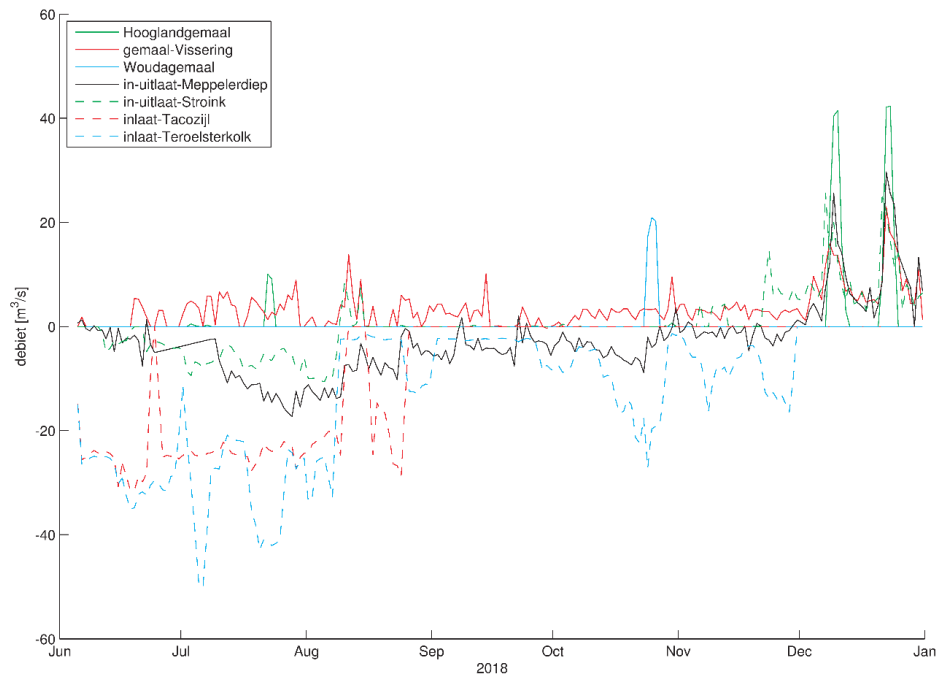




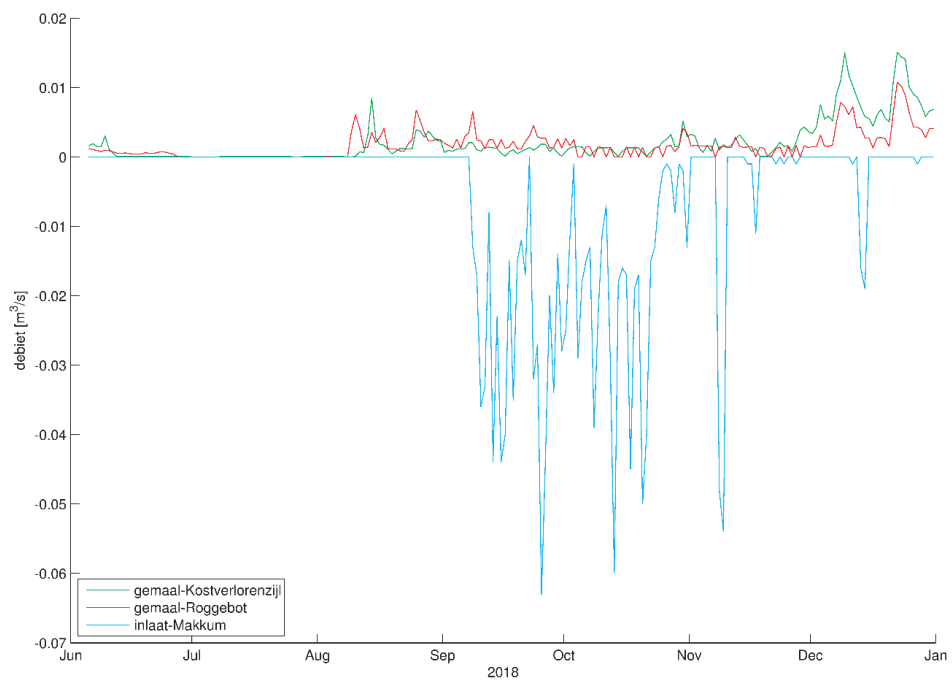
Figuur 4.36 Grote lozingen/onttrekkingen oppervlaktewater in IJsselmeer tussen juni en december 2018.



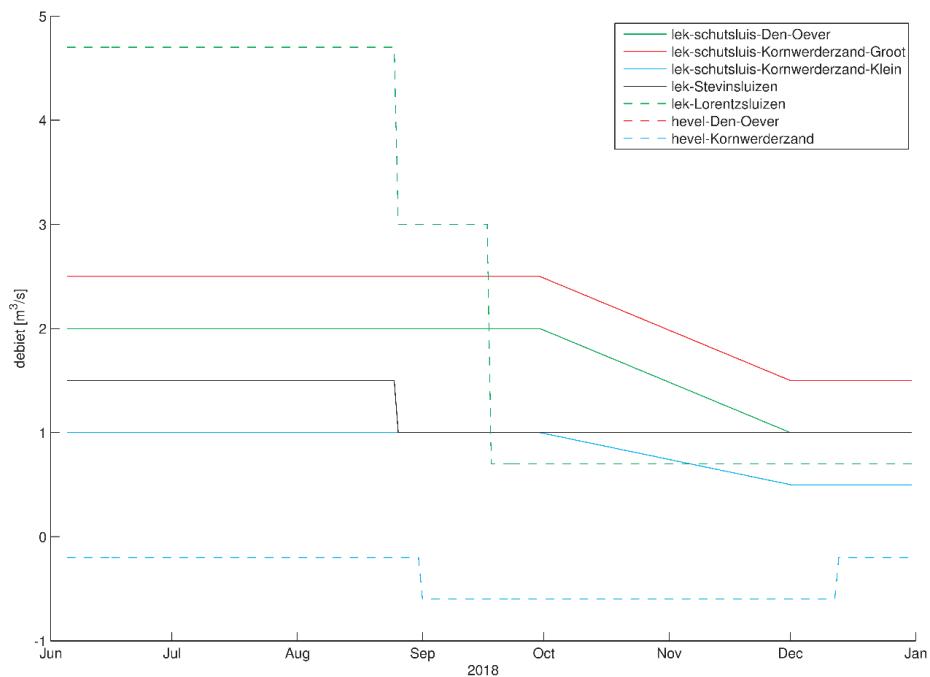
Figuur 4.37 Kleinere lozingen oppervlaktewater in IJsselmeer tussen juni en december 2018.



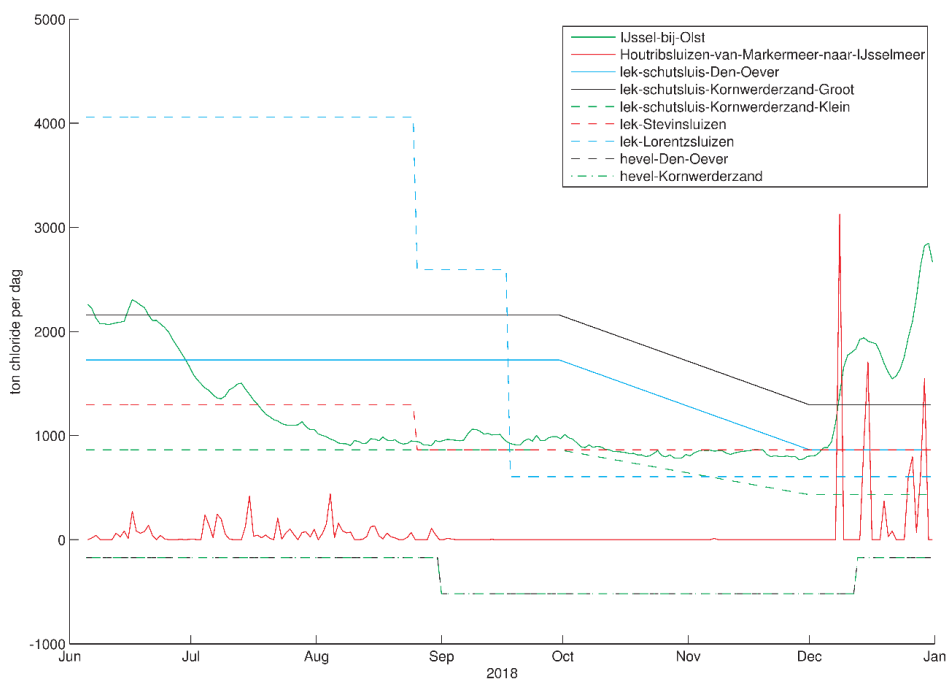
Figuur 4.38 Kleinere lozingen/onttrekkingen oppervlaktewater in IJsselmeer tussen juni en december 2018.



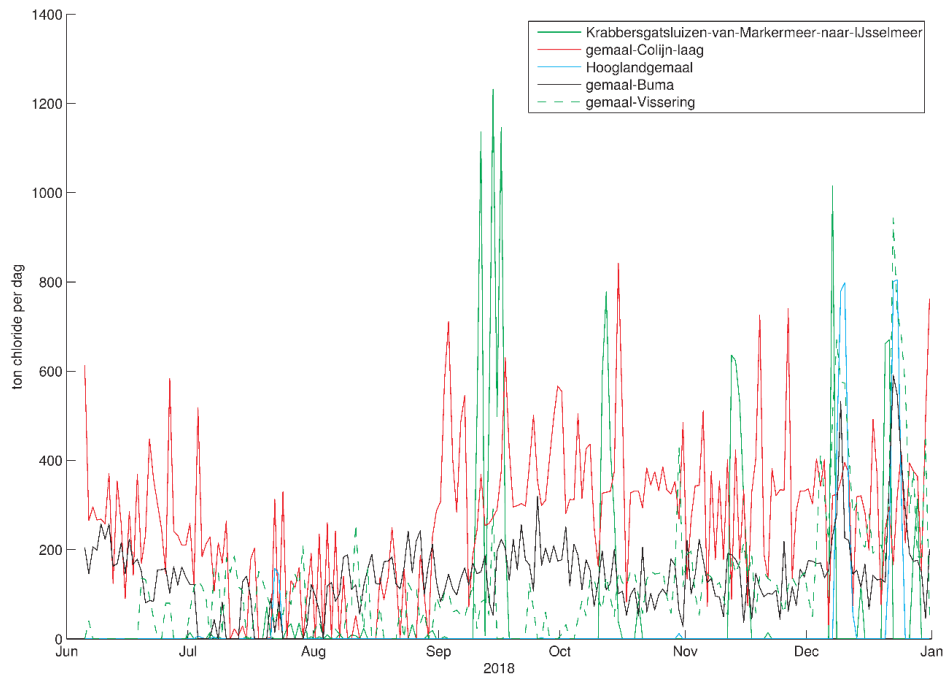
Figuur 4.39 Zeer kleine lozingen/onttrekkingen oppervlaktewater in IJsselmeer tussen juni en december 2018.



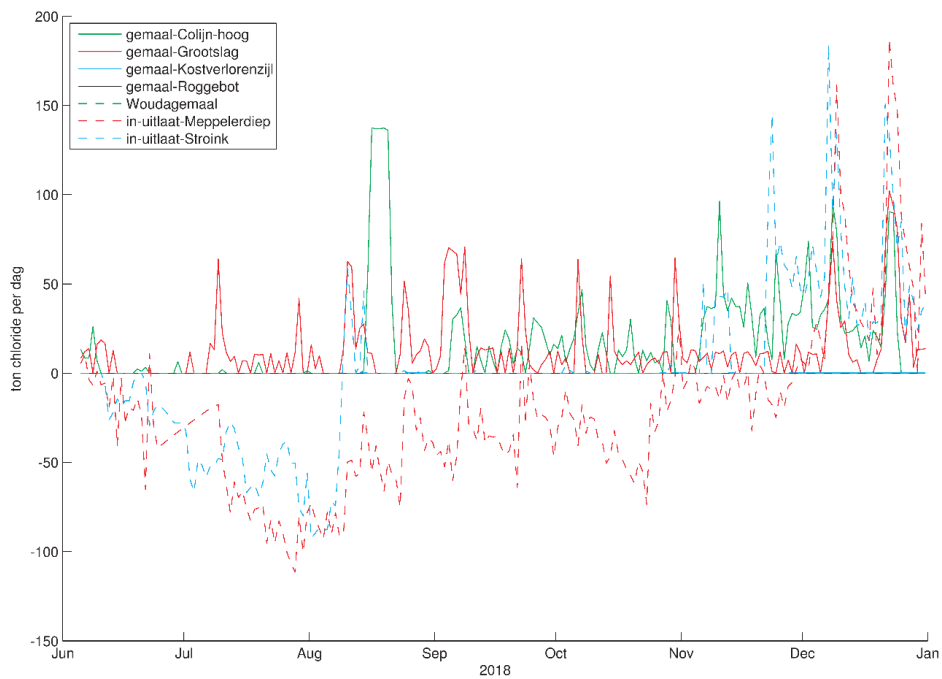
Figuur 4.40 Geschatte lozingen/onttrekkingen oppervlaktewater bij Afsluitdijk in IJsselmeer tussen juni en december 2018.



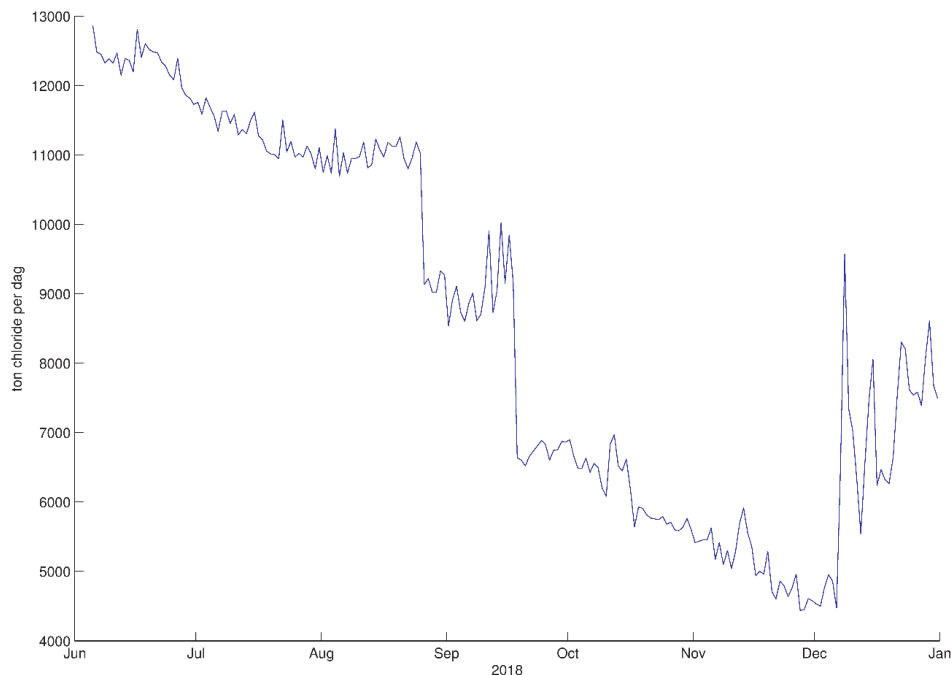
Figuur 4.41 Grotere bijdragen aan chloride/zout van lozingen/onttrekkingen IJsselmeer tussen juni en december 2018.



Figuur 4.42 Grote bijdragen aan chloride/zout van lozingen/onttrekkingen IJsselmeer tussen juni en december 2018.



Figuur 4.43 Kleinere bijdragen aan chloride/zout van lozingen/onttrekkingen IJsselmeer tussen juni en december 2018.



Figuur 4.44 Totale som van bijdragen aan chloride/zout van lozingen/onttrekkingen IJsselmeer tussen juni en december 2018.

#### 4.5.2 Wind

Voor de wind is voor de eerste opzet van het model voor zoutverspreiding gebruik gemaakt van metingen van KNMI voor station 235 - De Kooy (verkregen via <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens>). Zie Figuur 4.45 en 4.46. Er is hier gekozen voor een meetstation relatief vlakbij de Afsluitdijk omdat daar op voorhand<sup>10</sup> het meeste belangrijke verspreidingsgedrag verwacht werd. De windschuifspanningscoëfficiënten zijn overgenomen uit WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1, zie de instellingen voor de parameters Cdbreakpoints en Windspeedbreakpoints in Bijlage A. In een volgende iteratie zal nagegaan moeten worden hoe gevoelig de modeluitkomsten zijn voor een andere windforcering (tijdreeks van een ander meetstation en/of ruimtelijk variërende wind).

#### 4.5.3 Temperatuur

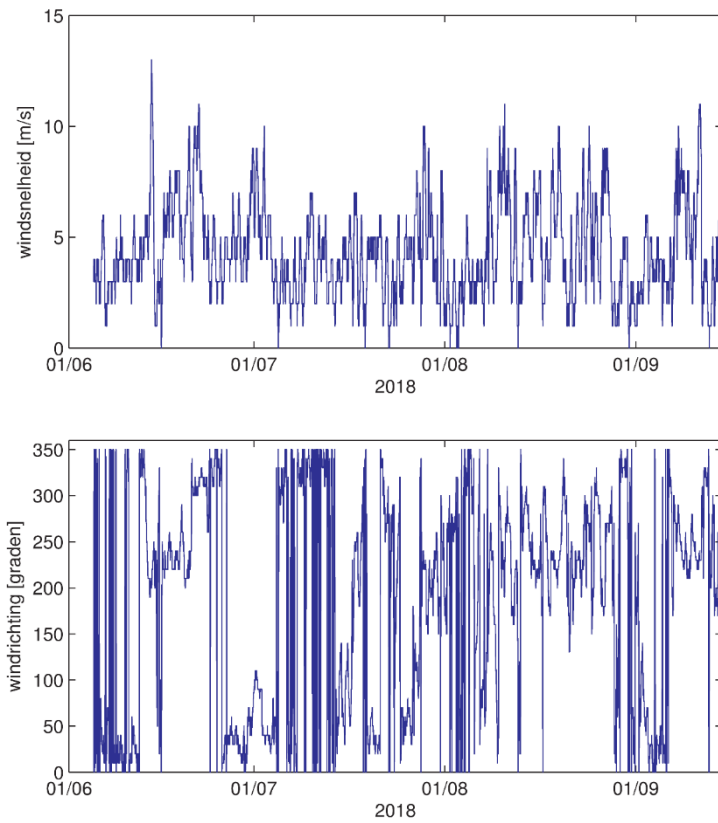
In deze eerste iteratieslag wordt in het model nog geen temperatuur gebruikt.

#### 4.5.4 Initiële condities

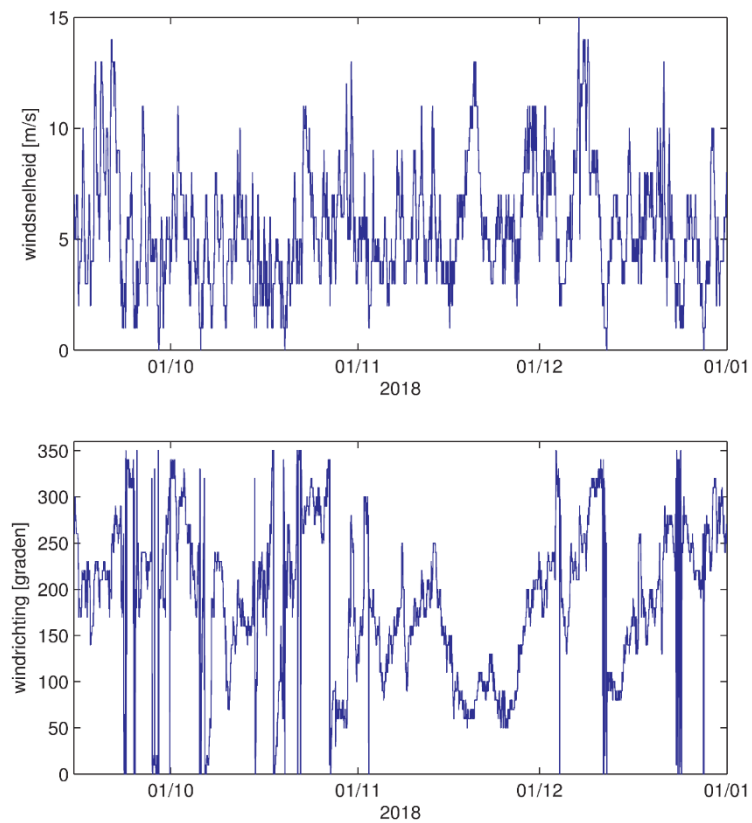
Voor de initiële waterstand is ruimtelijk uniform het meerpeil van 5 juni 2018 opgelegd. Dit meerpeil is berekend op basis van metingen uit Matroos met het MATLAB script in sectie F.2. Zie ook Figuur G1 t/m G4 in bijlage G.

Vanwege het niet tijdig beschikken over voldoende recente meetgegevens is voor de initiële chlorideconcentratie de waarde 82,26 mg/l gebruikt. Dit is het gemiddelde over 2013 van de gemeten chlorideconcentraties in meetpunten Houtribhoek, Ketelmeer west, Steile bank en Vrouwezand en is ook in [5] gebruikt. Deze waarde is uniform opgelegd.

<sup>10</sup> Tijdens de later uitgevoerde, extra casus m.b.t. Gemaal Lely is hier nieuw inzicht over ontstaan, zie ook de aanbeveling in hoofdstuk 6.



Figuur 4.45 Wind tussen 5 juni 2018 en 15 september 2018 zoals gemeten op KNMI station De Kooy.



Figuur 4.46 Wind tussen 15 september 2018 en 31 december 2018 zoals gemeten op KNMI station De Kooy.

## 4.6 Aanvullende casus lokale zoutverspreiding in 3D

### 4.6.1 Beschrijving aanvullende casus

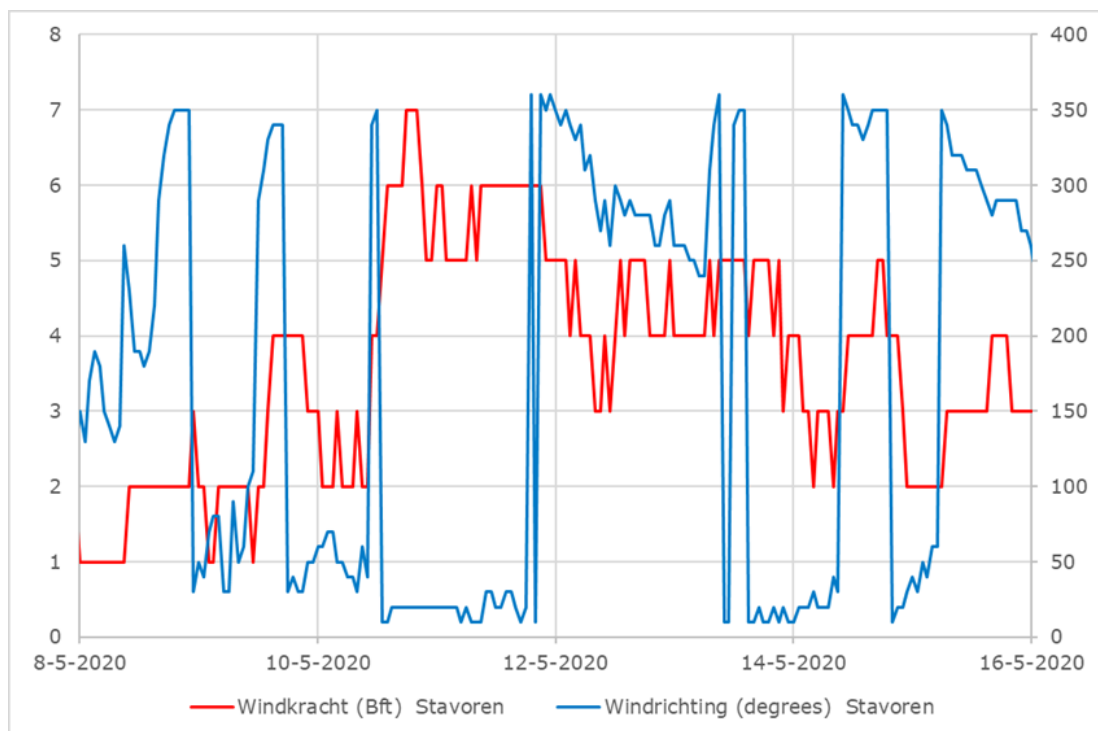
Een nadere evaluatie is uitgevoerd van de manier waarop de zoutverspreiding tussen gemaal Lely en Andijk door het model wordt weergegeven.

In de periode van 10 t/m 15 mei 2020 is gemaal Lely gebruikt om overtollig water uit het Wieringermeerpolder te lozen op het IJsselmeer. Voor deze periode heeft HHNK de draaiuren van het gemaal bijgehouden en omgezet naar debieten, en heeft gezorgd dat de chlorideconcentraties van het geloosde water goed in kaart werden gebracht. PWN heeft vanaf het eind van de dag op 10 mei een verhoging van de chlorideconcentratie waargenomen bij innamepunten psA en WPJ (zie Figuur 4.19). Pas op 18 mei daalde de chlorideconcentratie weer tot het niveau van voor de verhoging.

De periode 10 t/m 19 mei is met het model nagerekend en naast metingen gelegd, om zo te evalueren hoe het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer de verspreiding tussen gemaal Lely en de omgeving van Andijk weer geeft.

### 4.6.2 Analyse en karakterisering condities

Op 10 en 11 mei passeerde een koufront waarachter een krachtige noordelijke stroming koude lucht aanvoerde. Daarbij stond er ook opvallend veel wind met in een groot deel van het land 5 tot 6 Bft uit het noorden en zware windstoten aan de kust (KNMI). Het meest nabije KNMI weerstation is Stavoren, hier is 5 tot 7 Bft gemeten, zie Figuur 4.47.



Figuur 4.47 Wind tussen 8 mei 2020 en 16 mei 2020 zoals gemeten op KNMI station Stavoren.

Bij deze windcondities worden de watersnelheden grofweg geschat op zo'n 0,3 en 0,5 m/s (bij respectievelijk 5 en 7 Bft). Wind gedreven transport zou de afstand tussen gemaal Lely en Andijk (zo'n 10 km) in zo'n 9,3 uur afleggen (bij gemiddeld 5 Bft).

Bij gegeven windkracht en -richting is het niet onmogelijk dat de zoutlast bij Den Oever een rol speelt, dit is afhankelijk van de door de wind aangedreven transportpatronen. Echter, de gemeten zoutgehalten bij Wieringen Oost laten zien dat voor deze situatie in de eerste helft van mei 2020 dat niet het geval is.

### 4.6.3 Aanpak

De interesseperiode is kort (ongeveer 10 dagen) en chloridemetingen voor 10 mei en na 19 mei vertonen weinig variatie in de tijd. Op basis hiervan wordt aangenomen dat de chlorideconcentratie bij Andijk voor de interesseperiode uitsluitend wordt bepaald door de achtergrondconcentratie in het meer en de lozing door gemaal Lely. Daarom wordt om in de modelvalidatie voor de inzet van Lely alle andere chloridevrachten dan gemaal Lely verwaarloost.

Voor deze case worden 10 sigma lagen in de verticaal gebruikt, de inschatting is dat dit hier voldoende is.

Voor het globale gedrag van de waterbeweging wordt in het model alleen de aanvoer van de IJssel, de afvoer bij Den Oever en Kornwerderzand en de wind meegenomen. Voor het lokale gedrag van de waterbeweging tussen Medemblik en Andijk worden alle lokale lozingen/onttrekkingen (van HHNK en PWN), zover bekend en beschikbaar, meegenomen. Alle bronnen van water op het meer (met uitzondering van gemaal Lely) brengen geen zout het meer in. Op deze manier is het mogelijk om het effect van gemaal Lely op de innamepunten van PWN te isoleren van alle andere invloeden. Dit dus in een scenario context, d.w.z. door relatieve vergelijking. Deze aanpak maakt de startsituatie in het model ook niet meer afhankelijk van de oplading van het meer in maanden daarvoor, wat de praktische uitvoering van de simulatie vereenvoudigt en versnelt.

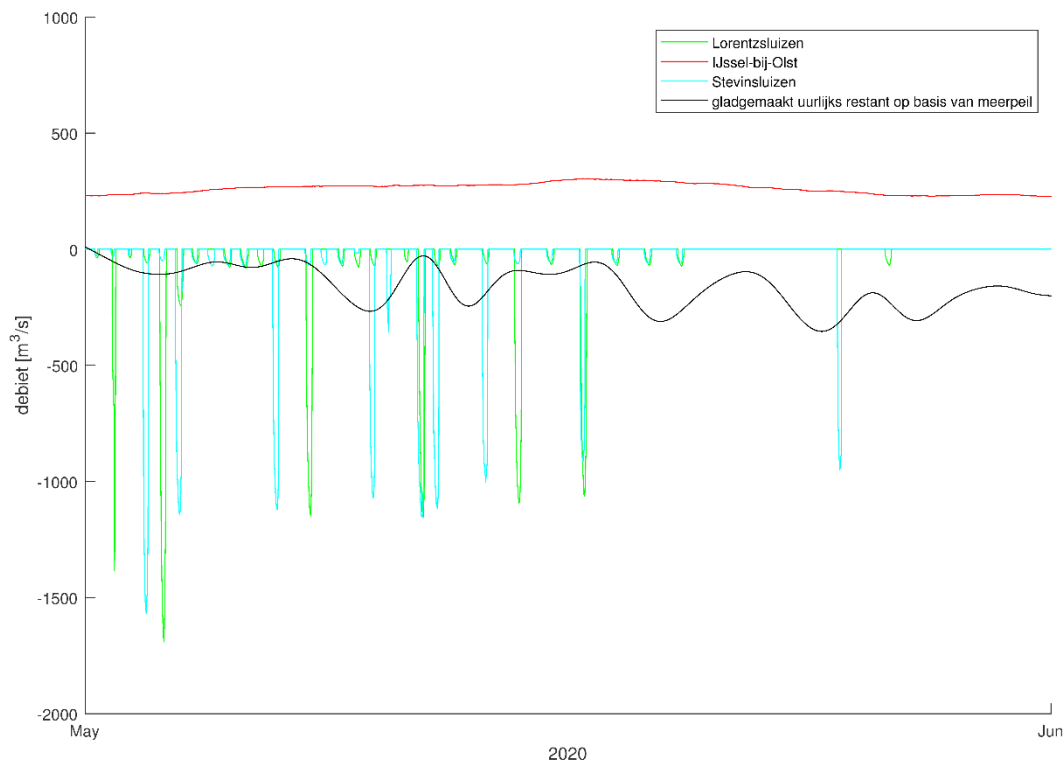
#### 4.6.3.1 Simulatieperiode

De interesse periode is dus tussen 10 en 19 mei 2020. Voor het inspelen van de achtergrondstroming met een uniform chloridegehalte van 95 mg/l wordt de simulatie gestart op 5 mei. Op dat moment worden al wel de gemeten waarden van wind bij Stavoren, instroom bij de IJssel en uitstroom bij Den Oever en Kornwerderzand opgelegd. Uit een gevoeligheidsanalyse bleek dat 5 dagen inspelen ruim voldoende is. De tijdreferentie is MEZT (Midden-Europese Zomertijd), in afwijking van de gangbare keuze voor MET.

#### 4.6.3.2 Randvoorwaarden

Voor het globale gedrag van de waterbeweging wordt in het model dus alleen de aanvoer van de IJssel, de afvoer bij Den Oever en Kornwerderzand en de wind meegenomen. Voor de wind wordt de gemeten wind van KNMI weerstation Stavoren gebruikt, zie ook Figuur 4.47. Hiervoor wordt een tijdreeks van windkracht en windrichting verkregen uit MATROOS met waarden per 10 minuten uniform opgelegd in het model. Voor de aanvoer van de IJssel (bij Olst) en de afvoer bij Den Oever en Kornwerderzand zijn door RWS-WVL vanuit IWP tijdreeksen aangeleverd van debieten per 60 minuten (IJssel) en 10 minuten (spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand). Let op dat deze afvoercondities lager zijn dan gemiddeld (jaargemiddelde afvoer Afsluitdijk circa 500 m<sup>3</sup>/s, gemiddelde afvoer Den Oever 295 m<sup>3</sup>/s en Kornwerderzand 205 m<sup>3</sup>/s etmaal gemiddeld, Bron: waternormalen.nl, de afvoer bij Olst was tussen 5 en 20 mei gemiddeld 280 m<sup>3</sup>/s en tussen 10 en 19 mei 285 m<sup>3</sup>/s). Zie Figuur 4.48.





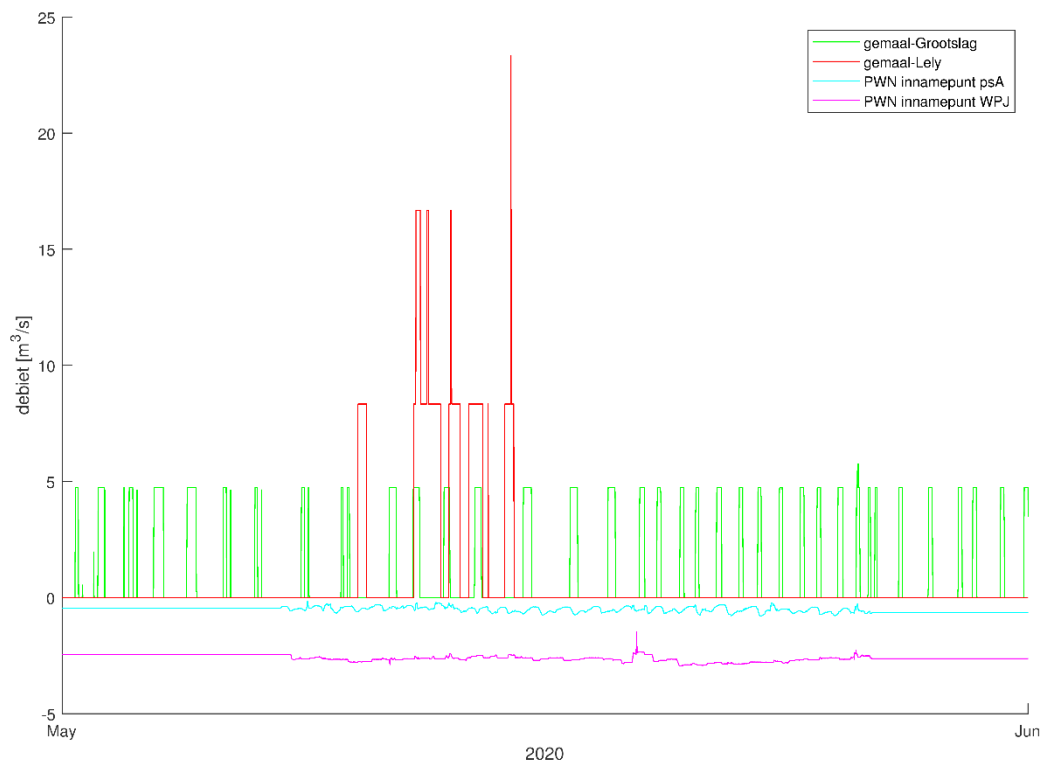
Figuur 4.48 Voor aanvullende case gebruikte debieten voor de IJssel bij Olst, de Stevin spuisluizen bij Den Oever en de Lorentz spuisluizen bij Kornwerderzand.

Relevant voor de stroming in de zone tussen Medemblik en Andijk zijn naast het globale gedrag de lokale lozingen door gemaal Lely, gemaal Grootslag (hiervoor het zoutgehalte geschat), Vier Noorder Koggen (geen data voor beschikbaar), de uitwisseling met het Markermeer (geen data voor beschikbaar, deze bijdrage is weggelaten omdat het effect vermoedelijk gering is) en de twee drinkwater innamepunten psA en WPJ van PWN bij Andijk.

Voor het definiëren in het model van de lozing van gemaal Lely worden de afdelingen 1 t/m 4 gecombineerd tot één lozing met de juiste zoutlast, deze wordt uniform over de diepte in 1 rekencel geloosd.

De debieten van de twee drinkwater innamepunten psA en PWJ van PWN bij Andijk zijn in het model uniform gedefinieerd over de diepte in de rekencel nabij de oever. Het inname debiet van innamepunt psA is gemiddeld circa 0.5 m<sup>3</sup>/s, het effect van tijdelijke sluiting is verdisconteerd o.b.v. ruwwater onttrekking aan het psA bassin en het (geschatte) verval over de inlaat. Het debiet van innamepunt PWJ is opgelegd conform de ruwwater onttrekking aan het bassin van 2.5 à 3 m<sup>3</sup>/s.

Zie Figuur 4.49.



Figuur 4.49 Voor aanvullende case gebruikte debieten van gemaal Grootslag, gemaal Lely en de PWN innamepunten psA en WPJ.

Voor de initiële waterstand is het meerpeil op basis van gemeten waterstanden uit MATROOS uniform opgelegd (zie ook sectie 4.5.1.4).

Neerslag en verdamping zijn verwaarloosd in de simulatieperiode. De waterbalans is wel gecontroleerd, maar niet sluitend gemaakt (stijging tijdens de simulatie was beperkt tot 1 à 1,5 dm).

De keuze van het achtergronds chloridegehalte is een uniforme waarde van 95 mg/l (overeenkomend met een saliniteit van  $1.80655 \cdot 95 / 1000 = 0.1716$  ppt) (de gemiddelde achtergrondswaarde zit tussen de 90 en 100 mg/l). Effecten van neerslag en verdamping op zoutgehalte worden verwaarloosd.

Tenslotte is nog een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de IJssel instroom en de uitstroom bij de Afsluitdijk door een berekening uit te voeren zonder deze achtergrondstroming. Hiervoor zijn de debieten voor de IJssel en de Lorentz- en Stevin spuisluizen op nul gezet.

## 5 Modelresultaten, tijdstap analyse en rekentijden

### 5.1 Waterstanden in 2DH

#### 5.1.1 Modelperformance

Een eerste indruk van de modelperformance van het model, in diepte gemiddelde mode en op waterstanden is verkregen voor een historische stormperiode in januari 2007. De gehanteerde methodiek is eerder beschreven in sectie 2.3 van hoofdstuk 2. Dit is zowel visueel via figuren als getalsmatig via statistische criteria uitgevoerd, de resultaten hiervan zijn opgenomen in respectievelijk Bijlage C en Bijlage E.

In het WAQUA model uit [3, 4] is zowel ruimtelijke variërende wind gebruikt (met HIRLAM11-downscaling wind, zie Figuur 4.33) als uniforme wind (Stavoren). Vergelijking van WAQUA modeluitkomsten voor deze windschematisaties laat zien dat het gebruik van een uniforme wind in deze stormperiode niet tot grote verschillen leidt (Bijlage C). Daarom wordt voor het D-Flow FM model alleen een uniforme wind gebruikt in de bepaling van de modelperformance.

Verder is voor het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer nagegaan dat volstaan kan worden met een uniforme bodemruwheid (zie ook sectie 4.3). In de figuren in Bijlage C liggen de resultaten voor D-Flow FM met ruimtelijke variërende bodemruwheid (blauwe lijn) vrijwel op die voor D-Flow FM met ruimtelijk uniforme bodemruwheid. De statistische getallen in de vierde (D-Flow FM met ruimtelijke variërende bodemruwheid) en vijfde kolom (D-Flow FM met ruimtelijke uniforme bodemruwheid) in de tabellen in Bijlage E liggen dicht bij elkaar. Over 9 stations gemiddeld verschillen Bias, RMSE, standaardafwijking,  $\Delta\zeta_{\max}$  en  $\Delta\zeta_{\min}$  minder dan 2 mm, dit is een stuk kleiner dan de typische verschillen tussen modellen onderling. (Kenmerkende waarden uit de 5<sup>e</sup> kolom zijn respectievelijk -5.4, 9.7, 7.4, -10.2 en 11.2 cm). Over het algemeen lijkt het nieuwe D-Flow FM model het even goed te doen als WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 model. Aan het einde van de stormperiode stijgt de waterstand voor D-Flow FM modellen (5 tot 7 cm) ten opzichte van metingen en de WAQUA modellen. Dat kan meerdere oorzaken hebben (mogelijk door het gebruik van een bij de Afsluitdijk relatief grof WAQUA model voor het genereren van randvoorwaarden voor het D-Flow FM model, zie sectie 4.4.1, een niet sluitende waterbalans, het niet juist meenemen van de Ramspolkering). Dit zal verbeterd moeten worden.

#### 5.1.2 Tijdstap analyse

Voor het IJsselmeer deelmodel in 2DH is met de stormperiode in januari 2007 ook een kleine analyse uitgevoerd van het effect van de gehanteerde tijdstap. Standaard bepaalt D-Flow FM aan de hand van de parameter CFLMax (deze staat op de standaardwaarde 0.7, zie Bijlage A) wat de tijdstap op het betreffende moment van de simulatie moet zijn. Dit hangt af van de kleinste rekencellen en de op dat moment heersende stromingscondities. Deze automatische bepaalde tijdstap kan daardoor in grootte variëren tijdens de simulatie. Voor dit model leidt dit tot een gemiddelde tijdstap van 6.03 s, dit is een relatief kleine tijdstap waardoor rekentijden relatief groot worden. De tijdstap analyse is geforceerd door CFLMax op een groot getal te zetten, zodat D-Flow FM ook met een vaste tijdstap rekt, achtereenvolgens 1 s, 3 s, 5 s, 10 s, 15 s, 30 s, 60 s, 150 s en 300 s. Voor een tijdstap van 30 s, 60 s, 150 s en 300 s kwam het D-Flow FM model niet tot een goed einde. Resultaten voor het D-Flow FM model met een tijdstap van 1 s, 3 s, 5 s, 10 s en 15 s zijn opgenomen in Bijlage D (figuren) en Bijlage E (statistisch). Deze resultaten laten zien dat D-Flow FM convergeert naar dezelfde oplossing als de vaste tijdstap vanaf 5 s via 3 s daalt naar 1 s. Tevens is te zien dat de oplossing van D-Flow FM met automatische tijdstap vrijwel overeenkomt met die van D-Flow FM met een vaste tijdstap van 3 s en 1 s (vergelijk bijvoorbeeld kolommen 5, 6 en 7 van de tabellen in Bijlage E met elkaar).

D-Flow FM met een vaste tijdstap van 5 s doet het een beetje minder goed. Voor de bijbehorende rekentijden zie Tabel 5.3 in Sectie 5.1.3: D-Flow FM met automatische tijdstap rekent het snelst om vrijwel dezelfde kwaliteit te bereiken.

### 5.1.3 Rekentijden en parallelisatie

De wall clock tijd en schaalbaarheid van het D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer in diepte gemiddelde mode is bepaald op **E3-1276 v3 nodes** (D-HYDRO / Delft3D FM release 2020.03) en **E5-2697A v4 nodes** (2020.04) (details hardware/software in sectie 1.3). Tevens is een doorvertaling gemaakt om de rekentijden en schaalbaarheid te kunnen vergelijken met andere D-Flow FM en WAQUA modellen. Voor dit laatste zijn ook **E5-2690 v3 nodes** van Cartesius bij SURFsara gebruikt (Linux bullx/Red Hat Enterprise 7, nodes met elk 24 cores in 2 Intel twelve-core Xeon E5-2690 v3 processoren, 64 GB geheugen per node, 2.6 GHz per core). Let op dat daarbij -voor de andere modellen- andere versies van de software zijn gebruikt. Voor het hier beoogde doel, het indicatief onderling kunnen vergelijken is dat niet van belang.

De rekentijd en schaalbaarheid is bepaald voor de stormperiode in januari 2007. De bijbehorende simulatie periode is 8 dagen en omvat het voortraject tot aan de storm en de storm zelf. Ook worden de voor dit geval typische I/O (inlezen van invoer en wegschrijven van uitvoer) tijdens modelsimulatie meegenomen in de rekentijden. Omdat D-Flow FM automatisch de tijdstap aanpast kan het zijn dat vooral tijdens de piek van de storm meer tijdstappen verricht worden. Hierdoor is er op dat moment een grotere rekentijd. De hier gepresenteerde rekentijden dienen als indicatie van wat te verwachten is. Voor typisch andere toepassingen wordt aanbevolen ter verdere aanscherping altijd de rekentijd specifiek te bepalen. De hier gepresenteerde resultaten kunnen daarbij wel gebruikt worden voor het omrekenen naar andere hardware en andere aantallen cores/nodes.

Voor de wall clock tijd is de laatst gemelde waarde van “total time in timeloop” uit de D-Flow FM schermuitvoer genomen. Er is gemeten voor de volledige 8 simulatiedagen, dit getal is door 8 gedeeld: de hier gepresenteerde wall clock tijden geven de werkelijke tijd aan die nodig zijn om gemiddeld 1 dag te simuleren met het model.

Tabel 5.1 en 5.2 laten de wall clock tijd zien van het D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer voor twee soorten processoren en voor een verschillend aantal nodes en cores. Te zien is dat voor deze range van cores de rekentijd nog verlaagd kan worden door gebruik van meer cores.

Tabel 5.1 Wall clock tijd van D-Flow FM deelmodel IJsselmeer op E3-1276v3 nodes.

node type	aantal nodes	totaal aantal cores	wall clock tijd
E3-1276 v3	1	4	35.32 m
E3-1276 v3	2	8	18.51 m
E3-1276 v3	4	16	11.07 m
E3-1276 v3	8	32	7.34 m

Tabel 5.2 Wall clock tijd van D-Flow FM deelmodel IJsselmeer op E5-2697A v4 nodes.

node type	aantal nodes	totaal aantal cores	wall clock tijd
E5-2697A v4	1	32	4.94 m
E5-2697A v4	2	64	2.80 m
E5-2697A v4	4	128	1.82 m
E5-2697A v4	8	256	1.33 m
E5-2697A v4	16	512	1.17 m

Tabel 5.3 laat de wall clock tijd zien van het D-Flow FM model bij gebruik van een andere, vaste tijdstap. Te zien is dat bij een grotere tijdstap de rekentijd verlaagd kan worden. Echter, let hierbij op dat voor een vaste tijdstap groter dan 5 s de berekende waterstanden minder goed zijn (zie ook sectie 5.1.2 en Bijlage D en E). Verder valt op dat de hoeveelheid rekenwerk, waaronder het aantal iteraties, per tijdstap varieert waardoor de rekentijd voor één tijdstap niet vast is.

Tabel 5.3 Wall clock tijd van D-Flow FM deelmodel IJsselmeer bij verschillende tijdstap op E3-1276v3 nodes.

node type	aantal nodes	totaal aantal cores	auto-matische tijdstap	vaste tijdstap van 1 s	vaste tijdstap van 3 s	vaste tijdstap van 5 s	vaste tijdstap van 10 s	vaste tijdstap van 15 s
E3-1276 v3	1	4	35.32 m	171.26 m	63.87 m	41.52 m	24.19 m	18.61 m

Ter vergelijking worden hier ook vermeld in Tabel 5.4 de wall clock tijd van het WAQUA model voor IJVD, in Tabel 5.5 de wall clock tijd van het D-Flow FM model voor het Markermeer en in Tabel 5.6 de wall clock tijd van het WAQUA model voor het Markermeer (gegevens van de laatste twee zijn voor een stormperiode in oktober 2006 en komen uit [6]). Het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer bevat 369.683 elementen (sectie 4.2.3). Het D-Flow FM model van het Markermeer uit [6] bevat 345.634 elementen. Qua aantal elementen zijn beide D-Flow FM modellen daardoor vergelijkbaar. Echter, het D-Flow FM model van het Markermeer heeft een gemiddelde tijdstap van 28.25 s, terwijl dit voor het IJsselmeer 6.03 s is, dit is een factor 5. De rekentijd voor het IJsselmeer (vergelijk Tabel 5.5 met Tabel 5.1) is een factor 4 groter dan voor het Markermeer.

Het WAQUA model voor IJVD omvat een groter gebied dan het D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer. Het WAQUA rekenrooster bevat 469.040 elementen waarvan ongeveer de helft in het gebied van het D-Flow FM model. WAQUA gebruikt voor het IJVD model een vaste tijdstap van 15 s, dit is een factor 2.5 met de gemiddelde tijdstap van 6.03 s van het D-Flow FM model. De rekentijd voor het D-Flow FM model (vergelijk Tabel 5.4 met Tabel 5.1) is een factor 2 groter dan voor het WAQUA IJVD model.

Het WAQUA model van het Markermeer bevat 109.739 elementen en heeft een vaste tijdstap van 30 s.

Tabel 5.4 Wall clock tijd van WAQUA model IJVD op E3-1276v3 nodes.

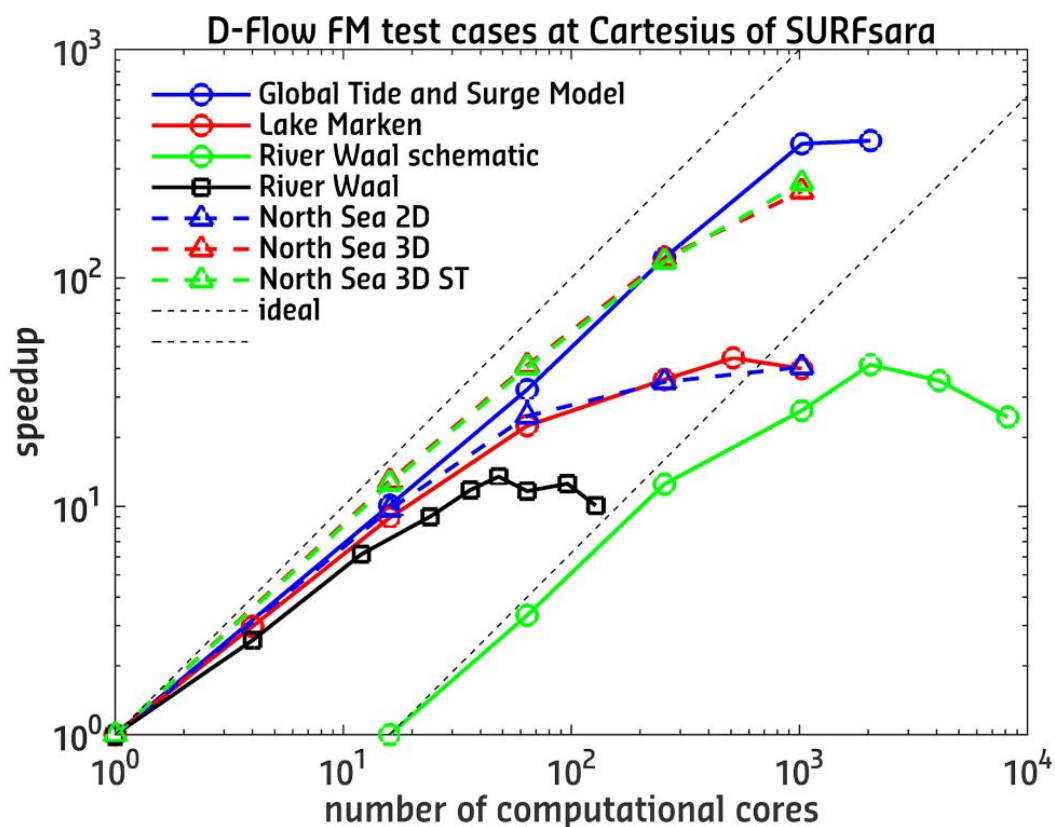
node type	aantal nodes	totaal aantal cores	WAQUA IJVD
E3-1276 v3	1	4	18.49 m
E3-1276 v3	2	8	9.04 m
E3-1276 v3	4	16	4.87 m
E3-1276 v3	8	32	3.19 m

Tabel 5.5 Wall clock tijd van D-Flow FM model Markermeer op E3-1276v3 nodes.

node type	aantal nodes	totaal aantal cores	Markermeer
E3-1276 v3	1	4	9.21 m
E3-1276 v3	2	8	4.90 m
E3-1276 v3	4	16	2.83 m

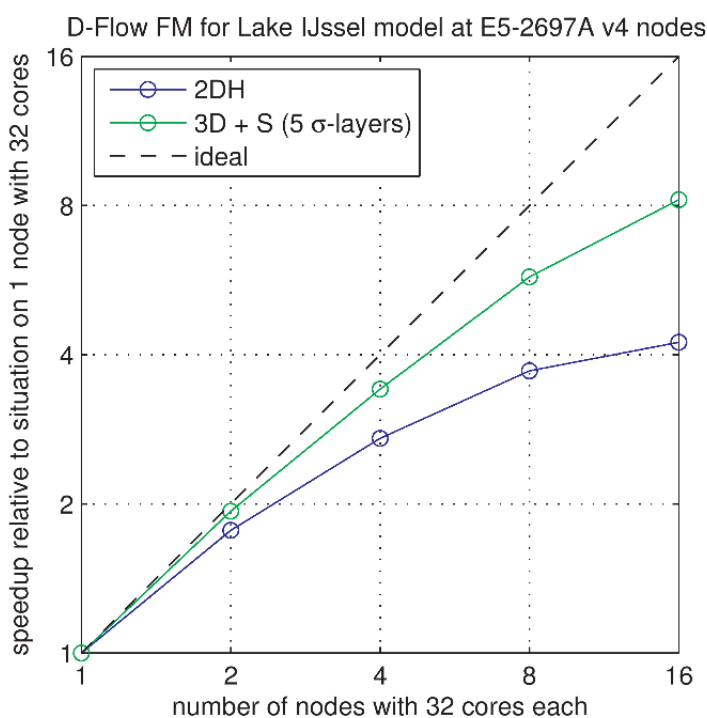
Tabel 5.6 Wall clock tijd van WAQUA model Markermeer op E3-1276v3 nodes.

node type	aantal nodes	totaal aantal cores	WAQUA Markermeer
E3-1276 v3	1	4	2.20 m
E3-1276 v3	2	8	1.46 m
E3-1276 v3	4	16	1.04 m



Figuur 5.1 Schaalbaarheid van D-Flow FM voor verschillende modellen op E5-2690 v3 nodes.

In 2018 en 2019 was het D-Flow FM model van het Markermeer één van de testcases in een PRACE project van Deltares, SURFsara en CINECA [7, 8]. Deze testcase bevat dezelfde stormperiode in oktober 2006 als in Tabel 5.5 en Tabel 5.6. Figuur 5.1 laat hiervan een belangrijk resultaat zien: het toont de schaalbaarheid<sup>11</sup> van D-Flow FM voor verschillende testcases op de E5-2690 v3 nodes. Hieruit is op te maken dat D-Flow FM model van het Markermeer goed schaalbaar tot orde 100 cores, daarna vlakkt deze af. Omdat het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer qua aantal elementen vergelijkbaar is, is de verwachting dat de schaalbaarheid van het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer hier op lijkt. Verder geeft Figuur 5.1 een indicatie van de schaalbaarheid als het model in drie dimensies gebruikt gaat worden. De 2 dimensionale Noordzee testcase “North Sea 2D” heeft vrijwel dezelfde hoeveelheid rekencellen als het D-Flow FM model van het Markermeer. De 3 dimensionale Noordzee testcases “North Sea 3D” en “North Sea 3D ST” (met zout en temperatuur) zijn gebaseerd op “North Sea 2D” met 25 rekenlagen in de verticaal. Te zien is in de figuur dat het D-Flow FM model van het Markermeer en “North Sea 2D” hetzelfde schalingsgedrag vertonen. “North Sea 3D” en “North Sea 3D ST” schalen goed tot orde 1000 cores. Op basis van deze figuur is de verwachting dat bij gebruik van 25 rekenlagen in de verticaal het D-Flow FM model van het Markermeer en dus ook het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer een vergelijkbare schaling vertonen. Dit beeld wordt bevestigd door recente resultaten uit een lopend vervolg op [7, 8]. In dit nieuwe PRACE project is het IJsselmeer deelmodel in 3D (met 5 sigma lagen en zout) uit dit rapport als testcase opgenomen. Deze recente resultaten zijn uitgezet samen met de gegevens uit Tabel 5.2 in Figuur 5.2: getoond wordt de schaalbaarheid<sup>11</sup> van het IJsselmeer deelmodel in 3D en 2DH op E5-2697A v4 nodes.



Figuur 5.2 Schaalbaarheid van D-Flow FM deelmodel voor IJsselmeer in 2DH en 3D op E5-2697A v4 nodes.

<sup>11</sup> Hierbij wordt de rekestijd van een modelsimulatie met D-Flow FM op X cores (of X nodes) gedeeld door de rekestijd van dezelfde modelsimulatie op 1 core (of 1 node). Dit geeft een indruk of D-Flow FM voor de betreffende modelsimulatie sneller kan draaien door het gebruik van meer cores (of nodes).

## 5.2 Zoutverspreiding in 3D

### 5.2.1 Modelperformance m.b.t. reproductie waterbalans door model en software

Voor verspreiding van stof (waaronder zout) is het essentieel dat de (sluitende) waterbalans door model en software gereproduceerd wordt. Voor de 3D modeltoepassing is dit nagegaan voor een langere periode met de door de randvoorwaarden opgelegde waterbalans. In eerste instantie bleek dat de waterbalans niet gereproduceerd werd. Na de aanpassingen bij de puttermen voor de spuisluisen bij Den Oever en Kornwerderzand geeft het model nu wel acceptabele resultaten. Hiervoor zijn de berekende en gemeten waterstanden vergeleken bij Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluisen Noord en Lemmer<sup>12</sup>, zie Figuur G.1 t/m G.4 in Bijlage G (deze figuren bevatten ook met het meerpeil gecorrigeerde tijdreeksen waardoor je daar vooral naar het windeffect kijkt).

### 5.2.2 Ruimtelijke verspreiding chloride

(De in deze sectie vermelde animaties staan binnen het Deltares netwerk in n:\Deltabox\Bulletin\gensebe\IJsselmeer\chloride\.)

#### 5.2.2.1 Modelresultaten gehele gebied

Voor elke dag in de gehele simulatieperiode van 5 juni 2018 tot en met 31 december 2018 (210 dagen) zijn ruimtelijke beelden gemaakt van de chloride verspreiding in de onderste rekenlaag en in de bovenste rekenlaag voor het gehele gebied. Om een indruk te krijgen van het dynamische gedrag dat zo door het model wordt voorspeld, zijn deze ruimtelijke beelden achter elkaar geplaatst in een animatie (bestandsnaam ly\_3d\_juni-december-2018\_geheel\_1fps.m4v). Tevens zijn op deze ruimtelijke beelden als “bollenplots” de waarden weergegeven zoals gemeten tijdens meerdere dagelijkse meetvaartochten in deze periode (zie voor een algemene beschrijving [13]). Let op dat het moment van meten en het simulatie tijdstip tot meerdere uren kan verschillen. Van deze gecombineerde beelden is een animatie gemaakt (bestandsnaam ly\_3d\_juni-december-2018\_meting-simulatie\_geheel\_1fps.m4v). Voor het begrip/inzicht wordt aangeraden te kijken naar deze animaties. Voor dit rapport is een selectie gemaakt uit de gecombineerde beelden voor het gehele gebied. Dit zijn Figuur G.5 t/m G.18 in Bijlage G.

#### 5.2.2.2 Modelresultaten noorden

Voor drie perioden van enkele weken in september, oktober en december zijn ruimtelijke beelden gemaakt van de chloride concentratie in de onderste rekenlaag in het noordelijke gedeelte van het IJsselmeer. Van deze beelden zijn drie animaties gemaakt (bestandsnamen ly\_3d\_september-2018\_noord\_8fps.m4v, ly\_3d\_oktober-2018\_noord\_8fps.m4v en ly\_3d\_december-2018\_noord\_8fps.m4v). Voor het begrip/inzicht wordt aangeraden te kijken naar deze animaties. In deze rapportage zijn hiervan geen figuren opgenomen.

#### 5.2.2.3 Modelresultaten noordoosten

Voor dezelfde drie perioden van enkele weken in september, oktober en december als sectie 5.2.2.2 zijn ruimtelijke beelden gemaakt van de chloride concentratie in de onderste en bovenste rekenlaag in het noordoostelijke deel van het IJsselmeer. Op deze ruimtelijke beelden zijn als “bollenplots” de waarden weergegeven zoals gemeten tijdens de meerdere dagelijkse meetvaartochten.

---

<sup>12</sup> Den Oever, Kornwerderzand, Houtribsluisen Noord en Lemmer zijn ook de vier punten die gebruikt worden om het meerpeil uit te rekenen, zie het MATLAB script in sectie F.2.



Van deze gecombineerde beelden zijn drie animaties gemaakt (bestandsnamen ly\_3d\_september-2018\_meting-simulatie\_noordoost\_8fps.m4v, ly\_3d\_oktober-2018\_meting-simulatie\_noordoost\_8fps.m4v en ly\_3d\_december-2018\_meting-simulatie\_noordoost\_8fps.m4v). Voor het begrip/inzicht wordt aangeraden te kijken naar deze animaties. Voor dit rapport is een selectie gemaakt uit de gecombineerde beelden van het noordoosten. Dit zijn Figuur G.19 t/m G.30 in Bijlage G.

### 5.2.3 Variatie van chloride in de tijd

Voor alle observatiestations uit Figuur 4.34 zijn tijdreeksen gemaakt van de chloride concentratie in onderste, middelste en bovenste rekenlaag. De meeste observatiestations laten zien dat het chloride concentratie daar volgens de simulatie volledig in de verticaal gemengd is. Daarom is alleen een kleine selectie opgenomen in Bijlage G: Figuur G.34 t/m Figuur G.38. Vlakbij het observatiestation bij PWN in Andijk zijn ook metingen verricht in 2018, berekeningen en metingen zijn hiervoor gecombineerd in Figuur G.33.

In het noordoosten, bij Kornwerderzand, veranderde in de loop van september de toestand door afvoer door de spuisluizen. Daarom is voor twee rijen van observatiepunten in diepere zones de berekende verandering van de gelaagdheid in de tijd weergegeven in Figuur G.31. Ter verduidelijking is in dezelfde figuur ook aangegeven wanneer water afgevoerd werd door de spuisluizen en waar de twee rijen liggen. Te zien is dat vlak bij de spuisluizen er een sterke gelaagdheid is. Verder weg lijkt een zouttong door de diepere zones naar het zuiden te kruipen. Als er weer gespuid wordt verdwijnt dit weer. Na 16 september 2018 lijkt de situatie over te gaan naar een meer normale toestand met lagere chloride concentraties.

### 5.2.4 Duiding modelresultaten en bruikbaarheid deelmodel voor zoutverspreiding

In het noordoosten, richting Kornwerderzand, berekent het deelmodel in 3D structureel hogere chloride concentraties dan over het algemeen is gemeten (op een enkele uitschieter na). Het gevoel is dat dit komt doordat de in het model opgelegde zoutlek voor de schutsluizen bij Kornwerderzand is overschat. Voor de schutsluis bij Den Oever is dit minder duidelijk. De overschatting van de zoutlek lijkt minder te komen door de bijdrage van de spuisluizen.

Het door het model voorspelde verspreidingsgedrag verder weg van het noordoosten lijkt over het algemeen redelijk goed overeen te komen met de waarnemingen. De chlorideconcentraties bij Andijk zijn structureel lager in het model dan in werkelijkheid. Dit lijkt ook consistent met de verspreiding langs de Friese kust: het duidt er mogelijk op dat het model te weinig (horizontaal) mengt dan in werkelijkheid. Maar het model laat wel allerlei filamenten en fjnscalige structuren zien waardoor de concentratie bij Andijk vrij variabel is, zoals dat in 2018 ook is waargenomen. Daarnaast was het in 2018 opmerkelijk hoe lang het duurde voordat Andijk ontzilte, ook al was er veel meer rivieraanvoer. In de animaties is dit effect ook waar te nemen.

Het deelmodel voor het IJsselmeer zal op een aantal grotere en kleinere punten verbeterd moeten worden.

Dit begint bij het verbeteren van de brontermen. Met name de al genoemde schatting van zoutlek. Maar denk ook aan het opleggen van meer gladde signalen voor het spuien door de spuisluizen (zie bijvoorbeeld midden in Figuur G.31) en aan ontbrekende lozingen (bijvoorbeeld gemaal Lely voor juni 2018).

Een tweede stap is dan het verbeteren van het meng- en transportgedrag van het model. De horizontale ruimtelijke discretisatie -het rekenrooster en de daarop geprojecteerde diepte- van het model lijkt goed genoeg: daar waar nodig is voldoende fijnmazige resolutie, daar waar niet nodig is de resolutie inderdaad ook minder groot. Over het algemeen is de conclusie dat het door het model voorspelde globale verspreidingsgedrag er kwalitatief niet onrealistisch uitziet.

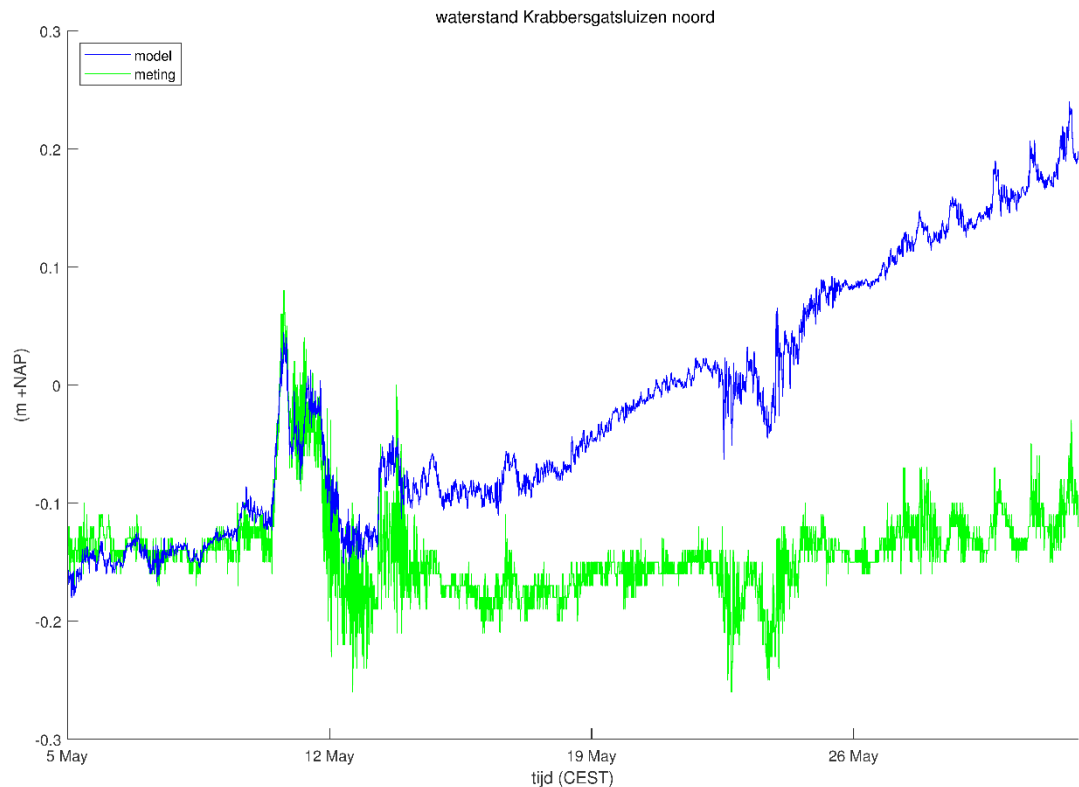
Een uitzondering is misschien de horizontale menging, deze lijkt te worden onderschat. Mogelijk heeft dit enigszins te maken met de gebruikte homogene, uurlijkse wind van station De Kooij. Kwantitatief gezien is er vooral eerst een beperking door de beschikbare metingen. Na het opheffen van deze beperking kan in een volgende iteratie het model verder verbeterd worden (waaronder de verticale resolutie).

Op basis van het voorgaande wordt het model geschikt geacht om te gebruiken voor het in een eerste fase verkennen van mogelijke inrichtingsmaatregelen op een globale schaal en door het doen van relatieve vergelijkingen. Voor meer gedetailleerde studies en/of het gebruik van absolute modelresultaten zal het model eerst verder verbeterd moeten worden in een volgende iteratieslag.

## 5.3 Aanvullende casus lokale zoutverspreiding in 3D

### 5.3.1 Waterstand

Als eerste is nagegaan dat de gemodelleerde waterstand bij Krabbersgatsluizen Noord vanuit de gevolgde modelaanpak in overeenstemming is met beschikbare metingen uit MATROOS. Krabbersgatsluizen Noord is het punt waarvoor metingen beschikbaar zijn dat het meest dicht bij het interesse gebied Andijk ligt. Figuur 5.3 toont de gemodelleerde en gemeten waterstand voor dit punt.

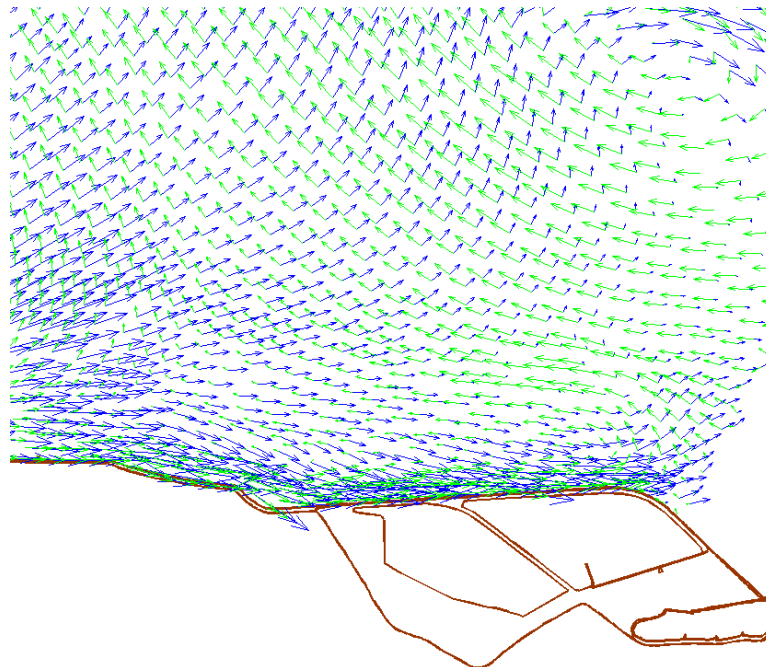


Figuur 5.3 Gemeten en berekende waterstand [m] t.o.v. NAP bij Kwabbersgatsluizen Noord.

De stijgende trend van ongeveer 0.1 m in 2 weken (5 - 19 mei) is het gevolg van de modelaanpak waarin een niet sluitende waterbalans geaccepteerd wordt. De stormopzet rond 10 en 11 mei is een realistisch effect van de wind. Dit geldt grosso modo ook voor latere variaties in de waterstand (zoals rond 24 mei). Hieruit leiden we af dat de basale windgedreven stroming dus klopt.

### 5.3.2 Stroomsnelheden

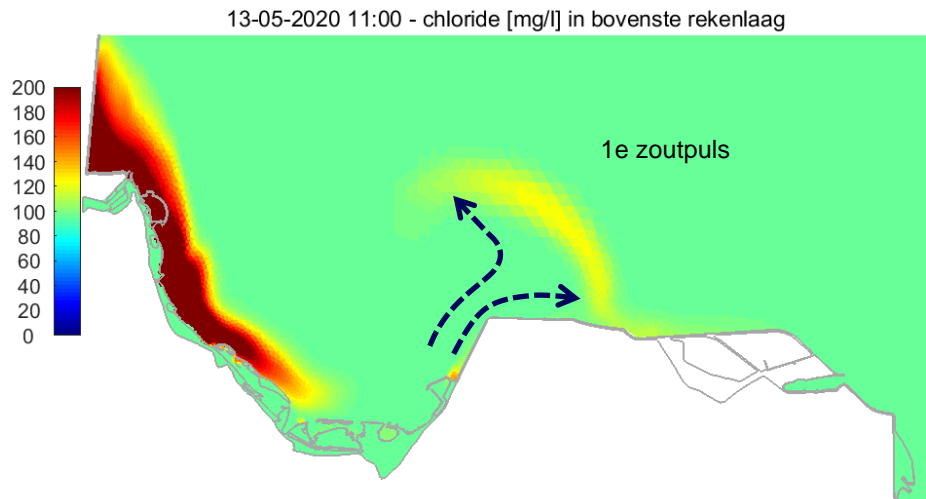
Voor lokaal transport van zout is het belangrijk zicht te hebben op lokale stromingspatronen. Wat in de simulatieresultaten opvalt is dat dit een zeer complex beeld is van grillige circulatiepatronen en retourstromingen. Figuur 5.4 illustreert dit op 17 mei 2020 19u met de diepte gemiddelde snelheid in groen en de snelheid in de bovenste rekenlaag in blauw: de patronen van de oppervlakte stroming wijken sterk af van die van de diepte gemiddelde stroming. Dergelijke patronen zijn aanwezig in het hele modelgebied en zijn belangrijk voor het menging en transport. De variabiliteit van de geselecteerde windforcering (10 minuten interval) kan daarbij een rol spelen,



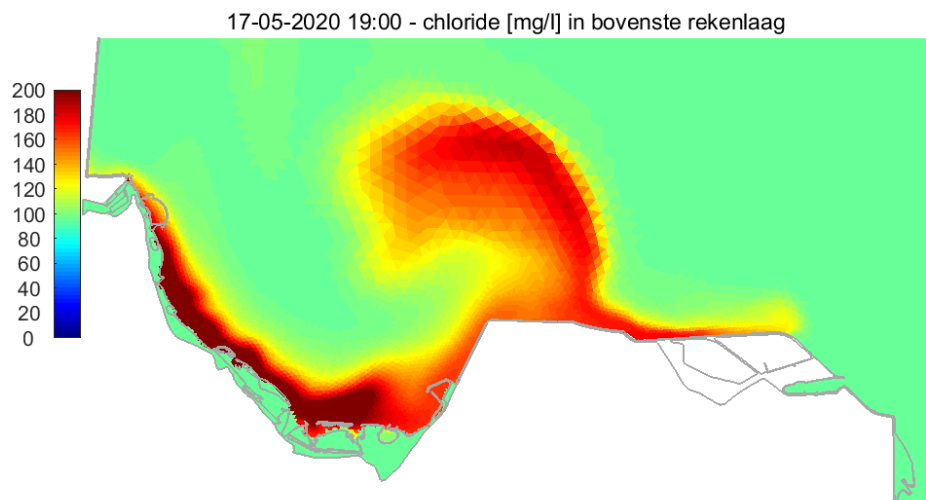
*Figuur 5.4 Diepte gemiddelde snelheid (groen) en snelheid in bovenste rekenlaag, bij wateroppervlak (blauw) volgens het model op 17 mei 2020 19u.*

### 5.3.3 Ruimtelijke verspreiding chloride

Het lokale verspreidingsgedrag van chloride is onderhevig aan de hiervoor gemelde grillige circulatiepatronen en retourstromingen. Voor de chloridegehaltenes bij Andijk is van belang of het stromingspatroon de lozing geconcentreerd bij de kust houdt of dat er loslating optreedt waardoor de lozing verdund en naar het noorden afgevoerd wordt. We illustreren dit met twee momentopnamen. Figuur 5.5 laat zien hoe de eerste kleinere zoutpuls van gemaal Lely verdund wordt en loslaat naar het noorden. Figuur 5.6 laat het andere geval zien voor de grotere tweede lozing van gemaal Lely die uiteindelijk het PWN innamepunt psA bereikt. NB. De verticale verschillen in zoutgehalte zijn over het algemeen gering, met uitzondering van de zone bij gemaal Lely, waar na lozing, dichtheidsstromen een rol spelen bij de initiële verspreiding van het zout.



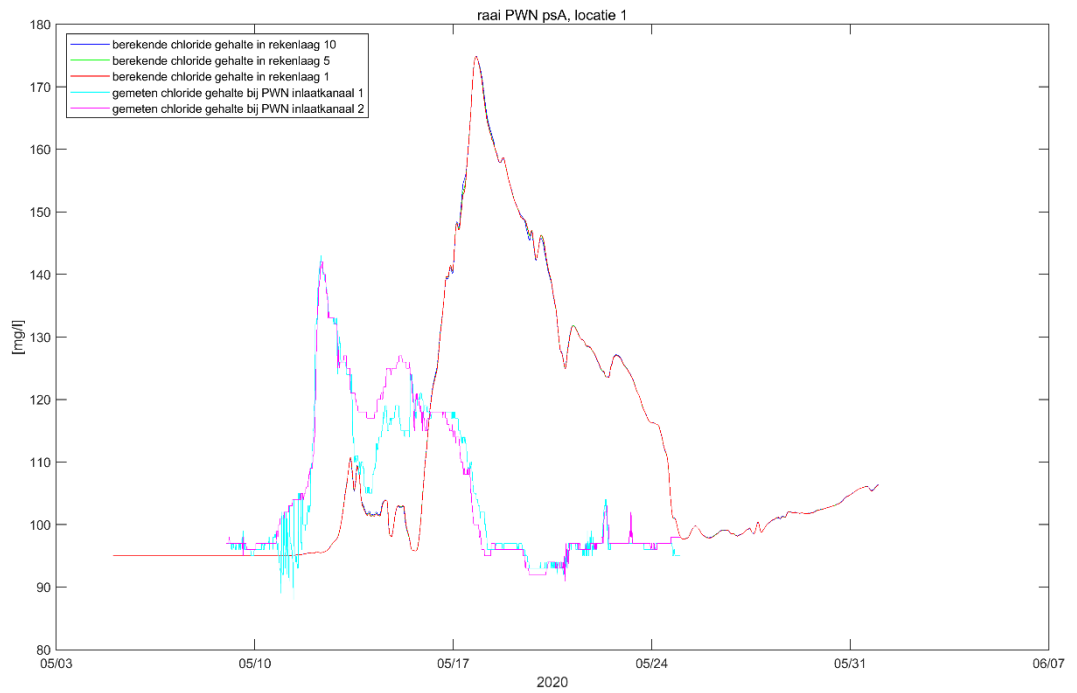
Figuur 5.5 Chloride [mg/l] in de bovenste rekenlaag volgens model op 13 mei 2020 11u.



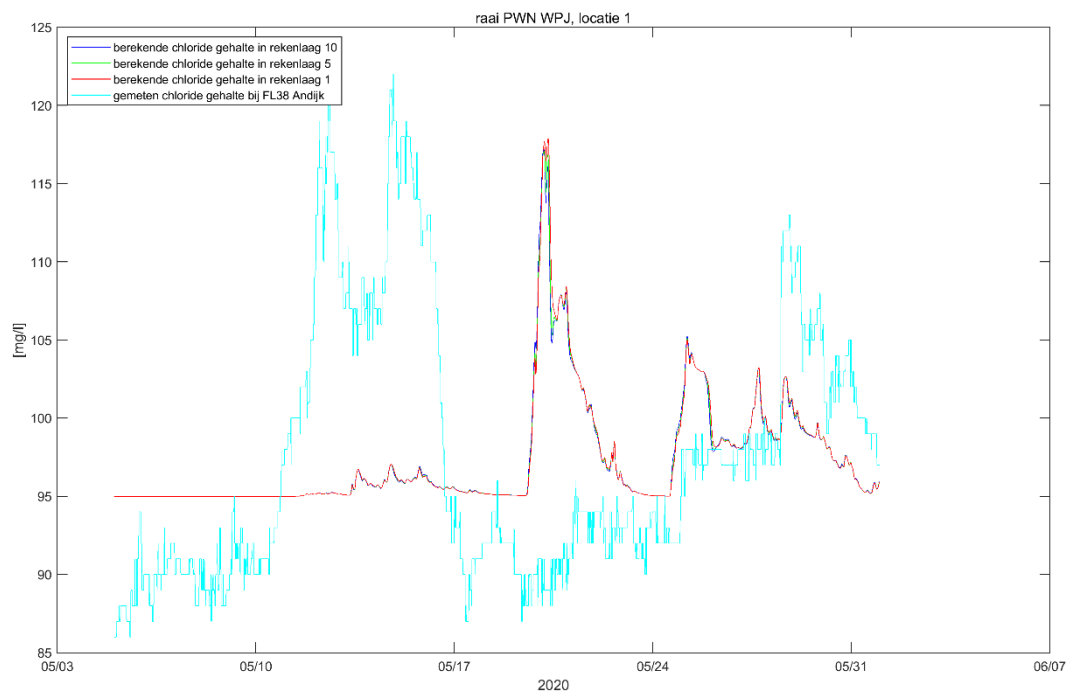
Figuur 5.6 Chloride [mg/l] in de bovenste rekenlaag volgens model op 17 mei 2020 19u.

#### 5.3.4 Variatie van chloride in de tijd

Figuur 5.7 toont het chloride gehalte [mg/l] zoals gemodelleerd en gemeten voor PWN inname punt psA. Figuur 5.7 doet dit voor PWN inname punt WPJ. Merk op dat de verticale schaal in beide figuren een factor 2 verschilt. Te zien is dat een aantal pieken niet in fase lopen. We gaan hier op in bij de discussie.



Figuur 5.7 Chloride [mg/l] zoals gemodelleerd en gemeten bij PWN inname punt psA.



Figuur 5.8 Chloride [mg/l] zoals gemodelleerd en gemeten bij PWN inname punt WPJ.

### 5.3.5

#### Discussie

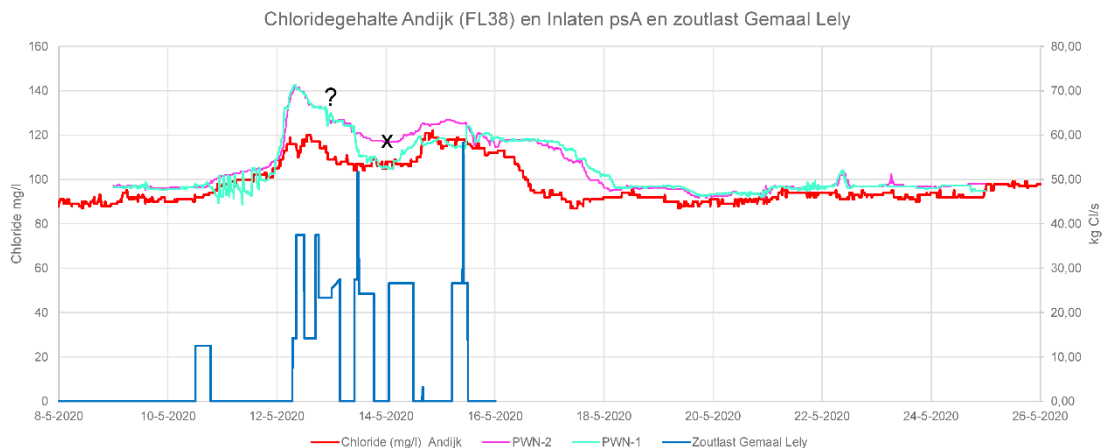
Er treedt een verdunning op van globaal een factor 50 à 100: bij gemaal Lely is er een toename van zo'n 2600 mg/l (van 95 naar 2700 mg/l) of na lozing 1300 mg/l (van 95 naar ~1400 mg/l); bij PWN is de verhoging nog maar 25 mg/l (van 95 naar 120 mg/l). We proberen met het model dus het restant van de lozing of de rand van de pluim te simuleren. Het transport langs de kust is in het model veel trager dan uit de ruwe schatting volgde (~4 dagen versus ~10 uur). De transport patronen ogen reëel op globale schaal, maar voor specifieke locaties is er een grote invloed door 'toevallige' patronen en neren:

- de stroming laat los van de oever bij het uitkomen van de baai tussen Medemblik en Proefpolder Het Grootslag (zie bijvoorbeeld Figuur 5.5 en 5.6),
- de stroming laat los bij de bocht in de oever van de PWN bassins (waardoor de resultaten voor innamepunten psA en WPJ sterk verschillen, zie Figuur 5.7 en Figuur 5.8)

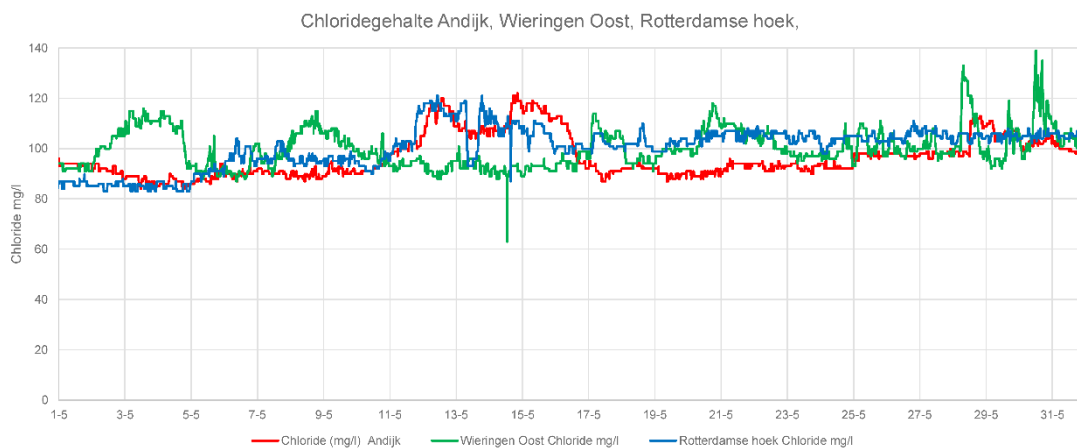
Het is bovendien de vraag of de lozing van zout bij gemaal Lely de enige aanleiding is voor de waargenomen verhoging van het chloridegehalte bij Andijk vanwege:

- het geringe faseverschil tussen de lozing bij gemaal Lely en de waargenomen pieken bij Andijk, zie Figuur 5.9; dit strookt niet met het transportgedrag in het model.
- het verloop van het zoutgehalte in Meetstation Rotterdamse Hoek, dat gelijkenis vertoont met dat in Andijk, zie Figuur 5.10.

Mogelijk is het tijdelijk hogere zoutgehalte van Andijk vergeleken met Rotterdamse Hoek (14 mei 20h – 16 mei 18h, max. +15 mg/l) wel gerelateerd aan de lozingen bij gemaal Lely plus orde 4 dagen transporttijd (vanaf 10 mei 12 h).



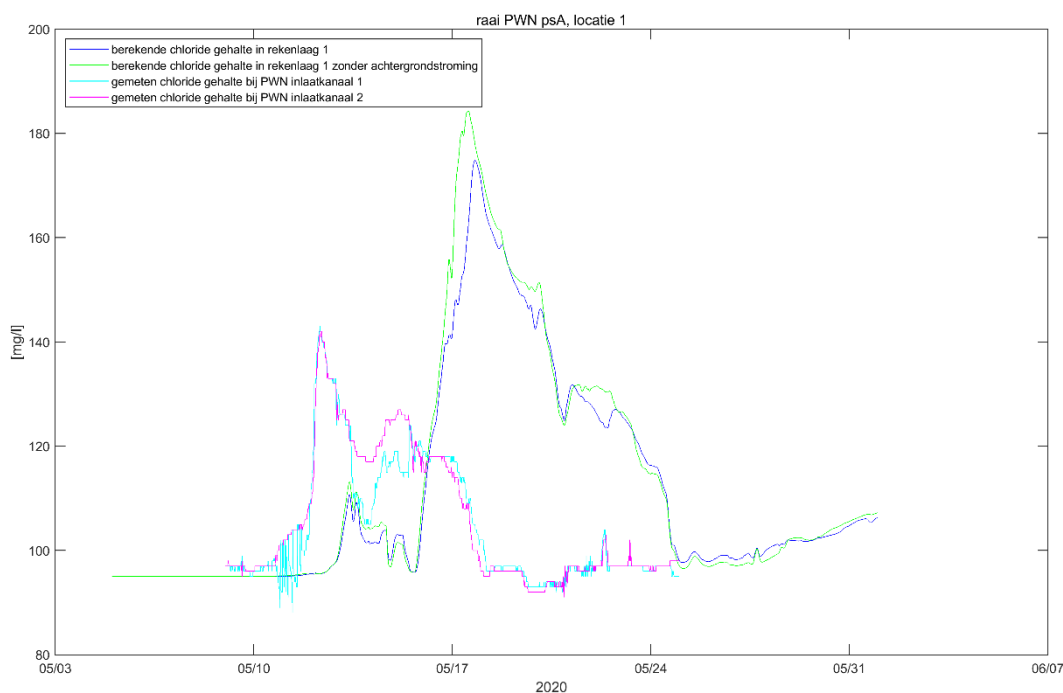
*Figuur 5.9 Fasering lozing gemaal Lely en metingen van PWN bij Andijk. X = meting PWN-2 niet juist omdat inlaat 2 gesloten was; ? = beide inlaten gesloten, beide metingen mogelijk niet accuraat.*



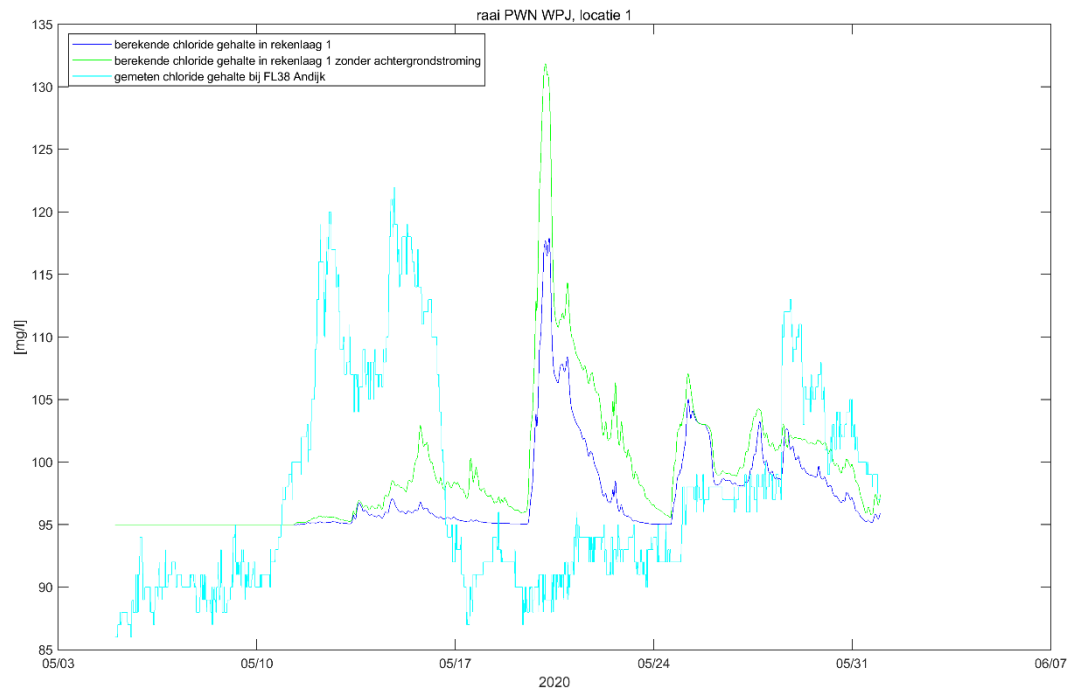
Figuur 5.10 Gemeten chloride gehalte op drie locaties in IJsselmeer.

Gevoeligheidsanalyses met wind, viscositeit, achtergrondzoutgehalte, andere detaillering lozing, golfgedreven stroming gaan waarschijnlijk niet eenvoudig helpen het resultaat te verbeteren.

Tenslotte is wel nog een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de achtergrondstroming ten gevolge van de afvoer bij de IJssel en de Afsluitdijk door een berekening uit te voeren zonder deze achtergrondstroming. De invloed op het zoutgehalte bij het innamepunt psA van PWN bij Andijk is betrekkelijk klein, zie Figuur 5.11. Voor innamepunt WPJ is relatief meer effect te zien van de achtergrondstroming in Figuur 5.12. Dit laat zien dat windgedreven stromingen lokaal dominant kunnen zijn voor stofverspreiding in het IJsselmeer, waarbij de verversing van water door afvoer plaatsvindt op een andere, langere tijdschalen.



Figuur 5.11 Chloride [mg/l] zoals gemodelleerd met (donkerblauwe lijn) en zonder achtergrondstroming (groene lijn) en gemeten bij PWN inname punt psA.



Figuur 5.12 Chloride [mg/l] zoals gemodelleerd met (donkerblauwe lijn) en zonder achtergrondstroming (groene lijn) en gemeten bij PWN inname punt WPJ.

### 5.3.6 Conclusies en aanbevelingen

De modelsimulatie van de zoutlozing door gemaal Lely laat zien dat het niet aannemelijk is dat het verhoogde zoutgehalte bij Andijk van 12 – 17 mei 2020 volledig is te verklaren door deze lozing.

Het ligt ook niet in de verwachting dat bij de onderhavige verdunningsgraad van 50 à 100 het gedetailleerde tijdsverloop van de zoutconcentratie in de innamepunten met modellen betrouwbaar kan worden gesimuleerd bij een lozing op 10 km afstand. Andere zoutbronnen, waarvoor geen courante gegevens beschikbaar zijn, spelen ook een rol in het wel of niet overschrijden van het EGV criterium bij de inlaten van PWN bij Andijk.

De casus voor lokale zoutverspreiding bevestigt dat het model geschikt is om effecten te analyseren van mogelijke veranderingen in het systeem. Omdat windgedreven stroming daarbij dominant lijkt te worden voor lokale menging- en transportprocessen wordt wel aanbevolen de gevoeligheid van de modeluitkomsten voor de windforcering na te gaan. In deze casus is bijvoorbeeld 10-minuten wind van meetstation Stavoren gebruikt, terwijl het andere voorbeeld was gebaseerd op uurlijkse wind van De Kooi. Daarnaast zou ook de ruimtelijke variëratie van de wind relevant kunnen zijn, onder meer vlak bij de kust (land-water overgang).

Voor de verdere modelontwikkeling wordt aanbevolen:

- de kusten langs te lopen, niet alle havens zijn automatisch goed opgenomen in Baseline,
- de diepte van het buitendijks gebied is niet correct bij de PWN bassins,
- na te gaan welke variaties van waterkwaliteitsparameters (inclusief tijd- en ruimteschalen) wel betrouwbaar zijn te modelleren in het zwak-dynamische IJsselmeersysteem.



## 6 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport beschrijft een eerste versie van een D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer. Met deze versie is de waterbeweging gedurende een stormperiode in januari 2007 in 2DH (dieptegemiddeld) gesimuleerd, en het zouttransport in de droge periode van juni – december 2018 in 3D. Zowel de modelbouw als de eerste resultaten voor waterstanden en zoutconcentraties zijn gerapporteerd.

Dit rapport is bedoeld om de status weer te geven van deze eerste modelversie. In de modelontwikkeling is gekozen voor een iteratieve aanpak: gerapporteerd is het resultaat van een eerste iteratieslag (gegeven beschikbare meetgegevens, kennis, software en budget). Het rapport dient om voor RWS toepassingen na te kunnen gaan waar het model al wel bruikbaar voor is en waarvoor verdere ontwikkelingen/verbeteringen nodig zijn (in een volgende iteratieslag).

### 6.1 Conclusies

Het hier gerapporteerde D-HYDRO/D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer betreft een eerste versie.

De modelperformance in diepte gemiddelde mode (2DH) voor de stormperiode in januari 2007 laat zien dat het D-Flow FM IJsselmeer deelmodel het over het algemeen even goed doet als het WAQUA-ym\_ijvd\_ov-j16\_5-v1 model. De relatief kleine automatisch bepaalde tijdstap is een punt van aandacht. De daardoor relatief grote rekentijden kunnen ondervangen worden door van meer en moderne hardware.

Voor hoogwaterveiligheidstoepassingen met waterstanden in 2DH (o.a. RWsOS Meren en BOI) is een uitbreiding van het gebied gewenst en wordt een meer uitgebreide validatie aanbevolen. Voor operationele hoogwatervoorspelling kan met resultaten van dit rapport al wel een indruk verkregen worden van de te verwachten rekentijden van het deelmodel. Voor toepassingen in 3D en/of met transport (waaronder zout) wordt het deelmodel geschikt geacht om te gebruiken voor het in een eerste fase verkennen van mogelijke inrichtingsmaatregelen op een globale schaal en door het doen van relatieve vergelijkingen. Voor meer gedetailleerde studies en/of het gebruik van absolute modelresultaten zal het deelmodel voor toepassingen in 3D en/of met transport eerst verder verbeterd moeten worden in een volgende iteratieslag. Hiervoor zijn wel betere meetgegevens en randvoorwaarden (volledig voor alle in-/uitstroom locaties in combinatie met meteorologische gegevens: wind en neerslag/verdamping voor zelfde periode) noodzakelijk.

### 6.2 Aanbevelingen

#### 6.2.1 Algemeen

De geschiktheid van het D-Flow FM deelmodel voor het IJsselmeer hangt van het beoogde doel af: voor wat voor een toepassing dient het ingezet te worden? Het is hiervoor belangrijk om meer begrip te krijgen van relevante ruimte- en tijdschalen van processen die voor de verschillende doelen in het model meegenomen moeten worden. Door het opschalen naar een grovere resolutie (met rekencellen van zo'n 400 m bij 400 m groot) van het huidige, relatief fijnmazige model kan al op hoofdlijnen gevoel gekregen worden (ook van de bijkomende winst in rekestijd). Hieruit kunnen dan ook betere aanpakken volgen voor bijvoorbeeld klimaatstudies (model met genoeg resolutie voor variaties in ruimte en tijd en genoeg fysische procesresolutie – zoals wind, maar snel genoeg om langere perioden door te rekenen).

Voor de eerste versie van het model was relatief veel focus op het voldoende volgen met het rekenrooster van belangrijke geometrie. In een volgende iteratieslag is aandacht nodig voor hoe goed de mee te nemen processen (moeten) worden gemodelleerd (denk bijvoorbeeld aan dichtheidsstroming in geulen). Echter, om dit te kunnen beoordelen is het belangrijk dat er voldoende realistische randvoorwaarden en meetgegevens voorhanden zijn. Daarom zijn de belangrijkste aanbevolen eerste ontwikkelpunten voor toepassingen met zoutverspreiding in 3D gericht op het verbeteren van (zout)randvoorwaarden:

- Verder ontwikkelen en inbouwen van Zeesluisformulering. Eerst vaststellen tot wel detail (maand, dag, uur, of 10 minuten basis) dit gewenst is o.b.v. de maatgevende processen in het model (sluisoperatie, sterkte dichtheidsstroming, variabiliteit wind gedreven stroming en getijafhankelijk spuien) en beschikbaarheid van informatie (o.a. deur-open-tijden, schepen/waterverplaatsing).
- Inbouwen/offline zoutlekformulering voor spuisluizen, voortbouwend op de analyses in [13] en mogelijkheden nieuwe monitoring netwerk.

Een tweede stap is dan het verbeteren van de verticale resolutie en het meng- en transportgedrag van het model. De horizontale ruimtelijke discretisatie -het rekenrooster en de daarop geprojecteerde diepte- van het model lijkt vanuit geometrisch oogpunt goed genoeg: daar waar nodig is voldoende fijnmazige resolutie, daar waar niet nodig is de resolutie inderdaad ook minder groot (maar wellicht is deze resolutie niet nodig voor andere toepassingen, dit hangt af van de relevante ruimte- en tijdschalen van transport en processen die meegenomen moeten worden voor de toepassing, zie eerdere opmerking aan het begin van deze sectie).

## 6.2.2 Specifiek

### 6.2.2.1 Geometrische gegevens

Aanbevolen wordt om voor de gebruikte Baseline gegevens lopende (waaronder de vernieuwing van de Afsluitdijk) en geplande ontwikkelingen (bijvoorbeeld het sluisencomplex bij Kornwerderzand) in het IJsselmeer na te gaan, inclusief de ligging van sluisen en gemalen. Hierbij is ook aandacht nodig voor kleine havens (waaronder de diepte bij Makkum en havens tussen Medemblik en Enkhuizen) en deelgebieden die niet bij RWS in beheer zijn (o.a. drinkwaterbekkens van PWN bij Andijk). Tevens wordt aanbevolen na te gaan of irregulariteiten in Baseline bij de vaargeul ten zuiden van Den Oever overeenkomen met de werkelijke situatie.

### 6.2.2.2 Rekenrooster

Er is nu nog geen roosterconvergentiestudie uitgevoerd. Dat wordt wel sterk aanbevolen. Dit kan gecombineerd worden met de aanbeveling om meer begrip te krijgen van relevante ruimte- en tijdschalen van processen die voor de verschillende doelen in het model meegenomen moeten worden en levert ook nuttige resultaten voor toepassing in operationele hoogwatervoorspelling binnen RWsOS Meren (o.a. t.b.v. ensemble simulaties).

In deze eerste iteratie zijn vanwege praktische redenen (nog niet geheel werkende Z-lagen functionaliteit in D-Flow FM software en beperken van rekentijd voor toepassing) nu 5 (equidistante) sigma-lagen in de verticale richting gebruikt. Met name voor de ontgrondingskuilen bij de spuisluizen is dit niet voldoende. Hiervoor zal in de volgende iteratieslag overgegaan moeten worden naar Z-lagen of gecombineerde sigma-/Z-lagen en een groter aantal lagen.

Voor de casus van mei 2020 zijn 10 equidistante sigma-lagen toegepast. Uit de grote verschillen tussen de dieptegemiddelde stroomsnelheid en richting en die aan het wateroppervlak blijkt de relevantie van verticale resolutie voor transportprocessen waarin wind een dominante rol speelt. De verticale resolutie speelt dus op meer plaatsen in het modelgebied, en niet alleen bij de ontgrondingskuilen.

#### 6.2.2.3 Modelverbeteringen

Tijdens het bepalen van de modelperformance zowel in 2DH als 3D bleek het model in combinatie met de D-Flow FM software vrij gevoelig te zijn voor de opgelegde randvoorwaarden. Aanbevolen wordt om na te gaan, indien mogelijk met betere randvoorwaarden, wat er nu precies aan de hand is. Ook de rol/het effect van de automatische tijdstap (die nogal klein werd), de huidige work around voor de spuisluisen in de Afsluitdijk en het gebruik van een open rand als alternatief zal hierin meegenomen moeten worden.

Neerslag/verdamping is nu geïmplementeerd door drie separate lozingen/onttrekkingen in het IJsselmeer. Bij neerslag heeft dit een lokaal effect op de berekende chloride/zoutconcentraties: het lijkt alsof er lokaal een zoetwaterlozing optreedt. In een volgende iteratie zal dit verbeterd moeten worden in het model, bijvoorbeeld door een evenredige verspreiding over het gehele modelgebied.

Vanwege het grote belang van windgedreven stroming voor mengingen en transport processen in het IJsselmeer wordt aanbevolen in een volgende iteratie na te gaan hoe gevoelig de modeluitkomsten zijn voor een andere windforcering (tijdreeks van een ander meetstation en/of ruimtelijk variërende wind).

De rol van de samenstelling van de initiële condities (waterstand, zout) in relatie tot de inspeel tijd moet verder uitgezocht worden.

Ook bevelen we aan na te gaan wat de relevantie is van de modellering van de watertemperatuur (vergelijk andere 3D D-HYDRO toepassingen). Er treedt weliswaar weinig temperatuurgelaagdheid op in het IJsselmeer, maar er is wel een grote temperatuurvariatie door het jaar heen aanwezig, met mogelijk ruimtelijke gradiënten tot gevolg door diepteverschillen. Deze variaties kunnen in combinatie met de zoutgehalten effect hebben op dichtheidsgedreven processen. Verder biedt een temperatuurmodel ook de mogelijkheid om de eerder genoemde verdamping te modelleren. En niet in de laatste plaats is de watertemperatuur een belangrijke parameter voor waterkwaliteitsmodellering, die volgt op de hydrodynamische modellering.

#### 6.2.2.4 Modelbeoordeling en uitbreiden gebied

Het stijgen van waterstanden aan het einde van stormperiode bij de eerste modelbeoordeling in 2DH dient verder uitgezocht te worden.

Voor toepassingen met waterstanden in 2DH (o.a. BOI) is een uitbreiding van het gebied gewenst en wordt een meer uitgebreide validatie aanbevolen.

Dit deelmodel voor het IJsselmeer zal opgenomen moeten worden in de zesde-generatie D-HYDRO modelschematisatie van de IJssel Vecht Delta (IJVD). Op het ogenblik loopt er een ander traject om de zesde-generatie modelschematisatie van de Overijssels Vecht Delta ten oosten van de Ramspolkering te realiseren. Als dat beschikbaar is zal ook hier op aangesloten moeten worden. Tevens kan dan het effect van sluiten en openen van de Ramspolkering in een modelsimulatie mogelijk gemaakt worden.

De aansluiting bij de Waddenzee is nog niet bepaald. Nagegaan dient te worden in hoeverre een aansluiting op roosterniveau nodig en realiseerbaar is (voor relevante processen en doelvariabelen per specifieke toepassing). Het wel of niet spuien is afhankelijk van het effect van getij en wind op de waterstand aan de kant van de Waddenzee en het effect van wind en (voornamelijk IJssel) afvoer aan de kant van het IJsselmeer. Hierbij is ook de vraag hoe de werking van de spuisluizen in de Afsluitdijk en Ramspolkering met de nieuwe D-HYDRO software aangestuurd moet worden. Voor zout/chloride verspreiding speelt zowel zoutindringing aan de kant van het IJsselmeer als het effect van een zoetwaterbel aan de kant van de Waddenzee. Deze wisselwerking is nog niet meegenomen: nu worden ingeschatte randvoorwaarden opgelegd bij de sluisen in de Afsluitdijk.

## 7 Referenties/Literatuur

- [1] Aukje Spruyt e.a., Ontwikkeling zesde-generatie modellen met D-HYDRO - Generieke technische en functionele specificaties Deltares rapport 11200569-000-ZWS-0028, 2017.
- [2] Menno Genseberger en Arnout Bijlsma, Beter monitoren, begrijpen en voorspellen van zout/chloride in het IJsselmeer, Deltares rapport 11202241-001-ZWS-0002, december 2018.
- [3] Mirjam van der Mheen, 5de generatie IJVD WAQUA model - Bouw, kalibratie en verificatie, Deltares rapport 1209449-007, 2014.
- [4] Carlijn Eijsberg - Bak, Actualisatie IJsselmeer en IJssel Vechtdelta model 2016, Deltares rapport 1230071-005-ZWS-0012, 2016.
- [5] Menno Genseberger en Arnout Bijlsma, Actualisatie 3D zoutverspreidingsmodel IJsselmeer, Deltares rapport 1230069-000-ZKS-0033, 2016.
- [6 ] Menno Genseberger, Carlijn Eijsberg - Bak, Asako Fujisaki en Christophe Thiange, Ontwikkeling zesde-generatie Markermeer en Veluwerandmeren model - Modelbouw en validatie, Deltares rapport 11200569-009-ZWS-0013, december 2019.
- [7] M. Mogé, M. J. Russcher, A. Emerson, and M. Genseberger, Scalable Delft3D Flexible Mesh for Efficient Modelling of Shallow Water and Transport Processes, PRACE White Paper 284, 2019. Online available via <http://www.prace-ri.eu/IMG/pdf/WP284.pdf>
- [8] Menno Genseberger, Maxime Mogé, Martijn Russcher, and Andrew Emerson, Towards scalable Delft3D Flexible Mesh on PRACE infrastructures for real life hydrodynamic applications, poster at the 26th International Conference on Domain Decomposition Methods, December 2nd-6th, 2019, Hong Kong, China.
- [9] Menno Genseberger (ed.), Merenmodellen in D-HYDRO – Pilot-applicatie Markermeer, Deltares rapport 1230071-011-ZWS-0019, 2016. Bijlage van Aukje Spruyt e. a., Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de 6e-generatie modellen van RWS, Deltares rapport 1230071-011-ZWS-0009, 2016.
- [10] Iris Niesten, Menno Genseberger, Asako Fujisaki en Aukje Spruyt, aansluiting zesde-generatie modelschematisaties IJVD en Rijntakken, Deltares memo 11203714-005-ZWS-0011, 2019.
- [11] I. Brongers / B. de Witte, Chloridemetingen in het IJsselmeer bij inlaten water via de spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand, CIV / Midden Nederland, 2014.
- [12] C. Kuijper, Salt Conversions Formula for NaCl and seawater, Delft Hydraulics report Z163-20, 1999.
- [13] Friocourt, Y. (2020). Nieuwe inzichten naar aanleiding van de verzilting van het IJsselmeer in 2018 en actualisatie van de posten van de water- en zoutbalans van het meer. RWS-WVL, eerste concept 20 maart 2020.

# A Lijst met gebruikte model instellingen D-Flow FM

In Tabel A.1 worden gebruikte instellingen voor het D-Flow FM deelmodel van het IJsselmeer bij het onderdeel [numerics] vermeld. In Tabel A.2 die bij de onderdelen [physics] en [wind]. Voor 2DH en 3D zijn voor een paar parameters andere waarden genomen, dit is bij de betreffende parameter aangegeven. Er is voor een aantal instellingen afgeweken van de generieke instellingen voor de zesde-generatie modelschematisaties (zoals weergegeven in Bijlage C van [1]). De afwijkende instellingen gelabeld met \*\* in Tabel A.2 zijn zo gekozen omdat dit overeenkomt met de instellingen van het vijfde-generatie WAQUA model [3, 4] en dit voor wind belangrijk is. De afwijkende instellingen gelabeld met \*\*\* in Tabel A.2 komen overeen met een gebiedsspecifieke instelling van de bodemruwheid (zie ook sectie 4.3).

Tabel A.1 Instellingen bij onderdeel [numerics] voor D-Flow FM deelmodel IJsselmeer.

Parameter	waarde
[numerics]	
CFLMax	0.7
AdvecType	33
TimeStepType	2
Limtyphu	0
Limtypmom	4
Limtypsa	4
TransportMethod	1
Vertadvtypsal	6
Icgsolver	6
Maxdegree	6
FixedWeirScheme	9
FixedWeirContraction	1
FixedWeirfrictscheme	1
Fixedweirtopwidth	3
Fixedweirtopfrictcoef	-999
Fixedweirtalud	0.25
Izwndpos	0
Tlfsmo	0 (2DH) / 3600 (3D)
Slopedrop2D	0
Chkadvd	0.1
Teta0	0.55
Qhrelax	0.01
Jbasqbnndownwindhs	0
cstbnd	0
Maxitverticalforestersal	0
Jaorgsethu	1
Turbulencemodel	3
Turbulenceadvection	3
AntiCreep	0
Maxwaterleveldiff	0
Maxvelocitydiff	0
EpsHu	0.0001

Tabel A.2 Instellingen bij onderdelen [physics] en [wind] voor D-Flow FM deelmodel IJsselmeer.

Parameter	waarde
<b>[physics]</b>	
UnifFrictCoef	0.0263***
UnifFrictType	1***
UnifFrictCoef1D	0.0263***
UnifFrictCoefLin	0
Umodlin	0
Vicouv	1 (2DH) / 0.1 (3D)
Dicouv	1 (2DH) / 0.1 (3D)
Vicoww	5E-05
Dicoww	5E-05 (2DH) / 0 (3D)
Vicwminb	0
Smagorinsky	0 (2DH) / 0.2 (3D)
Elder	0
Irov	0
wall_ks	0
Rhomean	1000 (2DH) / 1023 (3D)
Idensform	1 (2DH) / 2 (3D)
Ag	9.81 (2DH) / 9.813 (3D)
TidalForcing	0
Doodsonstart	55.565
Doodsonstop	375.575
Doodsoneps	0
Salinity	0 (2DH) / 1 (3D)
InitialSalinity	0 (2DH) / 0.1486 (3D)
Sal0abovezlev	-999
DeltaSalinity	-999
Backgroundsalinity	30
Temperature	0
Secchidepth	1 (2DH) / 2 (3D)
Stanton	-1 (2DH) / 1.3d-3 (3D)
Dalton	-1 (2DH) / 1.3d-3 (3D)
SecondaryFlow	0
EffectSpiral	0
BetaSpiral	0
<b>[wind]</b>	
ICdtyp	2
Cdbreakpoints	0.00136673 0.0039**
Windspeedbreakpoints	7.77886 50**
Rhoair	1.205
PavBnd	0
PavIni	0



## B Definities modelbeoordeling

### B.1 Achtergrond

In het kader van de ontwikkeling van de zesde-generatie modellen voor RWS wordt gestreefd naar een uniforme aanpak voor heel Nederland. In deze bijlage wordt een aantal definities voor de beoordeling van de modellen vastgelegd die voor alle modellen toegepast gaan worden en als bijlage aan de verschillende rapportages zullen worden toegevoegd.

### B.2 Definities

Voor het beoordelen van modelschematisaties worden de termen kalibratie, validatie en verificatie gebruikt en hier wordt het volgende onder verstaan:

#### B.2.1 Kalibratie

De kalibratie bestaat uit het afregelen van onzekere of meest bepalende parameters, zodat modelresultaten overeenkomen met gemeten data. Kalibratie vindt doorgaans plaats onder (een aantal) representatieve omstandigheden (storm, hoog water, laag water, hoge afvoer, lage afvoer, etc.), maar het kunnen ook dagelijkse omstandigheden zijn (getij, gemiddelde afvoer, etc) waarvoor gekalibreerd wordt. De mate van overeenkomst tussen modelresultaten en data wordt weergegeven door de Goodness-of-fit criteria. Uit de kalibratie volgt een set gekalibreerde parameters.

#### B.2.2 Validatie

De validatie bestaat uit het toetsen van de gekalibreerde parameters in een andere situatie dan tijdens de kalibratie gebruikte periode. Een succesvolle validatie geeft vertrouwen in de mate waarin de gekalibreerde parameters ook goede resultaten geven in andere situaties. Validatie is een wezenlijk onderdeel van het kalibratieproces. Er kunnen namelijk meerdere parametersets aan de kalibratiecriteria voldoen. De beste set is dan degene die tijdens de validatie het beste presteert. Na de validatie wordt bepaald of het model geschikt is voor de toepassing. Validatie kan ook plaatsvinden in dezelfde periode als de kalibratie, maar op andere locaties of op andere grootheden. Bijvoorbeeld op tussenliggende meetpunten, of op stroomsnelheden i.p.v. waterstanden.

#### B.2.3 Verificatie

Tijdens de verificatie wordt nagegaan of het geoperationaliseerde model nog steeds consistente uitkomsten geeft. Het model wordt beoordeeld op de resultaten van de eerder gekalibreerde en gevalideerde parameters.

## B.3 Goodness-of-fit criteria

Een goodness-of-fit (GOF) criterium is een maat voor de overeenkomst van twee dataseries. Voor het beoordelen van de resultaten worden verschillende criteria gebruikt. Deze worden in de volgende paragrafen weergegeven. Hierbij zijn de eerste drie: bias, standaardafwijking en RMSE, de belangrijkste.

Deze kunnen op een groot aantal verschillende (bewerkte/gefilterde) grootheden worden toegepast, zoals:

- waterstand,
- snelheid,
- debiet,
- zoutgehalte,
- watertemperatuur,
- timing en hoogte van hoogwaters
- timing en hoogte van laagwaters
- getijamplitude en fase (per component),
- scheve opzet,
- etc.

### B.3.1 Bias

De absolute bias wordt ook wel gemiddeld verschil (GV) genoemd:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{sim,k} - y_{ref,k}$$

met  $n$  het totaal aantal datapunten in de periode waarover de bias berekend wordt,  $y_{sim}$  de gesimuleerde eenheid en  $y_{ref}$  de referentiewaarden (meestal metingen).

De bias is een maat om aan te geven of de resultaten systematisch worden overschat of onderschat. Alleen een kleine bias is echter nog geen garantie dat de overeenkomst van de datasets groot is. Als er grote schommelingen rond het gemiddelde plaatsvinden, levert dit een lage bias op, terwijl de fout lokaal wel groot kan zijn.

### B.3.2 Standaardafwijking

De standaardafwijking of  $\sigma$  (*StDev*) van de fout

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n ((y_{sim,k} - y_{ref,k}) - bias)^2}$$

Dit is een maat voor de afwijking van de resultaten vanaf de bias. Hierbij worden grotere afwijkingen zwaarder meegewogen dan kleinere. Alleen een kleine standaardafwijking is echter nog geen garantie dat de overeenkomst van de datasets groot is. De resultaten kunnen dan namelijk nog systematisch worden overschat of onderschat.

### B.3.3 Root Mean Square Error (RMSE)

De RMSE is een maat die zowel de bias als de standaardafwijking combineert:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_{sim,k} - y_{ref,k})^2} \approx \sqrt{\sigma^2 + bias^2}$$

Als er geen bias is, is de RMSE gelijk aan de standaardafwijking. En andersom is de RMSE gelijk aan de bias indien de standaardafwijking gelijk aan nul is. Een RMSE van nul is een garantie dat twee datasets exact met elkaar overeenkomen.

### B.3.4 Relatieve bias

Naast de absolute bias kan er ook worden gekeken naar de relatieve bias, wanneer het grote en onderling sterk verschillende waarden betreft:

$$\text{Relatieve Bias} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{y_{sim,k} - y_{ref,k}}{y_{ref,k}}$$

### B.3.5 Variatiecoëfficiënt

Naast de standaardafwijking kan er ook worden gekeken naar de variatiecoëfficiënt (coefficient of variation, CV), wanneer het grote en onderling sterk verschillende waarden betreft:

$$CV = \frac{\sigma}{\text{gemiddelde}}$$

De variatiecoëfficiënt is een relatieve spreidingsmaat, wat inhoudt dat de spreiding gemeten wordt ten opzichte van het gemiddelde.

### B.3.6 Verschil in waarden rond extremen

Dit is een maat om aan te geven in hoeverre extreme waarden goed worden gerepresenteerd. Hierbij wordt vaak niet gekeken naar één enkele waarde, maar naar bijvoorbeeld een gemiddelde over waarden rond de piek (om zo toevallige uitschieters uit te sluiten). Dit kan zowel de maximale waarde zijn ( $\Delta\zeta_{max}$ ) of de minimale waarde ( $\Delta\zeta_{min}$ ):

$$\begin{aligned}\Delta\zeta_{max} &= \max(y_{sim,k}) - \max(y_{ref,k}) \\ \Delta\zeta_{min} &= \min(y_{sim,k}) - \min(y_{ref,k})\end{aligned}$$

Deze maat kan o.a. worden gebruikt voor de amplitude van de getijbeweging, afvoergolven en bij stormpieken.

### B.3.7 Verschil in tijdstip van extremen

Dit is een maat om aan te geven in hoeverre de timing van de extreme waarden van verschillende datasets met elkaar overeenkomen. Er wordt dan gekeken naar het tijdstip waarop de maximale ( $t_{max}$ ) of minimale ( $t_{min}$ ) waarde voorkomt:

$$\begin{aligned}\Delta t_{max} &= t_{max}(y_{sim,k}) - t_{max}(y_{ref,k}) \\ \Delta t_{min} &= t_{min}(y_{sim,k}) - t_{min}(y_{ref,k})\end{aligned}$$

Deze maat kan worden gebruikt om te bepalen hoe groot de faseverschuiving is.

### B.3.8 Overschrijdingsduur

Naast bias, RMSE en standaarddeviatie kan ook worden gekeken naar de duur van een bepaalde normoverschrijding of het aantal overschrijdingen. Dit geldt met name voor grootheden zoals saliniteit.

### B.3.9 Gemiddelde over stations

Naast waarden per afzonderlijk (meet)station kunnen de statistieken ook worden samengevat in zowel een gemiddelde over een aantal stations en het RMS (Root Mean Square)-gemiddelde. Voor dit laatste wordt de volgende formulering gebruikt:

$$\begin{aligned}\text{Mean}_{stations} &= \frac{\Sigma (\text{Statistiek per station})}{\text{Aantal stations}} \\ \text{RMS}_{stations} &= \sqrt{\frac{\Sigma (\text{Statistiek per station}^2)}{\text{Aantal stations}}}\end{aligned}$$

Het gebruik van RMS heeft als voordeel dat fouten niet tegen elkaar uitgemiddeld worden.

## B.4 Middelingsduur variabelen

Van te voren moet goed worden afgesproken welke middelingsduur er wordt toegepast voor zowel de in- als uitvoervariabelen. Hanteer je bijvoorbeeld 10-minuutgemiddelden voor wind/waterstand, uurgemiddelden, 2-/3-/4-/6-uurgemiddelden,...

Dit hangt sterk af van de specifieke toepassing en beschikbare data. Meteoromodellen kunnen bijvoorbeeld fenomenen met tijdschalen kleiner dan een uur niet goed oppakken en dan is het ook niet te verwachten dat het waterstandsmodel schommelingen van deze tijdsschaal (of kleiner) wel goed weergeeft. Hetzelfde geldt als voor historische afvoerreeksen alleen uurwaarden (of soms alleen dagwaarden) beschikbaar zijn. Anderzijds moet de middelingsduur niet te groot worden gekozen in verband met het goed kunnen weergeven van de nodige fysische processen (zoals getij).

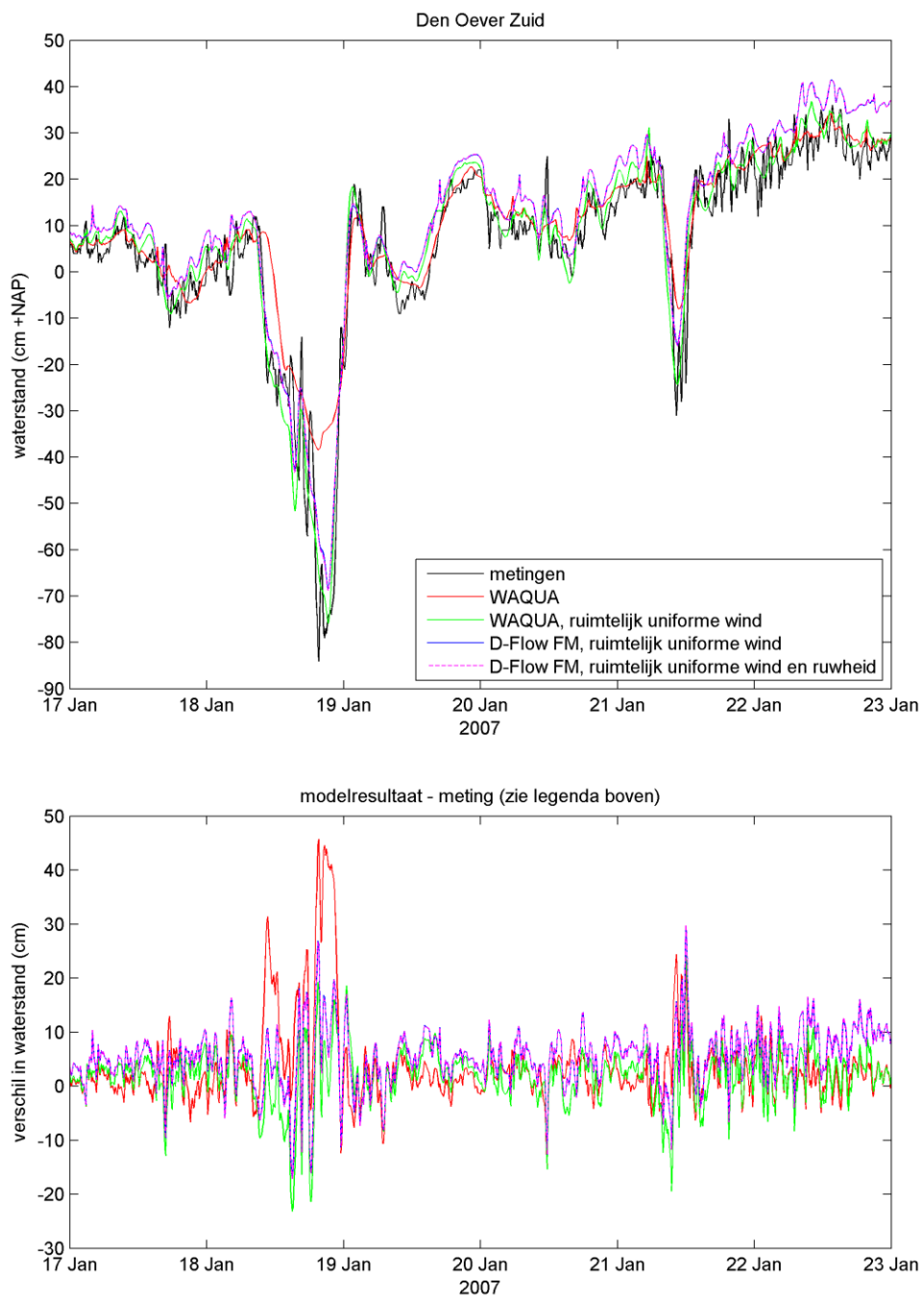
Algemeen kan worden gezegd dat je voor de middeling de kleinste tijdschaal wilt gebruiken die op basis van de data nog verantwoord is.

## B.5 Nauwkeurigheidscriterium

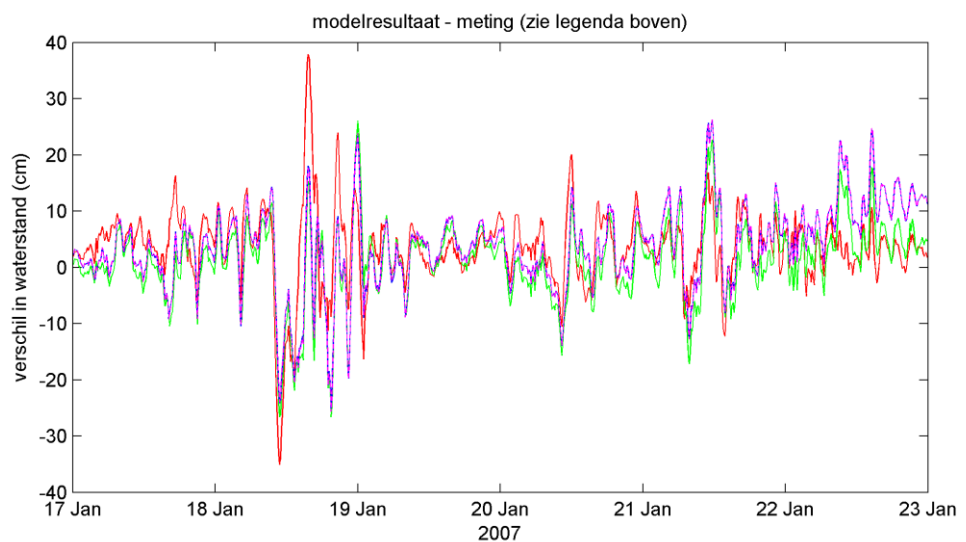
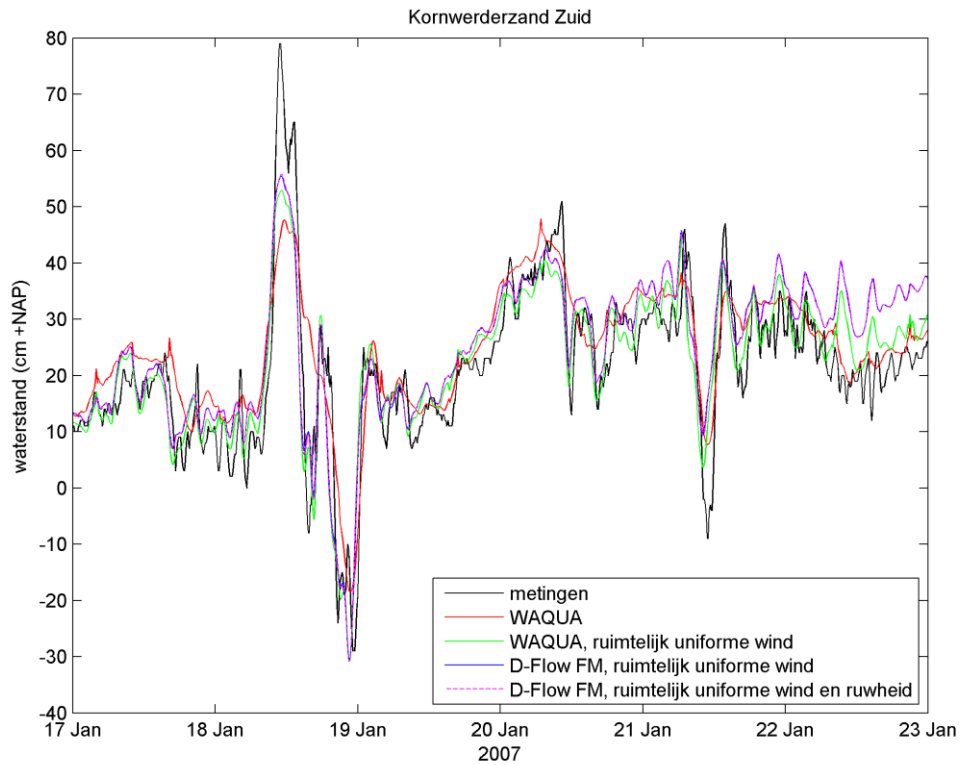
Het nauwkeurigheidscriterium bepaalt welke waarde voor de goodness-of-fit criteria gehaald moet worden om te kunnen spreken van een geslaagde kalibratie of validatie. Afhankelijk van het model, toepassing, grootte en periode kan er worden gekeken naar de GOF-criteria voor verschillende situaties, zoals:

- Stormpiek
- Hoge afvoer
- Lage afvoer
- Gemiddeld getij
- Springvloed
- Hoogwater seizoen
- Heel jaar

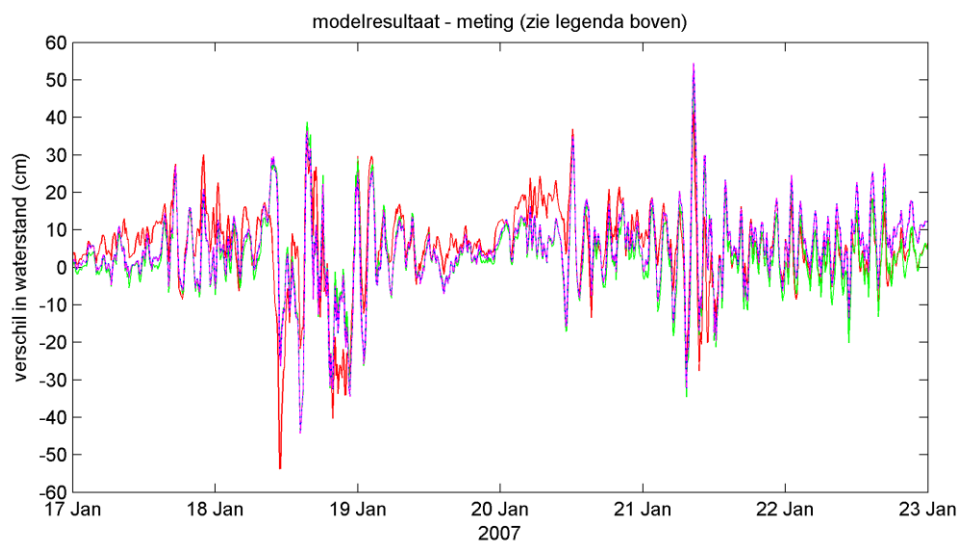
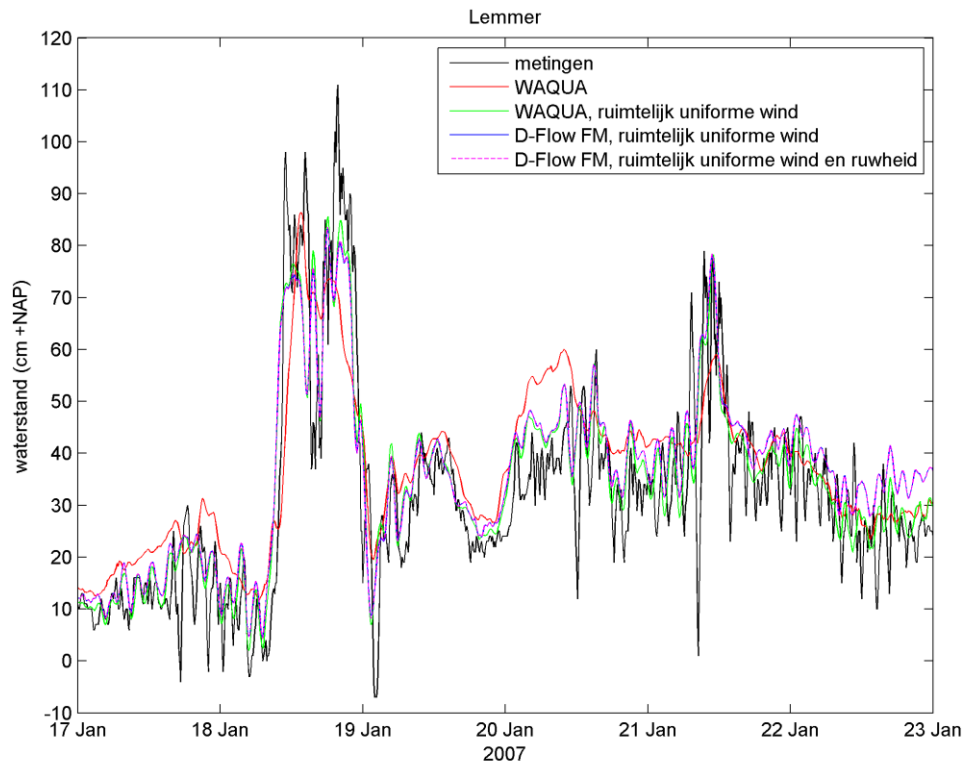
## C Resultaten waterstanden 2DH



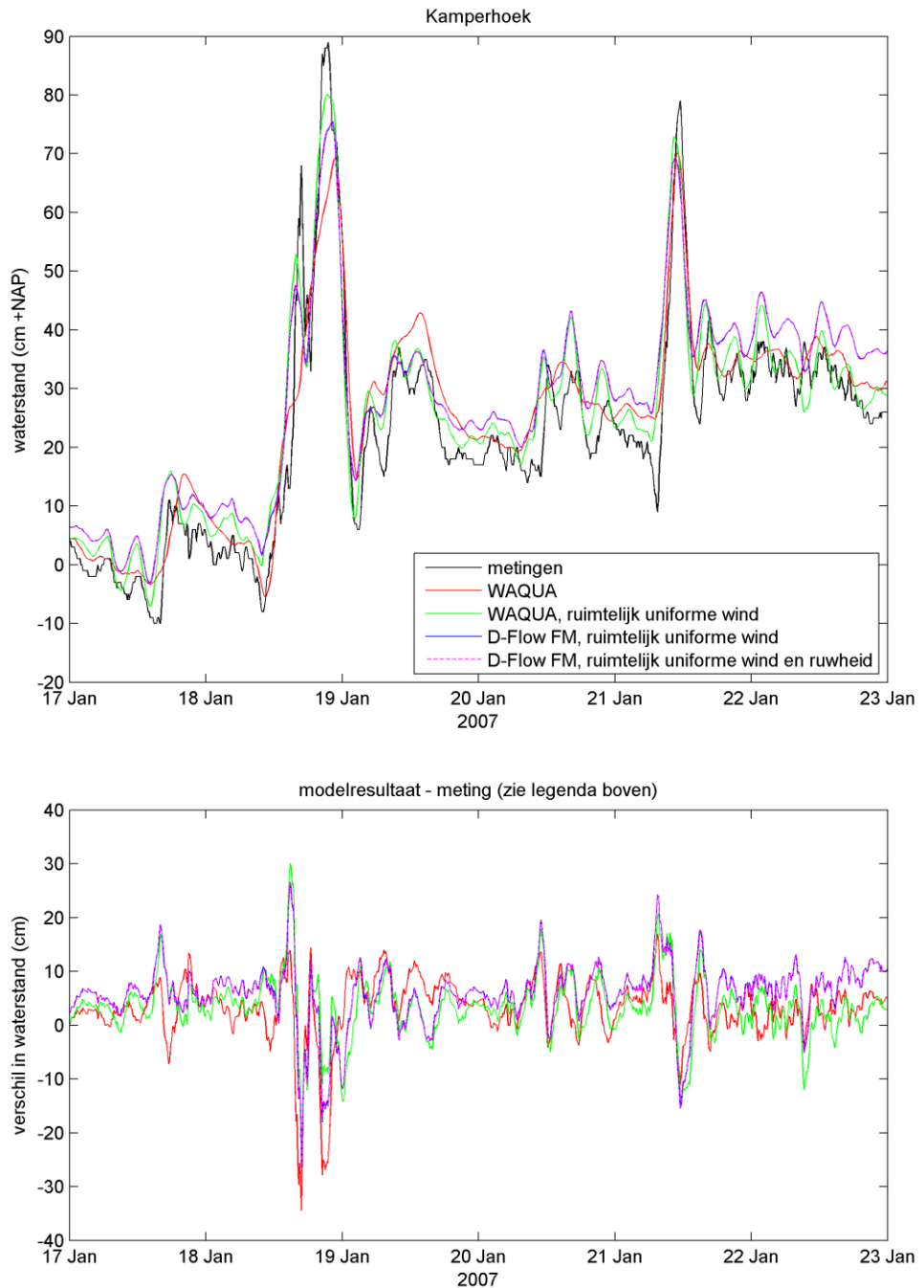
*Figuur C.1* Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Den Oever Zuid. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



Figuur C.2 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Kornwerderzand Zuid. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

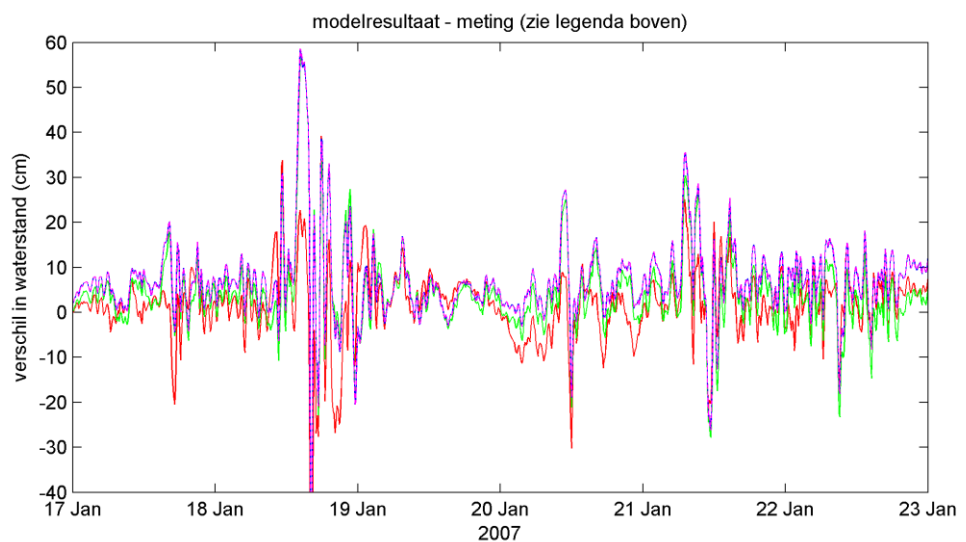
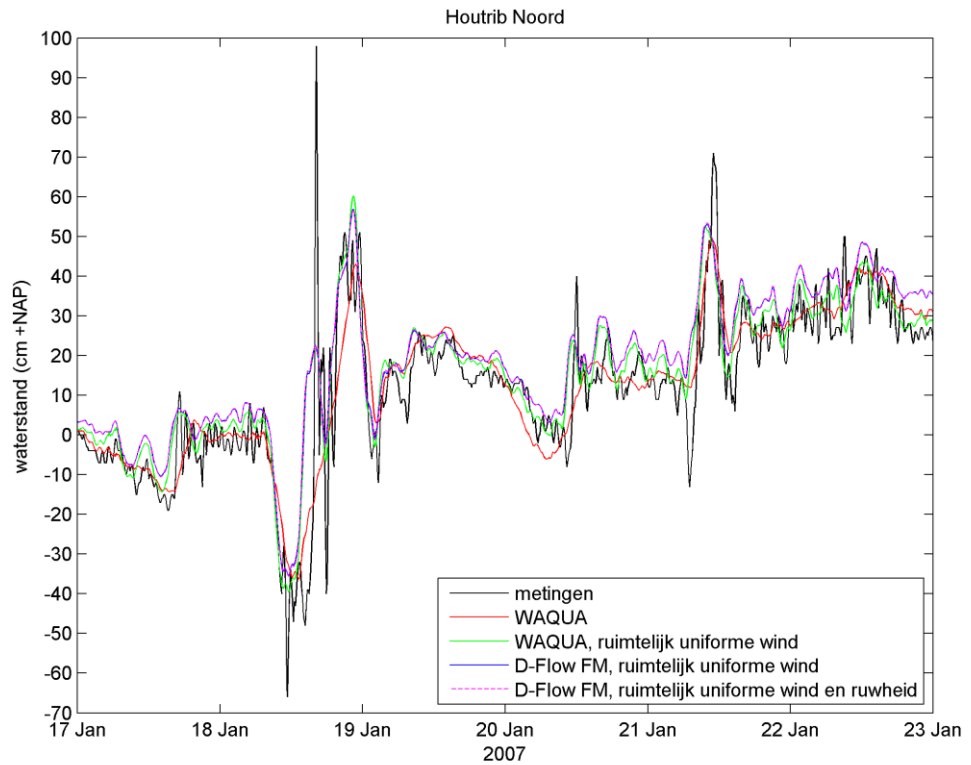


Figuur C.3 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Lemmer. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

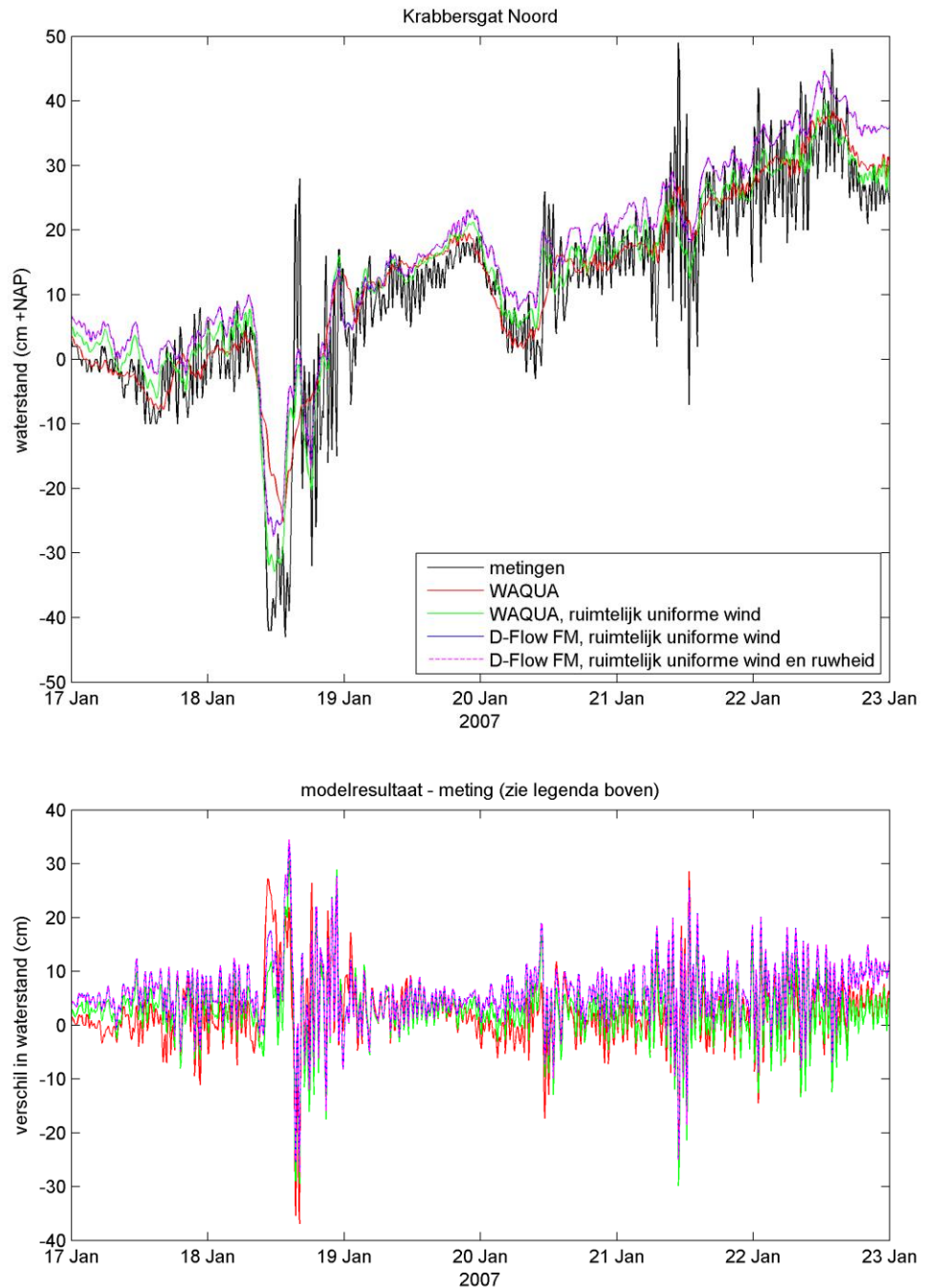


Figuur C.4 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Kamperhoek. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

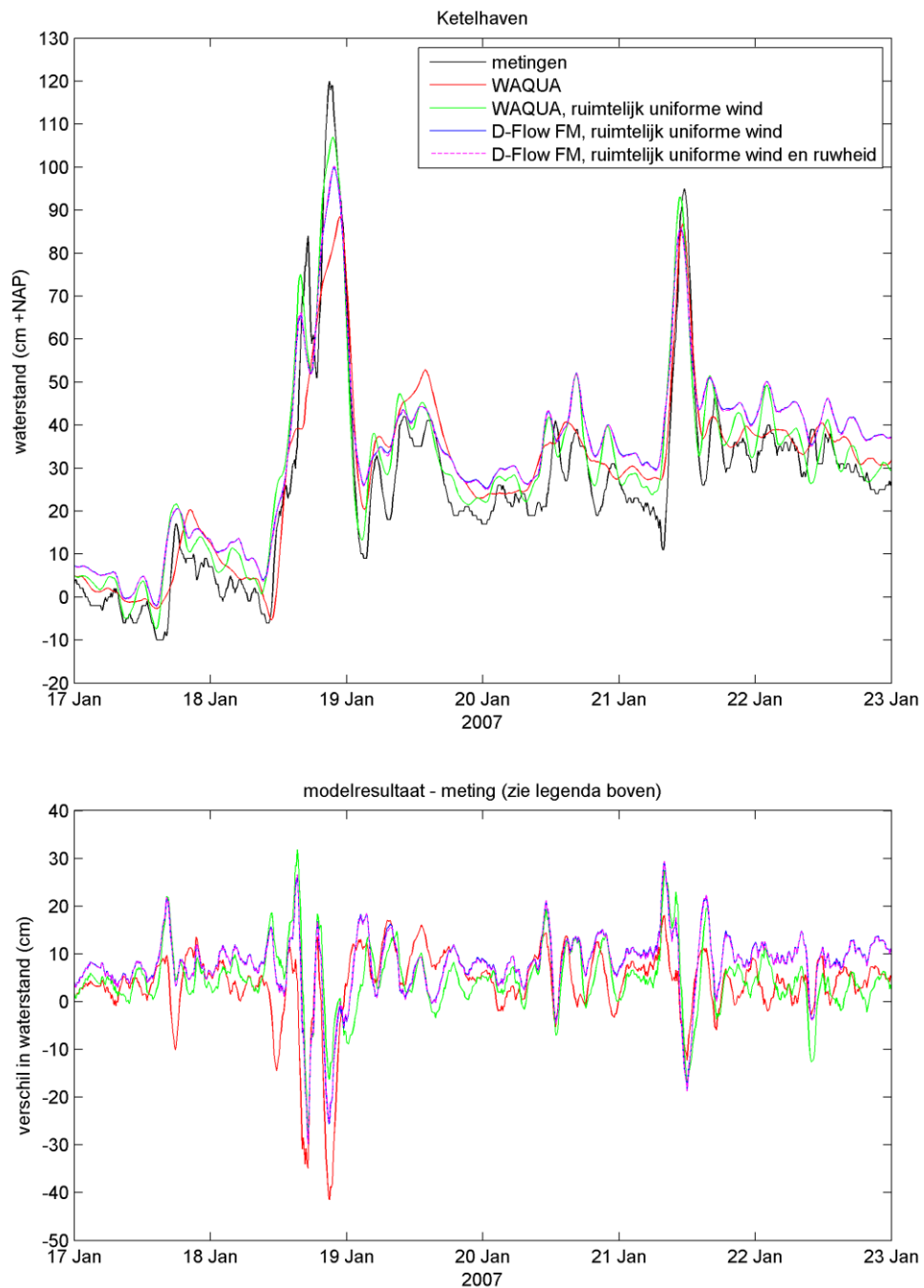




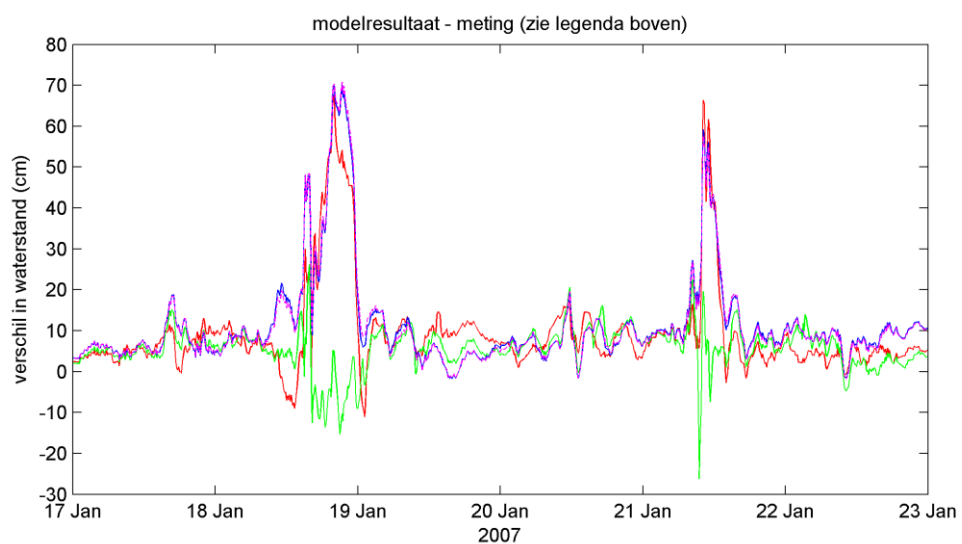
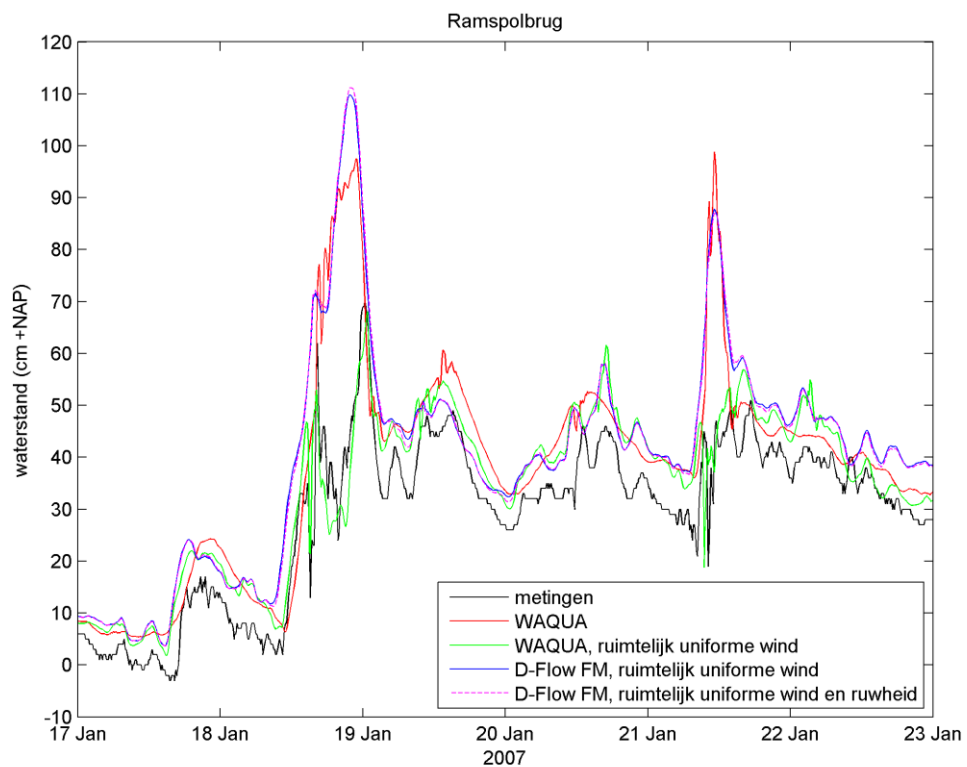
Figuur C.5 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Houtrib Noord. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



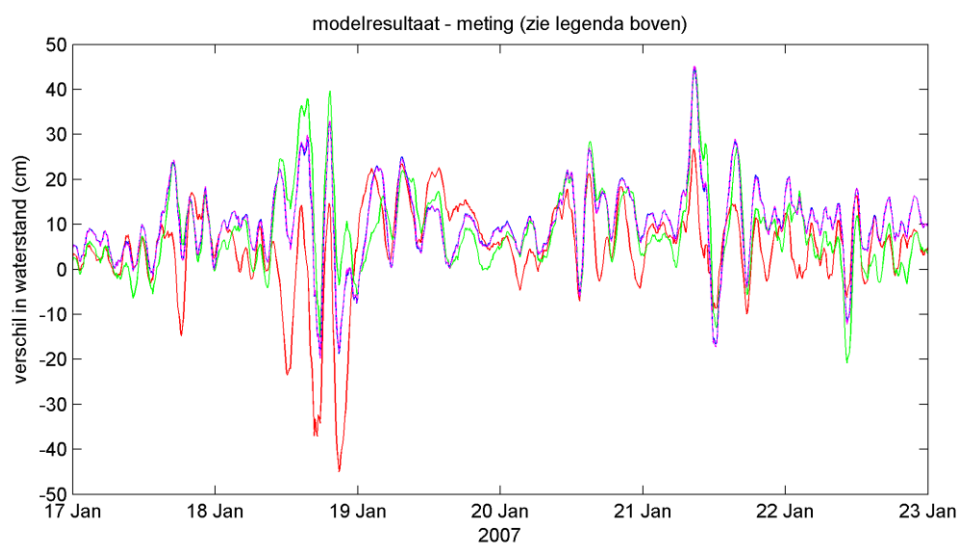
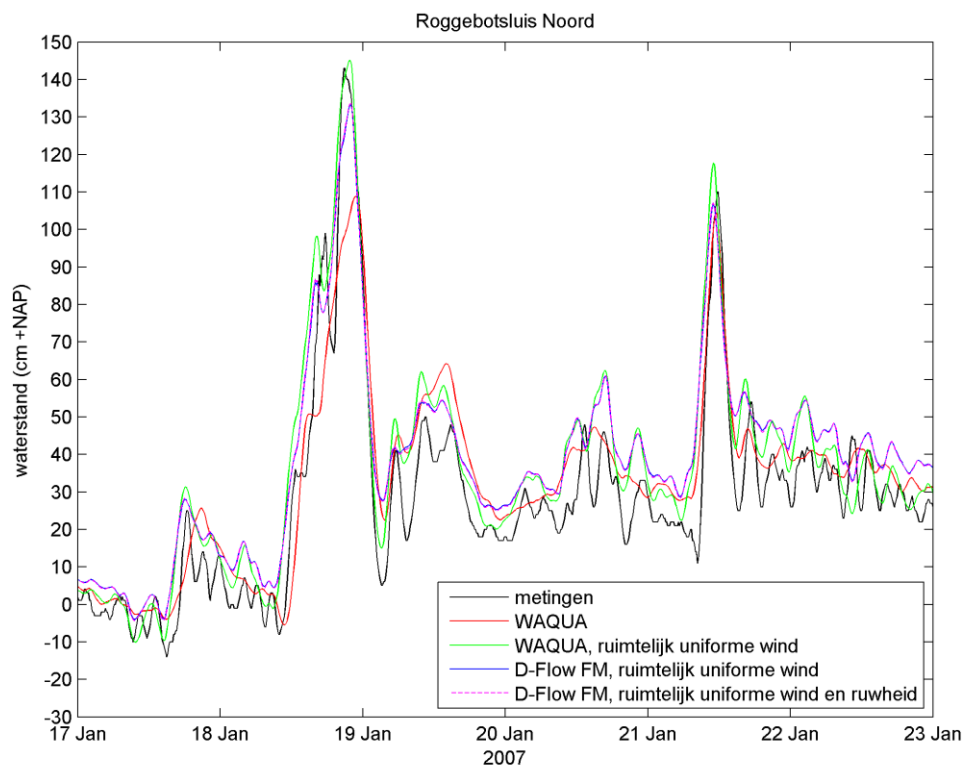
Figuur C.6 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Krabbersgat Noord. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



Figuur C.7 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Ketelhaven. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

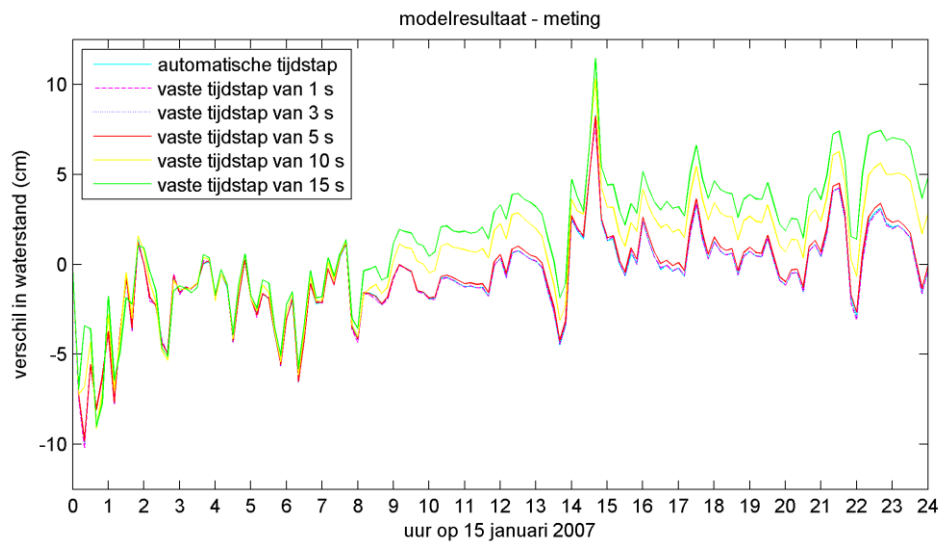


Figuur C.8 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Ramspolbrug. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

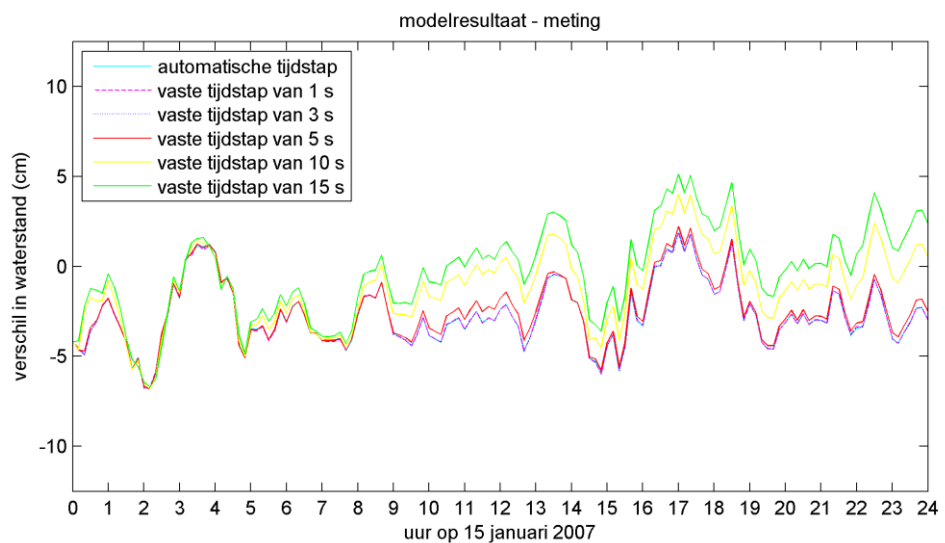


Figuur C.9 Vergelijking van gemeten en met WAQUA en D-Flow FM berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Roggebotsluis Noord. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

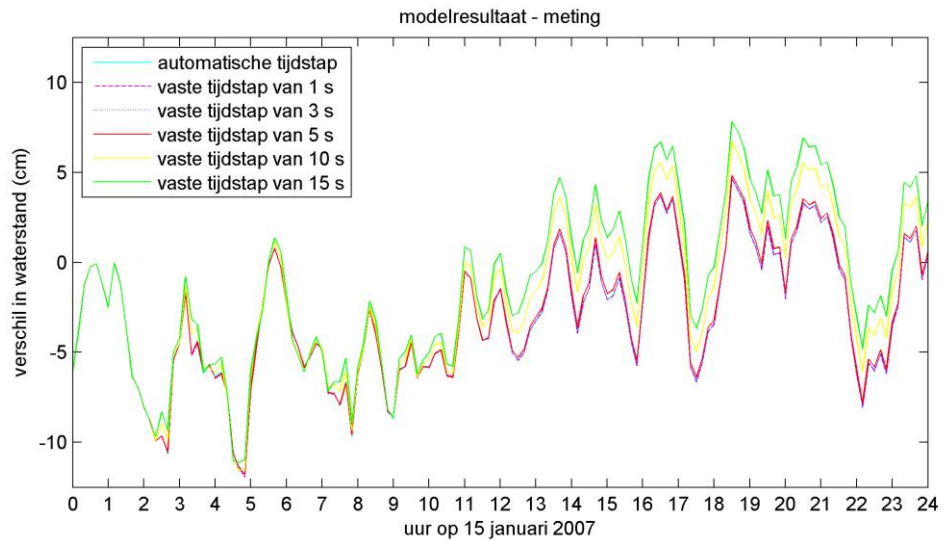
## D Resultaten tijdstap analyse waterstanden 2DH



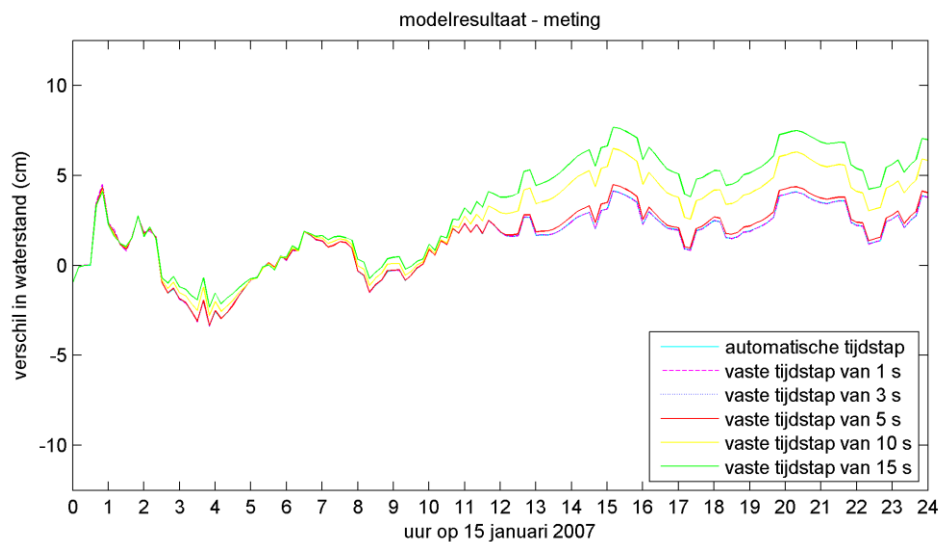
*Figuur D.1* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Den Oever Zuid. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.



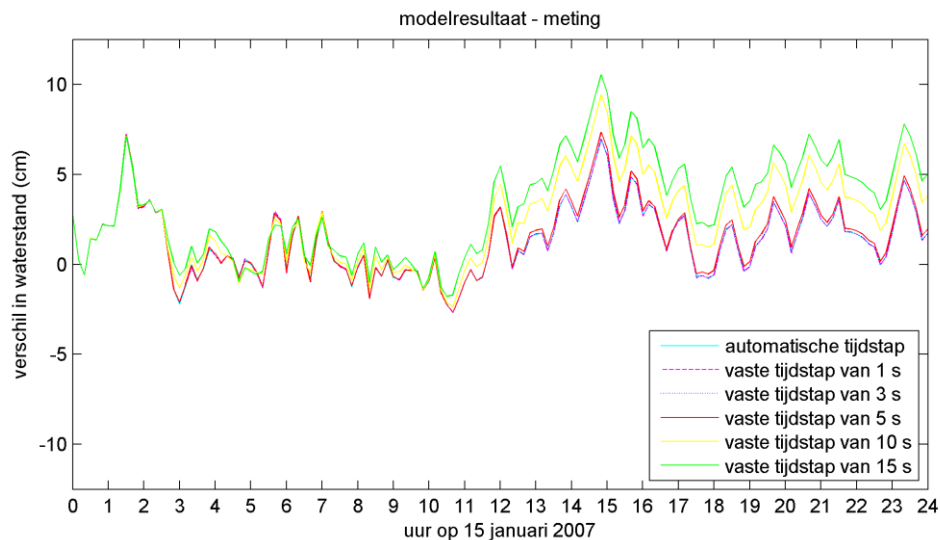
*Figuur D.2* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Kornwerderzand Zuid. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.



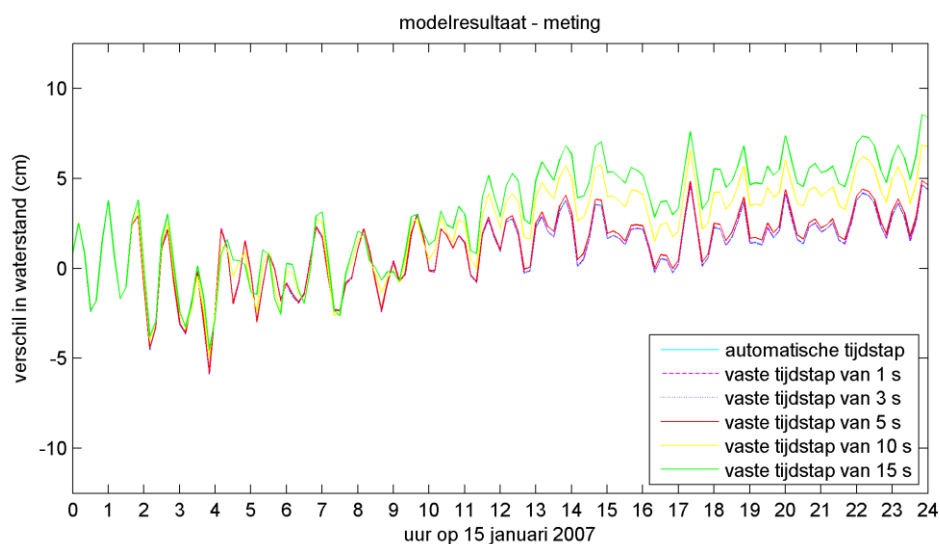
*Figuur D.3* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Lemmer. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.



*Figuur D.4* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Kamperhoek. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.

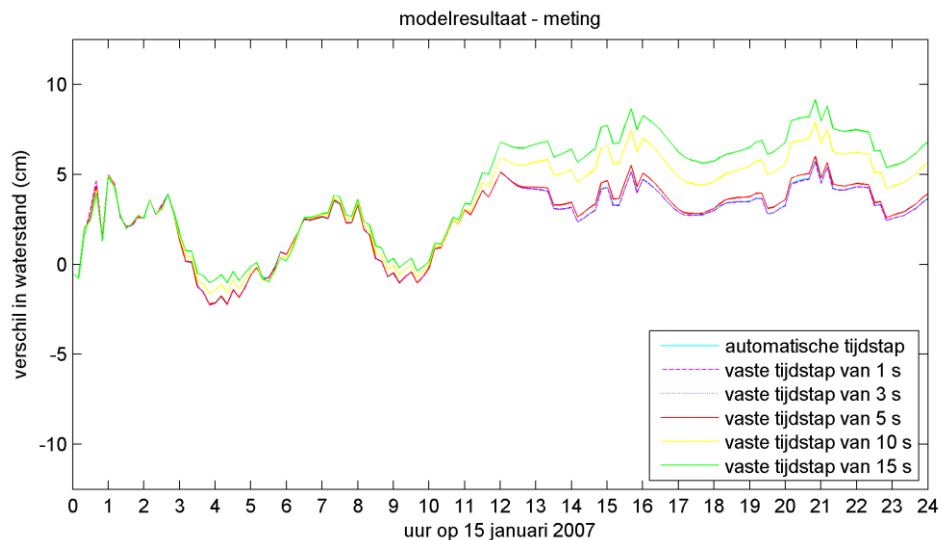


*Figuur D.5* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Houtrib Noord. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.

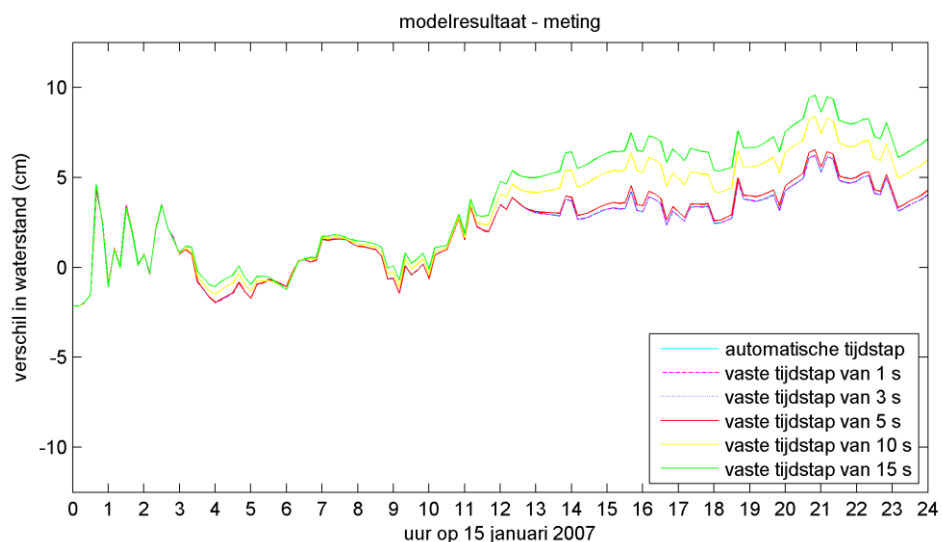


*Figuur D.6* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Krabbersgat Noord. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.

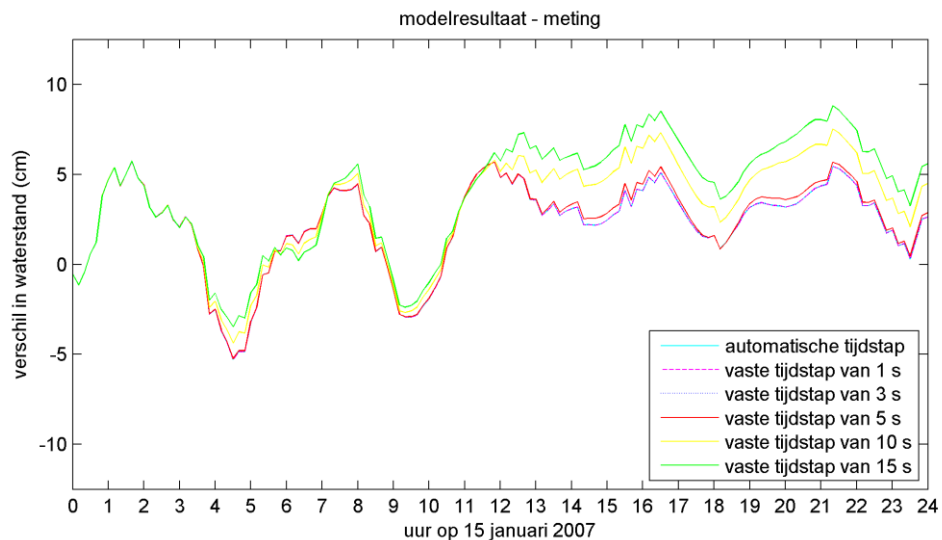




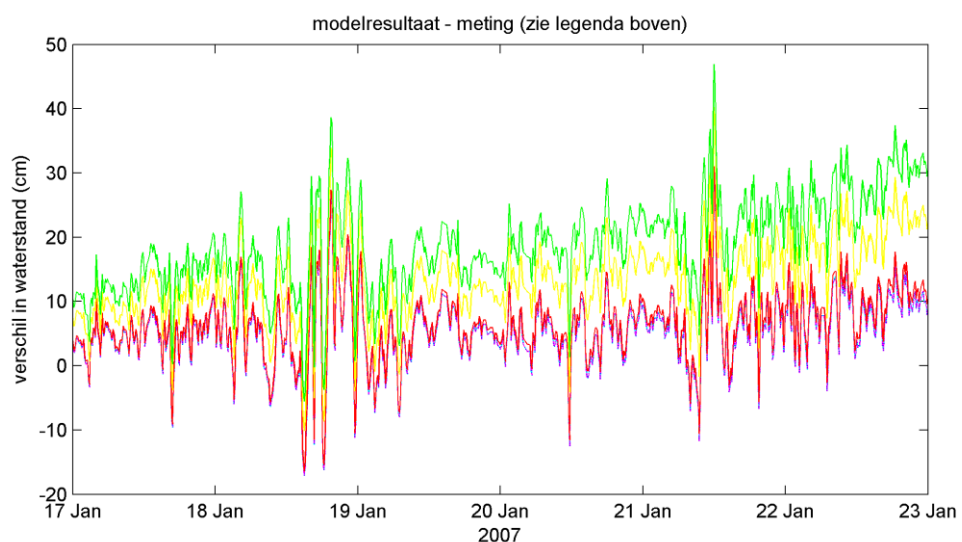
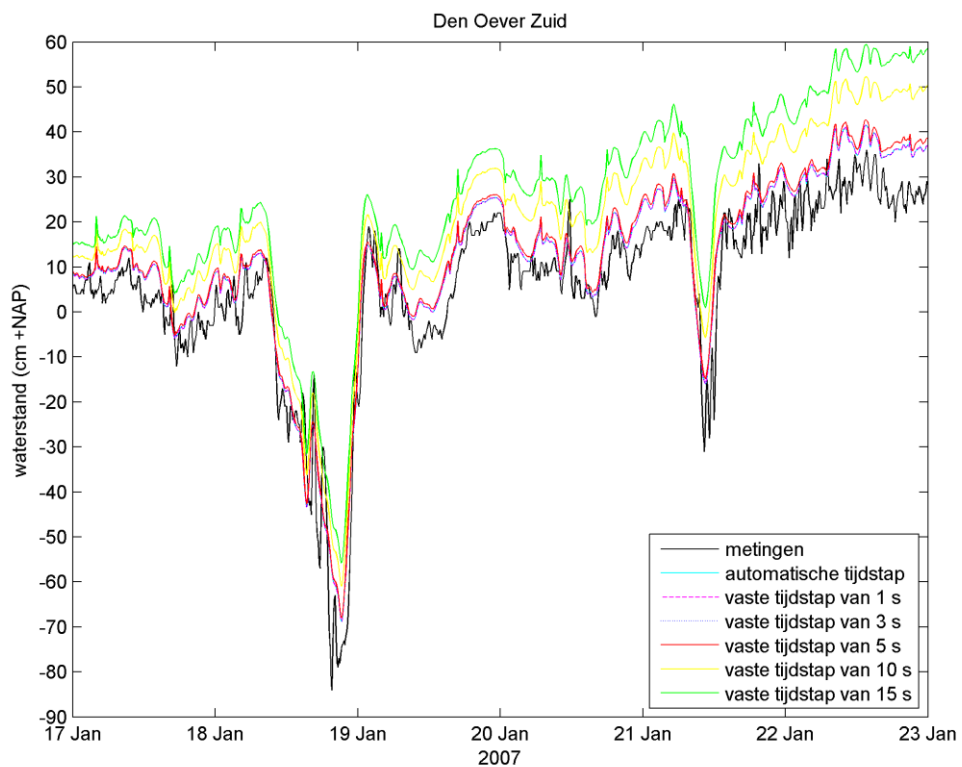
*Figuur D.7* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Ketelhaven. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.



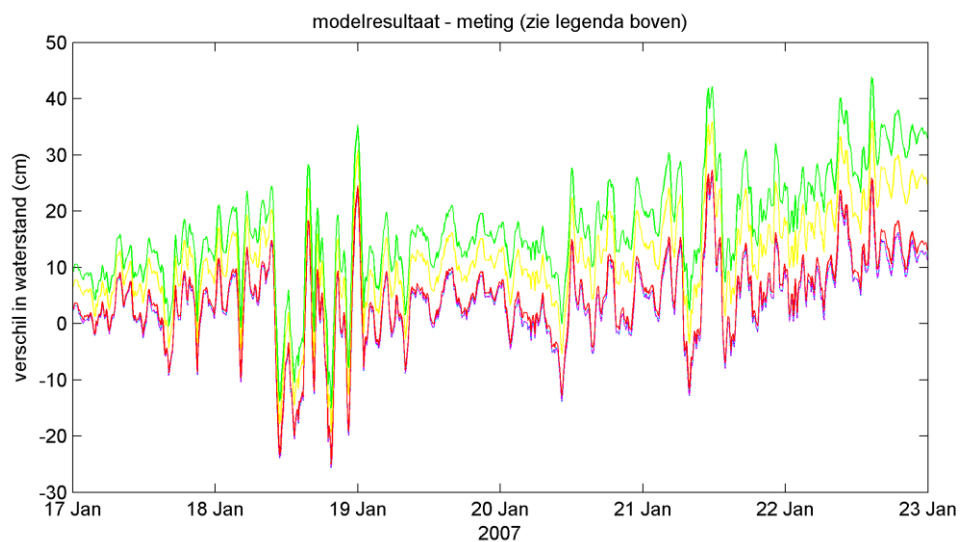
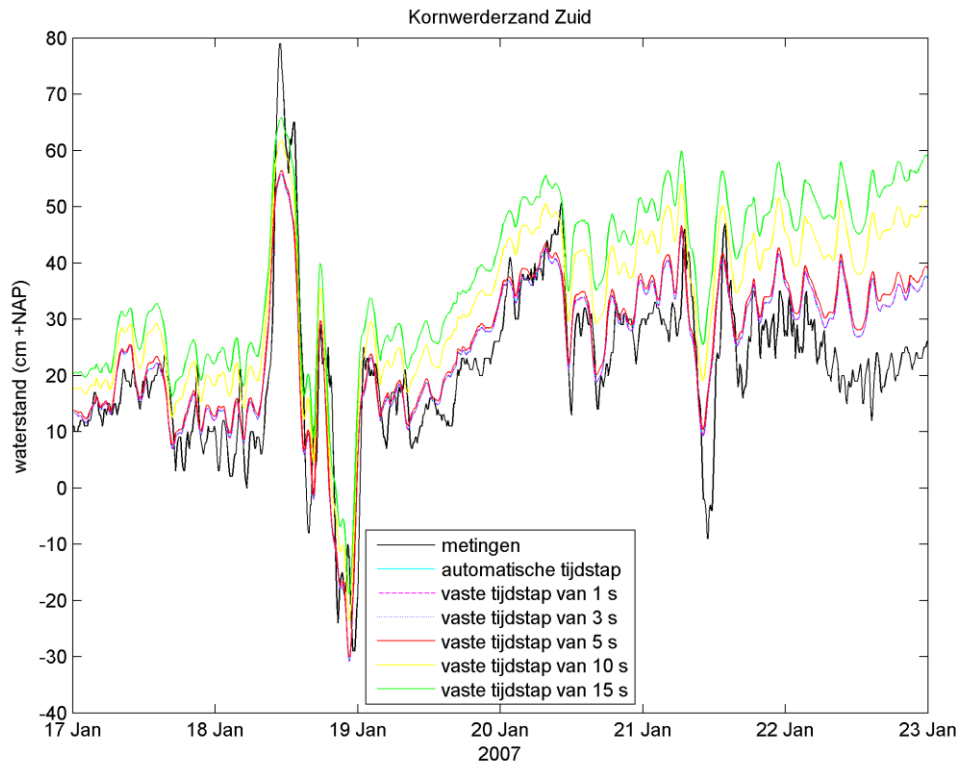
*Figuur D.8* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Ramspolbrug. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.



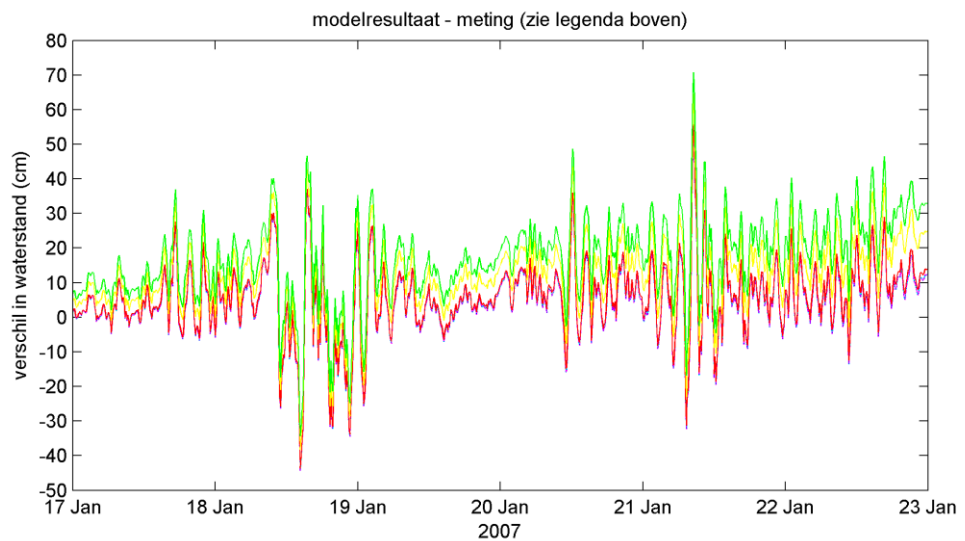
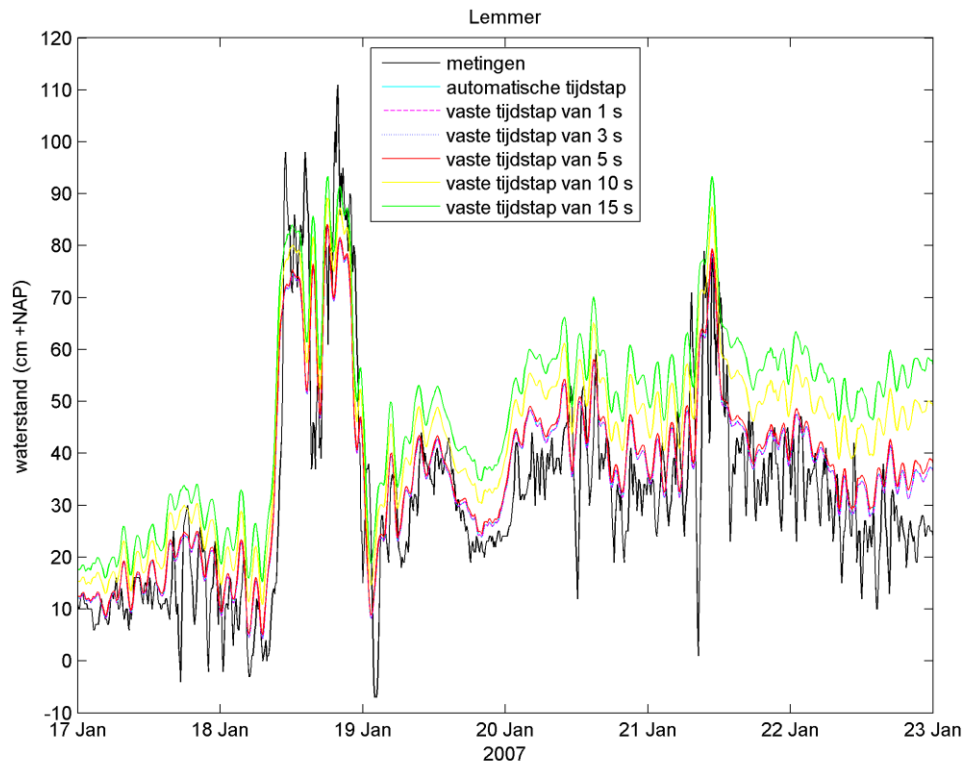
*Figuur D.9* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Roggebotsluis Noord. Verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm] gedurende eerste dag.



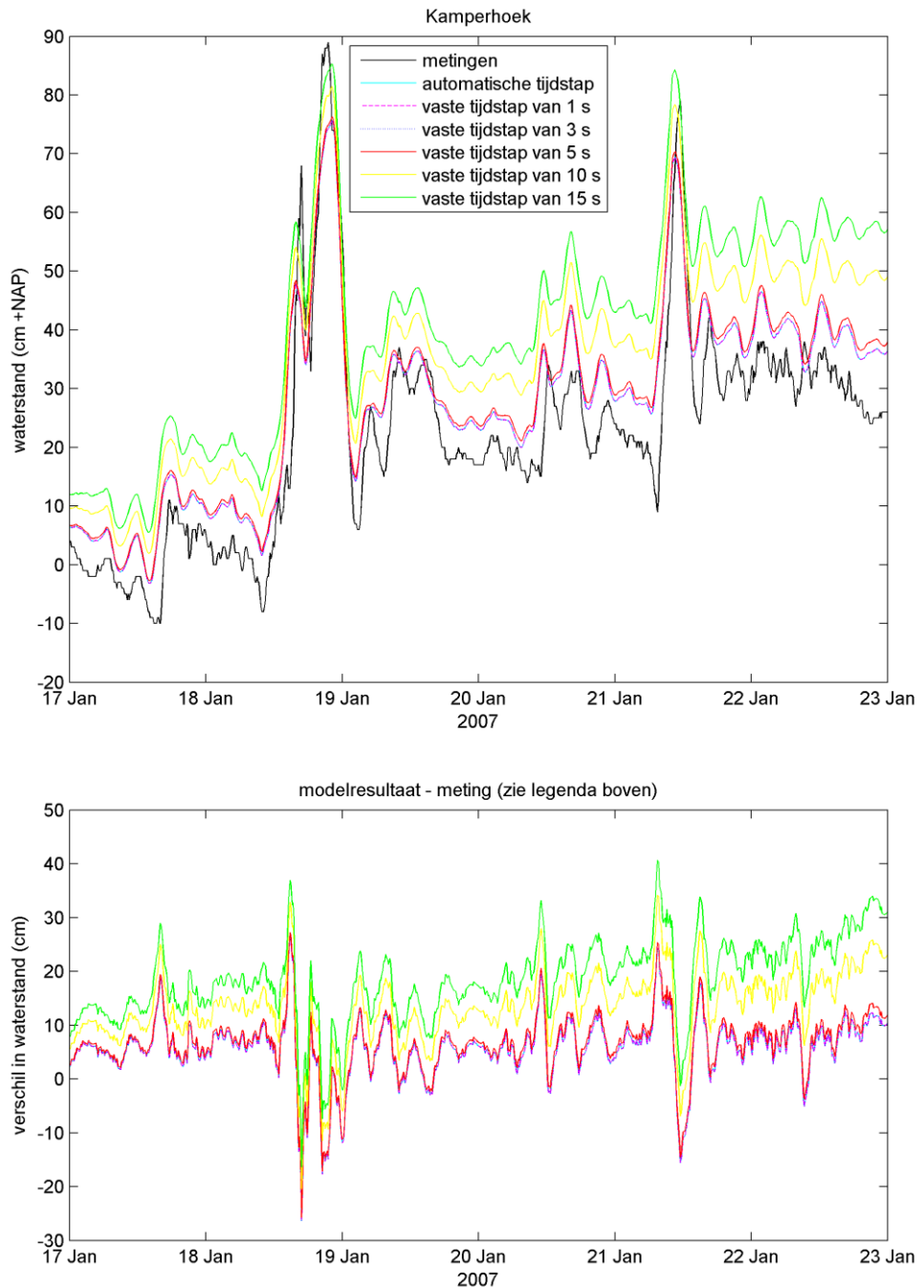
Figuur D.10 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Den Oever Zuid. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



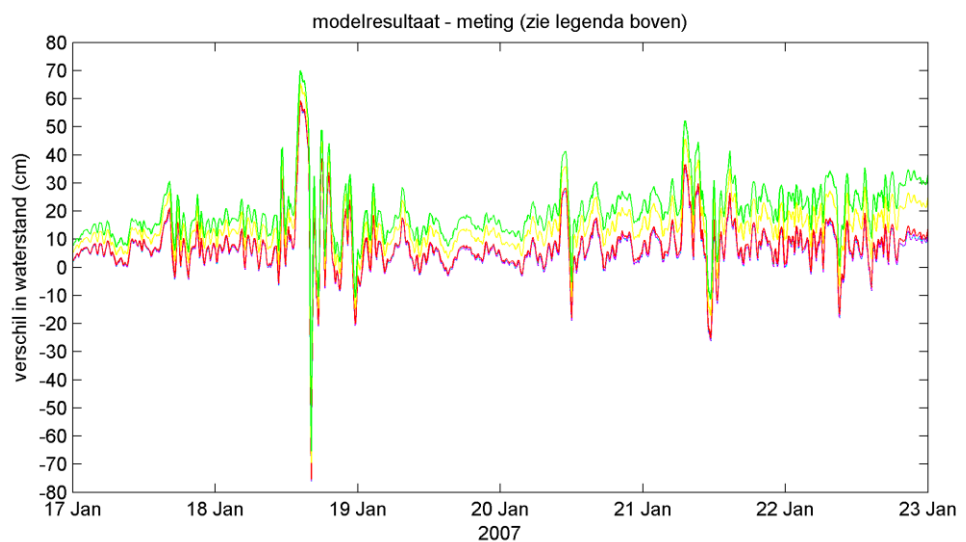
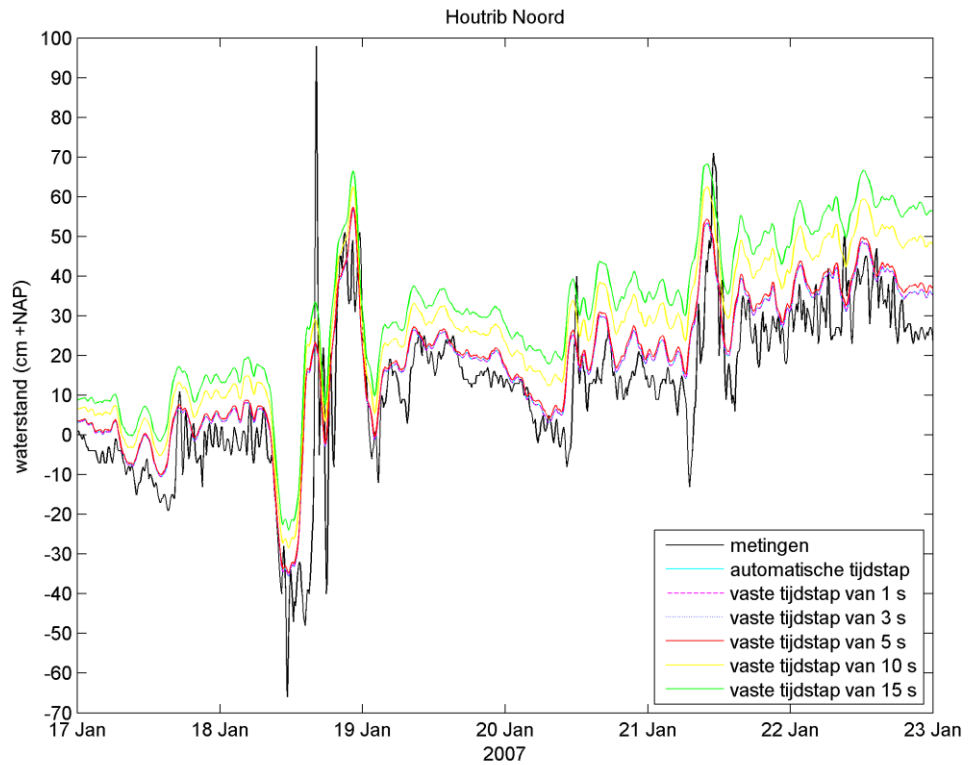
Figuur D.11 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Kornwerderzand Zuid. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



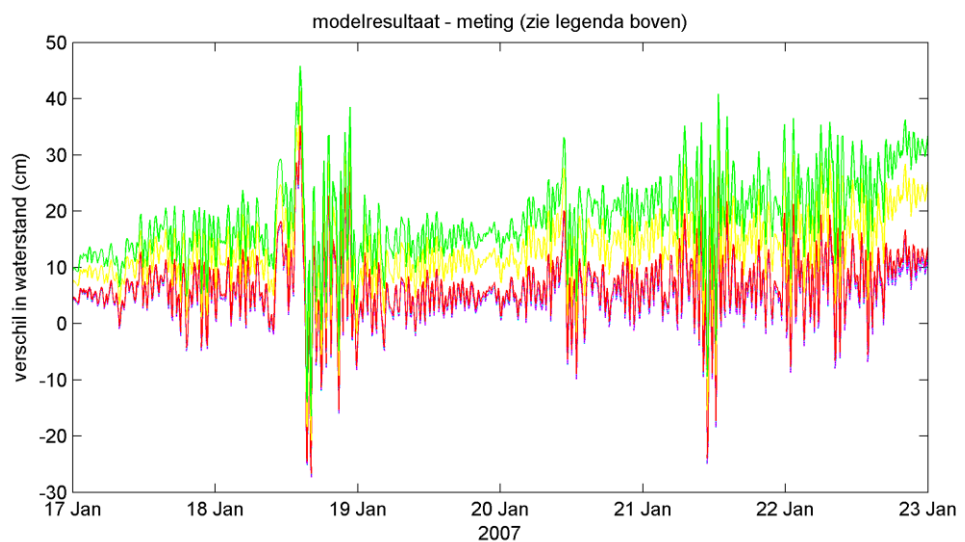
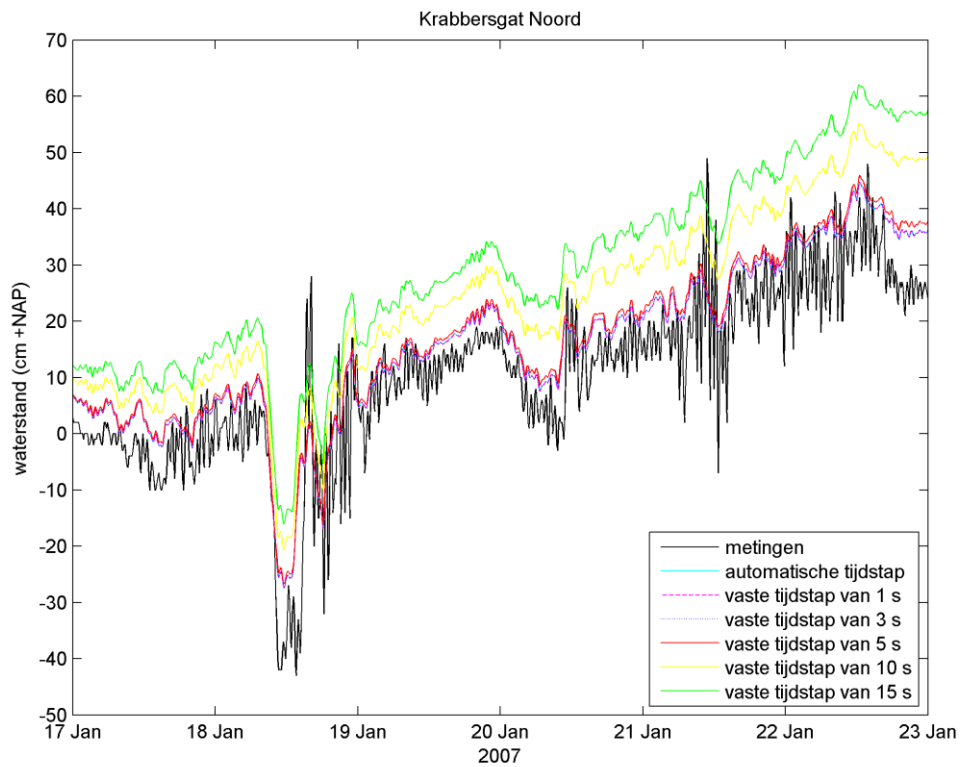
Figuur D.12 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Lemmer. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



Figuur D.13 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Kamperhoek. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

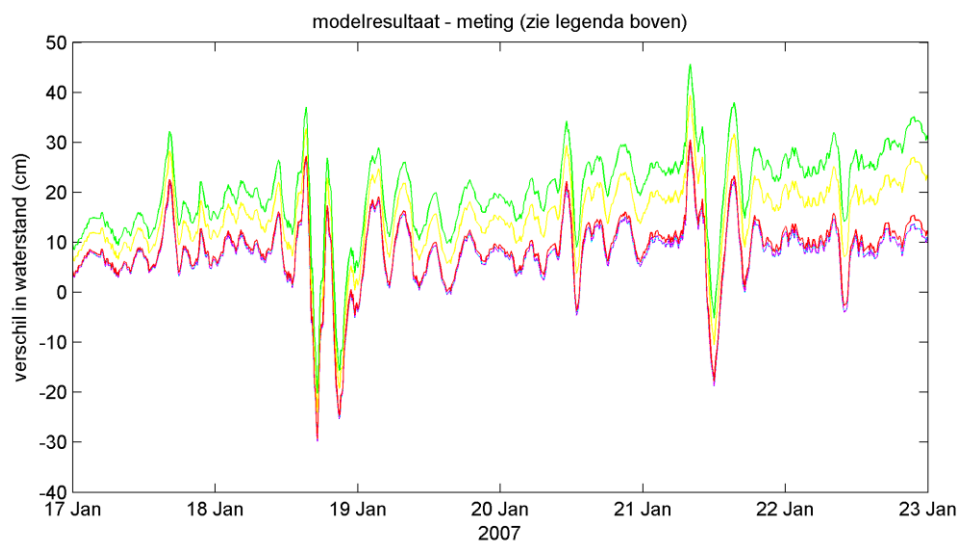
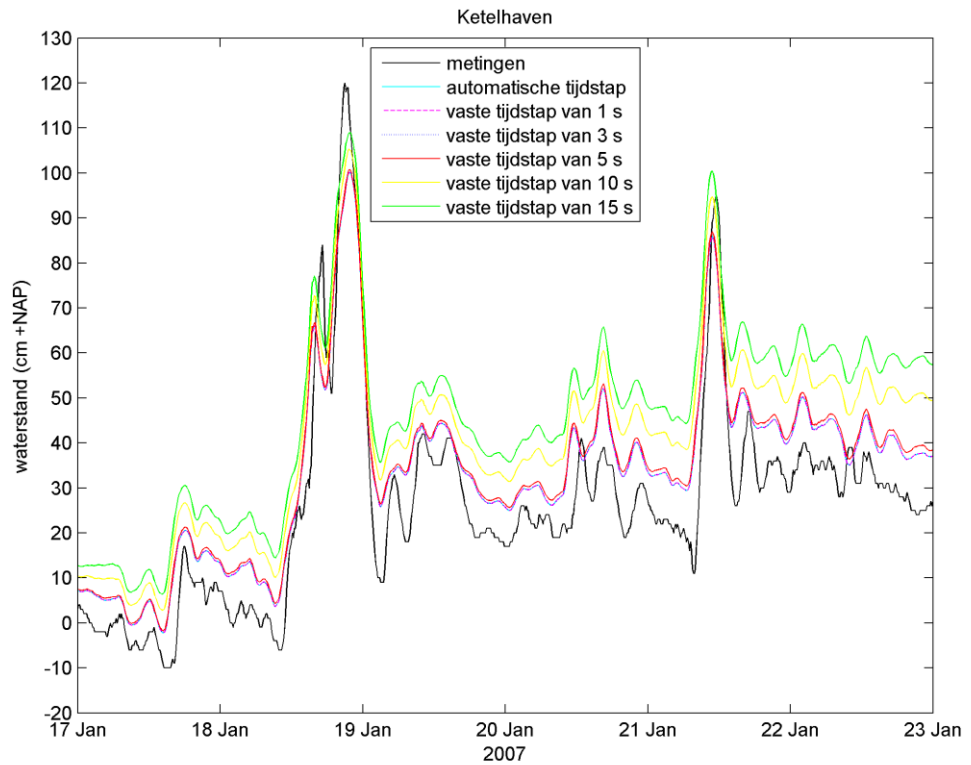


*Figuur D.14* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Houtrib Noord. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

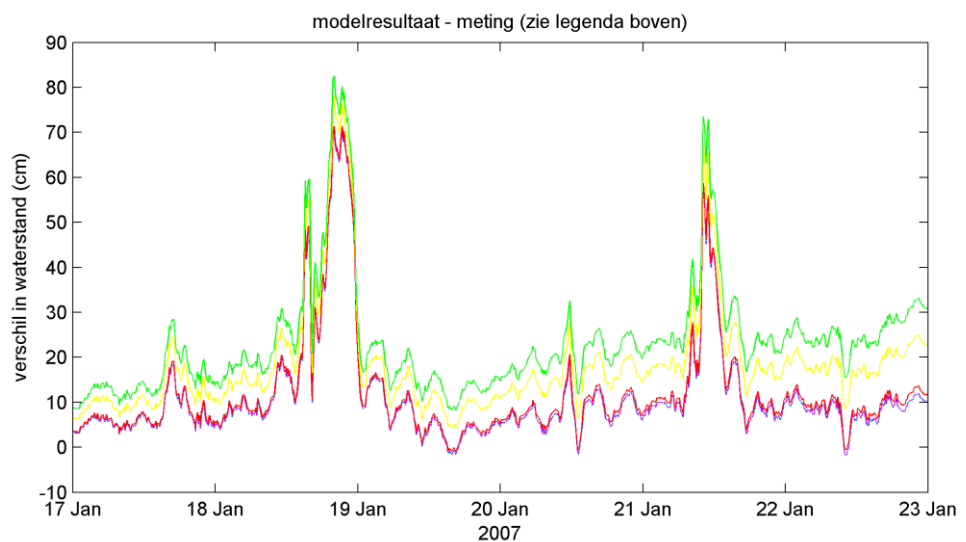
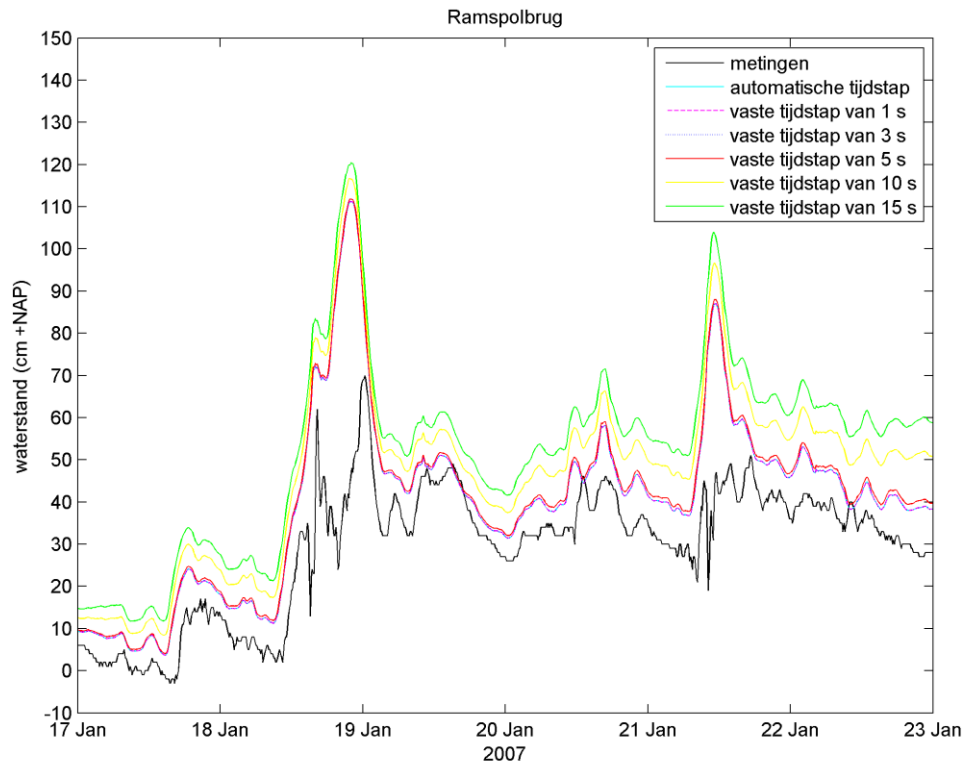


*Figuur D.15* Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Krabbersgat Noord. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

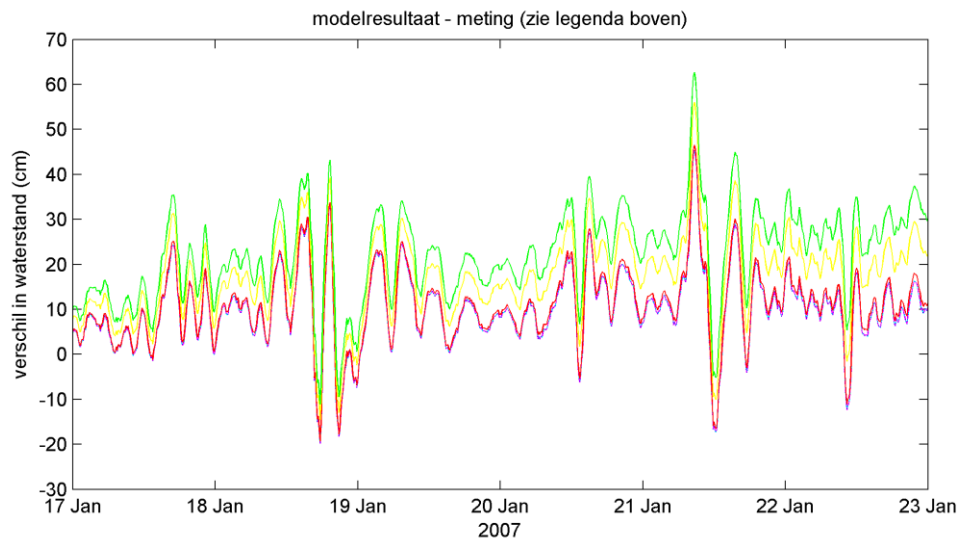
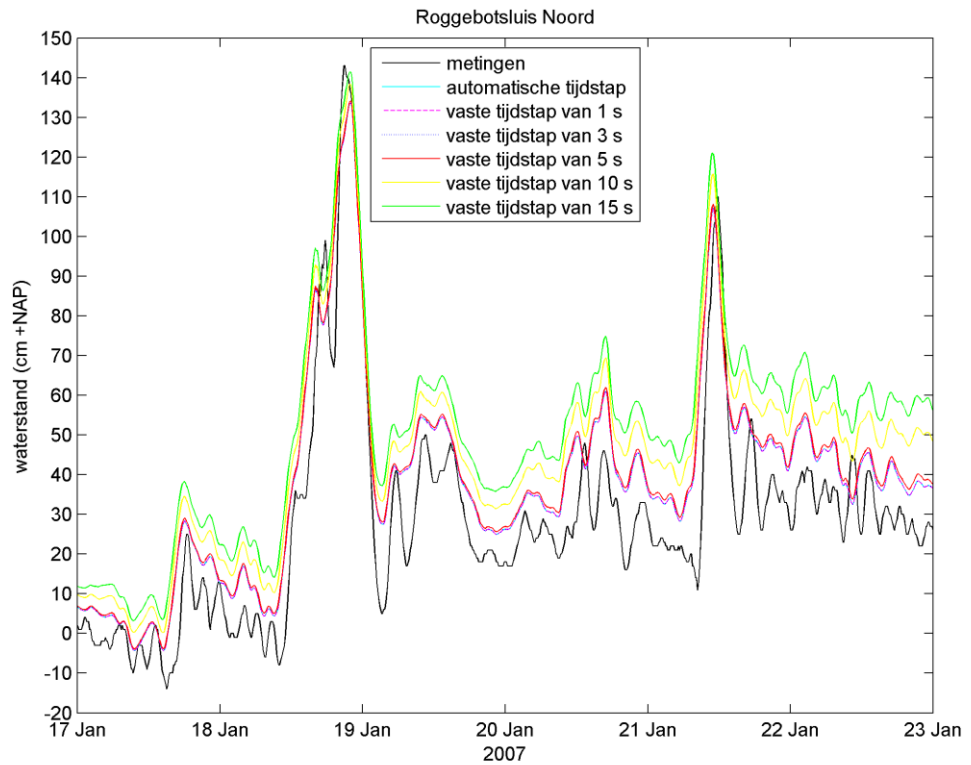




Figuur D.16 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Ketelhaven. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



Figuur D.17 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Ramspolbrug. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].



Figuur D.18 Vergelijking van gemeten en met D-Flow FM voor verschillende tijdstappen berekende waterstand voor stormperiode in januari 2007 bij observatie station Roggebotsluis Noord. Boven de waterstand in [cm] t.o.v. NAP, beneden het verschil van berekende waterstand minus gemeten waterstand in [cm].

# E Tabellen modelbeoordeling waterstanden 2DH

Tabel E.1 Bias in [cm] voor berekende waterstand in vergelijking met gemeten waterstand voor WAQUA en D-Flow FM model met verschillende modelinstellingen.

observatie station	WAQUA, ruimtelijk variërende wind	WAQUA, ruimtelijk uniforme wind	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 1 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 3 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 5 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 10 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 15 s
Den Oever Zuid	2.3	1.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.8	10.7	15.1
Kornwerderzand Zuid	2.4	0.3	2.3	2.3	2.3	2.3	3.1	8.9	13.1
Lemmer	4.2	1.5	2.9	3.0	3.0	3.0	3.6	9.2	13.3
Kamperhoek	2.9	2.9	5.0	4.9	4.9	4.9	5.6	11.2	15.3
Houtrib Noord	1.4	3.3	5.6	5.6	5.6	5.6	6.3	12.1	16.3
Krabbersgat Noord	1.4	2.0	4.5	4.5	4.5	4.5	5.2	11.0	15.2
Ketelhaven	3.6	4.2	6.7	6.6	6.6	6.6	7.3	12.8	16.8
Ramspolbrug	7.9	5.1	9.5	9.4	9.4	9.4	10.1	15.4	19.3
Roggebotsluis Noord	4.5	6.8	8.5	8.4	8.4	8.4	9.0	14.5	18.4
<b>gemiddelde over alle observatie stations</b>	3.4	3.0	5.5	5.4	5.4	5.4	6.1	11.8	15.9
<b>RMS gemiddelde over alle observatie stations</b>	3.9	3.6	5.9	5.9	5.9	5.9	6.5	11.9	16.0

Tabel E.2 RMSE in [cm] voor berekende waterstand in vergelijking met gemeten waterstand voor WAQUA en D-Flow FM model met verschillende modelinstellingen.

observatie station	WAQUA, ruimtelijk variërende wind	WAQUA, ruimtelijk uniforme wind	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 1 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 3 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 5 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 10 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 15 s
Den Oever Zuid	7.5	4.9	6.7	6.7	6.7	6.7	7.3	13.0	17.6
Kornwerderzand Zuid	6.8	6.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.8	12.7	16.9
Lemmer	10.9	9.3	10.1	10.1	10.1	10.1	10.5	14.5	18.2
Kamperhoek	6.0	5.8	7.3	7.3	7.3	7.3	7.8	13.3	17.6
Houtrib Noord	8.3	9.1	10.3	10.3	10.3	10.3	10.8	15.6	19.7
Krabbersgat Noord	6.1	5.6	7.2	7.2	7.2	7.2	7.7	13.2	17.6
Ketelhaven	7.8	7.4	9.3	9.2	9.2	9.2	9.8	15.1	19.3
Ramspolbrug	12.8	6.8	14.5	14.5	14.6	14.5	15.0	19.6	23.4
Roggebotsluis Noord	10.0	11.0	11.6	11.6	11.6	11.6	12.2	17.4	21.6
<b>gemiddelde over alle observatie stations</b>	8.5	7.3	9.3	9.4	9.4	9.4	9.9	14.9	19.1
<b>RMS gemiddelde over alle observatie stations</b>	8.7	7.6	9.7	9.7	9.7	9.7	10.2	15.1	19.2

Tabel E.3 Standaardafwijking in [cm] voor berekende waterstand in vergelijking met gemeten waterstand voor WAQUA en D-Flow FM model met verschillende modelinstellingen.

observatie station	WAQUA, ruimtelijk variërende wind	WAQUA, ruimtelijk uniforme wind	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 1 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 3 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 5 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 10 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 15 s
Den Oever Zuid	7.2	4.8	5.3	5.3	5.3	5.3	5.5	7.4	9.1
Kornwerderzand Zuid	6.4	6.3	7.0	7.0	7.0	7.0	7.2	9.0	10.6
Lemmer	10.0	9.2	9.6	9.7	9.7	9.7	9.8	11.2	12.5
Kamperhoek	5.2	5.0	5.3	5.3	5.3	5.3	5.5	7.1	8.7
Houtrib Noord	8.2	8.5	8.6	8.6	8.6	8.6	8.7	9.9	11.1
Krabbersgat Noord	5.9	5.2	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7	7.3	8.8
Ketelhaven	7.0	6.1	6.4	6.4	6.4	6.4	6.5	8.0	9.5
Rampolbrug	10.0	4.6	10.9	11.1	11.1	11.1	11.2	12.2	13.3
Roggebotsluis Noord	8.9	8.6	7.9	8.0	8.0	8.0	8.2	9.8	11.2
<b>gemiddelde over alle observatie stations</b>	7.6	6.5	7.4	7.4	7.4	7.4	7.6	9.1	10.5
<b>RMS gemiddelde over alle observatie stations</b>	7.8	6.7	7.6	7.7	7.7	7.7	7.8	9.3	10.6

Tabel E.4  $\Delta\zeta_{max}$  in [cm] voor berekende waterstand in vergelijking met gemeten waterstand voor WAQUA en D-Flow FM model met verschillende modelinstellingen.

observatie station	WAQUA, ruimtelijk variërende wind	WAQUA, ruimtelijk uniforme wind	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 1 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 3 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 5 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 10 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 15 s
Den Oever Zuid	-1.6	0.8	5.5	5.6	5.6	5.6	6.7	16.2	23.4
Kornwerderzand Zuid	-31.2	-26.1	-23.5	-23.2	-23.2	-23.2	-22.6	-17.1	-13.2
Lemmer	-24.7	-25.4	-27.8	-27.5	-27.5	-27.5	-26.9	-21.9	-17.7
Kamperhoek	-18.9	-8.8	-13.5	-13.4	-13.4	-13.4	-12.8	-7.5	-3.7
Houtrib Noord	-48.4	-37.8	-41.2	-41.3	-41.3	-41.3	-40.6	-35.5	-29.7
Krabbersgat Noord	-10.6	-9.4	-4.3	-4.2	-4.3	-4.3	-3.1	6.2	13.1
Ketelhaven	-31.5	-13.1	-20.2	-19.9	-19.8	-19.9	-19.3	-14.7	-11.1
Rampolbrug	28.8	-1.9	39.9	41.2	41.2	41.2	41.8	46.6	50.4
Roggebotsluis Noord	-34.2	2.1	-9.8	-9.4	-9.4	-9.4	-8.9	-4.7	-1.6
<b>gemiddelde over alle observatie stations</b>	-19.1	-13.3	-10.6	-10.2	-10.2	-10.2	-9.5	-3.6	1.1
<b>RMS gemiddelde over alle observatie stations</b>	28.6	18.5	24.4	24.5	24.5	24.5	24.3	23.1	23.0

Tabel E.5  $\Delta\zeta_{min}$  in [cm] voor berekende waterstand in vergelijking met gemeten waterstand voor WAQUA en D-Flow FM model met verschillende modelinstellingen.

observatie station	WAQUA, ruimtelijk variërende wind	WAQUA, ruimtelijk uniforme wind	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, automatische tijdstap	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 1 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 3 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 5 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 10 s	D-Flow FM, ruimtelijk uniforme wind en ruwheid, vaste tijdstap van 15 s
Den Oever Zuid	45.6	8.1	15.7	15.3	15.3	15.3	16.1	23.1	28.3
Kornwerderzand Zuid	10.5	-1.6	-1.7	-1.8	-1.8	-1.8	-1.1	5.4	10.2
Lemmer	13.3	9.0	10.4	10.4	10.3	10.3	10.4	11.0	11.7
Kamperhoek	4.4	2.9	7.0	6.8	6.8	6.8	7.3	11.9	15.0
Houtrib Noord	29.7	26.4	30.6	30.4	30.5	30.5	31.2	37.5	42.1
Krabbersgat Noord	17.8	10.1	15.9	15.6	15.6	15.6	16.3	22.3	26.9
Ketelhaven	4.7	2.6	8.0	7.8	7.8	7.8	8.2	12.8	16.0
Ramspolbrug	8.3	4.8	6.7	6.7	6.7	6.7	7.1	10.5	10.7
Roggebotsluis Noord	8.5	3.9	10.0	9.7	9.7	9.7	10.1	14.2	17.2
<b>gemiddelde over alle observatie stations</b>	15.9	7.4	11.4	11.2	11.2	11.2	11.7	16.5	19.8
<b>RMS gemiddelde over alle observatie stations</b>	20.4	10.6	14.2	14.0	14.0	14.0	14.4	18.9	22.2

# F MATLAB scripts randvoorwaarden 3D

## F.1 MATLAB script make\_balance.m

```
% Function to read discharge and chloride data from timeseries ASCII files
% into MATLAB and to create input file for D-Flow FM model.
% Project: I12303712-002 D-Flow FM salt model Lake IJssel
% Author: Menno Genseberger, Deltares
% Date: March 23rd 2020

make_plots = 0;
make_input = 1;

different_levels;
%to obtain lake_level_daily_value

clear corrected_waterlevel_10m_value time_daily_value day waterlevel_10m_value index waterlevel_10m_value_with_NaNs
lake_level_10m_value waterlevel_daily_value;
clear waterlevel_text number_of_days waterlevel_time observation_id waterlevel_value observation_point_MATROOS
time_10m_value;

number_of_days = datenum(2019, 1, 1, 0, 0, 0) - datenum(2018, 6, 5, 0, 0, 0);

%%% discharges
% available files with timeseries
% -----
% Rijkswaterstaat | Waterschap | Hoogheemraadschap | Wetterskip Fryslân | Waterschap Drents
% (note: several missing | Zuiderzeeland | Hollands | Overijsselse Delta
% values put to zero) | Noorderkwartier
% -----
% Q-Houtrib-IJ-M.ymr | Q-Buma.ymr | Q-Grootslag.ymr | Q-Hoogland.ymr | Q-Kostverlorenzijl.ymr
% Q-Houtrib-M-IJ.ymr | Q-Colijn-hoog.ymr | Q-Makkum.ymr | Q-Meppelerdiep.ymr
% Q-Krabbersgat-IJ-M.ymr | Q-Colijn-laag.ymr | Q-Tacoziyl.ymr | Q-Roggebot.ymr
% Q-Krabbersgat-M-IJ.ymr | Q-Vissering.ymr | Q-Teroelsterkolk.ymr | Q-Stroink.ymr
% Q-Lorentzsluizen.ymr | Q-Workum.ymr
% Q-Olst.ymr | Q-Wouda.ymr
% Q-Stevensluizen.ymr
% -----

discharge_files = { 'Q-Houtrib-IJ-M.ymr', 'Q-Houtrib-M-IJ.ymr', 'Q-Krabbersgat-IJ-M.ymr', 'Q-Krabbersgat-M-IJ.ymr', 'Q-
Lorentzsluizen.ymr', 'Q-Olst.ymr', 'Q-Stevensluizen.ymr', ...
'Q-Buma.ymr', 'Q-Colijn-hoog.ymr', 'Q-Colijn-laag.ymr', 'Q-Vissering.ymr', ...
'Q-Grootslag.ymr', ...
'Q-Hoogland.ymr', 'Q-Makkum.ymr', 'Q-Tacoziyl.ymr', 'Q-Teroelsterkolk.ymr', 'Q-Workum.ymr', 'Q-
Wouda.ymr', ...
'Q-Kostverlorenzijl.ymr', 'Q-Meppelerdiep.ymr', 'Q-Roggebot.ymr', 'Q-Stroink.ymr' };

discharge_labels = { 'Houtribsluizen-van-IJsselmeer-naar-Markermeer', 'Houtribsluizen-van-Markermeer-naar-IJsselmeer', ...
'Krabbersgatsluizen-van-IJsselmeer-naar-Markermeer', 'Krabbersgatsluizen-van-Markermeer-naar-
IJsselmeer', ...
'Lorentzsluizen', 'IJssel-bij-Olst', 'Stevensluizen', ...
'gemaal-Buma', 'gemaal-Colijn-hoog', 'gemaal-Colijn-laag', 'gemaal-Vissering', ...
'gemaal-Grootslag', ...
'Hooglandgemaal', 'inlaat-Makkum', 'inlaat-Tacoziyl', 'inlaat-Teroelsterkolk', 'inlaat-Workum',
'Woudagemaal', ...
'gemaal-Kostverlorenzijl', 'in-uitlaat-Meppelerdiep', 'gemaal-Roggebot', 'in-uitlaat-Stroink', ...
'lek-schutsluis-Den-Oever', 'lek-schutsluis-Kornwerderzand-Groot', 'lek-schutsluis-Kornwerderzand-
Klein', ...
'lek-Stevensluizen', 'lek-Lorentzsluizen', ...
'hevel-Den-Oever', 'hevel-Kornwerderzand' };

discharge_tim_labels = { 'spui-Houtrib_Y2M', 'spui-Houtrib_M2Y', ...
'spui-Krabbersgat_Y2M', 'spui-Krabbersgat_M2Y', ...
'spui-Lorentz', 'i-u-IJssel', 'spui-Stevin', ...
'g-Buma', 'g-Colijn-hoog', 'g-Colijn-laag', 'g-Vissering', ...
'g-Grootslag', ...
'g-Hoogland', 'schut-Makkum', 'i-Tacoziyl', 'i-Teroelsterkolk', 'schut-Workum', 'g-Wouda', ...
'g-Kostverlorenzijl', 'i-u-Meppelerdiep', 'g-Roggebot', 'i-u-Stroink', ...
'lek-schut-Stevin', 'lek-schut-Lorentz-groot', 'lek-schut-Lorentz-klein', ...
'lek-spui-Stevin', 'lek-spui-Lorentz', ...
'hevel-Stevin', 'hevel-Lorentz' };

discharge_hourly_interval = [ 6 6 6 6 6 6 ...
4 4 4 4 ...
4 ...
(1/24) (1/24) (1/24) (1/24) (1/24) (1/24) ...
(1/24) (1/24) (1/24) (1/24) ...
12 12 12 12 12 ];

%%% chloride associated with discharges
% available files with timeseries
% -----
% Rijkswaterstaat | Waterschap | Hoogheemraadschap | Wetterskip Fryslân | Waterschap Drents
% | Zuiderzeeland | Hollands | Overijsselse Delta
% | Noorderkwartier
% -----
% | chloride-Buma.ymr | chloride-Grootslag.ymr | chloride-Hoogland.ymr | chloride-Meppelerdiep.ymr
% | chloride-Colijn-hoog.ymr | chloride-Wouda.ymr | chloride-Roggebot.ymr
% | chloride-Colijn-laag.ymr | chloride-Stroink.ymr
% | chloride-Vissering.ymr
% -----

chloride_files = { '', '', '', '', '', '', ...
'chloride-Buma.ymr', 'chloride-Colijn-hoog.ymr', 'chloride-Colijn-laag.ymr', 'chloride-Vissering.ymr', ...
'chloride-Grootslag.ymr', ...
'chloride-Hoogland.ymr', '', '', '', '', 'chloride-Wouda.ymr', ...
'chloride-Kostverlorenzijl.ymr', 'chloride-Meppelerdiep.ymr', 'chloride-Roggebot.ymr', 'chloride-
Stroink.ymr' };

chloride_contribution = [ 0 1 0 1 0 1 0 ...
1 1 1 1 ...
1 ...
1 0 0 0 1 ...
1 1 1 1 ...
1 1 1 ...
1 1 ...
1 1 ... ]
```

```

1 1 ];
average_chloride_value = zeros(1, numel(discharge_files));

% 0 mg/l, outgoing term put to zero as D-Flow FM can not extract salt associated with 'Q-Houtrib-IJ-M.ymr'
% 115 mg/l, incoming term from Lake Marken near Lelystad associated with 'Q-Houtrib-M-IJ.ymr'
% 0 mg/l, outgoing term put to zero as D-Flow FM can not extract salt associated with 'Q-Krabbersgat-IJ-M.ymr'
% 115 mg/l, incoming term from Lake Marken near Enkhuizen associated with 'Q-Krabbersgat-M-IJ.ymr'
% 0 mg/l, outgoing term put to zero as D-Flow FM can not extract salt associated with 'Q-Lorentzsluizen.ymr'
% 70 mg/l, long year average for incoming term from river IJssel associated with 'Q-Olst.ymr'
% 0 mg/l, outgoing term put to zero as D-Flow FM can not extract salt associated with 'Q-Stevensluizen.ymr'

average_chloride_value(1 : 7) = [ 0 115 0 115 0 70 0 ]; % salt in ppt for first 7 terms discharge_labels

% used in earlier stage: 310 mg/l, long year average for incoming term associated with 'Q-Buma.ymr' (file Afvoerreeksen ZZL
YF tm 20190614.xlsx)
% used in earlier stage: 130 mg/l, long year average for incoming term associated with 'Q-Colijn-hoog.ymr' (file
Afvoerreeksen ZZL YF tm 20190614.xlsx)
% used in earlier stage: 570 mg/l, long year average for incoming term associated with 'Q-Colijn-laag.ymr' (file
Afvoerreeksen ZZL YF tm 20190614.xlsx)
% used in earlier stage: 330 mg/l, long year average for incoming term associated with 'Q-Vissering.ymr' (file Afvoerreeksen
ZZL YF tm 20190614.xlsx)
% used in earlier stage: 150 mg/l, long year average for incoming term associated with 'Q-Grootslag.ymr' (file afvoerreeksen
HNNK YF tm 20190614.xlsx)

discharge_color = { 'g-', 'r-', 'c-', 'k-', ...
                    'g-', 'r-', 'c-', 'k-', ...
                    'g-', 'r-', 'c-', 'k-', ...
                    'g-', 'r-', 'c-', 'k-', ...
                    'g+', 'r+', 'c+', 'k+', ...
                    'g+', 'r+', 'c+', 'k+' };

chloride_counter = 0;
for discharge_id = 1 : numel(chloride_contribution),
    if chloride_contribution(discharge_id)
        chloride_counter = chloride_counter + 1;
        chloride_color(discharge_id) = discharge_color(chloride_counter);
    end
end

for discharge_id = 23 : 29,
    discharge_daily_time(discharge_id) = [ datenum(2018, 6, 5, 0, 0, 0) : datenum(2018, 12, 31, 0, 0, 0) ]';
end

% contact by telephone with Yann Friocourt RWS at 17-9-2019:
% background of pit same as background in Wadden Sea,
% 10.000 mg/l or translation 1 kg/s corresponds to 0.1 m3/s

% leakage from Wadden Sea in sluices for ships (locks, "schutsluizen")
% e-mail from Yann Friocourt RWS at 20-9-2019 13:41
% until October 1st 2018 (summer situation):
%   large sluice for ships Kornwerderzand: 25 kg/s
%   small sluice for ships Kornwerderzand: 10 kg/s
%   sluice for ships Den Oever: 20 kg/s
% from December 1 st 2018 until January 1st 2019 (winter situation):
%   large sluice for ships Kornwerderzand: 15 kg/s
%   small sluice for ships Kornwerderzand: 5 kg/s
%   sluice for ships Den Oever: 10 kg/s
% between October 1st 2018 and December 1st 2018:
%   lineaire interpolation of summer and winter situation

% with a chloride of 10000 mg/l, 10^6 g chloride per s is in 100 m^3 per s
% (10^6 g) / (10000 mg/l) = (10^6) / (10) * [g l] / [g] = (10^5) [l] = (100) [m^3]
discharge_daily_chloride{23} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{23}));
discharge_daily_chloride{24} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{24}));
discharge_daily_chloride{25} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{25}));

discharge_daily_value{23}(1 : 118, 1) = 20 * 0.1;
discharge_daily_value{23}(180 : 210, 1) = 10 * 0.1;
discharge_daily_value{23}(119 : 179, 1) = interp1([ discharge_daily_time{23}(118) discharge_daily_time{23}(180) ], ...
[ discharge_daily_value{23}(118) discharge_daily_value{23}(180) ], ...
discharge_daily_time{23}(119 : 179), 'linear');

discharge_daily_value{24}(1 : 118, 1) = 25 * 0.1;
discharge_daily_value{24}(180 : 210, 1) = 15 * 0.1;
discharge_daily_value{24}(119 : 179, 1) = interp1([ discharge_daily_time{24}(118) discharge_daily_time{24}(180) ], ...
[ discharge_daily_value{24}(118) discharge_daily_value{24}(180) ], ...
discharge_daily_time{24}(119 : 179), 'linear');

discharge_daily_value{25}(1 : 118, 1) = 10 * 0.1;
discharge_daily_value{25}(180 : 210, 1) = 5 * 0.1;
discharge_daily_value{25}(119 : 179, 1) = interp1([ discharge_daily_time{25}(118) discharge_daily_time{25}(180) ], ...
[ discharge_daily_value{25}(118) discharge_daily_value{25}(180) ], ...
discharge_daily_time{25}(119 : 179), 'linear');

% leakage from Wadden Sea in sluices for flushing (gates, "spuisluizen")
% continuous leakage
% until August 26th 2018 small openings near bottom at Kornwerderzand and doors single closed:
%   salt leakage Kornwerderzand = 41 + 6 kg/s; salt leakage Den Oever = 15 kg/s;
% starting at August 26th 2018 until September 18th 2018 small openings near bottom at Kornwerderzand and doors double close:
%   salt leakage Kornwerderzand = 26 + 4 kg/s; salt leakage Den Oever = 10 kg/s;
% starting at September 18 2018 small openings near bottom at Kornwerderzand have been closed:
%   salt leakage Kornwerderzand = 7 kg/s; salt leakage Den Oever = 10 kg/s;

% with a chloride of 10000 mg/l, 10^6 g chloride per s is in 100 m^3 per s
% (10^6 g) / (10000 mg/l) = (10^6) / (10) * [g l] / [g] = (10^5) [l] = (100) [m^3]
discharge_daily_chloride{26} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{26}));
discharge_daily_chloride{27} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{27}));

discharge_daily_value{26}(1 : 82, 1) = 15 * 0.1;
discharge_daily_value{26}(83 : 210, 1) = 10 * 0.1;
discharge_daily_value{27}(1 : 82, 1) = 47 * 0.1;
discharge_daily_value{27}(83 : 105, 1) = 30 * 0.1;
discharge_daily_value{27}(106 : 210, 1) = 7 * 0.1;

% salt siphons ("hevels")
% e-mail from Yann Friocourt RWS at 19-7-2019 11:25

```



```

% until September 1st 2018: structural transport of siphons was
% -2 kg/s (-2 kg/s at Den Oever and -2 kg/s at Kornwerderzand)
% -> 0.2 m^3/s
% starting at September 1st 2018: emergency pumps were place at
% siphons which increased the transport capacity by a factor of 3
% -6 kg/s (-6 kg/s at Den Oever and -6 kg/s at Kornwerderzand)
% -> 0.6 m^3/s
% this until December 13th 2018, after this: it was assumed that
% transport of siphons was again
% -2 kg/s (-2 kg/s at Den Oever and -2 kg/s at Kornwerderzand)
% -> 0.2 m^3/s

% with a chloride of 10000 mg/l, 10^6 g chloride per s is in 100 m^3 per s
% (10^6 g) / (10000 mg/l) = (10^6) / (10) * [g l] / [g] = (10^5) [l] = (100) [m^3]
discharge_daily_chloride{28} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{28}));
discharge_daily_chloride{29} = 10000 * ones(size(discharge_daily_time{29}));

discharge_daily_value{28}(1 : 88, 1) = -2 * 0.1;
discharge_daily_value{28}(89 : 191, 1) = -6 * 0.1;
discharge_daily_value{28}(192 : 210, 1) = -2 * 0.1;
discharge_daily_value{29}(1 : 88, 1) = -2 * 0.1;
discharge_daily_value{29}(89 : 191, 1) = -6 * 0.1;
discharge_daily_value{29}(192 : 210, 1) = -2 * 0.1;

for discharge_id = 23 : 29,
    discharge_time{discharge_id} = discharge_daily_time{discharge_id};
    discharge_value{discharge_id} = discharge_daily_value{discharge_id};
    discharge_chloride{discharge_id} = discharge_daily_chloride{discharge_id};
end

for discharge_id = 1 : numel(discharge_files),
    [ discharge_text{discharge_id}, discharge_time{discharge_id}, discharge_value{discharge_id} ] =
read_timeseries(discharge_files{discharge_id});
    if ~isempty(chloride_files{discharge_id})
        [ chloride_text{discharge_id}, chloride_time{discharge_id}, chloride_value{discharge_id} ] =
read_timeseries(chloride_files{discharge_id});
    else
        chloride_text{discharge_id} = '';
        chloride_time{discharge_id} = discharge_time{discharge_id};
        chloride_value{discharge_id} = average_chloride_value{discharge_id} * ones(size(chloride_time{discharge_id}));
    end
    if discharge_id <= 12
        if discharge_id <= 7
            % selection period June 5th 2018 - December 31th 2018
            discharge_time{discharge_id} = discharge_time{discharge_id}(1 : 30241);
            discharge_value{discharge_id} = discharge_value{discharge_id}(1 : 30241);
        else
            % selection period June 5th 2018 - December 31th 2018
            discharge_time{discharge_id} = discharge_time{discharge_id}(1 : 20161);
            discharge_value{discharge_id} = discharge_value{discharge_id}(1 : 20161);
        end
        for hour = 1 : 24 * number_of_days,
            discharge_hourly_time{discharge_id}(hour, 1) =
discharge_time{discharge_id}(discharge_hourly_interval{discharge_id} * (hour - 1) + 1);
            discharge_hourly_value{discharge_id}(hour, 1) =
mean(discharge_value{discharge_id}(discharge_hourly_interval{discharge_id} * hour - discharge_hourly_interval{discharge_id} +
1 : discharge_hourly_interval{discharge_id} * hour));
        end
        if discharge_id <= 7
            discharge_hourly_chloride{discharge_id}(1 : 24 * number_of_days, 1) = average_chloride_value{discharge_id};
        else
            discharge_hourly_chloride{discharge_id} = interp1(chloride_time{discharge_id}, chloride_value{discharge_id}, ...
discharge_hourly_time{discharge_id}, 'linear');
        end
        % conversion chloride to salinity and vice versa
        % as D-Flow FM performs computations with salinity and not with chloride a conversion was applied
        % from miligram (mg) chloride per liter (l) to ppt
        % by dividing with 1000 ([mg] to [g]) and times 1.80655 (Cl- to S)
        discharge_hourly_ppt{discharge_id} = (1.80655 / 1000) * discharge_hourly_chloride{discharge_id};

        for day = 1 : number_of_days,
            discharge_daily_time{discharge_id}(day, 1) = discharge_hourly_time{discharge_id}(24 * (day - 1) + 13);
            discharge_daily_value{discharge_id}(day, 1) = mean(discharge_hourly_value{discharge_id}(24 * day - 23 : 24 *
day));
        end
        if discharge_id <= 7
            discharge_daily_chloride{discharge_id}(1 : number_of_days, 1) = average_chloride_value{discharge_id};
        else
            discharge_daily_chloride{discharge_id} = interp1(chloride_time{discharge_id}, chloride_value{discharge_id}, ...
discharge_daily_time{discharge_id}, 'linear');
        end
    else
        % selection period June 5th 2018 - December 31th 2018
        discharge_time{discharge_id} = discharge_time{discharge_id}(156 : 365);
        discharge_value{discharge_id} = discharge_value{discharge_id}(156 : 365);
        discharge_daily_time{discharge_id} = discharge_time{discharge_id};
        discharge_daily_value{discharge_id} = discharge_value{discharge_id};
        discharge_daily_chloride{discharge_id} = interp1(chloride_time{discharge_id}, chloride_value{discharge_id}, ...
discharge_daily_time{discharge_id}, 'linear');
    end
end

for discharge_id = 13 : 29,
    % conversion chloride to salinity and vice versa
    % as D-Flow FM performs computations with salinity and not with chloride a conversion was applied
    % from miligram (mg) chloride per liter (l) to ppt
    % by dividing with 1000 ([mg] to [g]) and times 1.80655 (Cl- to S)
    discharge_daily_ppt{discharge_id} = (1.80655 / 1000) * discharge_daily_chloride{discharge_id};
end

total_sum = discharge_daily_value{1};
total_ton_chloride_sum = 24 * 60 * 60 * discharge_daily_chloride{1} .* discharge_daily_value{1} * (1 / 1000000);
for discharge_id = 2 : 29,
    total_sum = total_sum + discharge_daily_value{discharge_id};
    total_ton_chloride_sum = total_ton_chloride_sum + 24 * 60 * 60 * discharge_daily_chloride{discharge_id} .*
discharge_daily_value{discharge_id} * (1 / 1000000);
end

daily_difference_lake_level = lake_level_daily_value(2 : end) - lake_level_daily_value(1 : end - 1);
daily_remainder = ((1193 * 1e6) / (24 * 60 * 60)) * daily_difference_lake_level' - total_sum;

```

```

if make_plots
    discharge_selections = { [ 6 7 5 1 3 2 4 ], [ 8 9 10 12 ], [ 13 11 18 20 22 15 16 ], [ 19 21 14 ], [ 23 24 25 26 27 28 29
] };
    label_location = { 'SouthWest', 'NorthWest', 'NorthWest', 'SouthWest', 'NorthEast' };
    for selection_id = 1 : numel(discharge_selections),
        figure(1);
        hold on;
        discharge_count = 0;
        for discharge_id = discharge_selections(selection_id),
            discharge_count = discharge_count + 1;
            plot(discharge_daily_time(discharge_id), discharge_daily_value(discharge_id), discharge_color(discharge_count));
        end
        datetick;
        legend(discharge_labels(discharge_selections(selection_id)), 'Location', label_location(selection_id));
        xlabel('2018');
        ylabel('debiet [m^3/s]');
        figure_handle = gcf;
        set(figure_handle, 'PaperType', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
            'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperPosition', [ 1.0 1.0 27.7 19 ]);
        plot_file_name = [ 'debieten_2018_deel_' num2str(selection_id) '_' date ];
        print(figure_handle, '-dpdf', '-noui', '-cmyk', '-painters', plot_file_name);
        close(1);
    end

    discharge_selections = { [ 6 2 23 24 25 26 27 28 29 ], [ 4 10 13 8 11 ], [ 9 12 19 21 18 20 22 ] };
    label_location = { 'NorthEast', 'NorthEast', 'NorthWest' };
    for selection_id = 1 : numel(discharge_selections),
        figure(1);
        hold on;
        chloride_counter = 0;
        clear chloride_labels;
        for discharge_id = discharge_selections(selection_id),
            if chloride_contribution(discharge_id)
                chloride_counter = chloride_counter + 1;
                plot(discharge_daily_time(discharge_id), 24 * 60 * 60 * discharge_daily_chloride(discharge_id) .*
discharge_daily_value(discharge_id) * (1 / 1000000), discharge_color(chloride_counter));
                chloride_labels(chloride_counter) = discharge_labels(discharge_id);
            end
        end
        datetick;
        legend(chloride_labels, 'Location', label_location(selection_id));
        xlabel('2018');
        ylabel('ton chloride per dag');
        figure_handle = gcf;
        set(figure_handle, 'PaperType', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
            'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperPosition', [ 1.0 1.0 27.7 19 ]);
        plot_file_name = [ 'dagelijkse_chloride_vrachten_2018_deel_' num2str(selection_id) '_' date ];
        print(figure_handle, '-dpdf', '-noui', '-cmyk', '-painters', plot_file_name);
        close(1);
    end

    figure(1);
    hold on;
    plot(discharge_daily_time{1}, 24 * 60 * 60 * cumsum(total_sum) / (1193 * 1e6))
    datetick;
    xlabel('2018');
    ylabel('m');
    figure_handle = gcf;
    set(figure_handle, 'PaperType', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
        'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperPosition', [ 1.0 1.0 27.7 19 ]);
    plot_file_name = [ 'ophoging_2018_' date ];
    print(figure_handle, '-dpdf', '-noui', '-cmyk', '-painters', plot_file_name);
    close(1);

    figure(1);
    hold on;
    plot(discharge_daily_time{1}, total_ton_chloride_sum)
    datetick;
    xlabel('2018');
    ylabel('ton chloride per dag');
    figure_handle = gcf;
    set(figure_handle, 'PaperType', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
        'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperPosition', [ 1.0 1.0 27.7 19 ]);
    plot_file_name = [ 'totale_dagelijkse_zoutvracht_2018_' date ];
    print(figure_handle, '-dpdf', '-noui', '-cmyk', '-painters', plot_file_name);
    close(1);
end

if make_input
    for discharge_id = 1 : 12,
        if discharge_id == 5,
            number_of_subsources = 30;
        elseif discharge_id == 6,
            number_of_subsources = 7;
        elseif discharge_id == 7,
            number_of_subsources = 45;
        else
            number_of_subsources = 1;
        end
        if number_of_subsources > 1
            for subsource_id = 1 : number_of_subsources,
                if discharge_id == 6
                    file_id = fopen([ discharge_tim_labels(discharge_id) '-' num2str(subsource_id) '.tim' ], 'w');
                else
                    file_id = fopen([ discharge_tim_labels(discharge_id) '-' num2str(round((subsource_id + 1) / 3)) char(97 +
mod(subsource_id, 3)) '.tim' ], 'w');
                end
                fprintf(file_id, '* time (minutes from reference 2018-01-01) Q(m3/s) ppt\n');
                for hour = 1 : 24 * number_of_days,
                    fprintf(file_id, '%i', 155 * 24 * 60 + 60 * (hour - 1));
                    fprintf(file_id, ' %e', discharge_hourly_value(discharge_id)(hour) / number_of_subsources);
                    fprintf(file_id, ' %e\n', discharge_hourly_ppt(discharge_id)(hour));
                end
                fclose(file_id);
            end
        else
            file_id = fopen([ discharge_tim_labels(discharge_id) '.tim' ], 'w');
            fprintf(file_id, '* time (minutes from reference 2018-01-01) Q(m3/s) ppt\n');
            for hour = 1 : 24 * number_of_days,
                fprintf(file_id, '%i', 155 * 24 * 60 + 60 * (hour - 1));
            end
        end
    end
end

```

```

        fprintf(file_id, '%e', discharge_hourly_value(discharge_id)(hour));
        fprintf(file_id, '%e\n', discharge_hourly_ppt(discharge_id)(hour));
    end
    fclose(file_id);
end
end
for discharge_id = 13 : 29,
    if discharge_id == 26,
        number_of_subsources = 15;
    elseif discharge_id == 27,
        number_of_subsources = 10;
    else
        number_of_subsources = 1;
    end
    if number_of_subsources > 1
        for subsorce_id = 1 : number_of_subsources,
            file_id = fopen([ discharge_tim_labels{discharge_id} '-' num2str(subsorce_id) '.tim' ], 'w');
            fprintf(file_id, '* time (minutes from reference 2018-01-01) Q(m3/s) ppt\n');
            for day = 1 : number_of_days,
                fprintf(file_id, '%i', 155 * 24 * 60 + 24 * 60 * (day - 1));
                fprintf(file_id, '%e', discharge_daily_value{discharge_id}(day) / number_of_subsources);
                fprintf(file_id, '%e\n', discharge_daily_ppt{discharge_id}(day));
            end
            fclose(file_id);
        end
    else
        file_id = fopen([ discharge_tim_labels{discharge_id} '.tim' ], 'w');
        fprintf(file_id, '* time (minutes from reference 2018-01-01) Q(m3/s) ppt\n');
        for day = 1 : number_of_days,
            fprintf(file_id, '%i', 155 * 24 * 60 + 24 * 60 * (day - 1));
            fprintf(file_id, '%e', discharge_daily_value{discharge_id}(day));
            fprintf(file_id, '%e\n', discharge_daily_ppt{discharge_id}(day));
        end
        fclose(file_id);
    end
end
end
for neerslag_id = 1 : 3,
    file_id = fopen([ 'neerslag-' num2str(neerslag_id) '.tim' ], 'w');
    fprintf(file_id, '* time (minutes from reference 2018-01-01) Q(m3/s) ppt\n');
    for day = 1 : number_of_days,
        fprintf(file_id, '%i', 155 * 24 * 60 + 24 * 60 * (day - 1));
        fprintf(file_id, '%e', daily_remainder(day) / 3);
        fprintf(file_id, '%e\n', 0);
    end
    fclose(file_id);
end
end
% 1.80655 * 82.26 / 1000 = 0.148606803000000
% 0.1486
%
% Voor de initiële chlorideconcentratie is de waarde 82,26 mg/l (overeenkomend met een
% saliniteit van 0.1486 ppt) genomen. Dit is het gemiddelde over 2013 van de gemeten
% chlorideconcentraties in meetpunten Houtribhoek, Ketelmeer west, Steile bank en
% Vrouwezand.
%

```

## F.2 MATLAB script different\_levels.m

```

observation_point_MATROOS = { 'Den-Oever', 'Kornwerderzand', 'Houtribsluizen-noord', 'Lemmer' };
time_10m_value = [ datenum(2018, 6, 5, 0, 0, 0) : 1 / 144 : datenum(2019, 1, 2, 0, 0, 0) ];
for observation_id = 1 : numel(observation_point_MATROOS),
    clear waterlevel_text waterlevel_time waterlevel_value;
    [ waterlevel_text waterlevel_time waterlevel_value ] = read_waterlevel(observation_point_MATROOS{observation_id});
    % put not a numbers (NaN) at missing values
    index = round(1 + (waterlevel_time(1 : end) - datenum(2018, 6, 5, 0, 0, 0)) * 144);
    waterlevel_10m_value_withNaNs(observation_id) = NaN(1, numel(time_10m_value));
    waterlevel_10m_value_withNaNs(observation_id)(index) = waterlevel_value;
    waterlevel_10m_value[observation_id] = interp1(waterlevel_time, waterlevel_value, time_10m_value, 'linear');
end
lake_level_10m_value = 0.22 * waterlevel_10m_value{1} + ...
    0.30 * waterlevel_10m_value{2} + ...
    0.35 * waterlevel_10m_value{3} + ...
    0.13 * waterlevel_10m_value{4};
for observation_id = 1 : numel(observation_point_MATROOS),
    corrected_waterlevel_10m_value{observation_id} = waterlevel_10m_value{observation_id} - lake_level_10m_value;
end
if 0
    for observation_id = 1 : numel(observation_point_MATROOS),
        plot(time_10m_value, waterlevel_10m_value{observation_id}, 'g');
        hold on;
        plot(time_10m_value, corrected_waterlevel_10m_value{observation_id}, 'b');
        datetick;
        xlabel('periode van 5-6-2018 tot 1-1-2019');
        ylabel('\color{green}{waterstand (m)} \color{black}{/} \color{blue}{met meerpeil gecorrigeerde waterstand (m)}');
        title(['locatie ' observation_point_MATROOS{observation_id} ', metingen per 10 minuten uit MATROOS' ]);
        figure_handle =(gcf);
        set(figure_handle, 'PaperType', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
            'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperPosition', [ 0.0 0.0 30.0 20.0 ]);
        file_name = [ 'wl_cwl_' observation_point_MATROOS{observation_id} '_' date ];
        print(figure_handle, '-dpdf', '-noui', '-cmky', '-painters', file_name);
        close(figure_handle);
    end
end
time_daily_value = [ datenum(2018, 6, 5, 0, 0, 0) : datenum(2019, 1, 1, 0, 0, 0) ];
number_of_days = datenum(2019, 1, 2, 0, 0, 0) - datenum(2018, 6, 5, 0, 0, 0);
for day = 1 : number_of_days,
    for observation_id = 1 : numel(observation_point_MATROOS),
        waterlevel_daily_value{observation_id}(day) = mean(waterlevel_10m_value{observation_id}(144 * (day - 1) + 1 : 144 *
day));
    end
end

```

```

end
lake_level_daily_value(day) = mean(lake_level_10m_value(144 * (day - 1) + 1 : 144 * day));
end

if 0
plot(time_10m_value, lake_level_10m_value, 'g');
hold on;
plot(time_daily_value, lake_level_daily_value, 'b');
datetick;
xlabel('periode van 5-6-2018 tot 1-1-2019');
ylabel('\color{green}{meerpeil per 10 minuten (m)} \color{black}{/} \color{blue}{meerpeil per dag (m)}');
title(['meerpeil gebaseerd op beschikbare metingen uit MATROOS' ]);
figure_handle =(gcf);
set(figure_handle, 'PaperType', 'A4', 'PaperOrientation', 'landscape', ...
'PaperUnits', 'centimeters', 'PaperPosition', [ 0.0 0.0 30.0 20.0 ]);
file_name = [ 'll_' date ];
print(figure_handle, '-dpdf', '-noui', '-cmypk', '-painters', file_name);
close(figure_handle);
end

```

### F.3 MATLAB script read\_timeseries.m

```

function [timeseries_text, timeseries_time timeseries_value] = read_timeseries(file_name)

% Function to read data from timeseries ASCII file into MATLAB.
% Project: 112303712-002 D-Flow FM salt model Lake IJssel
% Author: Menno Genseberger, Deltares
% Date: June 23rd 2019

file_identififier = fopen(file_name);
for header_line = 1 : 6,
    timeseries_text(header_line) = fgetl(file_identififier);
end
fclose(file_identififier);

[timeseries_string, timeseries_value] = textread(file_name, '%s %f', 'headerlines', 7);
timeseries_time = datenum(timeseries_string, 'dd-mm-yy-HH-MM');

```

### F.4 MATLAB script read\_waterlevel.m

```

function [waterlevel_text, waterlevel_time waterlevel_value] = read_waterlevel(file_name)

% Function to read data from waterlevel time serie ASCII file into MATLAB.
% Project: 11203715-10 HIRLAM-HARMONIE IJsselmeergebied
% Author: Menno Genseberger, Deltares
% Date: July 19th 2019

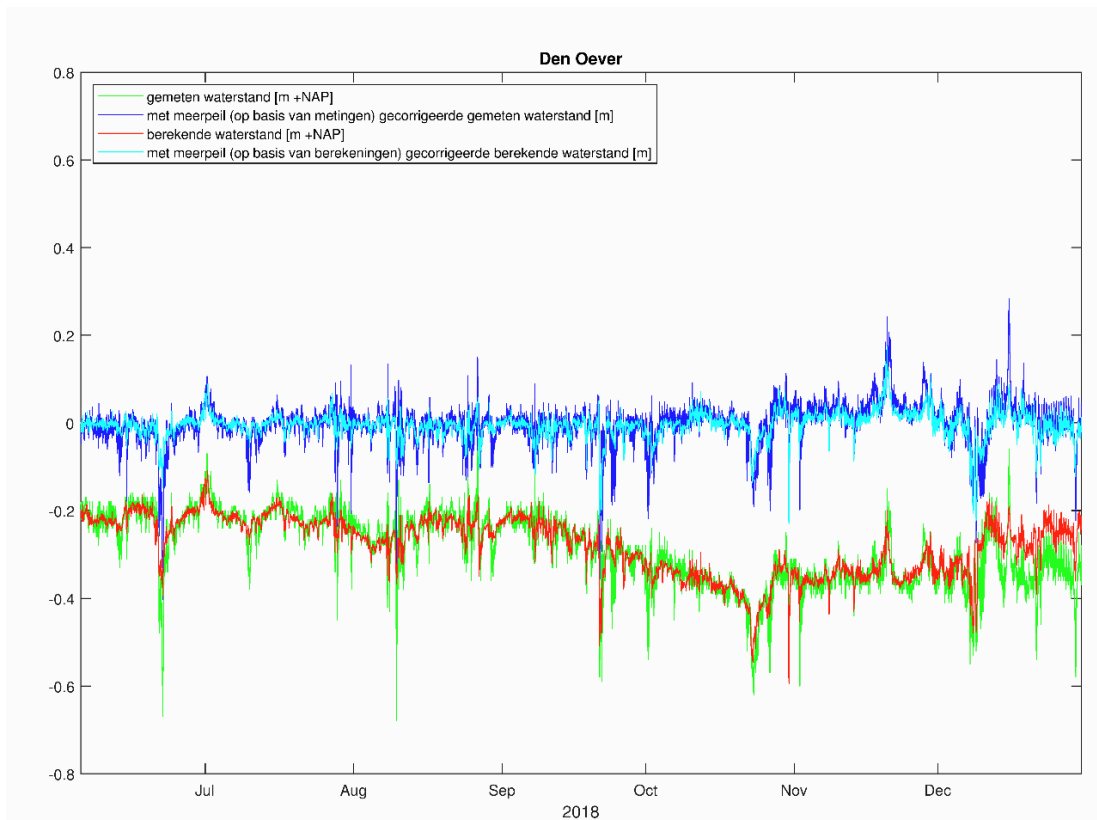
file_identififier = fopen(file_name);
for header_line = 1 : 11,
    waterlevel_text(header_line) = fgetl(file_identififier);
end
fclose(file_identififier);

[waterlevel_string, waterlevel_value] = textread(file_name, '%s %f', 'headerlines', 11);
waterlevel_time = datenum(waterlevel_string, 'YYYYmmdgHHMM');

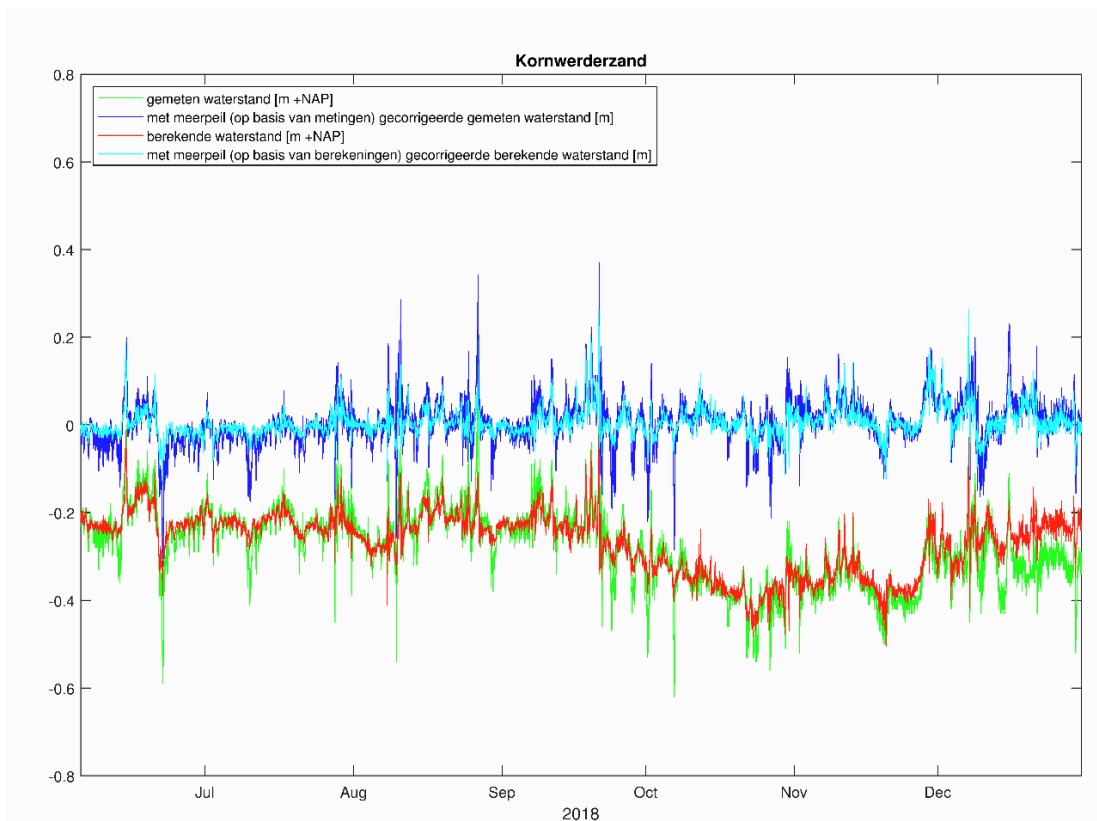
```

# G Resultaten zoutverspreiding 3D

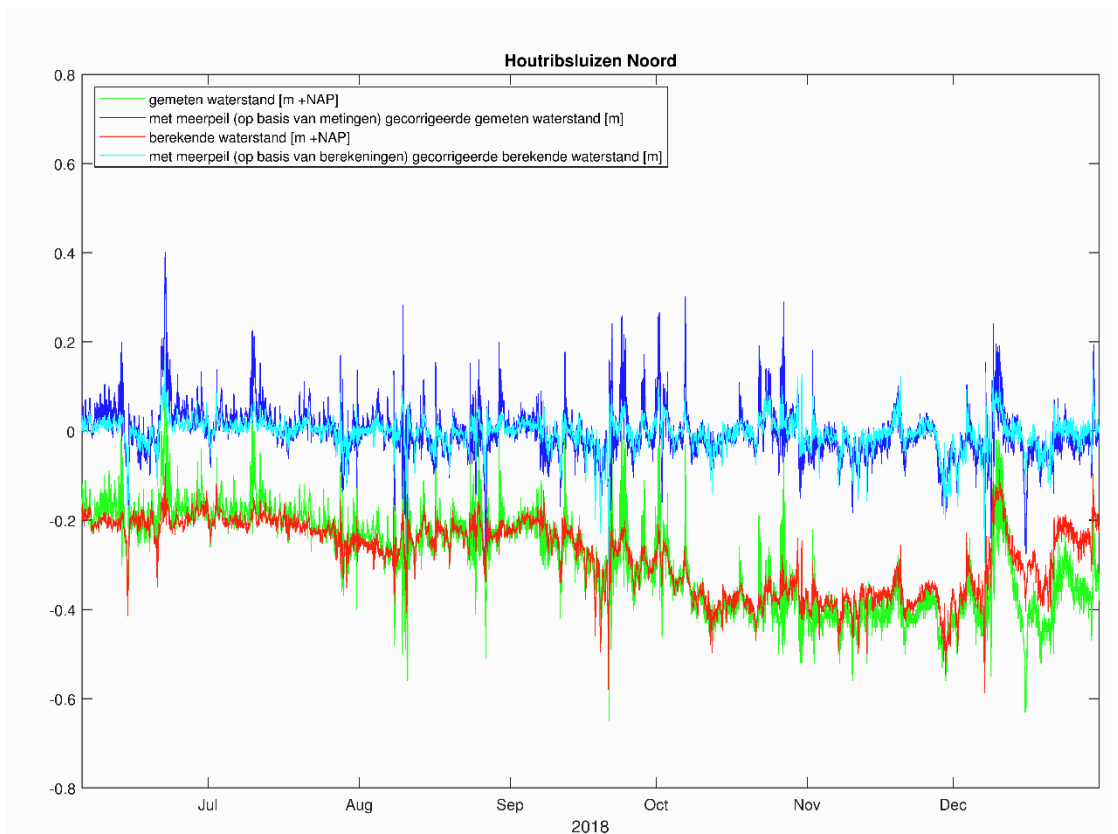
## G.1 Tijdsreeks waterstand



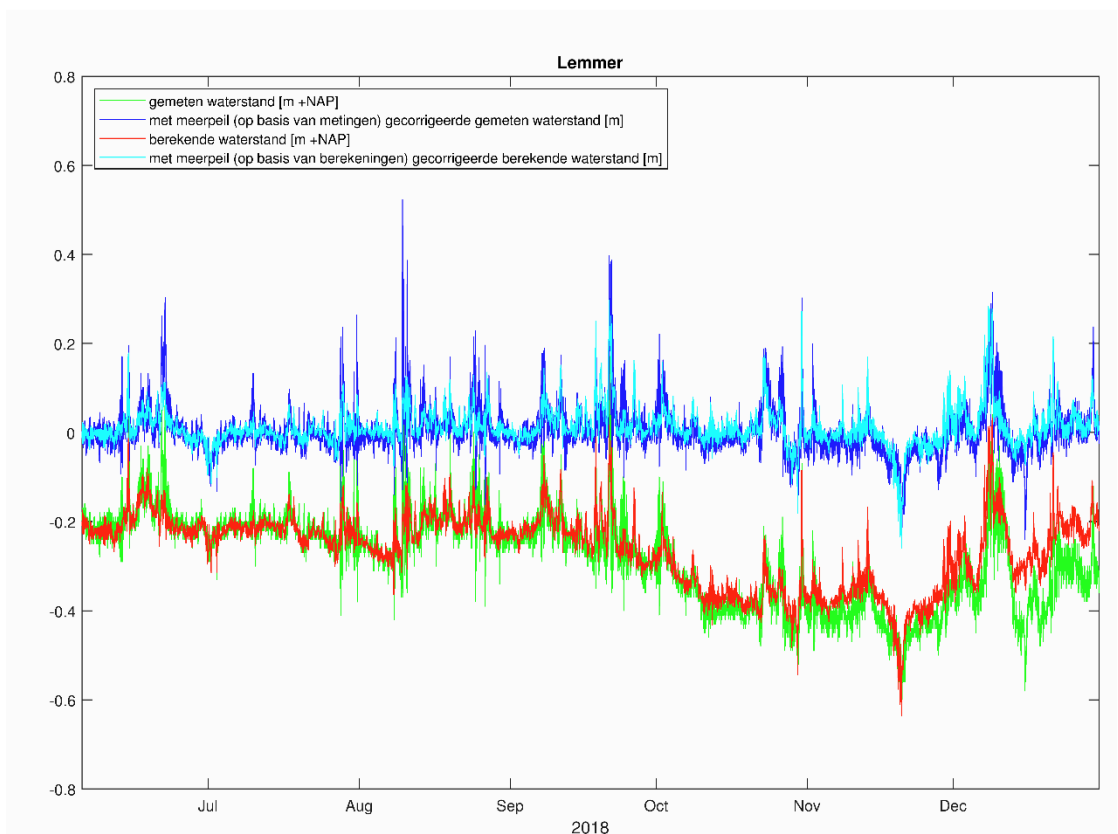
Figuur G.1. Gemeten en berekende waterstand [m +NAP] op observatiestation bij Den Oever.



Figuur G.2. Gemeten en berekende waterstand [m +NAP] op observatiestation bij Kornwerderzand.

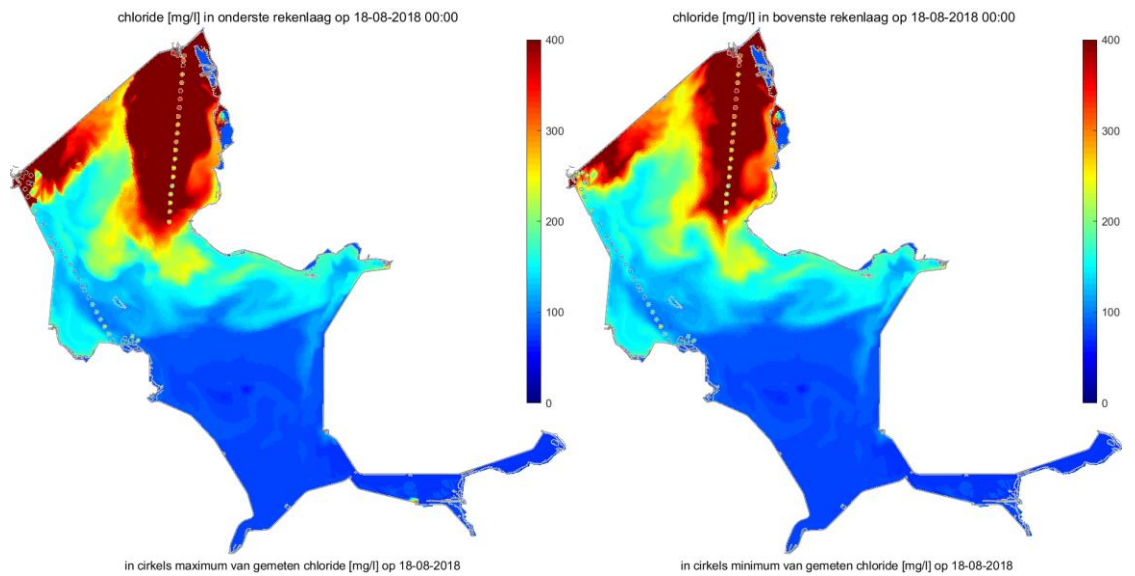


Figuur G.3. Gemeten en berekende waterstand [m +NAP] op observatiestation bij Houtribsluizen Noord.

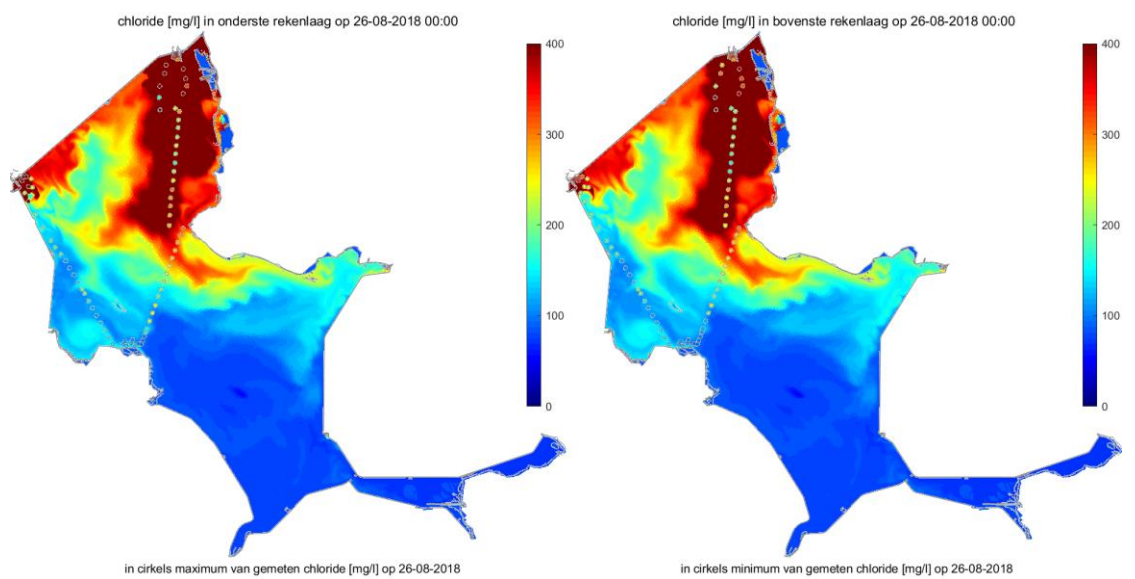


Figuur G.4. Gemeten en berekende waterstand [m +NAP] op observatie punt bij Lemmer.

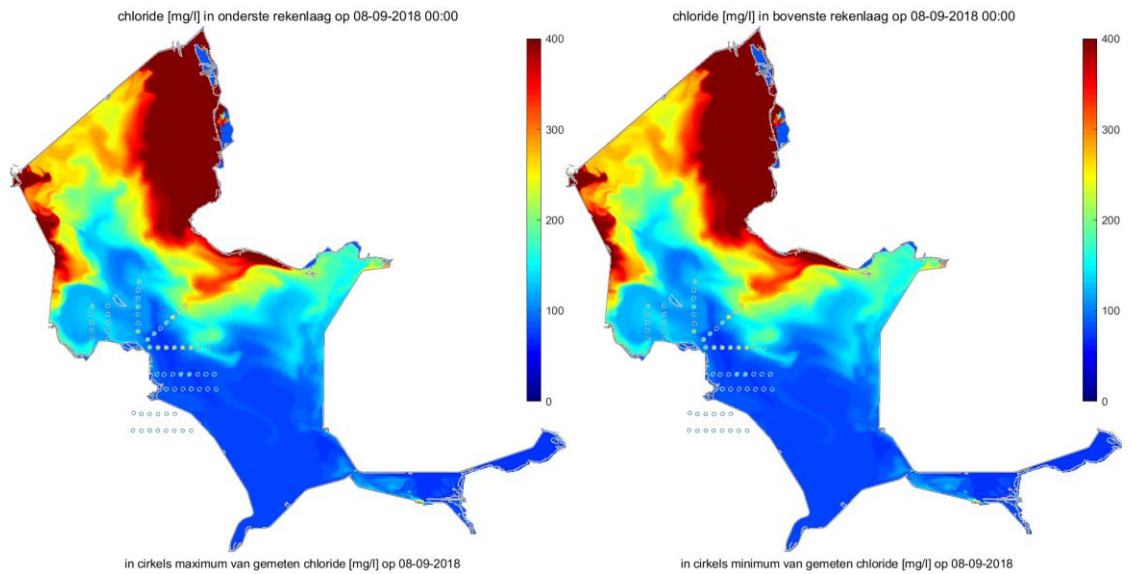
## G.2 Ruimtelijke figuren gehele gebied



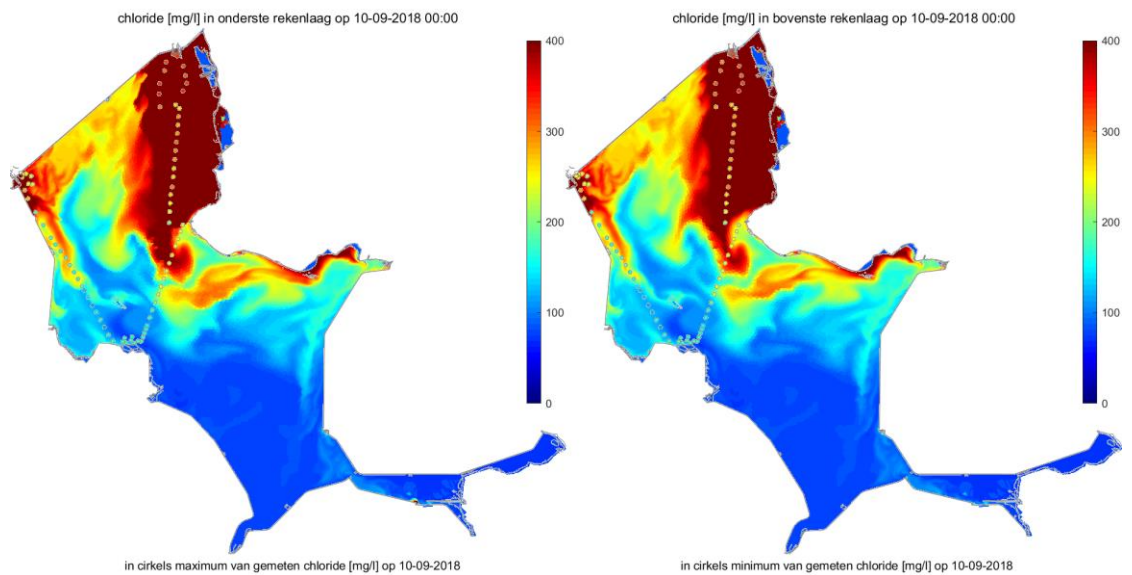
*Figuur G.5. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 18-08-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



*Figuur G.6. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 26-08-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

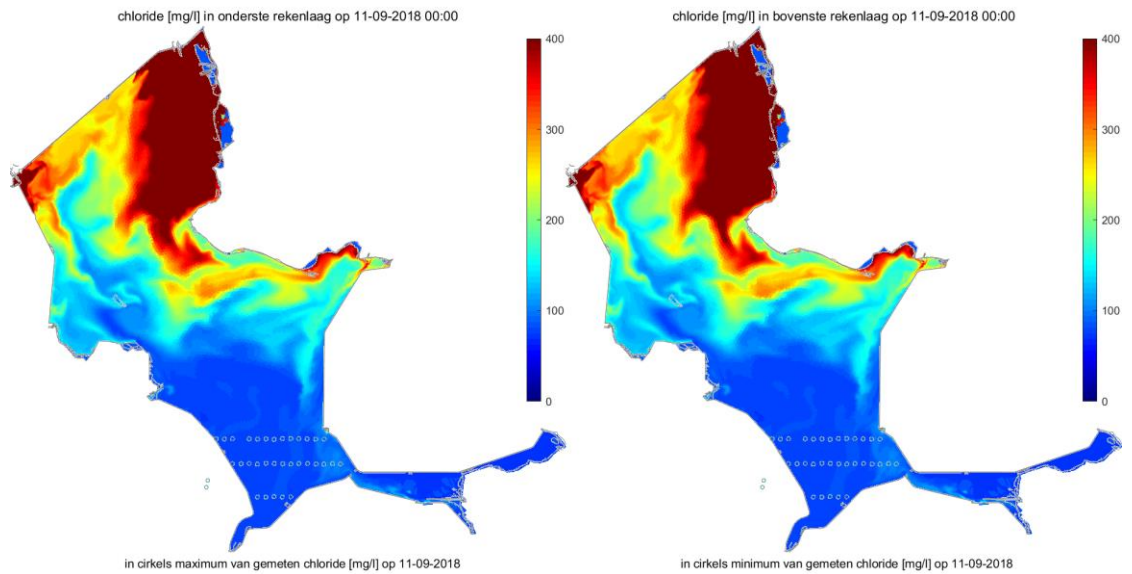


*Figuur G.7. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 08-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

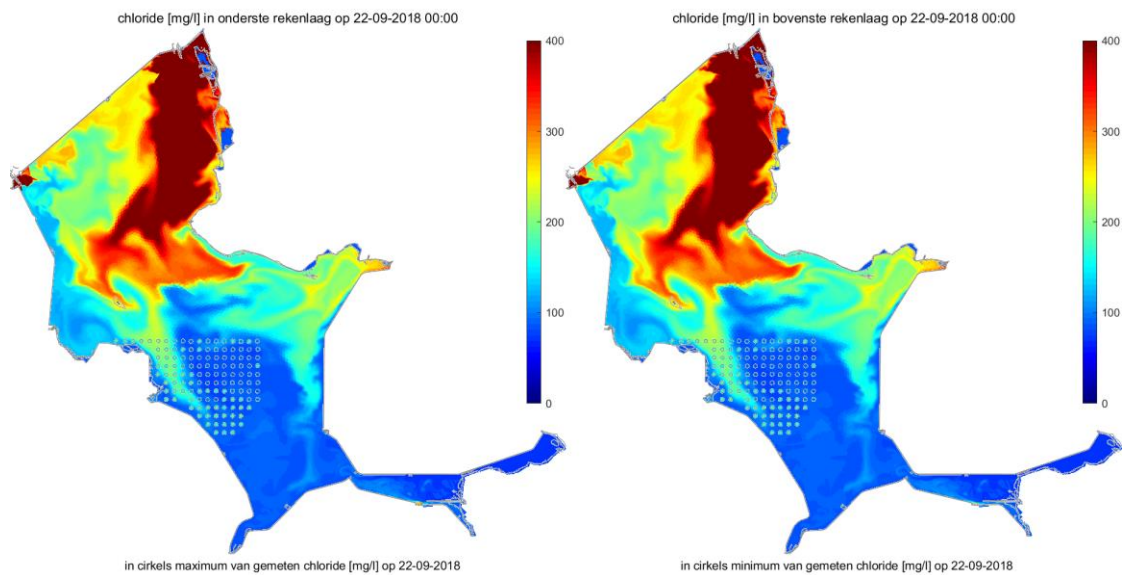


*Figuur G.8. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 10-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

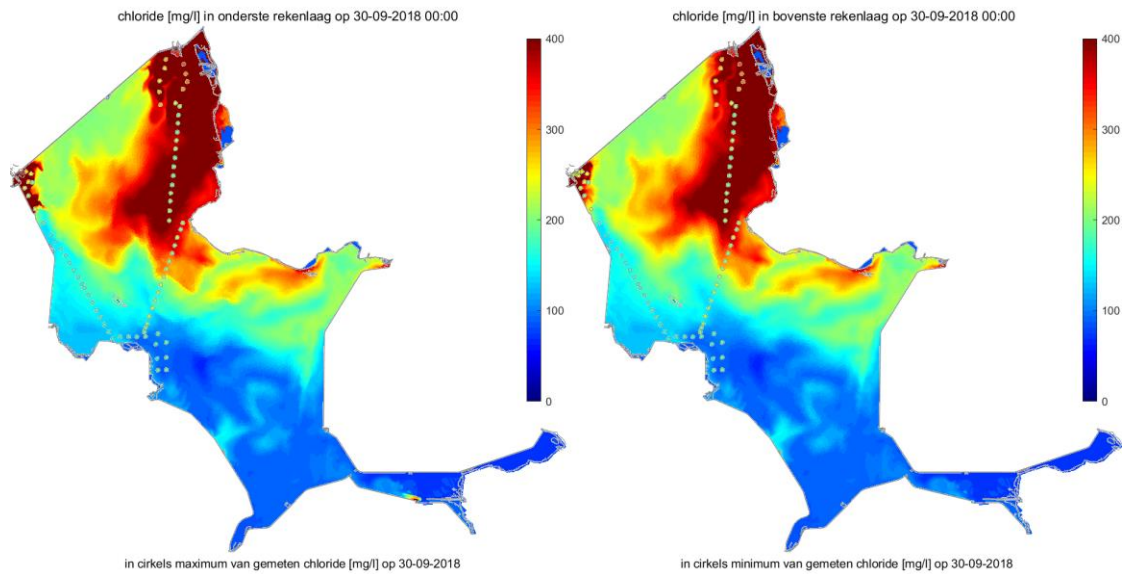




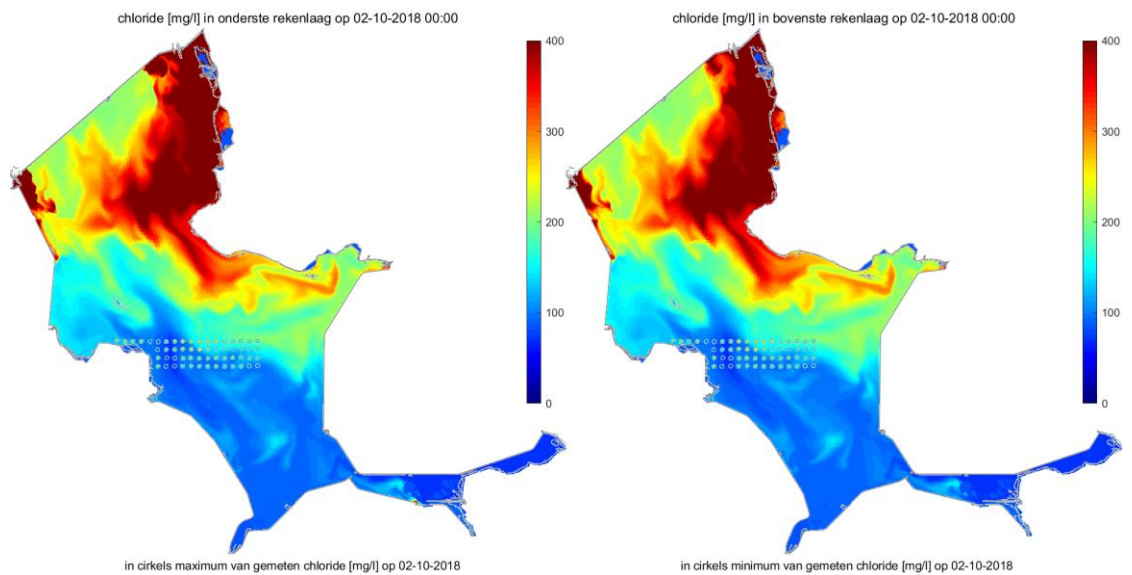
*Figuur G.9. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 11-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



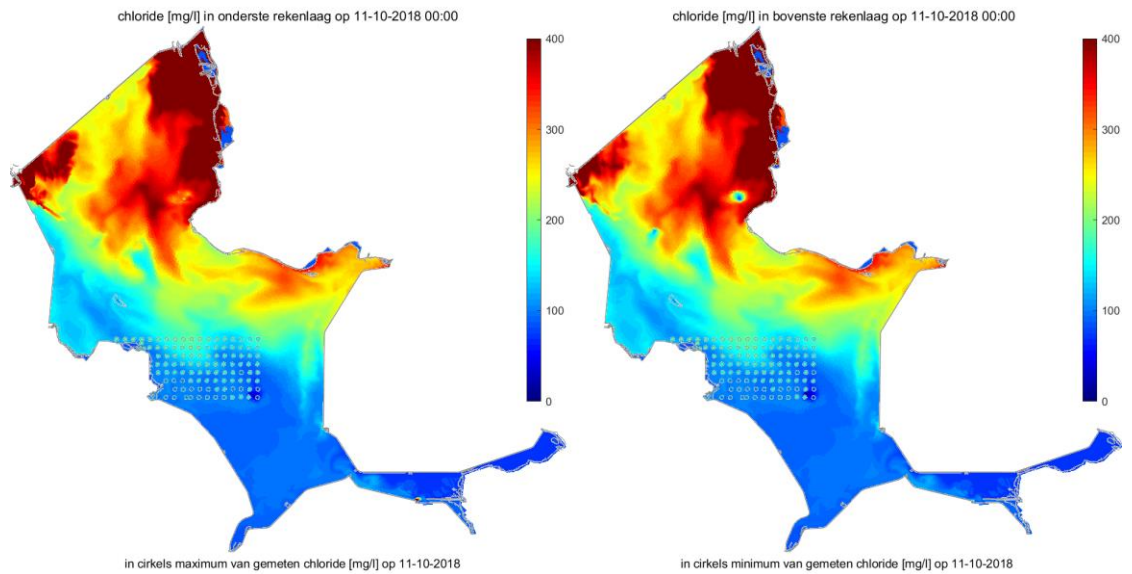
*Figuur G.10. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 22-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



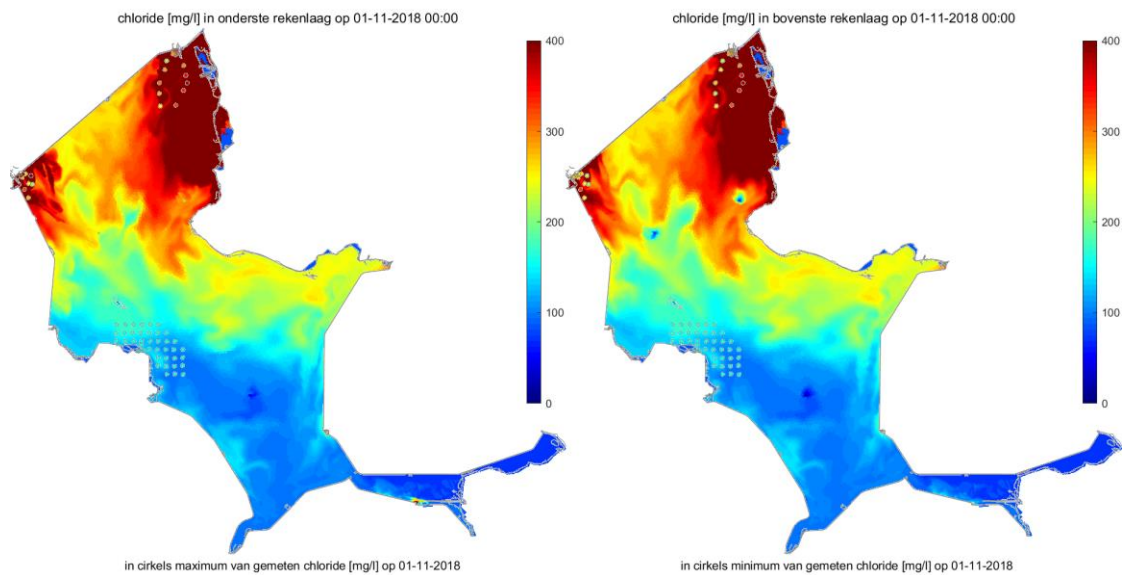
*Figuur G.11. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 30-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



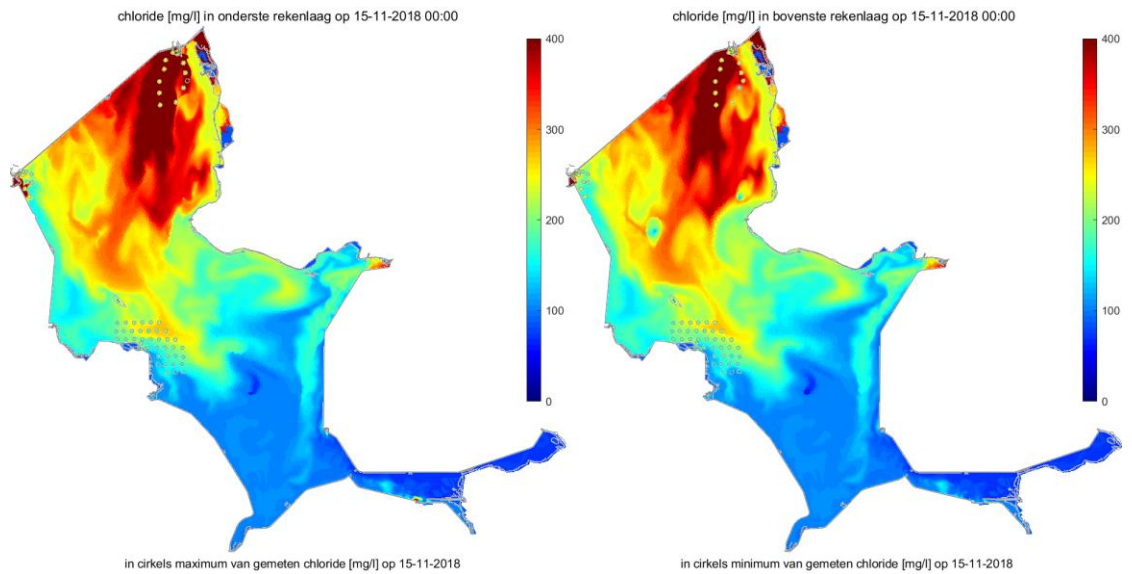
*Figuur G.12. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 02-10-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



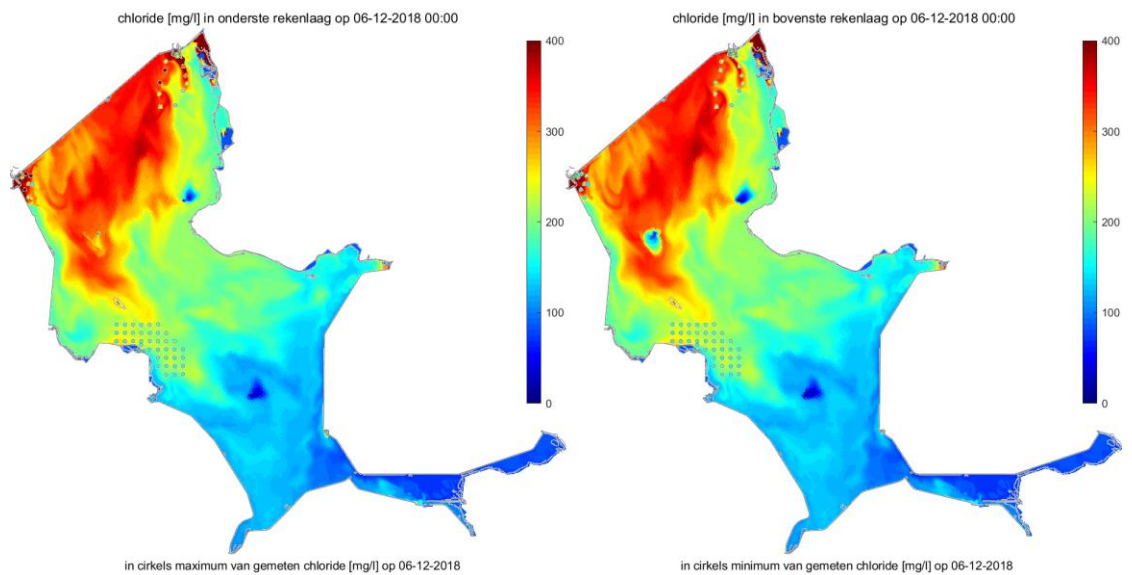
*Figuur G.13. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 11-10-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



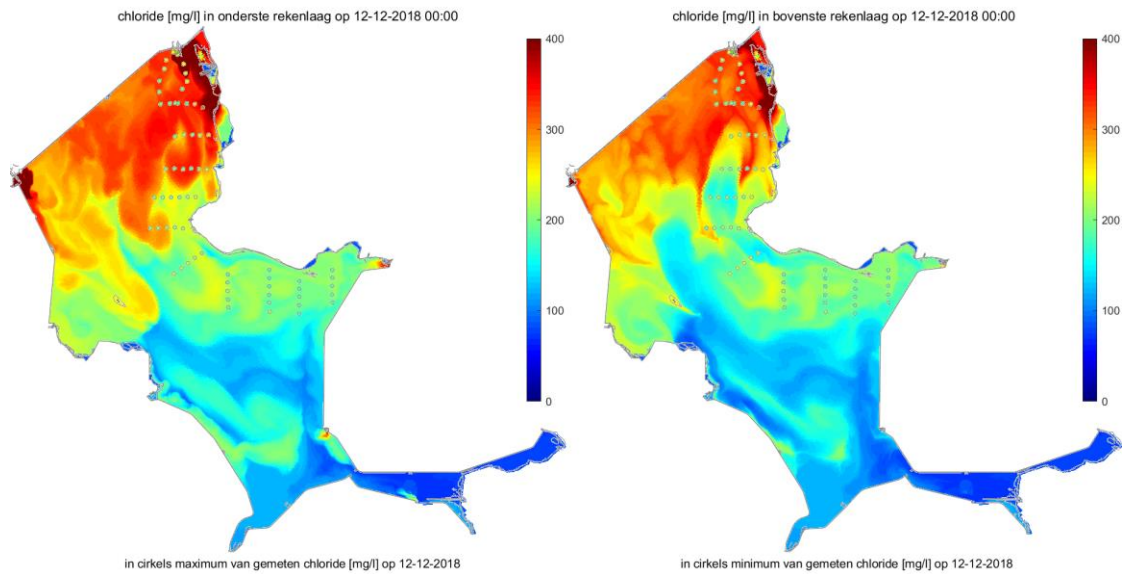
*Figuur G.14. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 01-11-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



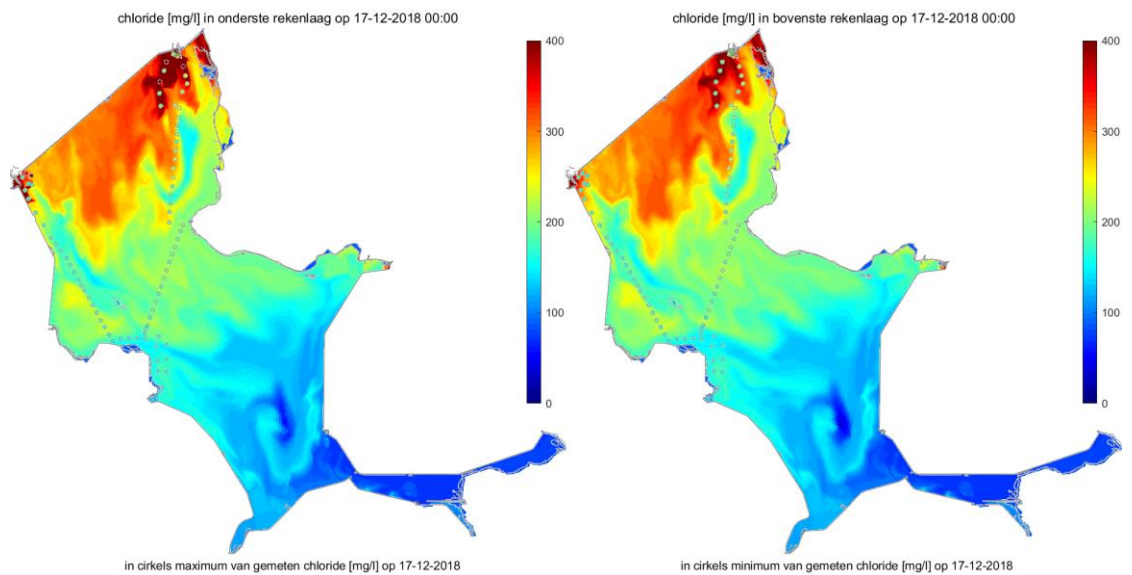
*Figuur G.15. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 15-11-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



*Figuur G.16. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 06-12-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

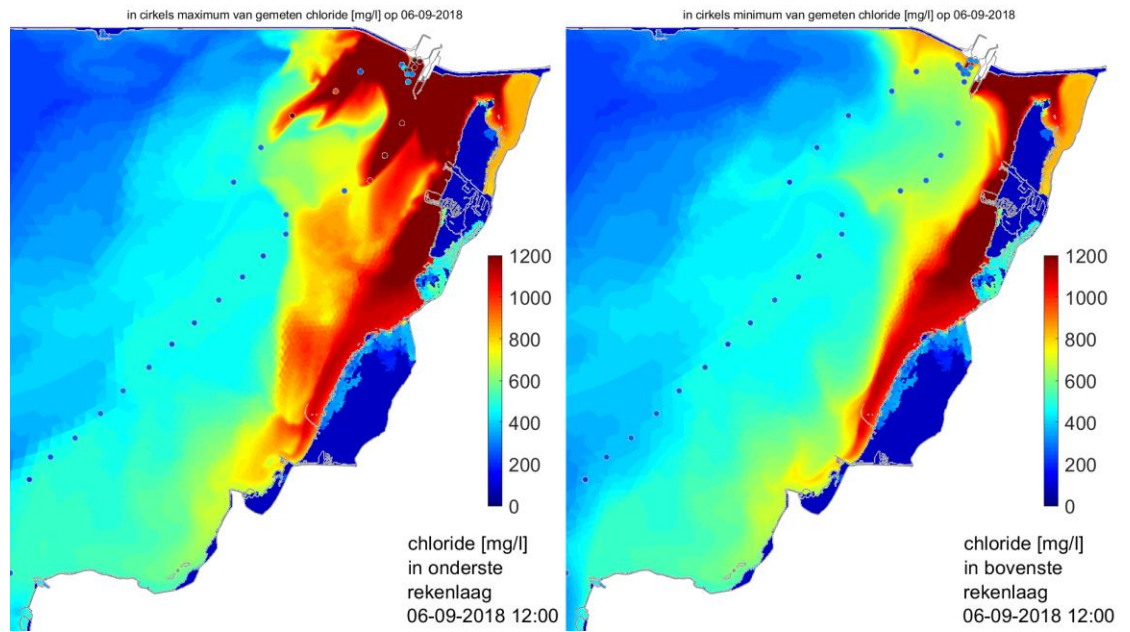


*Figuur G.17. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 12-12-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

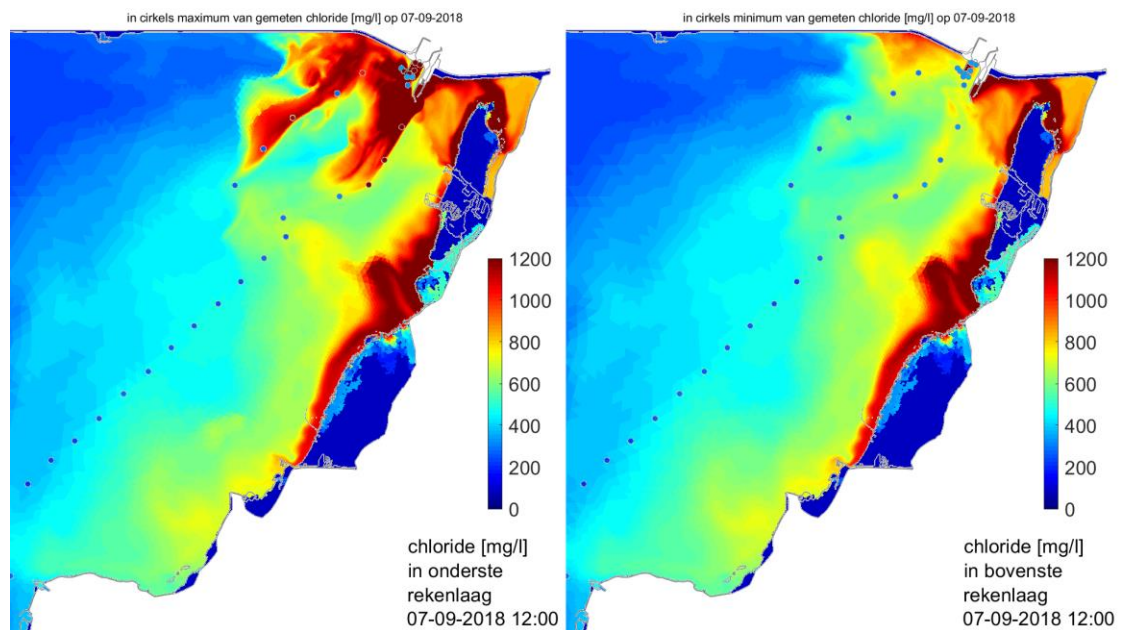


*Figuur G.18. Chloride [mg/l] in gehele gebied op 17-12-2018: berekende ruimtelijke waarde om 0u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

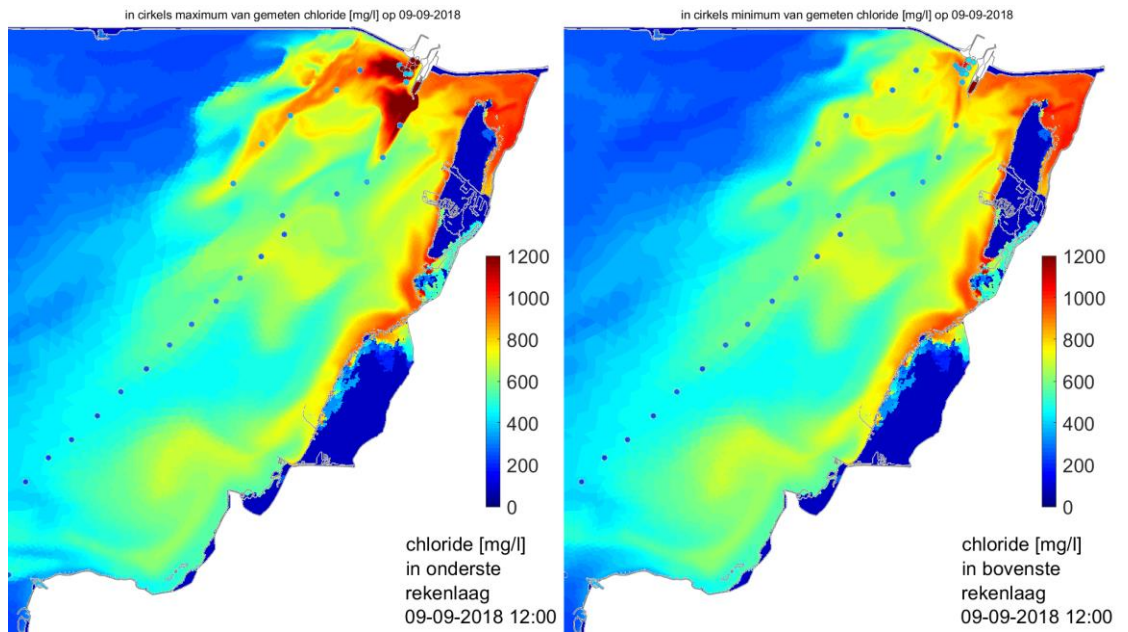
### G.3 Ruimtelijke figuren noordoosten



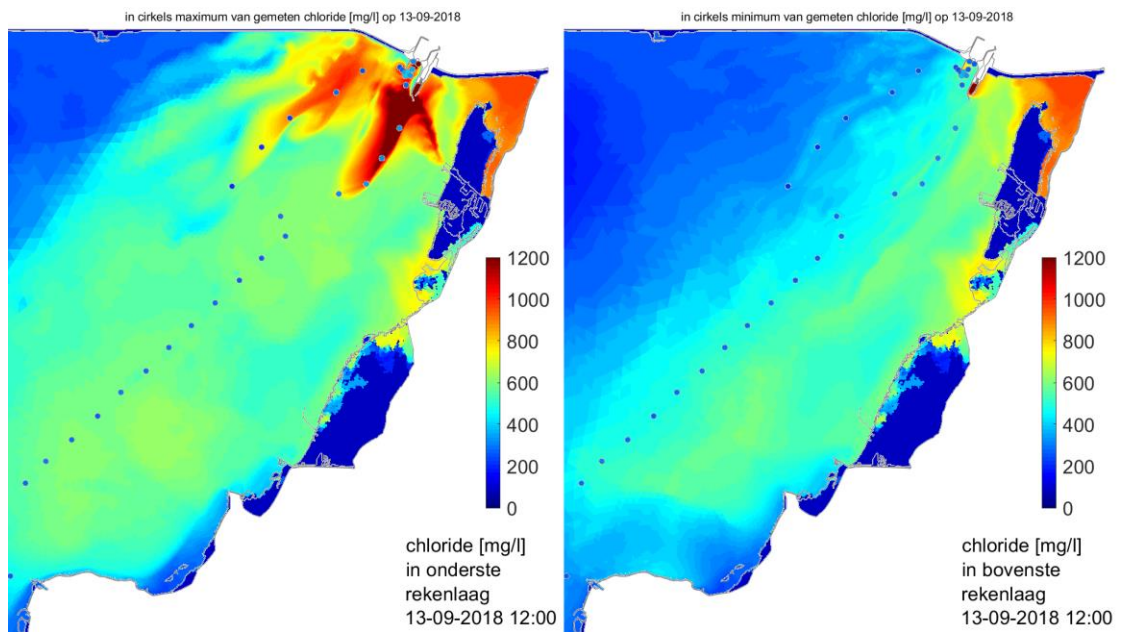
Figuur G.19. Chloride [mg/l] in noordoosten op 06-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).



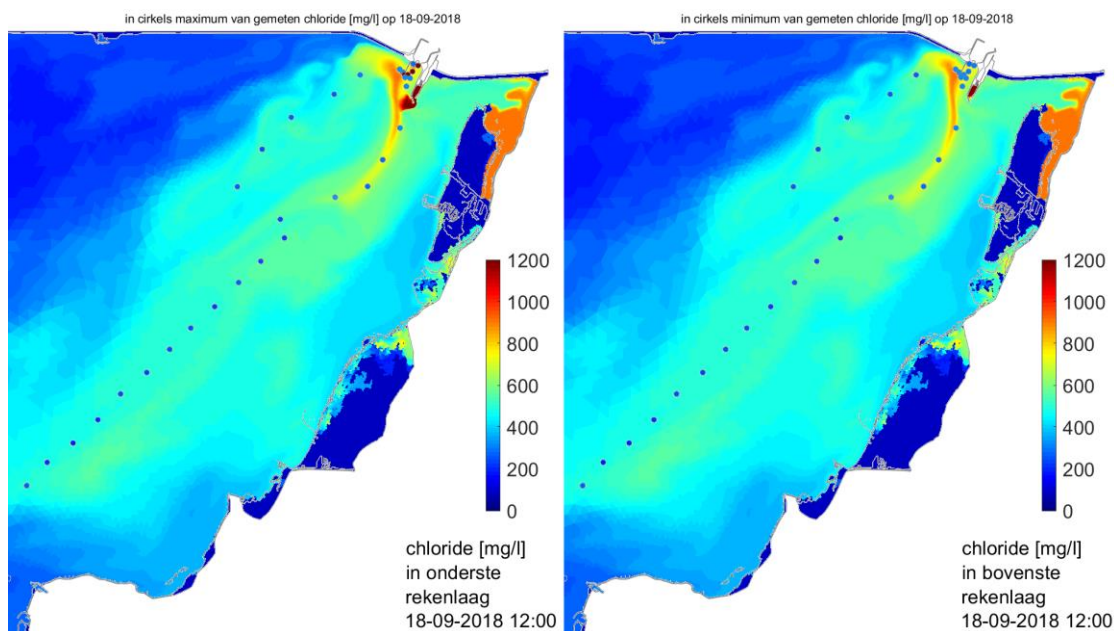
Figuur G.20. Chloride [mg/l] in noordoosten op 07-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).



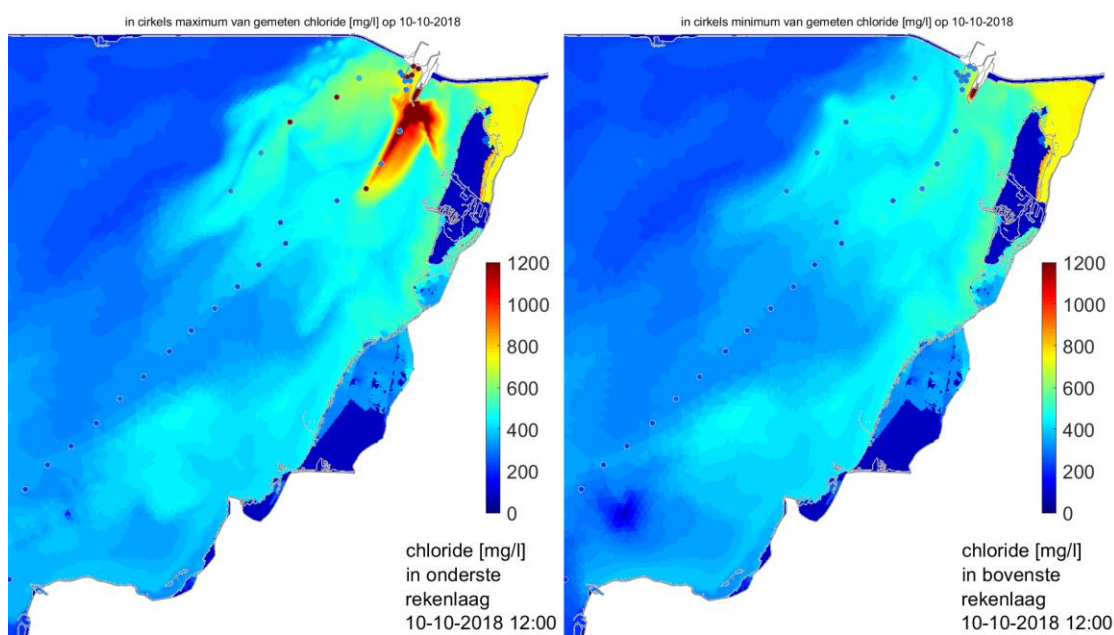
Figuur G.21. Chloride [mg/l] in noordoosten op 09-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).



Figuur G.22. Chloride [mg/l] in noordoosten op 13-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).

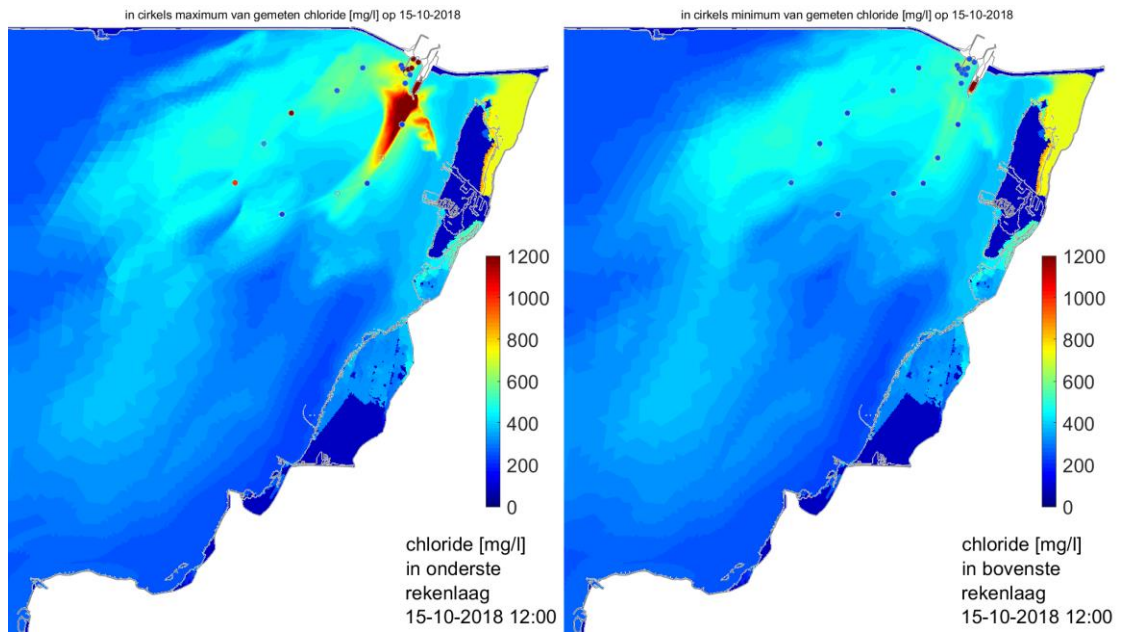


Figuur G.23. Chloride [mg/l] in noordoosten op 18-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).

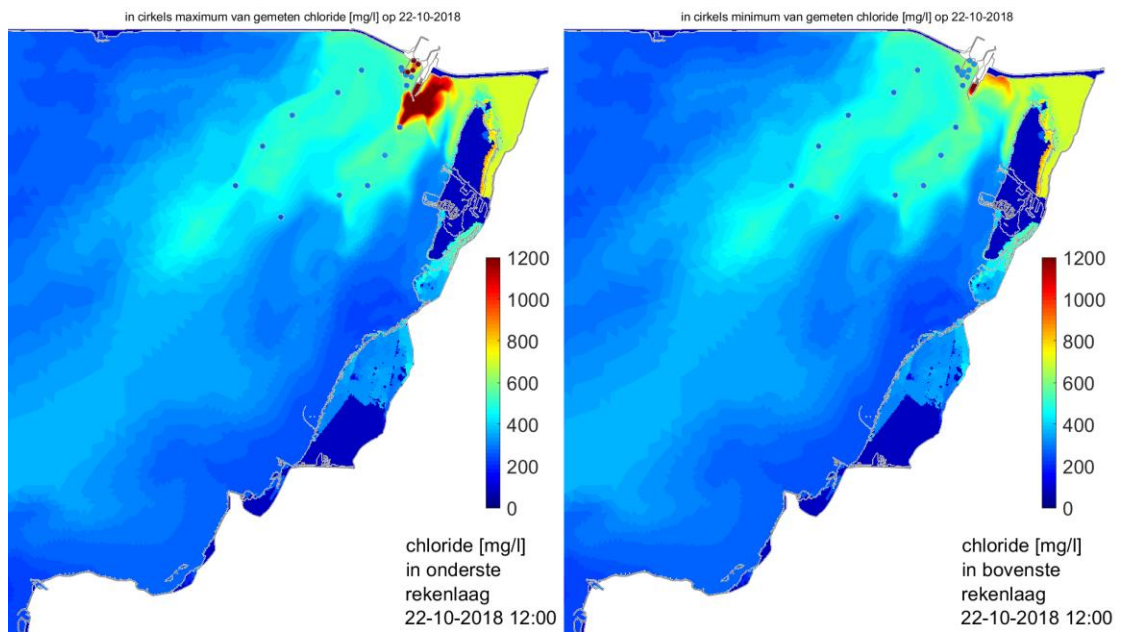


Figuur G.24. Chloride [mg/l] in noordoosten op 10-10-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).

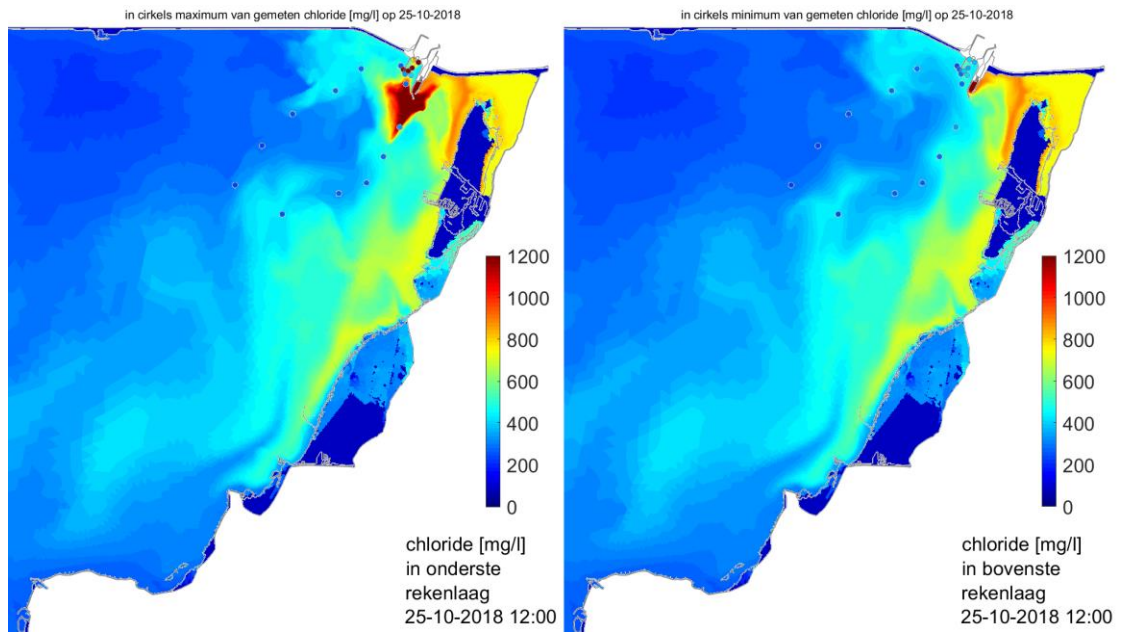




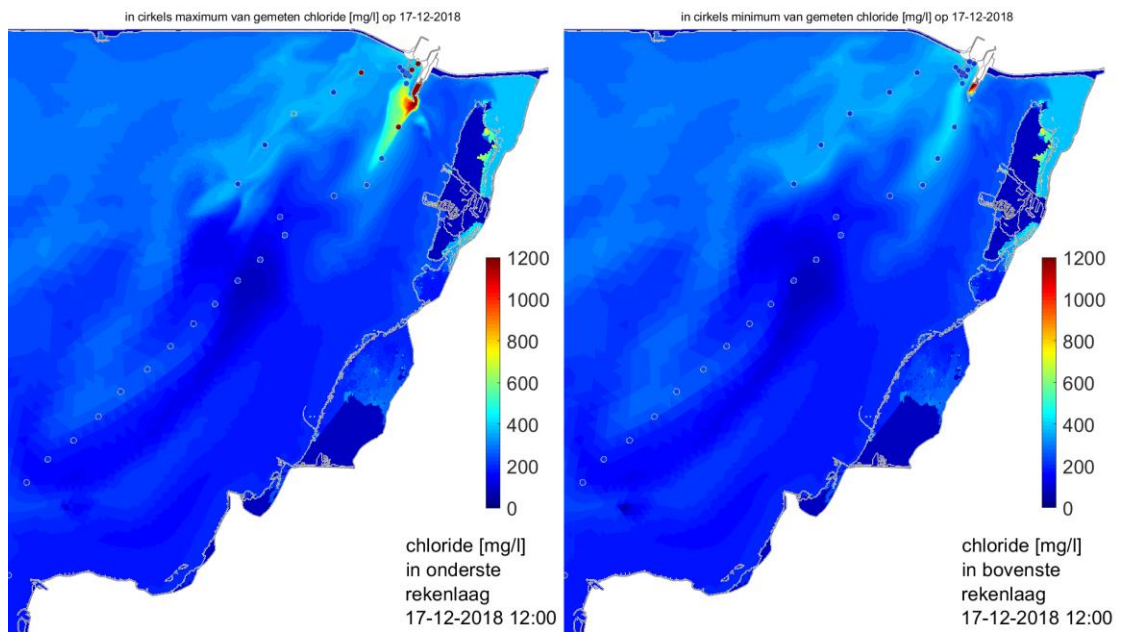
Figuur G.25. Chloride [mg/l] in noordoosten op 06-09-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).



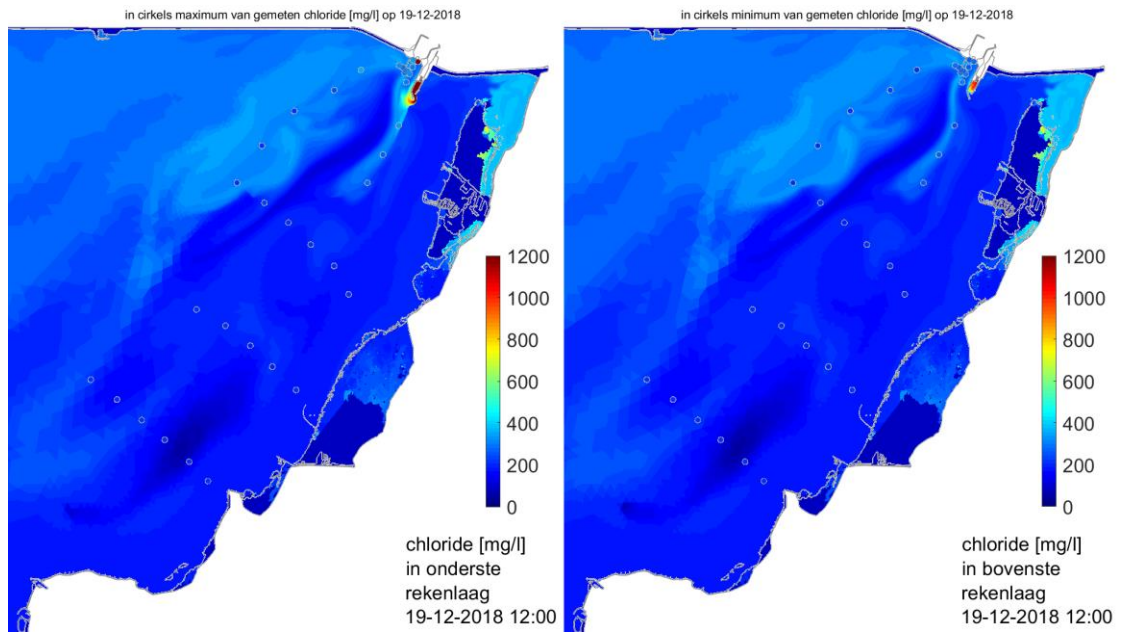
Figuur G.26. Chloride [mg/l] in noordoosten op 22-10-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).



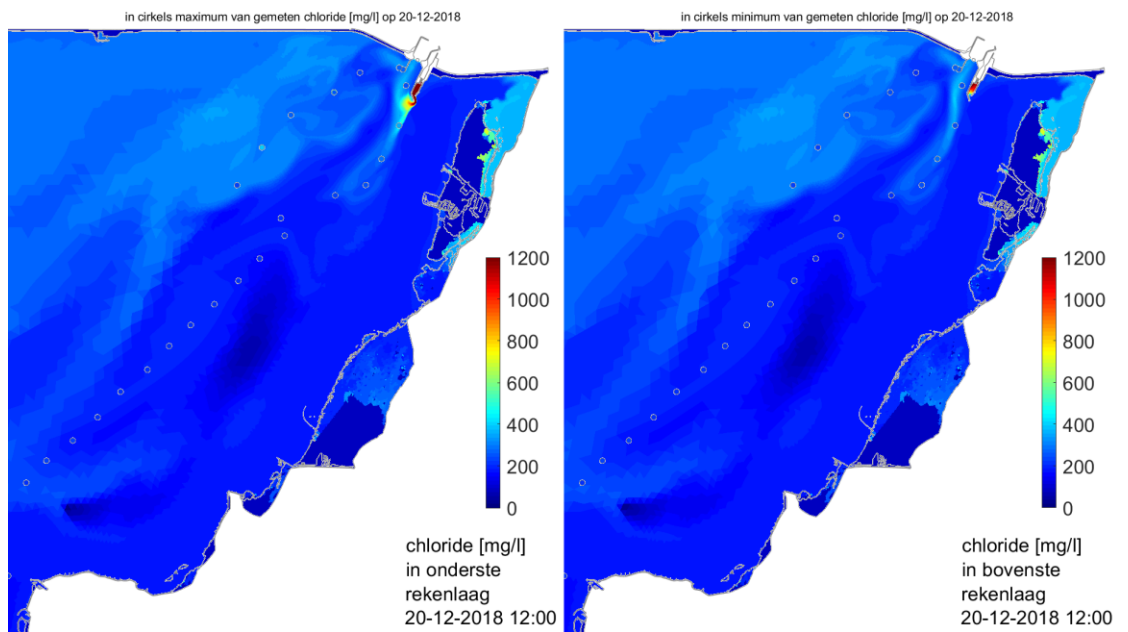
*Figuur G.27. Chloride [mg/l] in noordoosten op 25-10-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*



*Figuur G.28. Chloride [mg/l] in noordoosten op 17-12-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).*

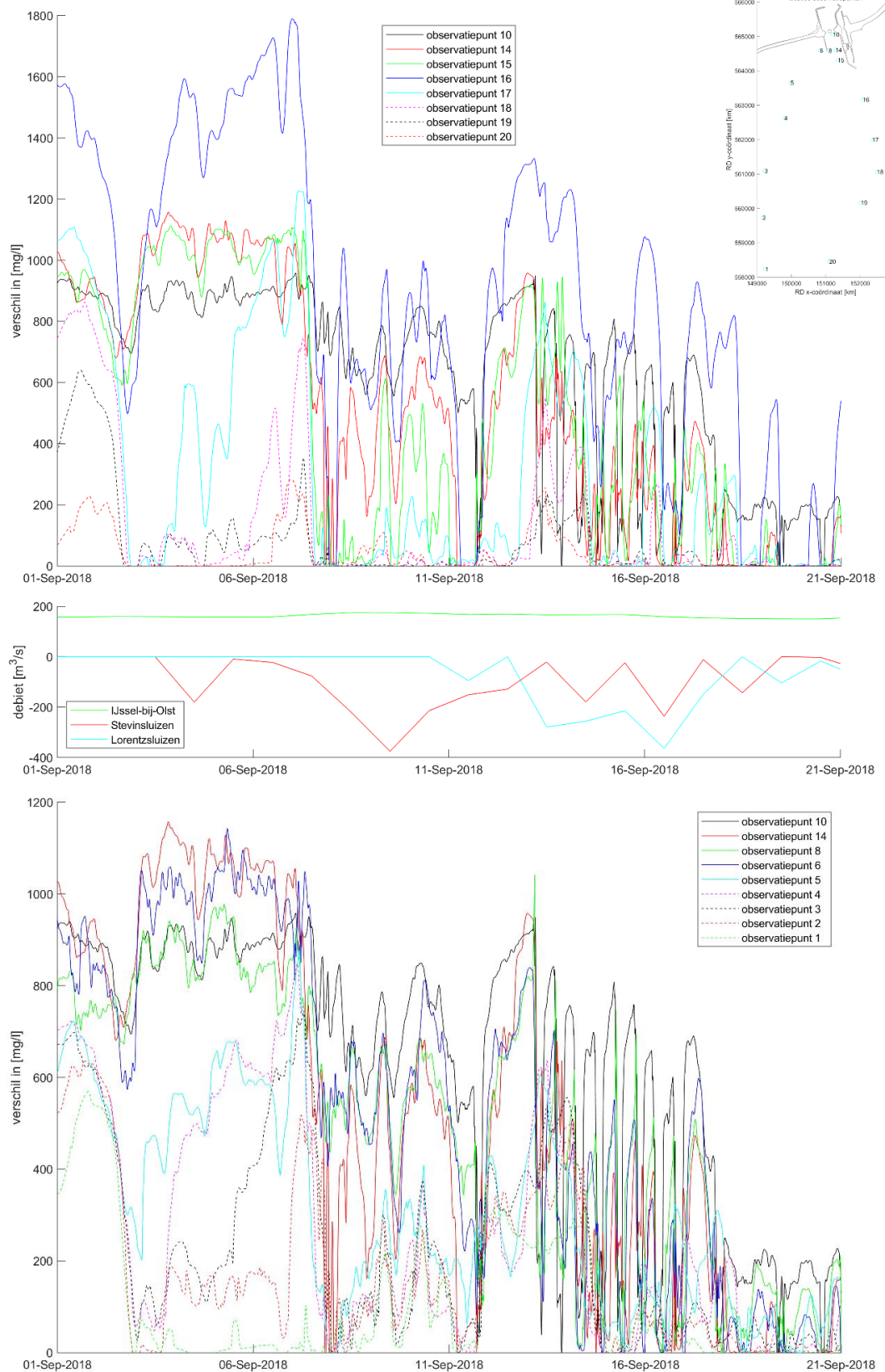


Figuur G.29. Chloride [mg/l] in noordoosten op 19-12-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).

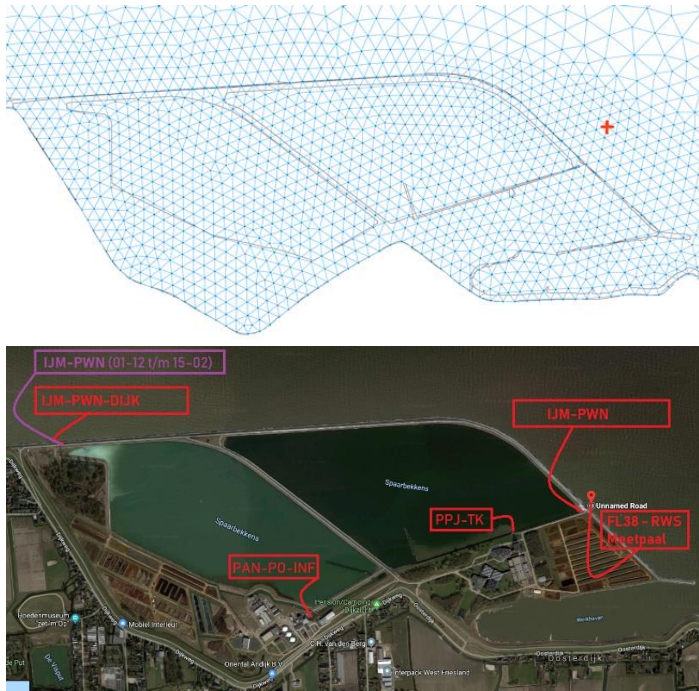


Figuur G.30. Chloride [mg/l] in noordoosten op 20-12-2018: berekende ruimtelijke waarde om 12u in onderste (links) en bovenste (rechts) rekenlaag, in cirkels meetlocaties gemeten maximum (links) en minimum (rechts).

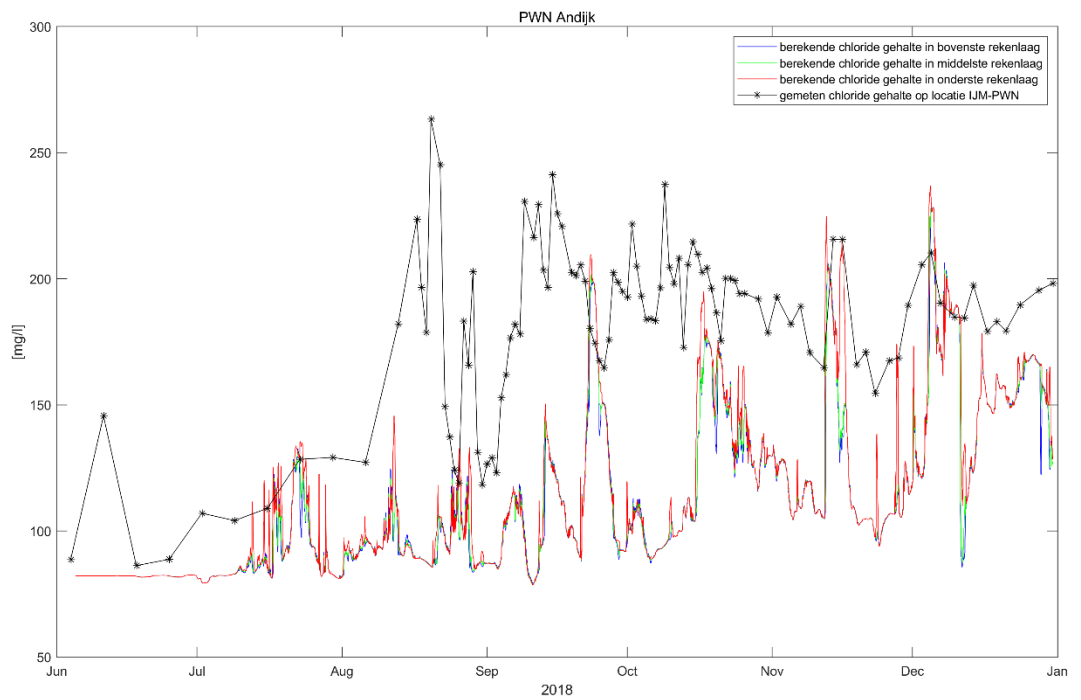
## G.4 Tijdsreeks chloride



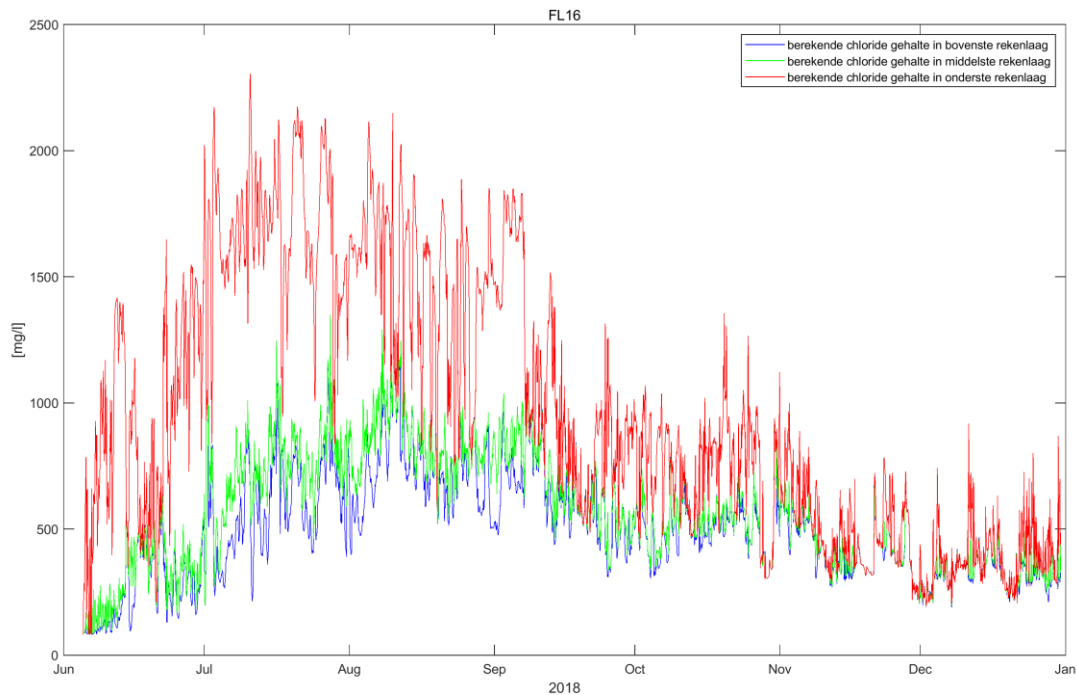
Figuur G.31. Verschil in chloride [mg/l] van waarde in onderste rekenlaag minus waarde in bovenste rekenlaag op twee rijen van observatiepunten (boven en onder, rechtsboven: locaties observatiepunten) bij diepere zones bij Kornwerderzand tijdens afvoerperiode in september (midden: afvoer spuisluisen).



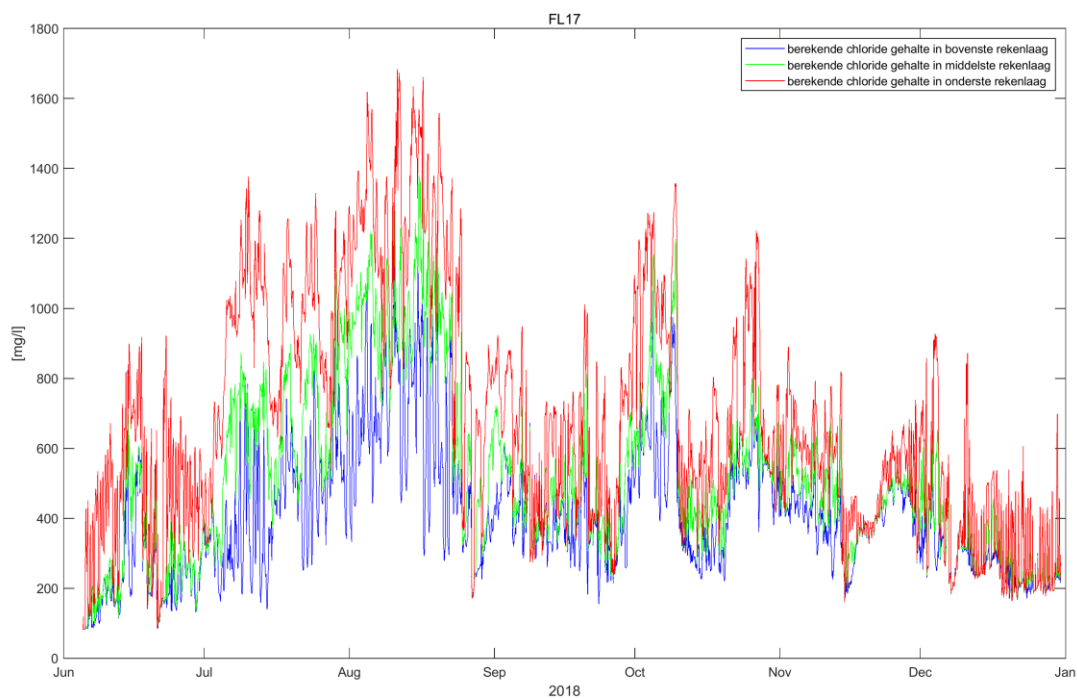
Figuur G.32. Locatie observatiestation PWN Andijk in model (boven) en locatie IJM-PWN in metingen (onder).



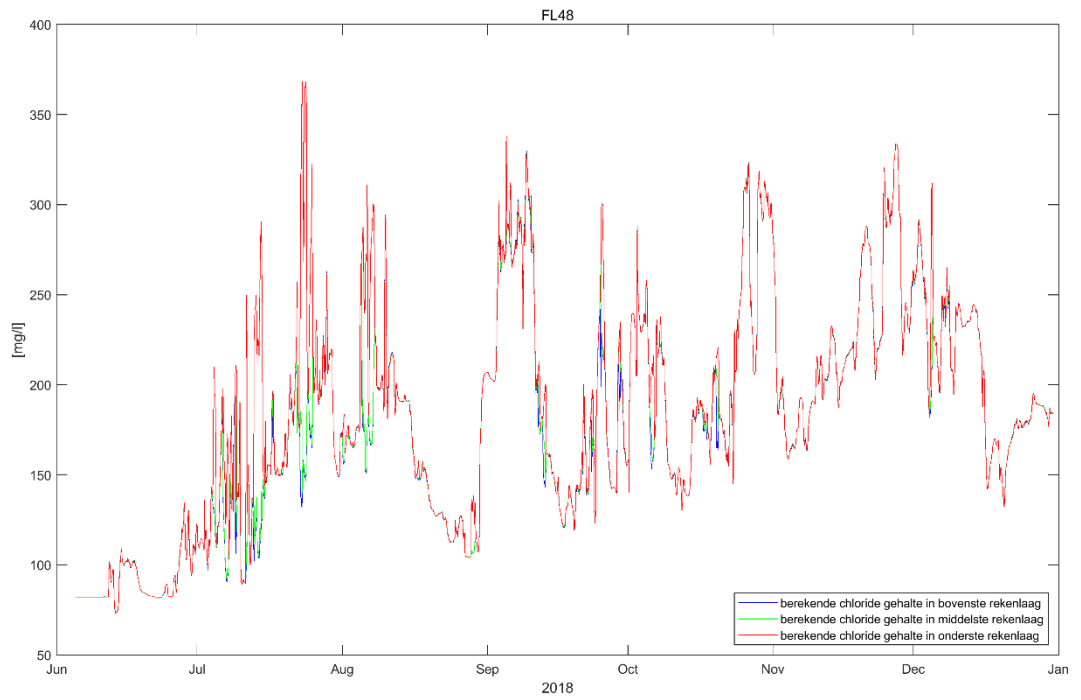
Figuur G.33. Berekende en gemeten chloride [mg/l] bij PWN in Andijk (zie locaties in Figuur G.32).



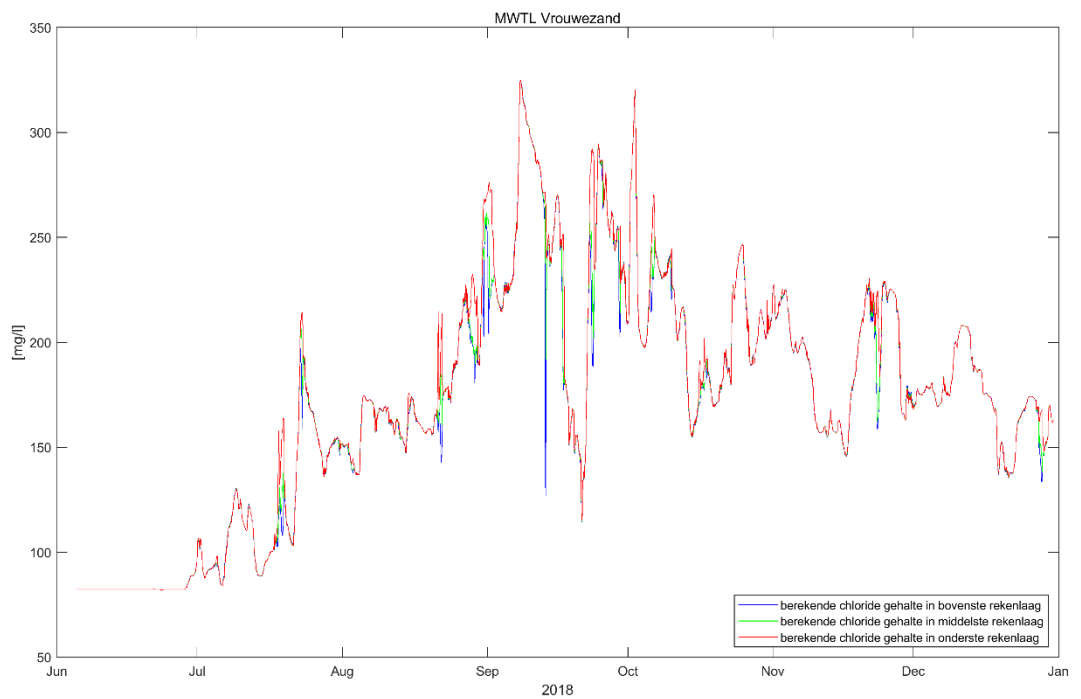
Figuur G.34. Berekende chloride [mg/l] bij observatiestation FL16 (zie locatie in Figuur 3.34).



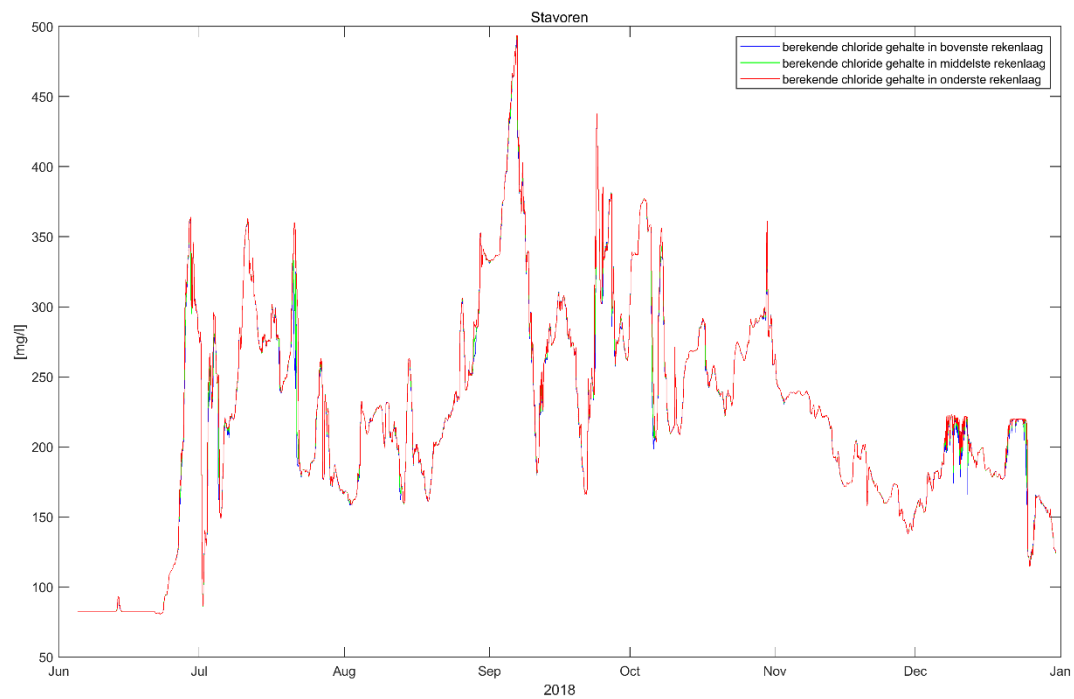
Figuur G.35. Berekende chloride [mg/l] bij observatiestation FL17 (zie locatie in Figuur 3.34).



Figuur G.36. Berekende chloride [mg/l] bij observatiestation FL48 (zie locatie in Figuur 3.34).



Figuur G.37. Berekende chloride [mg/l] bij observatiestation MWTL Vrouwezand (zie locatie in Figuur 3.34).



Figuur G.38. Berekende chloride [mg/l] bij observatiestation Stavoren (zie locatie in Figuur 3.34).



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](http://www.deltares.nl)