

Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen

Modelbouw, kalibratie en validatie



Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen
Modelbouw, kalibratie en validatie

Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen

Modelbouw, kalibratie en validatie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving & Rijkswaterstaat – Zee & Delta
Contactpersoon	Martin Scholten Yann Friocourt
Referenties	KPP Hydraulica Schematisaties Zout 2019/2020 (proj. nrs. 11203715 en 11205259) KPP BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2019/2020/2021 (proj. nrs.: 11203712, 11205256 en 11206811)
Trefwoorden	D-HYDRO Suite, zesde-generatie, Modelschematisaties, Grevelingen, hydrodynamica, waterkwaliteit, D-Flow Flexible Mesh, D-Water Quality, KPP2019, KPP2020, KPP2021

Documentgegevens

Versie	3.0
Datum	23-11-2021
Projectnummer	11205259-006
Document ID	11205259-006-ZKS-0007
Pagina's	228
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	J. Groenenboom L. van der Heijden A.A. Markus S.C. Laan	F. Zijl A.J. Nolte	A.G. Segeren	Dec 2020
2.0	J. Groenenboom L. van der Heijden A.A. Markus S.C. Laan	F. Zijl A.J. Nolte	A.G. Segeren	Dec 2020
3.0	J. Groenenboom L. van der Heijden A.A. Markus S.C. Laan	A.J. Nolte	A.G. Segeren	Nov 2021

Samenvatting

Algemeen

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van het zesde-generatie D-HYDRO-model van de Grevelingen voor Rijkswaterstaat (RWS) voor de waterbeweging en waterkwaliteit op basis van het nieuwe simulatiesoftwarepakket D-HYDRO Suite. De kern van de D-HYDRO Suite is de D-Flow Flexible Mesh module (D-Flow FM) waarmee eendimensionale (1D), tweedimensionale (2D) en driedimensionale (3D) hydrodynamische simulaties gemaakt kunnen worden op ongestructureerde roosters.

Gebruik is gemaakt van de landelijk afgestemde generieke technische en functionele specificaties voor alle nieuwe zesde-generatie modelschematisaties voor Rijkswaterstaat (RWS). Ook is rekening gehouden met het door RWS opgestelde Programma van Eisen (PvE) voor de 2D en 3D zesde-generatie watermodellen 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 2017-2022.

D-HYDRO Grevelingen – Hydrodynamisch model

Het D-HYDRO-model van de Grevelingen is volledig opnieuw opgebouwd voor de verschillende voor Rijkswaterstaat relevante toepassingen en primaire processen. De beoogde toepassingen zijn:

- Verkenning mogelijkheid om het meerpeil te corrigeren voor scheefstand (stormopzet),
- Toepassing binnen BOI (Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium),
- Onderzoeken systeemwerking peilbeheer, waterkwaliteit en ecologie in huidige situatie en na realisatie doorlaatmiddel Brouwersdam.

Voor de drie toepassingen is één 3D hydrodynamisch model (D-Flow FM) opgezet dat in staat is om saliniteit, temperatuur en stormopzet te berekenen. De enige verschillen tussen de drie toepassingen zijn de gemodelleerde periode en de gebruikte windforcering. Daarnaast is er een diepte-gemiddeld (2Dh) model afgeleid van dit 3D-model voor toepassing binnen BOI. Voor de derde toepassing gerelateerd aan waterkwaliteit en ecologie is een (met het hydrodynamische model) online-gekoppeld waterkwaliteitsmodel opgezet (D-Water Quality). In overleg met kerngebruikers bij RWS zijn voor iedere toepassing kalibratie- en validatieperiodes vastgesteld welke gebruikt zijn om het model te toetsen op kwaliteit en geschiktheid.

Vergeleken met het bestaande 3D-model voor de Grevelingen heeft het D-HYDRO-model een hogere horizontale en verticale resolutie. Desalniettemin is, grotendeels door de mogelijkheid om simulaties geparalleliseerd uit te voeren, de rekentijd vergelijkbaar gebleven met het bestaande Delft3D-FLOW 3D-Grevelingenmodel.

In de kalibratie van het hydrodynamische model zijn op basis van een jaarsom voor 2008 verschillende modelkeuzes en -instellingen beschouwd. Aangezien hiermee niet significant betere modelresultaten werden gevonden, is besloten om (met uitzondering van de achtergrondwaarde verticale eddy diffusiviteit om de menging af te regelen) niet af te wijken van de standaardinstellingen voor D-HYDRO-modellen.

De verificatie van de stormopzet (oktober 2002 en december 2013) heeft aangetoond dat meetgegevens van station Stavenisse tot de beste reproductie van de stormopzet leidt bij het doen van hindcasts. Het gevoeligheidsonderzoek laat verder zien dat de berekende stormopzet vooral beïnvloed wordt door de keuze van meetstation en de winddrag-coëfficiënten. Doordat meetlocatie Vlissingen (waar wel de benodigde meteo-gegevens voor de temperatuurmodellering beschikbaar zijn) een vergelijkbare magnitude (maar iets andere timing) van windsnelheden heeft, kan dit station

goed gebruikt worden voor het doen van jaarsommen aangezien het daarmee een vergelijkbaar effect op de verticale menging zal hebben en zo de gebruikte meteo-gegevens van hetzelfde meetstation afkomstig zijn.

Uit een test voor de BOI-toepassing waarin met het hydrodynamische model de waterstand langs de dijkkring bij extreme condities is berekend, is gebleken dat bij het 3D-model de rekentijden significant toe kunnen nemen of de simulatie zelfs tot stilstand komt door de automatische tijdstapbeperking. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de hoge stroomsnelheden (t.g.v. de oplopende, extreme windsnelheid) in combinatie met lokaal (zeer) dunne z-lagen. Ondanks dat voor toepassing binnen BOI het 2D-model gebruikt zal worden, moet hier in samenwerking met de softwareafdeling een oplossing voor gezocht worden. Waarschijnlijk kan dit opgelost worden door het toepassen van een combinatie van z- en sigma-lagen, iets wat recent in de D-Flow FM geïmplementeerd is. Wat betreft berekende waterstanden is er een klein verschil (orde centimeters) tussen de berekende piekwaterstanden (orde decimeters) in het 2D- en 3D D-HYDRO-model, waarbij het 3D model waterstanden berekent die dichter in buurt komen van de resultaten van het WAQUA-model van het Grevelingenmeer.

Om het hydrodynamische model te valideren op het berekenen van saliniteit en temperatuur van belang voor de toepassing waterkwaliteit en ecologie zijn ook jaarsom 2000 en jaarsom 2017 gemodelleerd. De reproductie van saliniteit en temperatuur met het zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel is vergelijkbaar met dat van het Delft3D 4-model.

De huidige en toekomstige inzet van het Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta is besproken met de regio. Op dit moment draait het operationeel systeem (*Online Grevelingen*) met een 2D WAQUA-model om het meerpeil in de Grevelingen te sturen. Op korte termijn zal IWP (Instrument voor Waterpeilbeheer) en het onderliggende (1D) model, dit systeem gaan vervangen. In de toekomst is het mogelijk gewenst om in het operationele model ook op scheefstand te kunnen sturen. Er zijn stappen gedefinieerd die nodig zijn om in de toekomst D-HYDRO Grevelingen operationeel in te zetten, waarvan het belangrijkste punt is om consensus te bereiken over de toekomstige inzet van dit model.

D-HYDRO Grevelingen – Waterkwaliteitsmodel

Het voorgaande Delft3D 4-waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen is omgezet naar modelinvoer voor gebruik binnen de D-HYDRO Suite. Met behulp van een model-model-vergelijking is geverifieerd dat de door het D-HYDRO-model berekende zuurstof, chlorofyl- en nutriëntenconcentraties, voor zowel het jaar 2000 als het jaar 2008, over het algemeen vergelijkbaar zijn met de Delft3D 4-modelresultaten. In de diepere lagen zijn verschillen tussen de berekeningsresultaten van beide modelsommen te zien, wat tot een relatief groot verschil in indicator *langdurig zuurstofarm areaal* leidt.

Naast de “huidige situatie” (jaarsom 2008), is ook een getij-scenario met het nieuwe D-HYDRO-model gesimuleerd. De kleine verschillen in de door het Delft3D 4- en D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentraties in de diepere delen van het meer lijken in dit getij-scenario te worden vergroot. Aangezien de verschillen die tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model bestaan vergelijkbaar zijn met de verschillen tussen een offline- en online-gekoppelde D-HYDRO-simulatie, kunnen de geïdentificeerde verschillen vermoedelijk voor een groot deel toegedicht worden aan de koppelingsmethodiek.

Bij het toepassen van het D-HYDRO-model in simulaties gericht op situaties buiten het bereik waarvoor het model is vergeleken met metingen, wordt geadviseerd om naar meerdere doelvariabelen te kijken, een voldoende lange inspeelperiode toe te passen, voldoende gevoeligheidsonderzoek te doen en de resultaten met een bandbreedte/betrouwbaarheidsinterval te rapporteren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
1.1	Achtergrond	10
1.2	Doel	10
1.3	Methodiek	10
1.4	Toepassingen van het model	11
1.5	Afbakening	12
1.5.1	Gekoppelde simulaties met D-HYDRO	12
1.5.2	Waterkwaliteitsmodellering: beperken tot bestaande modelgegevens en geen kalibratie	13
1.6	Gebruikte programmatuur en hardware:	13
1.7	Organisatie en bijdragen	13
1.8	Leeswijzer	14
1.9	Terminologie	14
2	Systeembeschrijving	15
2.1	Gebiedsbeschrijving	15
2.2	Verbinding met andere gebieden	16
3	Beschikbare data	17
3.1	Geometrie in Baseline	17
3.2	Randvoorwaarden en meetgegevens ten behoeve van kalibratie/validatie	17
4	Modelopzet	18
4.1	Rekenrooster	18
4.1.1	Horizontaal grid	18
4.1.2	Verticaal grid	20
4.2	Projectie vanuit Baseline	21
4.2.1	Bathymetrie	22
4.2.2	Bodemruwheid	22
4.2.3	Dunne dammen, droge gebieden en overlaten	23
4.2.4	Observatiepunten	24
4.3	Randvoorwaarden en initiële condities	25
4.3.1	Simulatieperioden	25
4.3.2	Open randen	26
4.3.3	Lateralen en kunstwerken	26
4.3.3.1	Waterbalans en de wijze van modelleren van onttrekkingen en lozingen	26
4.3.3.2	Waterbalans	26
4.3.3.3	Sluitfout	27
4.3.3.4	Kunstwerken	27
4.3.3.5	Afstroming en poldergemalen	31
4.3.3.6	Regenval en verdamping	32
4.3.4	Meteorologische forcering	32
4.3.4.1	Wind	32
4.3.4.2	Temperatuur	33
4.3.5	Initiële condities	33
4.4	Overige modelinstellingen en -eigenschappen	33
5	Kalibratie saliniteit, temperatuur en stormopzet	35

5.1	Saliniteit en temperatuur	35
5.1.1	Methodiek	35
5.1.2	Uitkomsten gevoeligheidsonderzoek	35
5.1.2.1	Bodemruwheid	35
5.1.2.2	Horizontale/verticale achtergrondviscositeit en -diffusiviteit	35
5.1.2.3	Verticale laagverdeling	36
5.1.2.4	Maximale rekentijdstep	36
5.1.2.5	Locatie Brouwerssluis	36
5.1.3	Modelresultaten	36
5.1.4	Conclusie	43
5.2	Stormopzet	43
5.2.1	Methodiek	43
5.2.2	Gevoeligheidsonderzoek	44
5.2.2.1	Windstations	44
5.2.2.2	Windcoëfficiënten	49
5.2.2.3	2Dh versus 3D	53
5.2.2.4	Overige instellingen	54
5.2.3	Vergelijking met het WAQUA- en SOBEK3-model van de Grevelingen	56
5.2.4	Conclusie	58
6	Validatie saliniteit en temperatuur	59
6.1	Validatiemethodiek	59
6.2	Modelresultaten	59
6.2.1	Jaarsom 2000	59
6.2.2	Jaarsom 2017	65
6.3	Conclusie	71
7	Modeltoepassing	73
7.1	Toetsing voor gebruikstoepassingen	73
7.1.1	Mappenstructuur	73
7.1.2	Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta	73
7.2	Toepassing binnen BOI	74
7.2.1	Inleiding	74
7.2.2	Methodiek	74
7.2.3	Rekentijden	75
7.2.4	Tijdstaplimitaties	77
7.2.5	Verschillen in waterstanden	78
7.2.6	Conclusie	81
7.3	Rekentijden	82
8	Waterkwaliteitsmodellering	83
8.1	Introductie	83
8.1.1	Zuurstofhuishouding in het Grevelingenmeer	83
8.1.2	Transitie van Delft3D 4 naar D-HYDRO	83
8.1.3	Voorgaande studies	84
8.2	Waterkwaliteitsmodel Grevelingenmeer	84
8.2.1	Beschrijving waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen	84
8.2.2	Verschillen tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van de Grevelingen	85
8.2.3	Rekentijd	85
8.3	Verificatie waterkwaliteit	85
8.3.1	Inleiding	85
8.3.2	Resultaten voor het jaar 2000	87
8.3.2.1	Opgeloste-zuurstofconcentratie	87
8.3.2.2	Chlorofylconcentratie	93

8.3.2.3	Nutriënten: stikstofconcentraties	95
8.3.2.4	Nutriënten: fosfaatconcentraties	99
8.3.2.5	Nutriënten: siliciumconcentraties	102
8.3.3	Resultaten voor het jaar 2008	104
8.3.3.1	Opgeloste-zuurstofconcentratie	104
8.3.3.2	Chlorofylconcentratie	108
8.3.3.3	Nutriënten: stikstofconcentratie	111
8.3.3.4	Nutriënten: fosfaatconcentratie	115
8.3.3.5	Nutriënten: siliciumconcentratie	118
8.3.4	Conclusie	119
8.3.4.1	Model-model vergelijking	119
8.3.4.2	Model-meting vergelijking	120
8.4	Herberekening scenario's uit project "Getij Grevelingen"	120
8.4.1	Inleiding	120
8.4.2	Vergelijking impact van getij-scenario	121
8.4.3	Indicator zuurstofarm areaal	129
8.4.4	Online- vs. offline-koppeling	132
8.4.5	Conclusie	139
9	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	140
9.1	Conclusies	140
9.1.1	Hydrodynamisch model	140
9.1.2	Waterkwaliteitsmodel	141
9.2	Aanbevelingen	142
9.2.1	Kunstwerken	142
9.2.2	HARMONIE gebruiken voor modelleren stormopzet	142
9.2.3	Z-sigma-lagen	142
9.2.4	Inspeelperiode	143
10	Referenties/Literatuur	144
A	Prioritering gebiedsschematisaties RWS	146
B	Bijlage bij hoofdstuk 4 'Modelopzet'	147
B.1	Input voor generieke specificaties voor D-HYDRO meren-modelschematisaties	147
C	Bijlage bij hoofdstuk 5 'Kalibratie saliniteit, temperatuur en stormopzet'	151
C.1	Statistische kengetallen	151
C.2	Modelresultaten – z,t-diagram – 2008	152
C.2.1	Saliniteit	152
C.2.2	Temperatuur	153
C.3	Modelresultaten – tijdseries – 2008	154
C.3.1	Saliniteit	154
C.3.2	Temperatuur	157
C.4	Modelresultaten – horizontale dwarsdoorsneden – 2008	160
C.4.1	Saliniteit	160
C.4.2	Temperatuur	162
C.5	Modelresultaten – verticale dwarsdoorsneden – 2008	164
C.6	Beschrijving van gebruikte stormperiodes	166
C.6.1	Stormachtige periode – oktober 2002	166
C.6.2	Stormachtige periode – december 2013	167
C.7	Overige modelresultaten gevoeligheidsonderzoek windforcering	168
C.7.1	Bodemruwheid (Manning)	168
C.7.2	Relatiewind	169

C.7.3	Kmx	170
C.7.4	Rhomean	171
C.7.5	Rhoair	172
C.7.6	Windhuorzwsbased	173
C.7.7	Windpartialdry	174
D	Bijlage bij hoofdstuk 6 'Validatie'	175
D.1	Modelresultaten – z,t-diagram – 2000	175
D.1.1	Saliniteit	175
D.1.2	Temperatuur	176
D.2	Modelresultaten – tijdseries – 2000	177
D.2.1	Saliniteit	177
D.2.2	Temperatuur	180
D.3	Modelresultaten – horizontale dwarsdoorsneden – 2000	183
D.3.1	Saliniteit	183
D.3.2	Temperatuur	185
D.4	Modelresultaten – verticale dwarsdoorsneden – 2000	187
D.5	Modelresultaten – z,t-diagram – 2017	189
D.5.1	Saliniteit	189
D.5.2	Temperatuur	190
D.6	Modelresultaten – tijdseries – 2017	191
D.6.1	Saliniteit	191
D.6.2	Temperatuur	194
D.7	Modelresultaten – horizontale dwarsdoorsneden – 2017	197
D.7.1	Saliniteit	197
D.7.2	Temperatuur	199
D.8	Modelresultaten – verticale dwarsdoorsneden – 2017	201
E	Bijlage bij hoofdstuk 7 'Modeltoepassing'	203
E.1	Operationeel draaien van het Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta	203
E.2	Hoekpuntenanalyse D-HYDRO Grevelingen t.b.v. BOI	208
F	Bijlage bij hoofdstuk 8 'Waterkwaliteitsmodellering'	215

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het kader van de zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen is een D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer ontwikkeld. Het model heeft conform de naamconventies van Rijkswaterstaat de aanduiding *dflowfm3d-grevelingen-j19_6-w4* gekregen. Van dit driedimensionale model is ook een diepte-gemiddelde variant afgeleid: *dflowfm2d-grevelingen-j19_6-w4*. Daarnaast is gelijktijdig ook gewerkt aan een nieuw waterkwaliteitsmodel dat online-gekoppeld is met het hydrodynamische 3D-model: *dflowfm3d_dwaq-grevelingen-j19_6-w4*.

Dit rapport geeft een overzicht van de verschillende stappen die gezet zijn bij het tot stand komen van de twee bovenstaande schematisaties: de modelopzet, de kalibratie en validatie van zowel het hydrodynamische- als waterkwaliteitsmodel. Deze modelontwikkeling is gestart als deelproject van het project *KPP Hydraulica Schematisaties Zout 2019* (uitgevoerd onder Deltares projectnummer 11203715-006) en *KPP2019 BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties 2019* (projectnummer 11203712). Vervolgens is het model doorontwikkeld binnen *KPP Hydraulica Schematisaties Zout 2020* (uitgevoerd onder Deltares projectnummer 11205259-006). Aanvullende werkzaamheden aan het waterkwaliteitsmodel zijn uitgevoerd binnen *KPP2021 BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties* (Deltares projectnummer 11206811-003). Het startpunt voor de voorliggende rapportage is het rapport uit 2019 (Groenenboom & Kleissen, 2019), deze is aangevuld en geüpdatet op basis van de werkzaamheden die zijn uitgevoerd in 2020 en 2021.

Er zijn eerder modellen opgezet voor dit interessegebied. Zo bestaat er een dieptegemiddeld vijfde-generatie WAQUA-model (Kuijper et al., 2014; Minns & Gaytan Aguilar, 2015) en SOBEK3-model (Groenenboom & Verploegh, 2016) dat gericht is op het modelleren van waterstanden. Daarnaast bestaat er een 3D Delft3D 4-model van het Grevelingenmeer (Zijl & Nolte, 2006) voor het berekenen van saliniteit en temperatuur. Dit model is ook gebruikt in combinatie met het waterkwaliteitsmodel voor de Grevelingen (Spiteri & Nolte, 2010).

1.2 Doel

Het doel van deze studie is het ontwikkelen van een D-HYDRO zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel voor het Grevelingenmeer. Om aan de beoogde toepassingen te kunnen voldoen, is een 3D-model opgezet worden dat getoetst is op het correct berekenen van saliniteit, temperatuur en stormopzet. Ook is een waterkwaliteitsmodel ontwikkeld dat, online-gekoppeld met het hydrodynamische D-HYDRO-model, ingezet kan worden voor waterkwaliteitsvraagstukken.

De beoogde toepassingen, verwachte situaties, benodigde functionaliteiten en acceptatie van het model zijn door Rijkswaterstaat opgesteld en opgenomen in bijlage A. De beoogde toepassingen van het model zijn:

- systeemwerking na realisatie doorlaatmiddel Brouwersdam t.b.v. peilbeheer en gezonde waterkwaliteit
- verkenning mogelijkheid om het meerpeil te corrigeren voor scheefstand (stormopzet)
- BOI

1.3 Methodiek

Binnen het onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO (Tiessen et al., 2018) is een bestaand Delft3D 4-model van de Grevelingen geconverteerd naar D-HYDRO.

Aangezien het maken van een nieuwe modelschematisatie in de D-HYDRO software nieuwe mogelijkheden biedt (zowel op het gebied van softwaretoepassingen, als het bekijken van huidige wensen/eisen van toekomstige gebruikers), is opnieuw naar de beoogde toepassingen en concrete wensen/eisen (beschreven in Minns et al. (2019)) aan de nieuwe modelschematisatie gekeken. Deze zijn vertaald naar een nieuwe zesde-generatie D-HYDRO-modelschematisatie. Hierbij is voor Grevelingen vooraf kenbaar gemaakt door RWS dat dit model inzetbaar moet zijn voor zowel 2D- als 3D-toepassingen.

In verschillende fasen van de modelontwikkeling wordt aangesloten bij de kennis en ervaringen die zijn opgedaan in de voorgaande studies door WL-Delft Hydraulics/Deltares:

- Modelopzet 3D-model (Delft3D-FLOW) en gevoeligheidsonderzoek met jaarsom 2000 (Zijl & Nolte, 2006);
- Validatie van 3D-model met jaarsom 2008 (Spiteri & Nolte, 2008);
- Modelontwikkeling SOBEK3-Grevelingen (Groenenboom en Verploegh, 2016);
- Verificatie van 2D-WAQUA-model voor stormopzet- en afwaaiing (Minns & Aguilar, 2015 en Kuijper et al., 2014)).

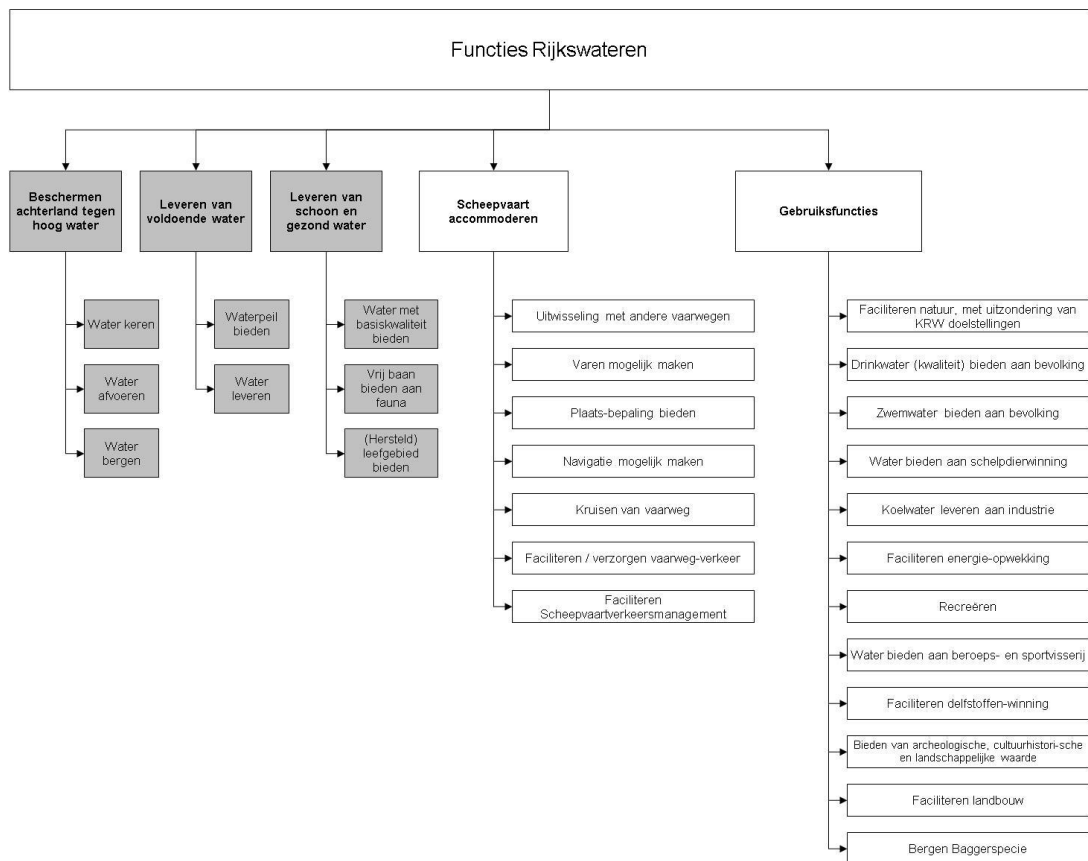
Dit wordt o.a. gedaan om kostenefficiënt te werken aangezien veel meetgegevens en invoergegevens voor deze simulatieperiodes al beschikbaar zijn bij Deltares. Daarnaast is het mogelijk een vergelijking te maken tussen de resultaten van het nieuw op te zetten D-HYDRO-model en de resultaten van de bestaande Delft3D 4-, WAQUA- en SOBEK3-modellen. Dit geldt zowel voor hydrodynamische als waterkwaliteitsparameters. De algemene eis aan de zesde-generatie modellen is dat deze minimaal gelijk en bij voorkeur beter presteren dan de vijfde-generatie modellen (Minns et al., 2019).

1.4 Toepassingen van het model

De modellen van de Grevelingen worden gebruikt in verschillende toepassingen die gerelateerd zijn aan de functies van het watersysteem (zie Figuur 1-1) en dienen geschikt te zijn om vragen die hierop betrekking hebben te helpen beantwoorden. Elke toepassing stelt zijn eigen eisen aan de te gebruiken modellen. Deze eisen, wensen en verwachtingen zijn geïnventariseerd in Spruyt et al. (2016) volgens een indeling langs de lijn van de RWS-missie:

- Veilig;
- Schoon;
- Voldoende;
- Vlot.

Op deze manier staan de toepassingen voor RWS centraal en worden de modellen hiervoor gebouwd, in plaats van dat er eerst een model wordt gemaakt en dat iedere toepassing hiervan gebruik moet maken (of het geschikt is of niet).



Figuur 1-1 Functieboom Rijkswateren (Bron: Basisspecificatie Rijkswateren versie 5.2)

Toepassing van hydraulische modellen van de Grevelingen vindt nu plaats in de RWS-processen Veilig en Schoon:

- Aanleg en onderhoud
 - Doorlaatmiddel Brouwersdam en Flakkeese Spuisluis
 - Verkenningen en planstudies
 - Natuurontwikkeling
 - Aanslibbing
- Informatievoorziening
 - Aanleverend Hydraulische Belastingen
- Kennis en netwerkqualiteit
 - bouw, ontwikkeling, actualisatie, software
 - beleidsadvies (bv. WBI/BOI, Deltaprogramma, Natuurontwikkeling en Rijksvisie)
 - Herintroductie getij & effecten waterkwaliteit en ecologie
 - netwerkmonitoring (Advies Monitoring Hoogwaterveiligheid)

1.5 Afbakening

1.5.1 Gekoppelde simulaties met D-HYDRO

Er wordt voorzien dat het D-HYDRO Grevelingenmodel na de modelontwikkeling en acceptatie van het model mogelijk gebruikt gaat worden voor het gekoppeld draaien van simulaties ten behoeve van het ontwerp en de bouw van het toekomstige doorlaatmiddel in de Brouwersdam ten behoeve van het herstel van gedempt getij. Zo zou het domein van de Grevelingen via een zogenoemde *general structure* aan het zeedeel van het D-HYDRO-model van de Rijn-Maasmonding (2020: nog in ontwikkeling) gekoppeld kunnen worden.

In de huidige modelontwikkeling ligt de focus op het *stand-alone* model waarbij de kunstwerken via lozings-/onttrekkingspunten en op basis van gemeten/synthetische tijdreeksen worden gemodelleerd. Aangezien de 3D-functionaliteit in de D-HYDRO Suite software op dit moment nog volop in ontwikkeling is en daarmee niet alle functionaliteiten beschikbaar zijn, is het in dit project niet mogelijk om simulaties te maken met het Grevelingenmodel gekoppeld aan het zeedeel van het Rijn-Maasmondingsmodel en/of het Oosterscheldemodel.

1.5.2 Waterkwaliteitsmodellering: beperken tot bestaande modelgegevens en geen kalibratie

De Grevelingen is het eerste watersysteem waarvoor de bestaande Delft3D 4-modelschematisatie voor waterkwaliteitsmodellering wordt overgezet naar D-HYDRO. De doelstelling is afgebakend tot een vergelijking tussen bestaande en nieuwe modelresultaten om eventuele verschillen te identificeren die nader onderzoek en/of ontwikkeling van software of toepassing vragen. Uitbreiding van het model en herkalibratie zijn in deze stap uitgesloten.

Met behulp van een waterkwaliteitssom voor een recente periode (bijv. jaarsom 2017) kan vastgesteld worden of mogelijke veranderingen door de ingebruikname van de Flakkeese spuisluis ook door het waterkwaliteitsmodel (D-Water Quality) gereproduceerd kunnen worden.

Echter, aangezien niet eerder met deze periode gerekend is en dit een grotere inspanning vergt, is dit buiten de scope van dit project gehouden. Momenteel zijn er signalen dat er behoefte is aan het modelleren van anorganisch slib met het waterkwaliteitsmodel, wat een herkalibratie zou vragen. Dat is in deze studie niet meegenomen. Met de huidige aanpak kan het bestaande waterkwaliteitsmodel geüpdatet worden en onderzocht worden hoe dit nieuwe model presteert. Op basis van deze resultaten kunnen eventuele vervolgstappen in een mogelijke vervolgstudie opgepakt worden.

1.6 Gebruikte programmatuur en hardware:

Tijdens de modelontwikkeling is gebruik gemaakt van Baseline versie 6.1.1 in combinatie met Baselineboom zwd_6-j19_6-w4 en D-HYDRO Suite 2020.05. De simulaties zijn gedraaid op het h6 Linux-cluster van Deltares met de bijbehorende softwareversie uit juli 2020.

1.7 Organisatie en bijdragen

Tabel 1.1 geeft een overzicht van het projectteam.

Tabel 1.1 Overzicht projectteam

Naam	functie
Julien Groenenboom	Deelprojectleider Hydraulica Schematisaties Grevelingen
David Kerkhoven	Projectleider KPP Hydraulica schematisaties zout
Luuk van der Heijden	Projectmedewerker waterkwaliteit
Arjen Markus	Projectmedewerker waterkwaliteit
Jos van Gils	Adviseur waterkwaliteit
Arno Nolte	Review & QA waterkwaliteit / Projectleider KPP Waterkwaliteitsmodelschematisaties
Firmijn Zijl	Review & QA hydrodynamica

Verder zijn Maaike Maarse (projectleider Getij Grevelingen), Tony Minns (projectleider (3D) D-HYDRO), Erik de Goede ((3D) D-HYDRO) en Michelle Jeuken (D-HYDRO WAQ) ook deels bij dit project betrokken/op de hoogte gehouden van het project.

1.8 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de systeembeschrijving van het Grevelingenmeer toegelicht. Een overzicht van de beschikbare data wordt gegeven in hoofdstuk 3. De modelopzet van het hydrodynamische D-HYDRO-model van de Grevelingen wordt in hoofdstuk 4 beschreven. Hoofdstuk 5 beschrijft de gevoeligheidsstudie die is uitgevoerd naar verschillende modelinstellingen en modelkeuzes van het hydrodynamische model en de verificatie van de gemodelleerde stormopzet. Hoofdstuk 6 richt zich op de validatie van het model wat betreft saliniteit en temperatuur. In hoofdstuk 7 wordt het model getoetst voor gebruikstoepassingen (bijv. binnen BOI). Tot slot worden in hoofdstuk 8 de conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van deze modelontwikkeling gegeven.

1.9 Terminologie

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

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

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

2 Systeembeschrijving

2.1 Gebiedsbeschrijving

Het Grevelingenmeer, ook wel de Grevelingen genoemd, is een voormalige zeearm van de Noordzee in de Zuidwestelijke Delta. Het meer ligt tussen de eilanden Goeree-Overflakkee en Schouwen-Duiveland, op de grens van Zuid-Holland en Zeeland (zie Figuur 2-1). Aan de westkant is het meer afgesloten van de Noordzee door de Brouwersdam, aan de oostkant van de Oosterschelde en het Volkerak-Zoommeer door de Grevelingendam. Langs het Grevelingenmeer liggen zogeheten slikken: de Slikken van Flakkee en de Slikken van Bommenede. In het Grevelingenmeer ligt een aantal eilanden (voormalige zandplaten): Hompelvoet, Veermansplaat, Kabellaarsbank (dit is een schiereiland), Dwars in de weg en de Veermansplaat



Figuur 2-1 Gebiedsoverzicht (bron: Rijkswaterstaat).

De Grevelingen heeft, behalve via kunst- en regelwerken, momenteel geen direct open verbinding met andere wateren. Dit betekent dat de gemiddelde waterstand in het meer volledig bepaald wordt door de lozingen, onttrekkingen, regenval en verdamping. De lozingen en onttrekkingen bestaan uit het inlaten en spuien door de twee grote sluisen in het gebied (de Brouwerssluis en de Flakkeese Spuisluis), de uitslag van een vijftal poldergemalen en de afstroming van buitendijks gelegen gebied. De Flakkeese Spuisluis is sinds april 2017 weer operationeel nadat het is omgebouwd tot een tweezijdig doorlaatmiddel. In de huidige situatie is het Grevelingenmeer een zoutwatermeer en wordt het vooral ingezet ten behoeve van watersport, recreatie, natuur en visserij. Sinds april 2018 staat de sluis dicht in verband met de bouw van Tidal Technology Center Grevelingendam. Onduidelijk is nog wanneer de sluis weer functioneel is. Het zoutgehalte van het Grevelingenmeer wordt op peil gehouden door de Brouwerssluis.

2.2 Verbinding met andere gebieden

De belangrijkste verbindingen van de Grevelingen zitten in het oosten en westen van het Grevelingenmeer, bij respectievelijk de Brouwerssluis (verbinding met de Noordzee) en Flakkeese Spuisluis (verbinding met de Oosterschelde).

3 Beschikbare data

Bij de modelopzet, kalibratie en validatie van het D-HYDRO Grevelingenmodel is gebruik gemaakt van gegevens van verschillende bronnen.

3.1 Geometrie in Baseline

Door middel van een zogenoemde Baselineprojectie zijn geometrische gegevens uit Baselineboom zwd_6-j19_6-w4 geprojecteerd op het rekenrooster. De resulterende modelbestanden zijn gebruikt als invoer voor het D-HYDRO-model, zie paragraaf 4.2.

3.2 Randvoorwaarden en meetgegevens ten behoeve van kalibratie/validatie

De randvoorwaarden en meetgegevens voor een aantal simulatieperiodes is reeds beschikbaar uit voorgaande modelstudies. Concreet gaat het om jaarsom 2000, jaarsom 2008, oktober 2002 (stormperiode) en december 2013 (stormperiode). Om kostenefficiënt te werk te gaan, zijn dezelfde simulatieperiodes gebruikt bij de modelopzet, kalibratie en validatie van het D-HYDRO-model.

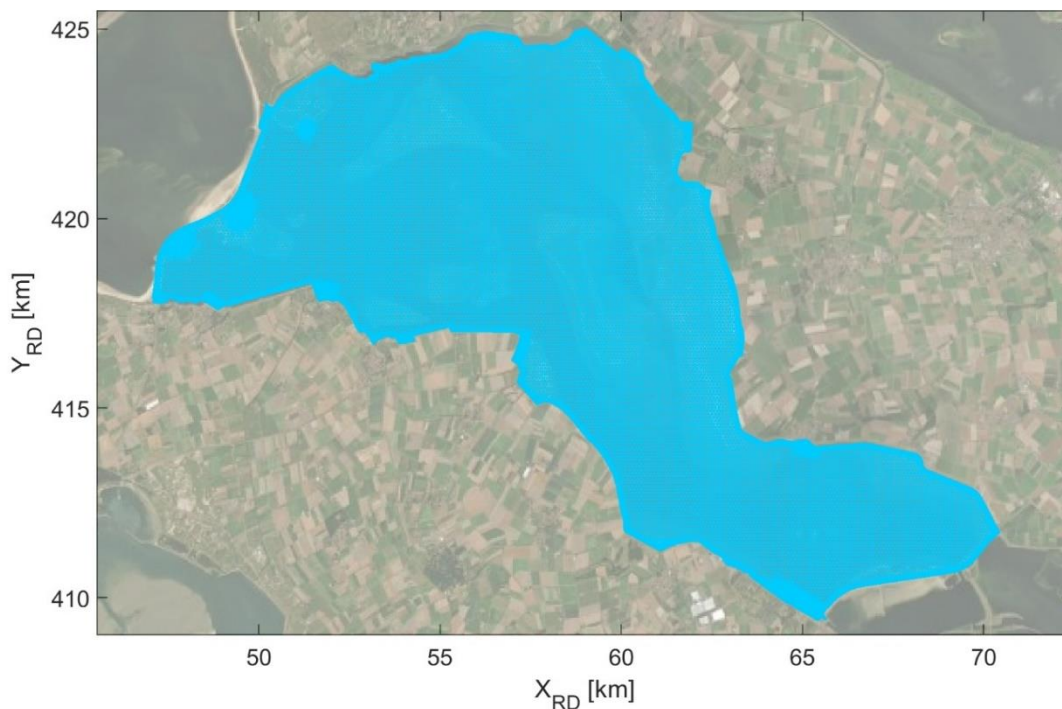
Om te toetsen of het model ook voor een meer recente periode geschikt is, worden ook de randvoorwaarden en meetgegevens voor jaarsom 2017 (aangeleverd door Rijkswaterstaat) gebruikt in de validatie van het hydrodynamische model.

4 Modelopzet

4.1 Rekenrooster

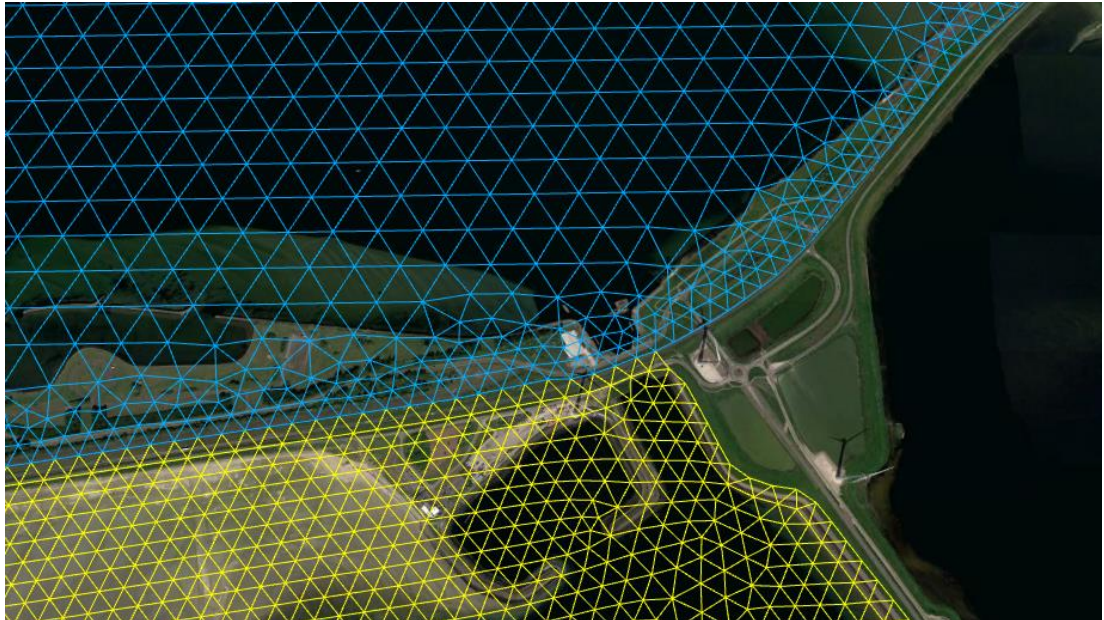
4.1.1 Horizontaal grid

Het modeldomein (zie Figuur 4-1) omvat het Grevelingenmeer en wordt omsloten door de omliggende dijken (geometrie afkomstig uit Baseline) van Goeree-Overflakkee en Schouwen-Duiveland (in resp. het noorden en zuiden), de Grevelingendam (in het oosten) en de Brouwersdam (in het westen).



Figuur 4-1 Modeldomein en het rekenrooster van het D-HYDRO Grevelingenmodel

Het binnengebied van het rekenrooster is gevuld met volledig uniforme driehoekige rekencellen (zie Figuur 4-2) met een resolutie van 100 m. De rand van het modeldomein bestaat uit driehoekige cellen met een resolutie van 50 m waarbij de modelrand aansluit op de dijken/dammen en op andere D-HYDRO netwerken (zeedeel Rijn-Maasmondingsmodel en de Oosterschelde). De ruimte tussen het binnengebied en de boundary-fitted modelrand is automatisch opgevuld met driehoekige cellen en heeft daardoor een variabele resolutie.

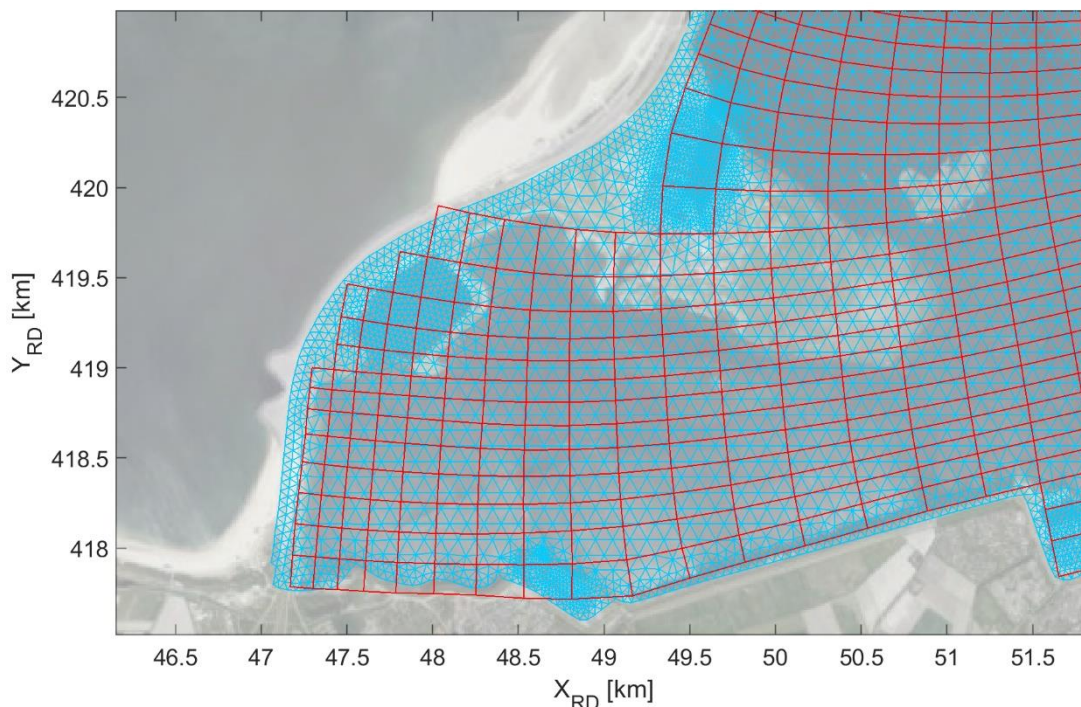


Figuur 4-2 Netwerk D-HYDRO Grevelingen (blauw) en D-HYDRO Oosterschelde (geel)

De redenen voor deze aanpak van de roostergeneratie zijn:

- Snelle, efficiënte manier van roostergeneratie
- Vergelijkbare aanpak als de D-HYDRO-modellen voor Oosterschelde, Veerse Meer, Markermeer en IJsselmeer. De twee laatstgenoemde hebben geen volledig uniforme driehoeken in het binnengebied en de roosteropzet hiervan is daardoor bewerklijker.
- Met uitzondering van de overgangsgebieden tussen het uniforme roosterdeel en de modelrand, zal het rooster een perfecte orthogonaliteit en gladheid hebben. De aspect ratio wordt hier gelijk aan 1. In de overgangsgebieden zal deze hiervan afwijken.
- Door gebruik te maken van driehoekige cellen op de modelrand, kan het model eenvoudig worden aangesloten op het netwerk van andere D-HYDRO-modellen (Oosterschelde, het zeedeel van Rijn-Maasmonding en het nog te ontwikkelen Volkerak-Zoommeermodel).
- Doordat het rekenrooster volledig driehoekig is, is dit geen beperking voor een mogelijke toekomstige toepassing voor golf/SWAN-berekeningen (waarvoor op dit moment geldt dat het rooster volledig driehoekig dan wel rechthoekig dient te zijn, waarbij opgemerkt dient te worden dat alleen de rechthoekige variant op dit moment, een gevalideerde status voor gebruik binnen RWS heeft).

Figuur 4-3 toont hoe de horizontale resolutie van het D-HYDRO Grevelingenmodel substantieel is toegenomen ten opzichte van het bestaande Delft3D 4-model van het Grevelingenmeer.



Figuur 4-3 Detail van netwerk van het nieuwe D-HYDRO-model (blauw) en het bestaande Delft3D 4 rekenrooster (rood) van de Grevelingen ter hoogte van de Brouwerssluis

Om aan de wens van Rijkswaterstaat te voldoen om de waterstand in (kleine) havenbekkens te kunnen modeleren, is het rooster nabij havens verfijnd om zo de havenbekkens en het Grevelingenmeer te verbinden en doorstroming hier mogelijk te maken (zie bijvoorbeeld de roosterverfijningen in Figuur 4-3). Er is hiervoor geen nauwkeurigheidseis gedefinieerd.

Doordat de software de rekentijdstep automatisch limiteert op basis van stabiliteitscriteria, zoals bijvoorbeeld het Courant-criterium dat nodig is voor de tijdsintegratie van de advection-term, varieert de rekentijdstep tijdens de simulatie. Er is bij de roosterontwikkeling gepoogd rekencellen die zorgen voor een verkleining van de gemiddelde tijdstep (en daarmee een langere rekentijd) zo veel mogelijk te vermijden. Deze tijdstepsbeperkingen zijn vooral terug te vinden op locaties waar relatief kleine rekencellen samenvallen met hoge stroomsnelheden.

Het rekenrooster bestaat uit 44.804 bodempunten en 23.109 waterstands-/rekenpunten.

4.1.2 Verticaal grid

In verticale richting wordt het rekenrooster beschreven door z-lagen. Deze vaste lagen hebben roosterlijnen die strikt horizontaal zijn. Doordat in het Grevelingenmeer stratificatie kan bestaan door dichtheidsverschillen ten gevolge van saliniteit- en temperatuurgradiënten, en er relatief weinig verticale menging is door afwezigheid van getij, is ervoor gekozen om z-lagen te gebruiken aangezien deze (min of meer) parallel lopen met de pycnoclines in het model (lijnen van gelijke dichtheid). Ten opzichte van de meer gangbare σ -lagen zorgt dit voor minder artificiële menging bij stratificatie in combinatie met grote verschillen in de bodemligging.

Omdat uit eerder onderzoek (Spiteri & Nolte, 2010) is gebleken dat een verdubbeling van het aantal verticale lagen van 14 naar 28 voor betere resultaten zorgde, is dezelfde minimale verticale resolutie (1,25 m) als in het Delft3D 4-model aangehouden. In dit bestaande model liep de laagdikte vanaf -21,25 m NAP langzaam op tot 3,2 m bij het diepste bodempunt. In het D-HYDRO-model is een constante laagdikte van 1,25 m toegepast en daarmee heeft het model nabij de bodem een iets hogere verticale resolutie dan zijn voorganger. Het aantal lagen wordt hiermee 36.

De bodemlaag komt, op basis van de maximale bodemligging, op -46,5 m NAP te liggen. De onderkant van de bovenste rekenlaag ligt op -1,5 m NAP. Deze waarde is zo gekozen dat bij met een zomerpeil van circa -0,25 m NAP, de toplaag ook een dikte heeft van zo'n 1,25 m. De bovenkant van de toplaag bevindt zich op de hoogte van de lokale waterstand waardoor de laagdikte varieert. Tabel 4.1 toont de verdeling van de z-lagen over de verticaal. In elke rekencel wijkt de onderste actieve laagdikte af van onderstaande z-laagverdeling (dit zou anders een overschatting van het volume als gevolg hebben) en wordt de modelbodemligging gebruikt.

Tabel 4.1 Verdeling verticale lagen

Laagnummer	Bovenkant laag [m NAP]	Onderkant laag [m NAP]	Laagdikte
36	<waterstand>	-1,50	0,00 – ?*
35	-1,50	-2,75	1,25
34	-2,75	-4,00	1,25
...
3	-42,75	-44,00	1,25
2	-44,00	-45,25	1,25
1	-45,25	-46,50	1,25

* Door de veranderde waterstand varieert de laagdikte in de bovenste laag.

4.2 Projectie vanuit Baseline

Voor de opzet van het model wordt gebruik gemaakt van de geometrische gebiedsbeschrijving zoals opgenomen in Baseline. De projectie van de Baseline-gegevens op het rekenrooster is gedaan met Baseline versie 6.1.1 en Baselineboom zwd_6-j19_6-w4¹. Vanuit Baseline worden de bestanden aangemaakt zoals weergegeven in Tabel 4.2

Tabel 4.2 Overzicht van de verschillende soorten bestanden uit een Baselineproject (inclusief ter vergelijking de WAQUA- en Baseline 5-bestandsnamen)

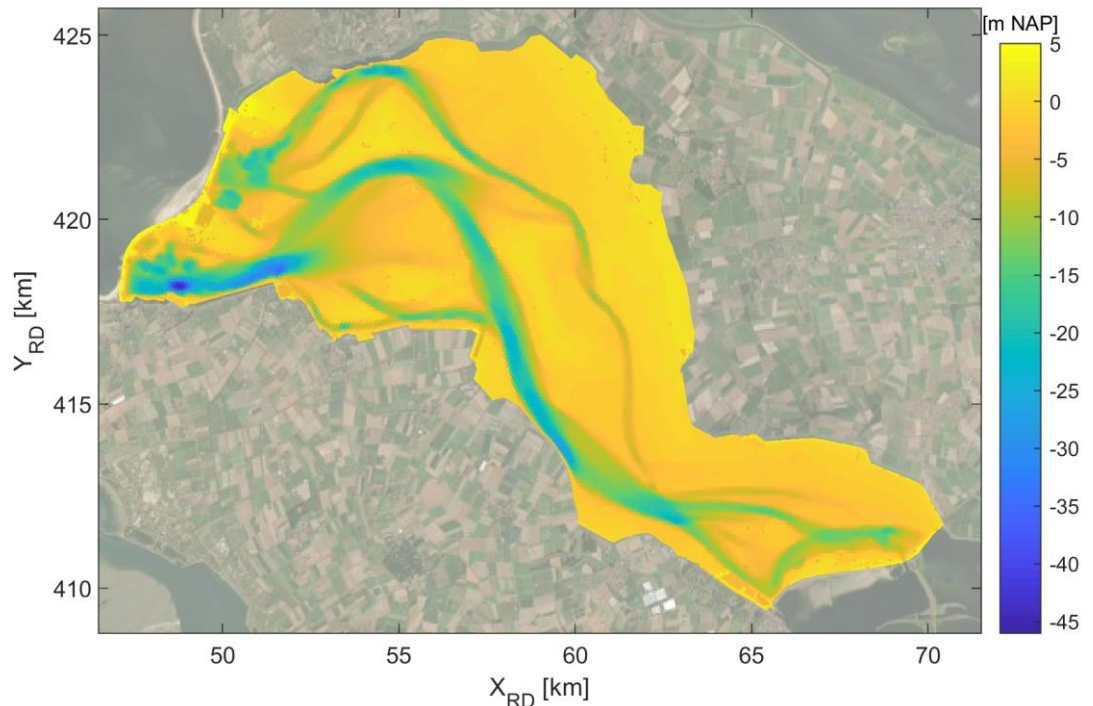
Naamgeving D-Flow FM	Extensie	Naamgeving WAQUA	Naamgeving Baseline 5	Beschrijving
netwerk	_net.nc	grid & bathymetry	rooster & bodem	De bodemhoogte wordt toegevoegd aan het rooster op de hoekpunten
landboundaries	.ldb		secties	Enkel voor visualisatie
fixed weirs	.pliz	weirs	overlaten	Subgrid afhandeling voor lokale bodemveranderingen, door een drempelwaarde op de snelheidspunten
trachytopes	.arl	roughcombination	ruwheid	Voor iedere snelheidslink is aangegeven uit welke trachytopen de ruwheid bestaat en in welke verhouding.
dry_areas	.pol	drypoints	schotjes	Definieert dat een roostercel niet actief is
thin dams	.pli	drypoints	schotjes	Definieert dat een snelheidspunt niet actief is
laterals	.pli	discharges	lateraal	Een lokale in- of uitstroming op een roostercel die niet aan de rand van het rooster zit.
weirs_gates	.pli	barriers	kunstwerken	In tijd-variabele kunstwerken, afgehandeld als overlaat
observation points	.xyn	checkpoints	uitvoerlocaties	Locaties (waterstandspunten) waarop de waterstand met een hogere frequentie wordt weggeschreven

¹De nieuwe Baselineboom *Baseline-NL Land* (oplevering verwacht in september 2020) was niet op tijd beschikbaar om te gebruiken binnen de modelontwikkeling van D-HYDRO Grevelingen. De verwachting is dat het gebruik hiervan weinig tot geen effecten op de modelresultaten zou hebben. Wel wordt verwacht dat het gebruik van de nieuwe Baselineboom tot aangepaste naamgeving van bestanden en objecten zou leiden.

4.2.1 Bathymetrie

De bodemligging van het model, zie Figuur 4-4, is gebaseerd op de Baseline-schematisatie van de Zuidwestelijke Delta (Baselineboom zwd_6-j19_6-w4). De onderliggende gegevens bestaan uit een combinatie van lodingen uit de periode 2014 – 2018 en peilstokmetingen voor de ondiepe gebieden langs het Grevelingenmeer. Voor details wordt verwezen naar van Doornik (2019). Omdat de verwachting is dat deze recente versie betrouwbaardere bodemgegevens bevat dan Baselinebomen van eerdere jaren en er geen grote morfologische verandering in het interessegebied geweest zijn, wordt dezelfde via Baseline verkregen bathymetrie gebruikt in de verschillende (jaar)sommen.

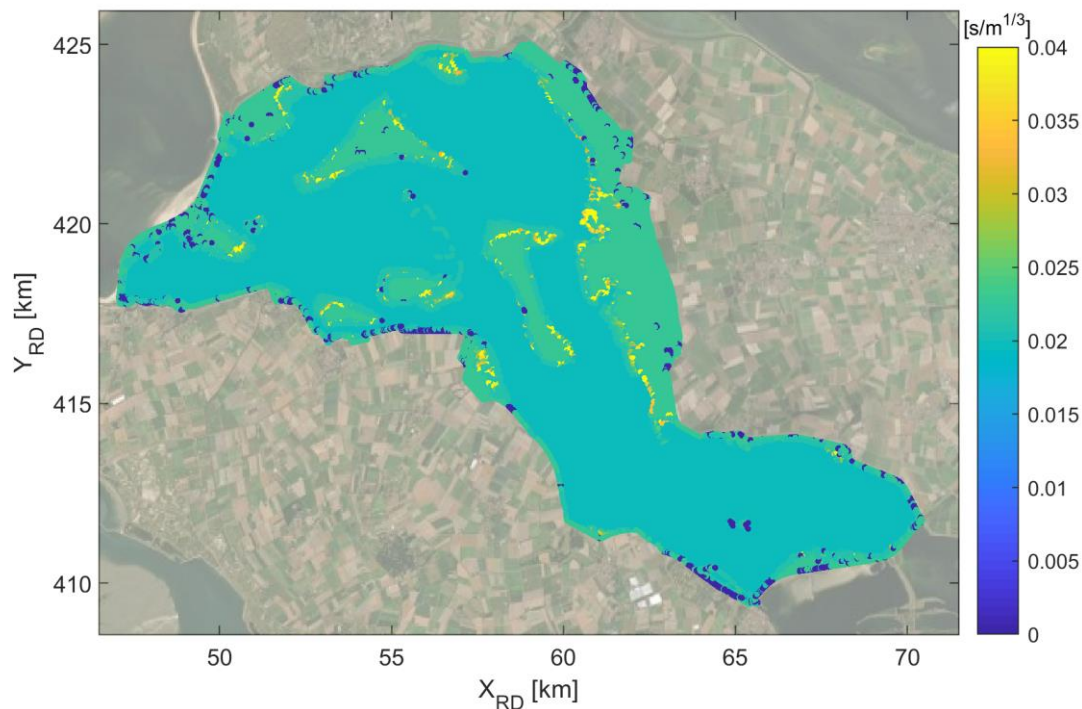
Omdat het Grevelingenmeer een voormalige zeearm van de Noordzee is, bestaat het systeem uit platen en geulen. De gemiddelde diepte in de geulen is zo'n 15 tot 20 m, het diepste punt in modelbodem bevindt zich op -45,3 m NAP (dit rekenpunt bevindt zich in de onderste laag). De modelbathymetrie is beschreven op de zogenoemde netnodes/bodempunten.



Figuur 4-4 Modelbathymetrie (in m NAP)

4.2.2 Bodemruwheid

Figuur 4-5 toont de Manning-coëfficiënt die in het model gebruikt wordt. Deze waarden volgen uit de Baseline-projectie. De standaardwaarde van de bodemruwheid (Baseline-term: zomerbed) voor de Zeeuwse Delta heeft een Manning-coëfficiënt van $0,022 \text{ s/m}^{1/3}$. Om de beoogde waarde (overeenkomstig met het Delft3D 4-model van het Grevelingenmeer) van $0,020 \text{ s/m}^{1/3}$ voor de bodemruwheid te gebruiken in het model, wordt een kalibratie-polygoon toegepast met een factor $0,020/0,022$.

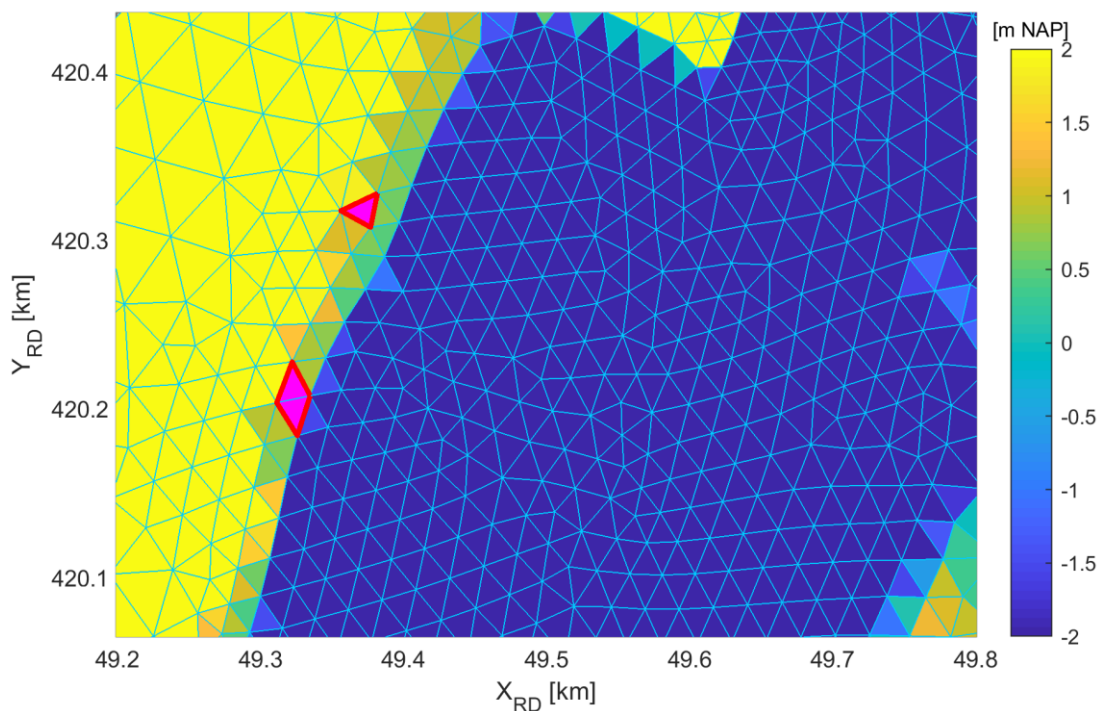


Figuur 4-5 Bodemruwheid (Manning-coëfficiënt)

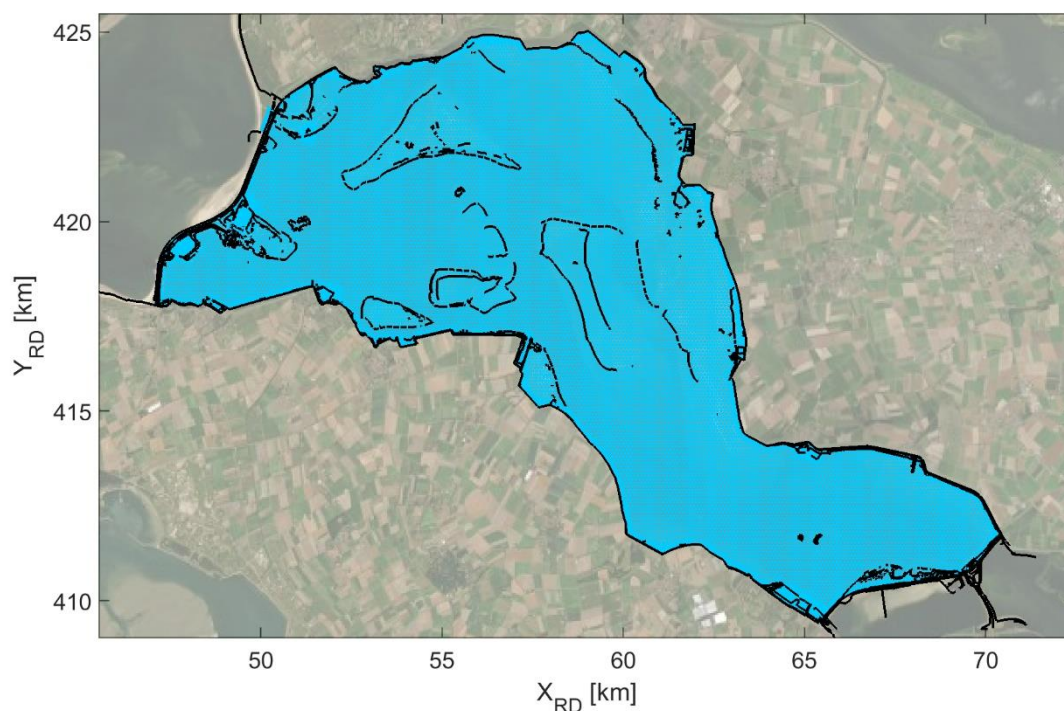
4.2.3 Dunne dammen, droge gebieden en overlatten

Uit de Baseline-projectie komt een zeer beperkt aantal dunne dammen en droge gebieden (polygonen). Om te tonen om wat voor locaties dit gaat is twee derde hiervan weergegeven in Figuur 4-6, deze afbeelding zoomt in op Marina Port Zélande (ter hoogte van het midden van de Brouwersdam). Er kan opgemerkt worden dat de dunne dammen (rode lijnen) rekencellen omlijnen waardoor deze volledig inactief worden. Precies hetzelfde gebeurt door de polygonen die de droge gebieden aangeven. Aangezien ter plaatse van deze dunne dammen en droge gebieden de bodemligging ruim boven de gemiddelde waterstand ligt, heeft de opname van de dunne dammen en droge gebieden in het model weinig tot geen effect. Uiteraard is deze modelinvoer, afkomstig uit de Baseline-project, voor de volledigheid wel opgenomen in de modelschematisatie.

De door Baseline geproduceerde overlatten zijn weergegeven in Figuur 4-7. Elke overlaat bestaat uit een lijnsegment met naast x,y-coördinaten ook een z-coördinaat. Alleen bij een waterstand boven de kruinhoogte kan stroming over dit lijnsegment plaatsvinden.



Figuur 4-6 Dunne dammen (rood) en droge gebieden (magenta). Ter illustratie is ingezoomd op Marina Port Zélande (ter hoogte van het midden van de Brouwersdam).



Figuur 4-7 Netwerk (lichtblauw) en overlaten (zwarte lijnen)

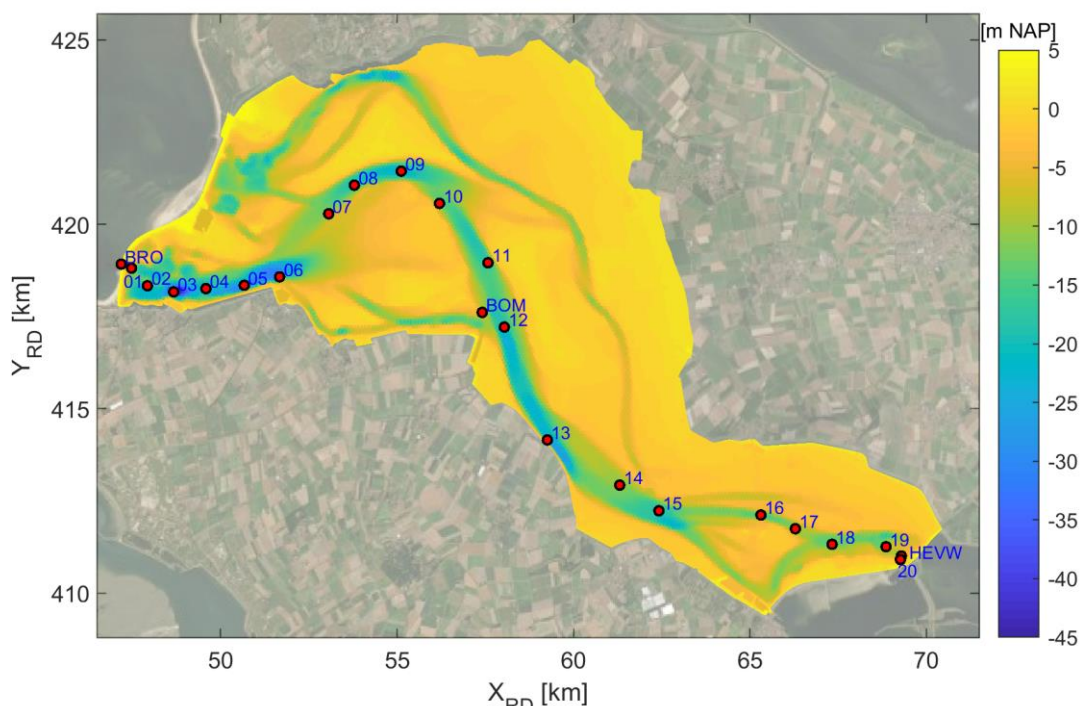
4.2.4 Observatiepunten

In het modeldomein bevinden zich drie waterstandsmeeptpunten die gebruikt zijn in de modelvalidatie. De locaties van deze stations zijn weergegeven in Tabel 4.3 en Figuur 4-8. De waterstanden van locatie Brouwerssluis binnen (BRO) en Grevelingen hevel West (HEVW) kunnen mogelijk beïnvloed worden door het spuien/inlaten van resp. de Brouwerssluis en de Flakkeese spuisluis.

Tabel 4.3 Waterstandsm Meetpunten

Station	Afkorting in Figuur 4-8	[X,Y]-coördinaat (RD, m)	Y-coördinaat (RD, m)
Brouwerssluis binnen	BRO	47288	418878
Grevelingen hevel West	HEVW	69262	410910
Bommenede	BOM	57412	417613

Om een data-model-vergelijking te kunnen maken is gebruik gemaakt van GTSO-metingen (Grevelingen Temperatuur Saliniteit en O_2 (zuurstof)). Op basis van de coördinaten van de uitgevoerde metingen zijn de locaties van de verschillende observatiepunten (GTSO-1 tot en met GTSO-20, zie Figuur 4-8) bepaald en in het model toegepast.



Figuur 4-8 Overzicht observatiepunten: waterstandsm meetpunten (BRO, BOM en HEVW) en TSO-stations (1 t/m 20). Vanwege de leesbaarheid is in dit figuur het prefix 'GTSO-' weglaten bij de 20 GTSO-stations.

4.3 Randvoorwaarden en initiële condities

4.3.1 Simulatieperioden

Het D-HYDRO-model is ontwikkeld voor zowel het modelleren van saliniteit en temperatuur (gevalideerd op basis van jaarsommen), het berekenen van stormopzet (korte simulatieperioden) als het toepassen binnen waterkwaliteitsstudies. In Tabel 4.4 is een overzicht gegeven van de verschillende jaarsommen en stormachtige perioden met de bijbehorende simulatieperioden (incl. inspeeltijd). De jaarsommen (2000, 2008 en 2017) bevatten ca. 2 maanden inspeeltijd, waarbij een volledig kalenderjaar als analyse periode is gehanteerd.

Tabel 4.4 Overzicht simulatieperioden

Omschrijving	Simulatieperiode
Jaarsom 2000 (hydrodynamica + waterkwaliteit)	28-okt-1999 – 01-jan-2001
Jaarsom 2008 (hydrodynamica + waterkwaliteit)	01-nov-2007 – 01-jan-2009
Jaarsom 2017 (hydrodynamica)	27-okt-2016 – 01-jan-2018
Oktober 2002 (hydrodynamica)	25-okt-2002 – 30-okt-2002
December 2013 (hydrodynamica)	04-dec-2013 – 07-dec-2013

4.3.2 Open randen

Het D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer bevat geen open randen.

4.3.3 Lateralen en kunstwerken

4.3.3.1 Waterbalans en de wijze van modelleren van onttrekkingen en lozingen

De waterbalans (en de bijbehorende modelrandvoorwaarden) voor jaarsom 2000 en jaarsom 2008 zijn direct overgenomen uit de voorgaande modelstudies, resp. Zijl & Nolte (2006) en Spiteri & Nolte (2010). De beschrijving van de waterbalans, debieten door de Brouwerssluis, figuren van de neerslag etc. zijn niet overgenomen in deze rapportage. Voor de details wordt verwezen naar de hierboven genoemde rapporten.

In de voorgaande modelstudies en het in 2019 ontwikkelde D-HYDRO-model van de Grevelingen worden de afstromingsdebieten, neerslag, verdamping en correcties via enkele onttrekkings- en lozingspunten gemodelleerd. In het huidige model wordt dit op een meer natuurgetrouwe manier gemodelleerd door de debieten te verspreiden over een groot deel van het modeldomein o.b.v. een polygoon. Daarnaast heeft dit als voordeel dat er geen constituenten meer uit het model onttrokken worden bij verdamping, iets wat ongewenst is voor het modelleren van bijv. zout en waterkwaliteitsparameters. De voorheen gebruikte truc om het te veel aan 'verdamp't/onttrokken zout terug te brengen in het model, is daardoor nu niet meer nodig.

De toegepaste methode is afgestemd met andere D-HYDRO-modelschematisaties van meren en wordt nader toegelicht in bijlage B.1.

In onderstaande secties wordt de modelaansturing voor jaarsom 2017 in detail gepresenteerd.

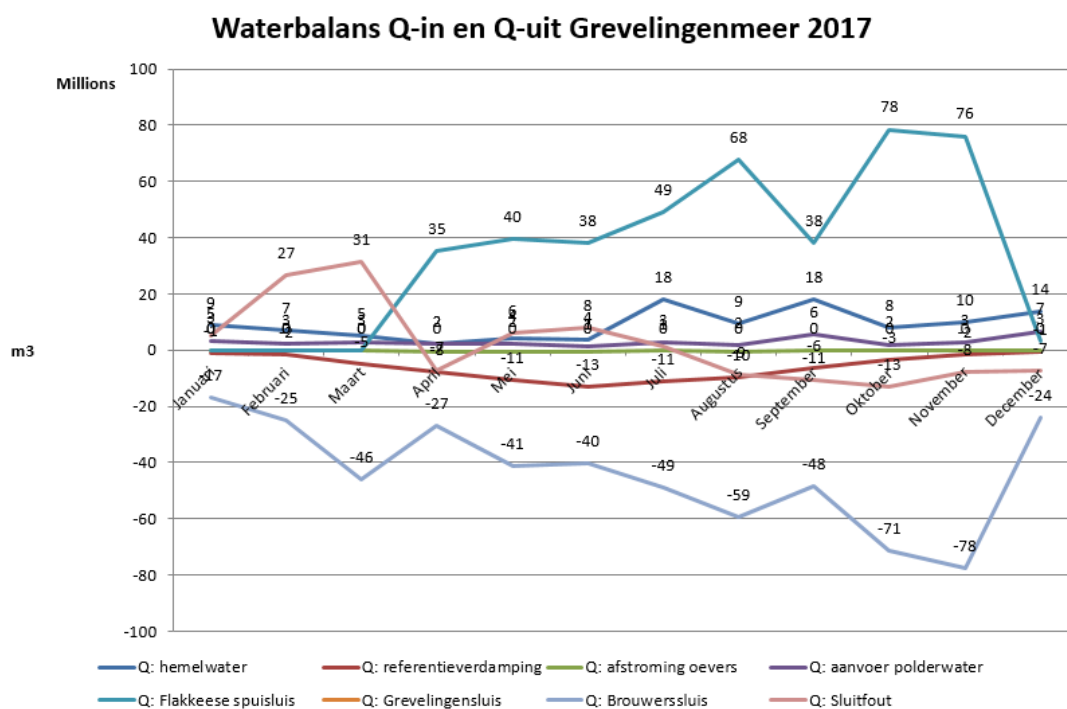
4.3.3.2 Waterbalans

Voor jaarsom 2017 is de waterbalans van het jaar 2016 en 2017 gebruikt die door Rijkswaterstaat is opgesteld (verkregen via Alexander Nefs, Rijkswaterstaat). Deze waterbalans is omgezet in tijdseries van debieten voor de twee grote kunstwerken (Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis), de poldergemalen, regenval en verdamping. Het tijdsinterval is direct overgenomen van de beschikbare gegevens. Het tijdsinterval van de tijdseries voor afstroming en polderwater is een maand. De regenval en verdamping wordt beschreven met een uurlijkse tijdserie en de debieten door de Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis zijn, afhankelijk van het jaar, gebaseerd op 10- of 60-minuutsdata.

In Tabel 4.5 en Figuur 4-9 is de waterbalans van het Grevelingenmeer voor het jaar 2017 weergegeven. De debieten door Brouwerssluis en de Flakkeese Spuisluis zijn de grootste termen in deze balans.

Tabel 4.5 Waterbalans Grevelingenmeer 2017 (debieten in m³)

Maand	Regenval	Verdamping	Afstroming	Polderwater	Flakkeese Spuisluis	Brouwerssluis	Sluifout
Jan	9.115.200	-1.198.800	2.255	3.465.006	0	-16.795.998	4.951.619
Feb	7.144.200	-1.706.400	1.617	2.503.900	0	-25.119.792	26.839.176
Maa	5.178.600	-5.097.600	465	2.834.651	0	-46.098.546	31.313.117
Apr	2.397.600	-7.851.600	0	2.228.986	35.288.604	-27.111.852	-7.083.473
Mei	3.990.600	-10.562.400	0	2.228.986	39.569.892	-41.059.524	5.945.681
Jun	3.747.600	-13.014.000	0	1.471.931	38.153.502	-40.100.502	8.027.785
Jul	18.187.200	-11.188.800	2.844	2.525.275	49.011.852	-48.846.372	1.214.936
Aug	9.487.800	-9.774.000	0	1.644.537	67.942.380	-59.397.558	-8.775.746
Sep	17.928.000	-6.199.200	4.556	5.700.074	38.071.794	-48.480.264	-10.694.662
Okt	7.921.800	-3.283.200	1.396	2.004.916	78.496.722	-71.432.058	-12.933.428
Nov	9.768.600	-1.620.000	2.496	2.928.893	76.133.976	-77.500.614	-7.727.059
Dec	13.797.000	-712.800	3.762	6.803.727	3.188.850	-23.874.456	-7.290.409



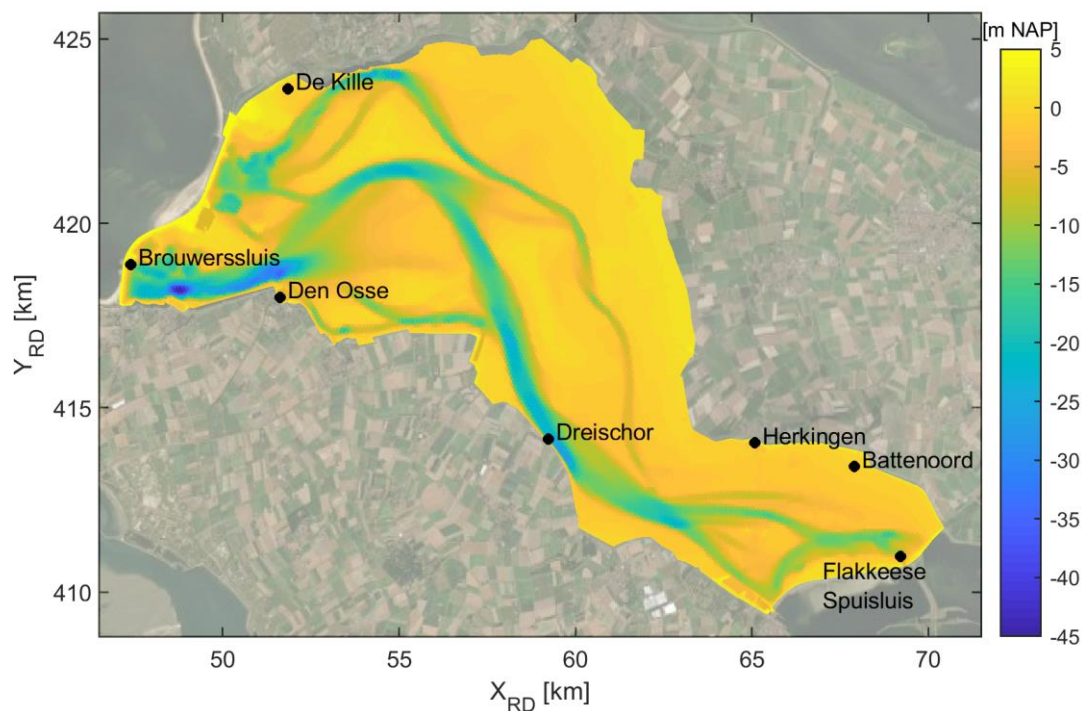
Figuur 4-9 Waterbalans Grevelingenmeer 2017 (via Alexander Nefs, Rijkswaterstaat) – sluitfout is later toegevoegd (zie sectie 4.3.3.3)

4.3.3.3 Sluitfout

Op basis van de waterbalans kan een theoretisch meerpeilfluctuatie berekend worden. Aangezien deze niet overeenkomt met de gemeten waterstandsverschillen, is de sluitfout bepaald (zie ook Tabel 4.5 en Figuur 4-9) en is dit als losse correctieterm opgelegd in het model. Net als in de voorgaande modelstudies, is deze correctie toegepast ter plaatse van de Brouwerssluis. De toegepaste methode is afgestemd met andere D-HYDRO-modelschematisaties van meren en wordt nader toegelicht in bijlage B.1.

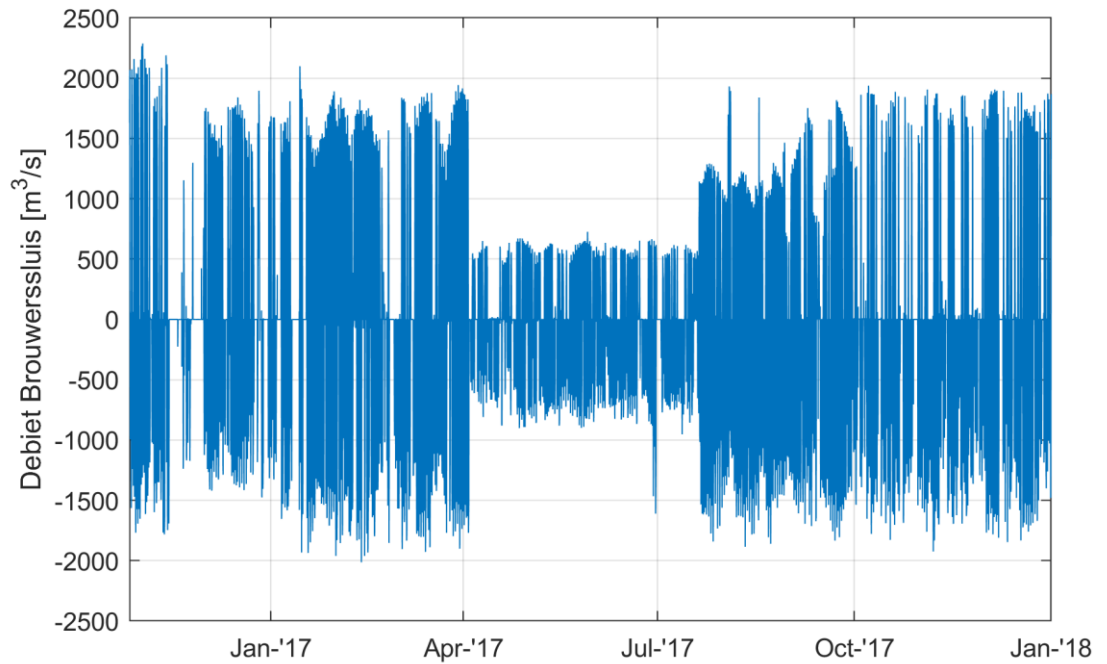
4.3.3.4 Kunstwerken

In Figuur 4-10 is een overzicht gegeven van de kunstwerken die in het model zijn opgenomen door middel van onttrekkings-/lozingspunten.

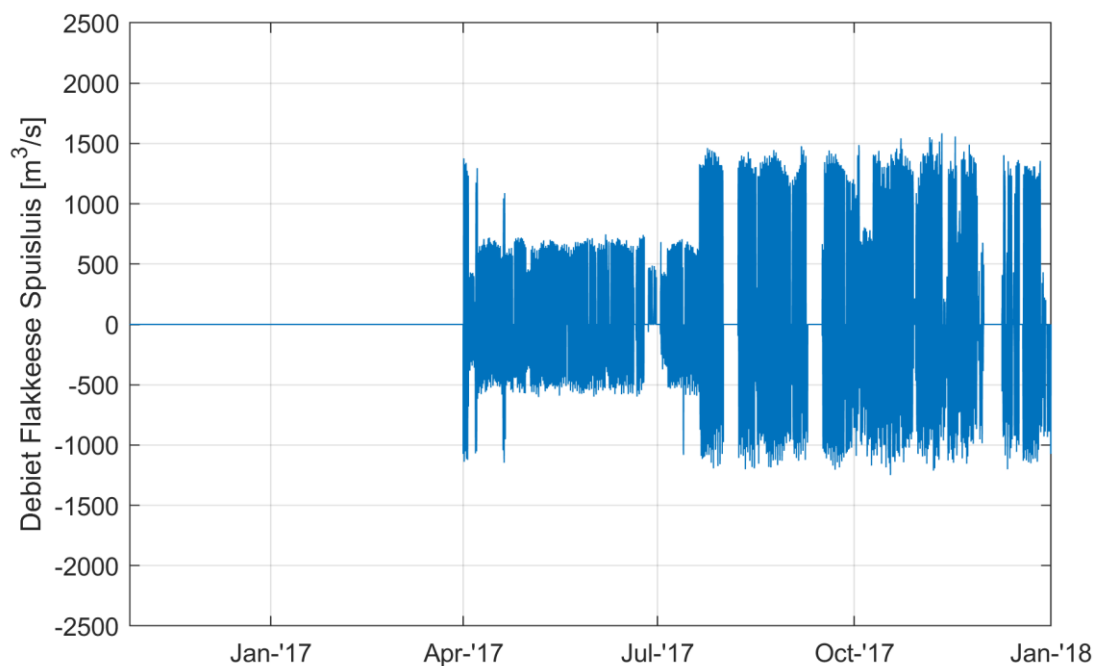


Figuur 4-10 Overzicht kunstwerken

De debieten door, de voor dit gebied belangrijkste kunstwerken, de Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis, zijn hieronder weergegeven in resp. Figuur 4-11 en Figuur 4-12. De magnitude van het debiet door het kunstwerk in de Brouwersdam is wat groter dan die van de debieten door de Flakkeese Spuisluis in de Grevelingendam. In deze figuren is ook te zien dat tijdens de zomerperiode (april tot augustus), vanwege het broedseizoen waarin een aangepast peilbeheer geldt, kleinere debieten door de kunstwerken plaatsvinden. Naast de bruto debieten, zijn ook de netto debieten interessant om te bekijken. Zoals ook uit Figuur 4-9 volgt, is er een netto debiet door de Brouwerssluis het Grevelingenmeer uit (van de Grevelingen naar de Noordzee) en een netto debiet door de Flakkeese Spuisluis het Grevelingmeer in (van de Oosterschelde naar de Grevelingen).



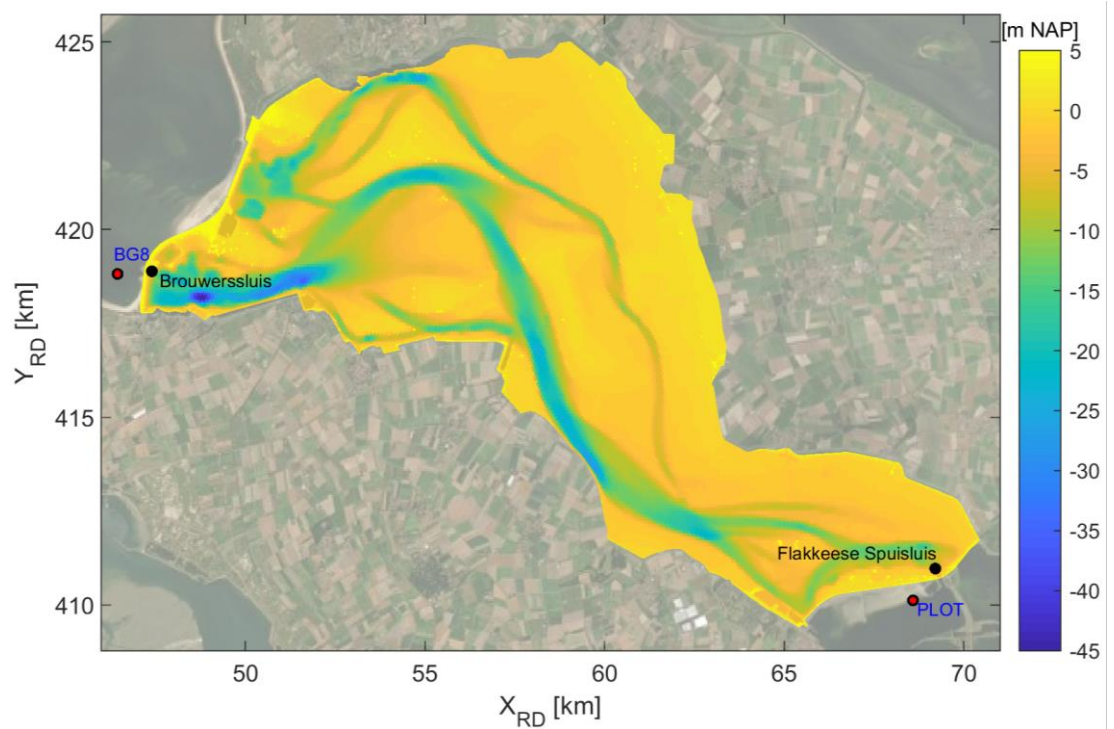
Figuur 4-11 Debiet door de Brouwerssluis (m^3/s) tijdens de simulatieperiode van jaarsom 2017



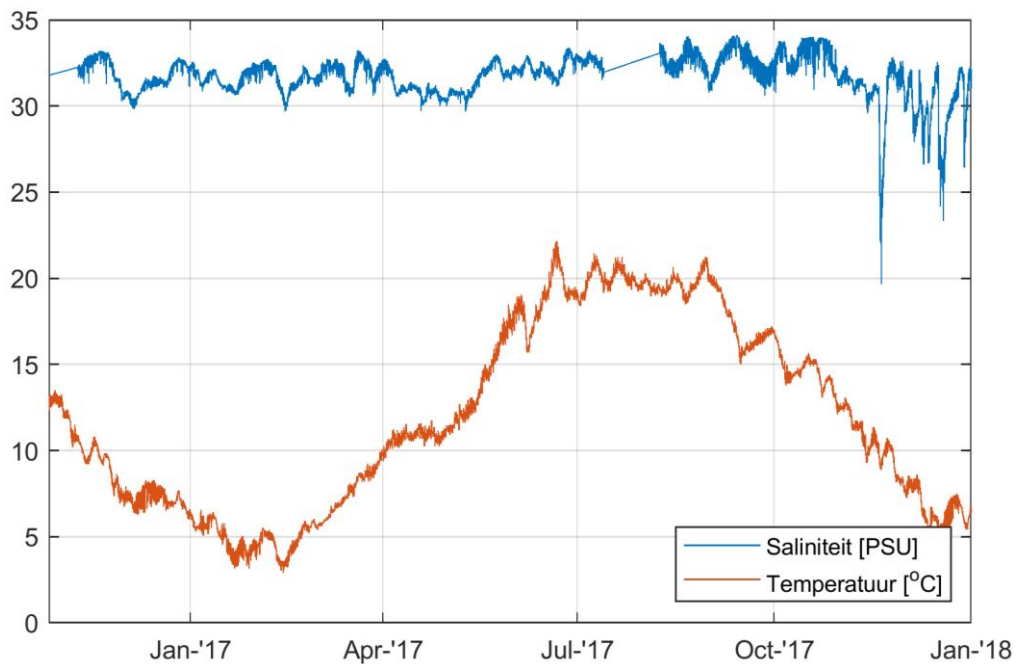
Figuur 4-12 Debiet door de Flakkeese Spuisluis (m^3/s) tijdens de simulatieperiode van jaarsom 2017

Voor de Brouwerssluis is de tijdserie van saliniteit en temperatuur (Figuur 4-14) van het inkomende water tijdens de simulatieperioden gebaseerd op meetstation *Brouwershavensche Gat 08*. Meetstation *Plaat van Oude Tonge* is gebruikt voor de beschrijving van de saliniteit- en temperatuurwaarden ter plaatse van de Flakkeese Spuisluis. De locatie van deze meetstations zijn weergegeven in Figuur 4-13. Dit kunstwerk is sinds april 2017 als tweezijdig doorlaatmiddel

operationeel. Het ontbreken van saliniteit- en temperatuurgegevens² in de periode voorafgaand aan april 2017, zie Figuur 4-15, als randvoorwaarden in de modelinvoer is daarom geen probleem (het debiet is in deze periode gelijk aan 0 m³/s).

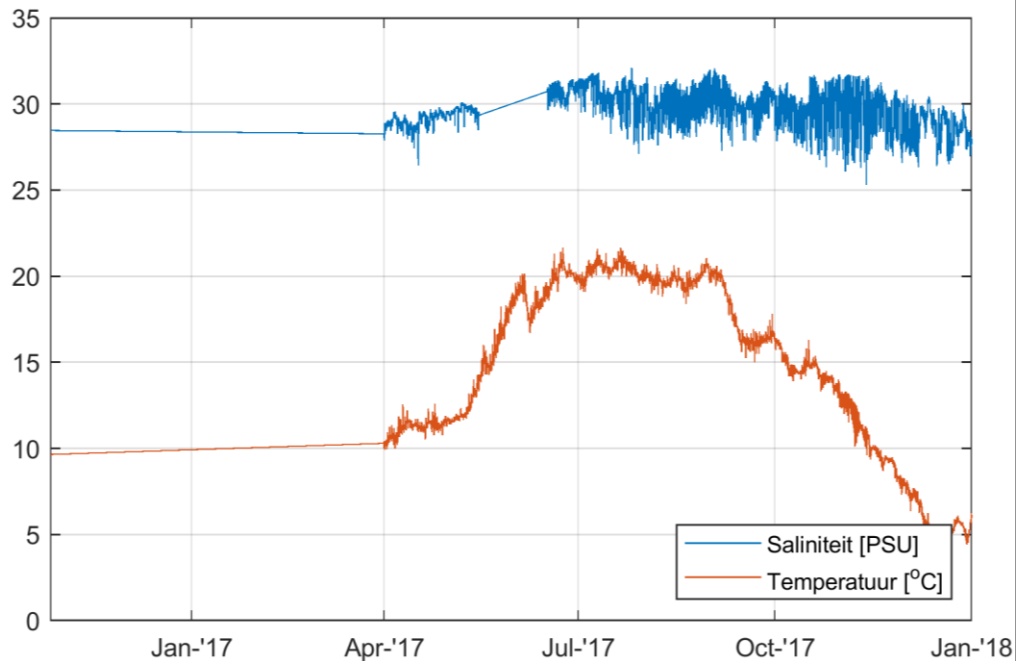


Figuur 4-13 Kunstwerken Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis. Saliniteit- en temperatuurgegevens van Brouwershavensche Gat 08 (BG8) en Plaat van Oude Tonge (PLOT) zijn gebruikt als randvoorwaarden ter plaatse van deze kunstwerken. In de achtergrond is de bodemligging in m NAP weergegeven.



Figuur 4-14 Saliniteit (PSU) en temperatuur (°C), afkomstig van meetstation Brouwershavensche Gat 08, die gebruikt worden bij het modelleren van de Brouwerssluis tijdens de simulatieperiode van jaarsom 2017

² Ten tijde van de afronding van deze studie bleken deze gegevens wel beschikbaar.



Figuur 4-15 Saliniteit (PSU) en temperatuur (°C), afkomstig van meetstation Plaat van Oude Tonge, die gebruikt worden bij het modelleren van de Flakkeese Spuisluis tijdens de simulatieperiode van jaarsom 2017

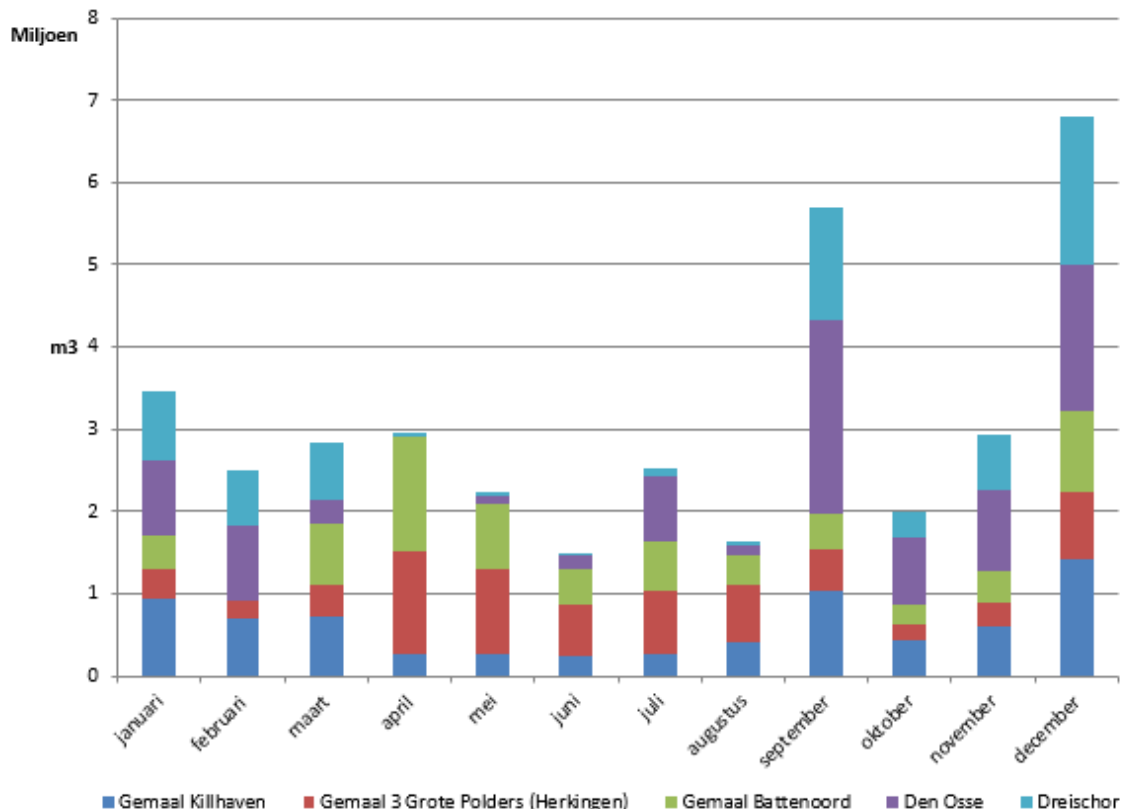
4.3.3.5 Afstroming en poldergemalen

Voor de afstroming van buitendijks gebied zijn, overeenkomstig met de voorgaande modelstudies, maandgemiddelde debieten gebruikt. De afstromingsdebieten over de oevers zijn berekend uit de maandelijkse neerslag in de locaties Ouddorp (5%), Goedereede (17%), Dirksland (20%), Anna Jacoba Polder (14%), Noordgouwe (19%) en Brouwershaven (25%) en verdampinggegevens in locatie Vlissingen. De percentages in de haakjes hebben betrekking op het deel van de totale neerslag die een bijdrage levert aan de afstroming. De afstroming (in m³/s) is als volgt gedefinieerd:

$$\text{Afstroming Oevers} = (\text{totale neerslag} - 0,7 \cdot \text{verdamping}) \cdot \text{oppervlak oevers}$$

waarbij voor *oppervlak oevers* 31.200 m² is gebruikt. De eenheid van 'totale neerslag' en 'verdamping' is m/s.

Naast de afstroming van buitendijksgebied, wordt ook het water dat via de gemalen uit verschillende polders in het Grevelingenmeer terecht komt meegenomen in de modellering. Figuur 4-16 toont de aanvoer van polderwater voor het jaar 2017.



Figuur 4-16 Aanvoer polderwater Grevelingenmeer 2017 (via Alexander Nefs, Rijkswaterstaat)

Het polderwater wordt via puntbronnen in de oppervlaktelaag gemodelleerd (zie de zwarte punten in Figuur 4-10), naast het debiet worden ook de temperatuur (10 °C) en saliniteit (0,1 PSU) als invoer opgelegd. De afstroming van de oevers wordt verspreid over het actieve modeldomein gesimuleerd met behulp van een *lateral discharge*. Hierbij wordt het debiet, op basis van een polygoon, verspreid over het actieve deel van het modeldomein. Deze polygoon loopt ongeveer over de isobath (lijn van gelijke bodemligging) van NAP -1 m en beslaat hierdoor het modeldomein waarvan de modelbodem lager ligt dan de minimale waterstand tijdens de modelberekening.

4.3.3.6 Regenvall en verdamping

Voor de neerslag voor jaarsom 2017 is het gemiddelde genomen van de meetwaarden in stations Dirksland en Brouwershaven (dagwaarden). Voor de verdamping zijn de gemeten dagwaarden in Wilhelminadorp gebruikt.

De regenvall en verdamping worden via een *lateral discharge*, op basis van een polygoon, verspreid over het actieve deel van het modeldomein. Dit gebeurt op dezelfde manier als het modelleren van het polderwater (paragraaf 4.3.3.5).

4.3.4 Meteorologische forcering

4.3.4.1 Wind

De windaansturing is van belang voor de aandrijving van de stroming in het Grevelingenmeer. Het ontstaan van stratificatie wordt tegengewerkt door menging ten gevolge van windgedreven stroming en productie van turbulentie aan het oppervlak. Voor de windaansturing worden uurswaarden van de windrichting en magnitude voor 2008 van meetstation Vlissingen gebruikt, afkomstig van het KNMI. De aansturing wordt uniform over het wateroppervlak toegepast.

De winddrag-formulering (Smith & Banke), de bijbehorende Cd-coëfficiënten (winddrag breakpoints $6,3E-4$ (0 m/s) en $7,23E-3$ (100 m/s)) en de luchtdichtheid ($1,205 \text{ kg/m}^3$) zijn ingesteld volgens de generieke D-HYDRO specificaties (Minns et al., 2019). De windforcering is daarmee iets anders dan het voorgaande Delft3D 4-model (Spiteri & Nolte, 2010) waarbij de Cd-coëfficiënten ingesteld zijn op $8,3E-4$ (0 m/s) en $7,23E-3$ (100 m/s).

4.3.4.2 Temperatuur

Voor de berekening van de temperatuur wordt het 'Ocean Heat Flux'-model gebruikt. Dit warmte-uitwisselingsmodel gebruikt als invoer naast de windsnelheid de luchttemperatuur op 2 m boven het wateroppervlak, de relatieve luchtvochtigheid en de bewolgingsgraad. De bruto zoninstraling wordt berekend op basis van de datum en de breedtegraad. De netto zoninstraling wordt dan berekend door te corrigeren voor de bewolgingsgraad. Hoewel de warmteflux door verdamping (latente warmteflux) een van de termen van het warmte-uitwisselingsmodel is, wordt de massaflux door verdamping gebaseerd op de vooraf bepaalde waarden uit de waterbalans gebruikt.

Voor de meteoaansturing worden uurswaarden voor de luchttemperatuur, de luchtvochtigheid en de bewolgingsgraad van meetstation Vlissingen gebruikt, afkomstig van het KNMI. Deze aansturing wordt uniform over het modeloppervlak toegepast.

De voor het temperatuursmodel benodigde Stanton- en Dalton-coëfficiënt voor resp. de convectieve- en evaporatieve (latente) warmte flux zijn allebei op 0,0013 gezet. De Secchi diepte, die de troebelheid van het water weergeeft, is (net als in het bestaande Delft3D 4-model) op 2,0 m ingesteld. Voor de luchtdichtheid is een waarde van $1,205 \text{ kg/m}^3$ gebruikt. Deze instellingen sluiten aan bij de standaardinstellingen voor D-HYDRO-model (Minns et al., 2019).

4.3.5 Initiële condities

Er worden ruimtelijk-uniforme initiële condities toegepast voor de waterstand, saliniteit en temperatuur. Een overzicht hiervan voor de verschillende simulatieperioden is weergegeven in Tabel 4.6. In alle gevallen wordt initieel uitgegaan van stagnante stromingscondities. Aangezien de simulaties van de stormperioden (Oktober 2002 en December 2013) zich richten op het berekenen van de (storm)opzet, wordt (vergelijkbaar met voorgaande (1D- en 2D-)modellen waarin de stormopzet in deze periodes berekend is) in deze sommen geen saliniteit en temperatuur berekend.

Tabel 4.6 Overzicht initiële condities

Omschrijving	Waterstand [m NAP]	Saliniteit [PSU]	Temperatuur [°C]
Jaarsom 2000	-0,15	30	9
Jaarsom 2008	-0,18	29	5
Jaarsom 2017	-0,20	31	10
Oktober 2002	-0,18	n.v.t.	n.v.t.
December 2013	-0,20	n.v.t.	n.v.t.

4.4 Overige modelinstellingen en -eigenschappen

In Tabel 4.7 en Tabel 4.8 is een overzicht gegeven van overige modelinstellingen en modeleigenschappen. Deze sluiten (grotendeels) aan bij de generieke technische en functionele specificaties voor de D-HYDRO-modellen (Minns et al., 2019). De enige uitzondering hierop is de achtergrondwaarde voor de verticale eddy diffusiviteit (dicoww), deze parameter is gebruikt om de verticale menging af te regelen en is ingesteld op $0 \text{ m}^2/\text{s}$, terwijl de standaardinstelling $5E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ is.

Tabel 4.7 Modelinstellingen

Omschrijving	Model keyword	Waarde
Maximale numerieke tijdstap	DtMax	30
Turbulentiemodel	Turbulencemodel	3 (k-epsilon)
Achtergrondwaarde horizontale eddy viscositeit	vicouv	0,1
Achtergrond waarde horizontale eddy diffusiviteit	dicouv	0,1
Smagorinsky coefficient	Smagorinsky	0,2
Achtergrondwaarde verticale eddy viscositeit	vicoww	5E-5
Achtergrondwaarde verticale eddy diffusiviteit	dicoww	0
Dieptebevestiging benodigd voor het berekenen van de windforcering	Windhuorzwsbased	0 (snelheidspunt)
Gebruik van modelbodempligging of z-laagverdeling	Keepzlayerlingatbed	2 (modelbodempligging)
Breedtegraad (t.b.v. Coriolis)	AngLat	52
Breedtegraad (t.b.v. zoninstraling)	AngLon	4

Tabel 4.8 Modeleigenschappen

Omschrijving	Waarde
Verticaal referentie niveau	Normaal Amsterdams Peil (NAP)
Tijdzone	GMT +1 uur
Coördinatensysteem	Cartesisch Rijksdriehoekskoördinaten (EPSG: 28992)

5 Kalibratie saliniteit, temperatuur en stormopzet

5.1 Saliniteit en temperatuur

5.1.1 Methodiek

Aangezien het 3D Grevelingenmodel onderdeel is van de zesde-generatie modellen van Rijkswaterstaat, is geprobeerd zo goed mogelijk aan te sluiten bij de generieke technische en functionele specificaties voor de D-HYDRO-modellen (Minns et al., 2019). De modelinstellingen uit deze generieke specificaties zijn daarbij als startpunt gebruikt bij de modelopzet van het Grevelingenmodel. De 3D-instellingen zijn daarnaast ook gebaseerd op de ervaringen uit het onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO (Tiessen et al., 2018).

Aangezien sommige modelinstellingen afhankelijk zijn van het watersysteem, de toepassing van het model of bijvoorbeeld de resolutie van het rekenrooster, kan er van de generieke specificaties afgeweken worden mits daar goede argumentatie voor is.

Op basis van jaarsom 2008 zijn verschillende modelinstellingen gevarieerd (gevoeligheidsonderzoek) en is op basis van tijdseries, z,t-diagrammen, dwarsdoorsnedes en horizontale doorsnedes het effect van verschillende modelinstellingen op de modelresultaten onderzocht. In paragraaf 5.1.2 zijn de belangrijkste uitkomsten hiervan beschreven. De modelresultaten van de uiteindelijk gekozen instellingen zijn te vinden in paragraaf 5.1.3. Om te beoordelen of een wijziging van een bepaalde parameter een positief effect heeft op de modelresultaten, zijn de modelresultaten vergeleken met de observaties. Een beschrijving van de hierbij gebruikte statistische kengetallen is te vinden in bijlage C.1. Deze sectie eindigt met paragraaf 5.1.4 waarin de belangrijkste conclusies zijn gegeven. Het doen van de gevoeligheidsberekeningen en het bijstellen van de parameterinstellingen aan de hand van een kwantitatieve vergelijking met metingen kan gezien worden als de kalibratie.

5.1.2 Uitkomsten gevoeligheidsonderzoek

5.1.2.1 Bodemruwheid

Het gebruik van verschillende waarden van de Manning-coëfficiënt (0,018, 0,020 en 0,022 s/m^{1/3}) die als achtergrondwaarde gebruikt worden (Baseline-term: zomerbed) zorgt voor een kleine verandering in de stormopzet en verticale menging. Aangezien het effect van de bodemruwheid op de berekende opzet in het Grevelingenmeer minimaal is (zie ook paragraaf 5.2.2.4) en de mate van menging (naast de bodemruwheid) ook beïnvloed kan worden door de verticale achtergronddiffusiviteit aan te passen, is ervoor gekozen om de bodemruwheid gelijk te houden aan de waarde uit het Delft3D 4-model (0,020 s/m^{1/3}). De verticale achtergronddiffusiviteit, modelinstelling dicoww, wordt daarmee de instelling om de verticale menging in het model af te regelen.

5.1.2.2 Horizontale/verticale achtergrondviscositeit en -diffusiviteit

Na enkele tests met de horizontale/verticale achtergrondviscositeit en -diffusiviteit, is ervoor gekozen om de standaard D-HYDRO-instellingen (Minns et al., 2019) te gebruiken. Zoals ook in paragraaf 5.1.2.1 aangegeven, is de verticale menging gekalibreerd door een geschikte waarde voor de verticale achtergronddiffusiviteit te kiezen. Na verschillende gevoeligheidssommen is deze waarde gelijk gekozen aan 0 m²/s.

5.1.2.3 Verticale laagverdeling

Ten opzichte van het voorgaande 3D-Grevelingenmodel is de horizontale resolutie significant toegenomen (zie bijv. Figuur 4-3) en is ook de verticale resolutie in de diepere delen toegenomen naar een laagdikte van 1,25 m over de gehele waterkolom. Het verder verhogen van de verticale resolutie van de z-lagen naar 1,00 m gaf geen duidelijke verbetering van de modelresultaten en daarom is de laagverdeling gehouden zoals beschreven in paragraaf 4.1.2.

5.1.2.4 Maximale rekentijdstep

Doordat de software de rekentijdstep automatisch limiteert op basis van stabiliteitscriteria varieert de rekentijdstep tijdens de simulatie. Er zit echter een maximum aan deze rekentijdstep, dat kan worden opgegeven als modelinvoer.

Het limiteren van de automatisch bepaalde rekentijdstep tot een maximum zorgt ervoor dat de modelberekening kleinere en meer tijdstappen nodig heeft, waardoor de numerieke oplossing in theorie nauwkeuriger kan worden.

Het verlagen van de maximale rekentijdstep van 60 naar 30 seconden had geen grote invloed op de rekentijd. Het model beperkte zelf automatisch de tijdstap al naar tijdstappen van meestal 15 tot 30 seconden met uitschieters naar enkele tot 60 seconden. Een verdere verkleining van de maximale rekentijdstep naar 15 seconden gaf geen duidelijk betere modelresultaten maar had wel een substantiële invloed op de rekentijd. Er is daarom gekozen om de maximale rekentijdstep op 30 seconden te zetten.

5.1.2.5 Locatie Brouwerssluis

Aangezien het modeldomein tot aan de kruin van de dijk loopt (en een relatief fijne resolutie gebruikt wordt), liggen de bodemhoogtes van deze rekencellen boven NAP. Het is daardoor niet mogelijk om, zonder Baseline-modelmaatregel, een kunstwerk als de Brouwerssluis als randvoorwaarde (op de open modelrand) te modelleren en daarom zijn de twee grotere kunstwerken (Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis) via lozings-/onttrekkingspunten in het *stand-alone* model geïmplementeerd. Doordat de zoutvracht door de kunstwerken tijdens uitstroom mede bepaald wordt door de concentratie in het model, varieert deze mogelijk ook per locatie (en bijbehorende diepteligging) van het kunstwerk in de modelschematisatie. Uit een test waarbij de Brouwerssluis wel via een open rand is gemodelleerd in plaats van als lozings-/onttrekkingspunt, blijkt het effect van deze modelkeuze op de berekende saliniteit en temperatuur minimaal.

Met behulp van verschillende gevoeligheidssommen is gevonden dat zeer lokaal (in het observatiepunt direct naast het kunstwerk) relatief grote verschillen (ca. 1 PSU) in zoutconcentratie kunnen ontstaan wanneer een andere rekencel gekozen wordt als representatieve locatie voor het kunstwerk. Echter, de keuze van deze locatie op de zoutverspreiding in het modeldomein bleek verder niet substantieel te veranderen bij een kleine aanpassing van het lozings-/onttrekkingspunt.

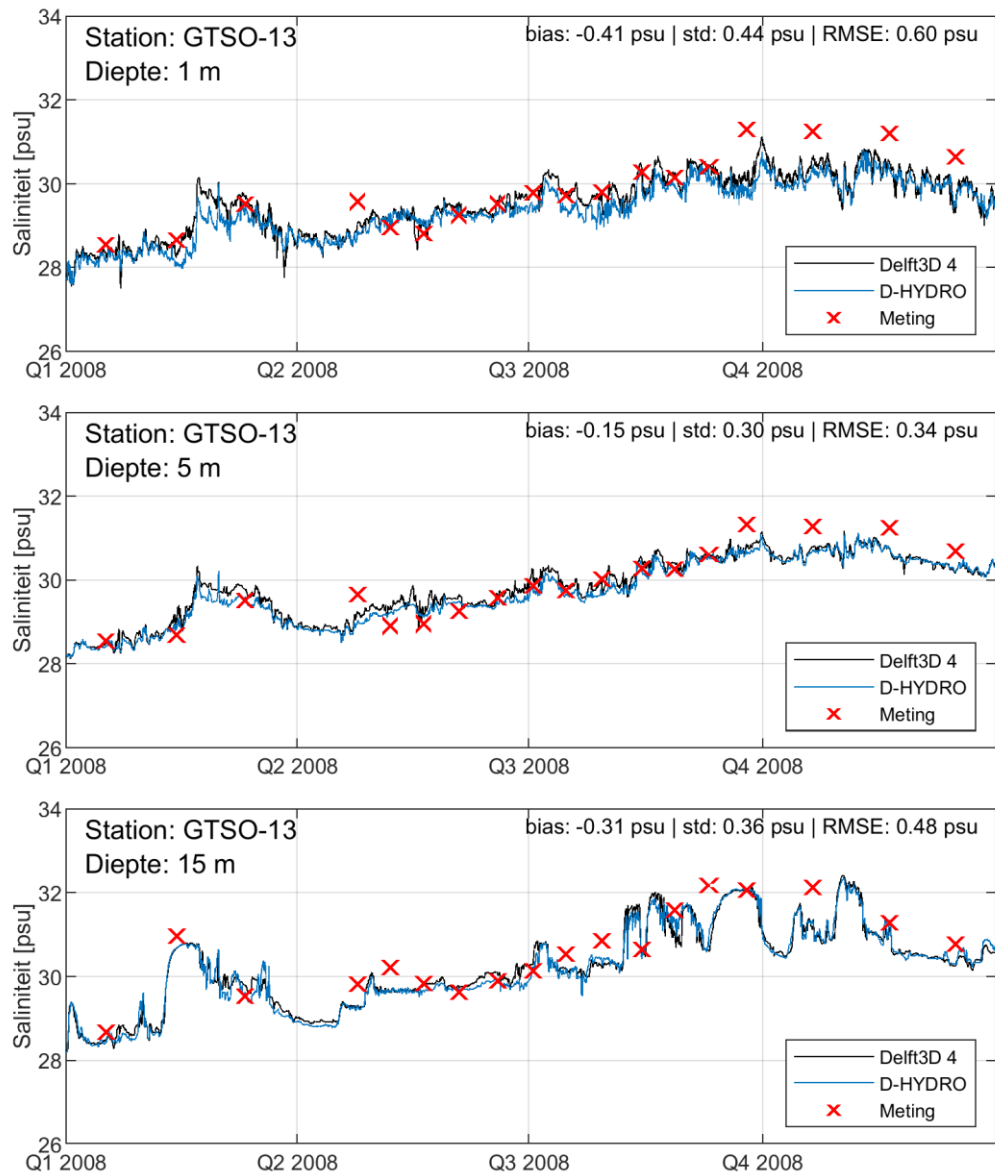
De kunstwerken zijn daarom zo dicht mogelijk bij de werkelijke locatie, in de rekencel met een resolutie van 100 m (grootst mogelijke cel om tijdstapsbeperkingen te voorkomen) geplaatst. Dichter bij de rand van het modeldomein was ook niet mogelijk aangezien deze cellen op de modelrand deels op de dam en daarmee, na de bodemprojectie via Baseline, boven NAP liggen.

5.1.3 Modelresultaten

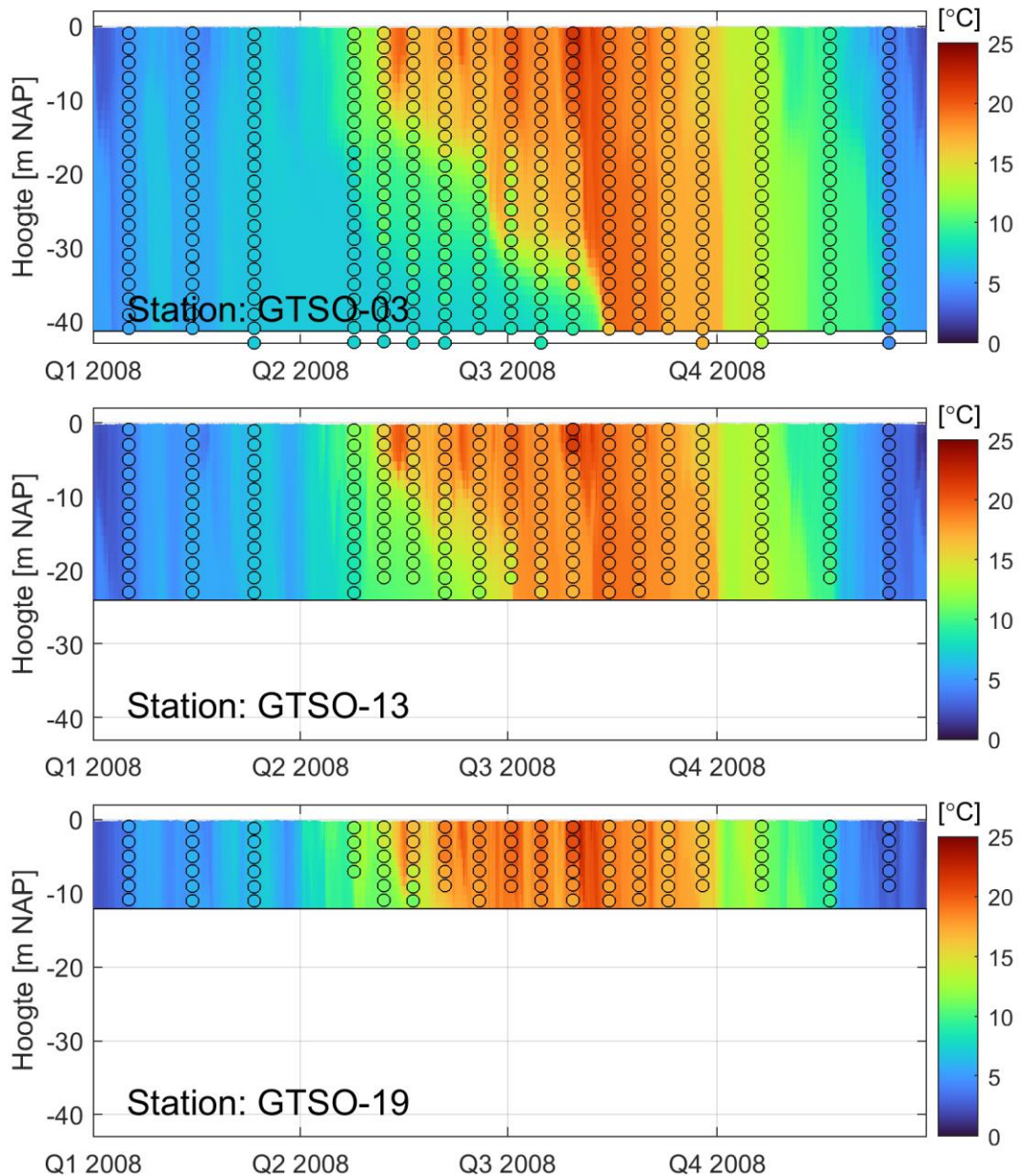
In bijlage C zijn verschillende soorten figuren opgenomen waarin de modelresultaten (saliniteit en temperatuur) van het gekalibreerde model voor jaarsom 2008 worden vergeleken met het bestaande Delft3D 4-model en de beschikbare metingen. Tijdens de modelontwikkeling en -validatie is gebruik gemaakt van alle beschikbare meetgegevens, in de rapportage zijn (vergelijkbaar met voorgaande Grevelingen-rapportages) voor de tijdseries en de z,t-plots de meetstations GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 gebruikt. Deze stations liggen verspreid over het modeldomein in de diepste delen van de Grevelingen (in de hoofdgeul). Voor de horizontale- en verticale dwarsdoorsnedes zijn twee momenten gekozen in de zomer waarop temperatuurstratificatie aanwezig is.

In deze paragraaf worden de modelresultaten met het op basis van jaarsom 2008 gekalibreerde model beschreven en wordt een tweetal figuren gebruikt om deze beschrijving te ondersteunen.

Figuur 5-1 toont de tijdreeks van de saliniteit in GTSO-13 van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes. Het z,t-diagram van de berekende temperatuur in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 (weergegeven als achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels) is te vinden in Figuur 5-2.



Figuur 5-1 Tijdreeks van de saliniteit in GTSO-13 van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes



Figuur 5-2 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende temperatuur in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels)

Het gekalibreerde D-HYDRO-model is goed in staat de geobserveerde saliniteit en temperatuur te reproduceren. De trendvariatie over het jaar wordt goed gereproduceerd en uit de tijdreeks van de verschillende dieptes en het z,t-diagram blijkt ook dat het verschil over de verticaal (stratificatie) in het model terug te vinden is.

Een overzicht van de bias (gemiddeld verschil), standaarddeviatie (std) en RMSE voor alle GTSO-stations voor jaarsom 2008 is te vinden in Tabel 5.1. In de gehele rapportage betekent een positieve (negatieve) bias een overschatting (onderschatting) door het model, oftewel bias = model minus meting.

Tabel 5.1 Statistische kengetallen van saliniteit en temperatuur voor jaarsom 2008 met D-HYDRO Grevelingen

Saliniteit (PSU)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-01	-0.12	0.72	0.73	-0.07	0.94	0.95			
GTSO-02	-0.09	0.46	0.47	-0.02	0.36	0.36	0.00	0.35	0.35
GTSO-03	-0.01	0.49	0.49	-0.02	0.44	0.44	-0.01	0.39	0.39
GTSO-04	-0.08	0.29	0.30	0.01	0.45	0.45	0.04	0.36	0.36
GTSO-05	-0.10	0.39	0.40	-0.08	0.49	0.49	0.01	0.40	0.40
GTSO-06	-0.19	0.37	0.41	-0.19	0.50	0.53	0.00	0.42	0.42
GTSO-07	-0.15	0.33	0.36	-0.18	0.33	0.38			
GTSO-08	-0.23	0.35	0.42	-0.26	0.33	0.42	-0.28	0.34	0.44
GTSO-09	-0.19	0.36	0.41	-0.21	0.38	0.43	-0.24	0.29	0.37
GTSO-10	-0.19	0.32	0.37	-0.21	0.41	0.46			
GTSO-11	-0.14	0.33	0.36	-0.12	0.33	0.35	-0.47	0.48	0.67
GTSO-12	-0.16	0.30	0.34	-0.17	0.31	0.36	-0.38	0.42	0.57
GTSO-13	-0.41	0.44	0.60	-0.15	0.30	0.34	-0.31	0.36	0.48
GTSO-14	-0.15	0.32	0.35	-0.16	0.30	0.34			
GTSO-15	-0.14	0.35	0.37	-0.16	0.32	0.36	-0.39	0.42	0.57
GTSO-16	-0.11	0.37	0.39	-0.17	0.35	0.39			
GTSO-17	-0.08	0.43	0.44	-0.08	0.35	0.36			
GTSO-18	-0.08	0.40	0.41	-0.15	0.39	0.42			
GTSO-19	0.01	0.47	0.47	-0.11	0.46	0.48			
GTSO-20	0.03	0.54	0.54	-0.11	0.44	0.45			
Gemiddelde	-0.13	0.40	0.43	-0.13	0.41	0.44	-0.18	0.38	0.46
RMS	0.16	0.41	0.44	0.15	0.43	0.46	0.26	0.39	0.47
Temperatuur (°C)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-01	0.19	0.57	0.60	0.06	0.48	0.48			
GTSO-02	0.34	0.46	0.58	0.12	0.40	0.42	0.28	0.62	0.68
GTSO-03	0.38	0.51	0.64	0.17	0.39	0.42	0.11	0.69	0.69
GTSO-04	0.39	0.56	0.68	0.14	0.47	0.49	0.15	0.50	0.52
GTSO-05	0.41	0.62	0.75	0.18	0.49	0.52	0.21	0.46	0.51
GTSO-06	0.39	0.66	0.77	0.18	0.54	0.57	0.00	0.81	0.81
GTSO-07	0.32	0.72	0.79	0.18	0.63	0.65			
GTSO-08	0.27	0.70	0.75	0.16	0.59	0.61	0.29	0.79	0.85
GTSO-09	0.35	0.65	0.74	0.23	0.62	0.66	0.34	0.69	0.77
GTSO-10	0.36	0.67	0.76	0.20	0.58	0.62			
GTSO-11	0.33	0.64	0.72	0.17	0.58	0.60	0.18	0.61	0.64
GTSO-12	0.29	0.65	0.71	0.07	0.47	0.48	-0.04	0.45	0.46
GTSO-13	0.19	0.54	0.58	0.07	0.57	0.58	0.02	0.49	0.49
GTSO-14	0.33	0.66	0.74	0.06	0.55	0.55			
GTSO-15	0.25	0.60	0.65	0.13	0.69	0.70	0.03	0.66	0.66
GTSO-16	0.10	0.56	0.56	0.00	0.69	0.69			
GTSO-17	0.26	0.65	0.70	0.08	0.63	0.64			
GTSO-18	0.11	0.60	0.61	0.09	0.67	0.68			
GTSO-19	0.11	0.69	0.70	0.00	0.66	0.66			
GTSO-20	0.12	0.68	0.69	0.05	0.70	0.70			
Gemiddelde	0.27	0.62	0.69	0.12	0.57	0.59	0.14	0.62	0.64
RMS	0.29	0.62	0.69	0.13	0.58	0.59	0.19	0.63	0.65

Om een vergelijking te kunnen maken met het Delft3D 4-model wordt de gemiddelde RMSE (o.b.v. de 20 GTSO-stations) voor saliniteit (Tabel 5.2) en temperatuur (Tabel 5.3) van het voorgaande 3D Grevelingenmodel en het D-HYDRO-model hieronder getoond voor jaarsom 2008.

Tabel 5.2 Gemiddelde statistiek (bias, std, RMSE) saliniteit (PSU) van het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations voor een jaarsom van het jaar 2008

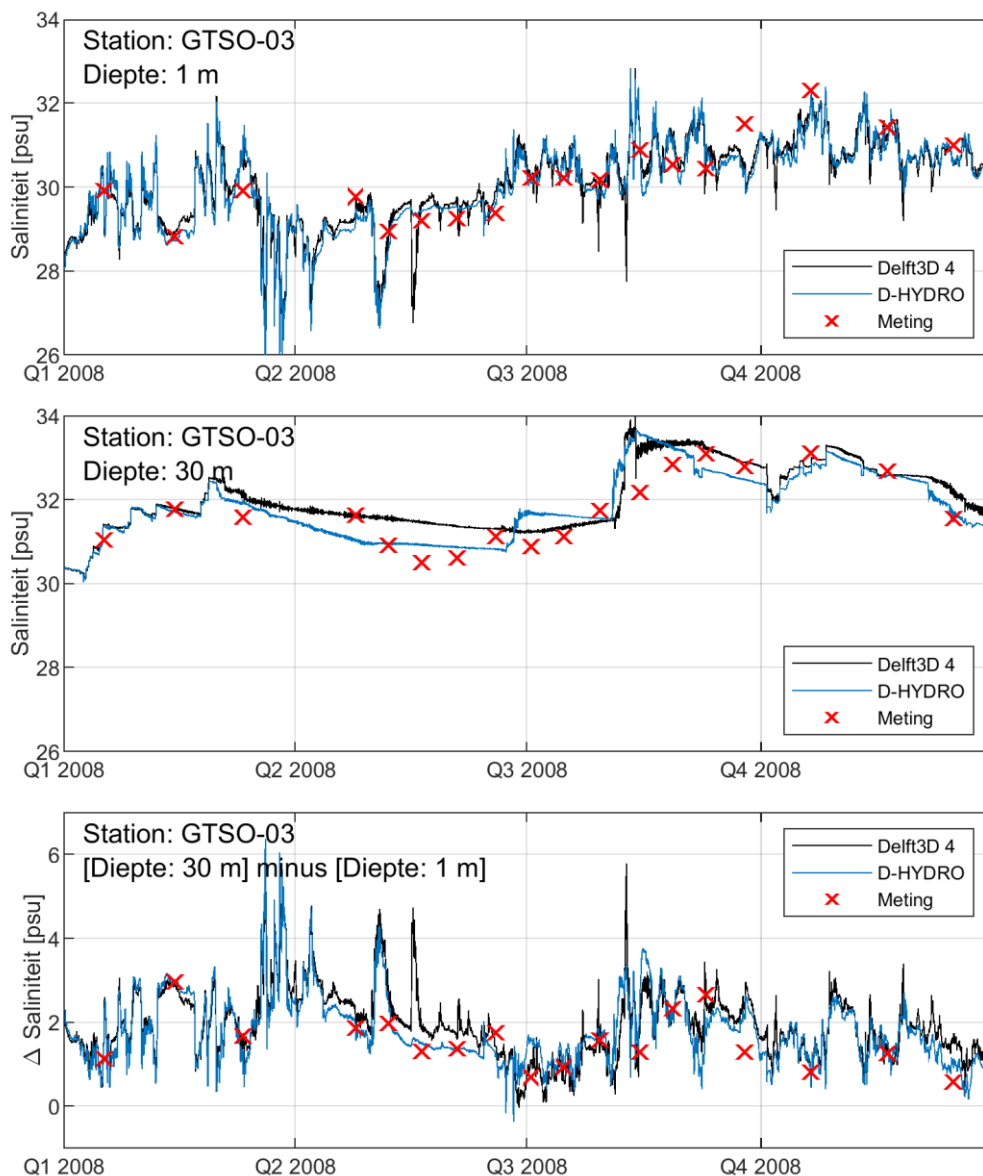
Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Saliniteit (PSU)									
Delft3D 4	-0.04	0.41	0.42	-0.01	0.43	0.43	-0.13	0.46	0.54
D-HYDRO	-0.13	0.40	0.43	-0.13	0.41	0.44	-0.18	0.38	0.46

Tabel 5.3 Gemiddelde statistiek (bias, std, RMSE) temperatuur (°C) van het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations voor een jaarsom van het jaar 2008

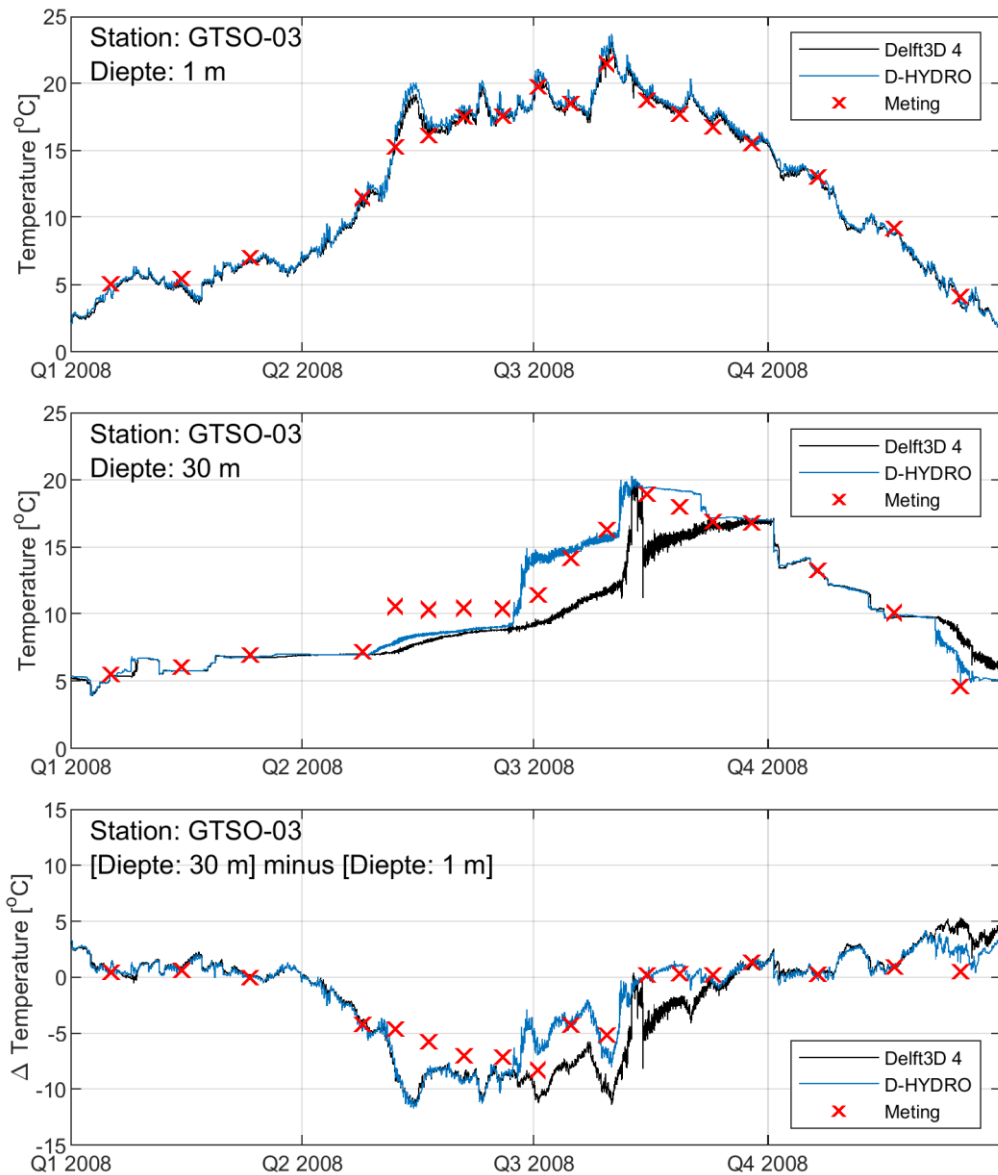
Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Temperatuur (°C)									
Delft3D 4	-0.09	0.49	0.51	-0.17	0.51	0.54	0.11	0.67	0.69
D-HYDRO	0.27	0.62	0.69	0.12	0.57	0.59	0.14	0.62	0.64

Het D-HYDRO-model presteert in de kalibratieperiode wat betreft saliniteit boven in de waterkolom (-1 m NAP en -5 m NAP) vergelijkbaar met het gekalibreerde Delft3D 4-model (RMSE van 0,42 – 0,44 PSU). Op -15 m NAP doet het nieuwe model het gemiddeld iets beter, met een RMSE van 0,46 PSU (tegen 0,54 PSU voor het oude model). De temperatuur wordt, gemiddeld genomen, iets minder goed gereproduceerd in het D-HYDRO-model dan in het voorgaande Delft3D 4-model. Met name de oppervlaktelaag wordt minder goed gereproduceerd door het D-HYDRO-model (een RMSE van 0,69 °C tegen een RMSE van 0,51 °C van het Delft3D 4-model).

In de hierboven gepresenteerde tabellen wordt de kwaliteit van het model op basis van een vergelijking van saliniteit en temperatuur met metingen bepaald. Doordat deze grootheden de dichtheid van het water en daarmee de stratificatie in het model beïnvloeden, hebben ze indirect effect op de waterkwaliteitsmodellering. Een goede reproductie van een waterkwaliteitsparameter als het zuurstofgehalte, kan daarmee een additionele validatie van het hydrodynamische model zijn. Om een beter beeld te krijgen van de reproductie van het verschil in saliniteit en temperatuur tussen de oppervlaktelaag en nabij de bodem (als maat voor stratificatie), worden in Figuur 5-3 en Figuur 5-4 deze grootheden geplot op 1m diepte (bovenste paneel), op 30 m diepte (middelste paneel) en het verschil hiertussen (onderste paneel).



Figuur 5-3 Tijdreeks van de saliniteit in GTSO-03 van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op -1 en -30 m diepte. Het onderste paneel toont het verschil in saliniteit tussen beide dieptes.



Figuur 5-4 Tijdreeks van de temperatuur in GTSO-03 van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op -1 en -30 m diepte. Het onderste paneel toont het verschil in temperatuur tussen beide dieptes.

Zoals eerder geconstateerd treedt er in de oppervlaktelaag weinig verschil op tussen het Delft3D 4- en het D-HYDRO-model. Het verloop van de saliniteit en temperatuur op 30 m diepte ziet er, met name in de zomer, anders uit. Doordat het voorgaande Delft3D 4-model een grovere horizontale resolutie had, vindt op deze grotere diepte (door de afwezigheid van naastgelegen horizontale rekencellen) het transport van saliniteit/temperatuur vooral in verticale richting plaats. De verandering van saliniteit en temperatuur verloopt daardoor langzamer dan in het D-HYDRO-model.

Op een diepte van 30 m toont het D-HYDRO-model in station GTSO-03, nabij de Brouwerssluis gelegen, een betere reproductie (kwalitatief gezien) van de temperatuur, waardoor er ook betere overeenkomst tussen de metingen en de door het D-HYDRO-model berekende temperatuurstratificatie op deze locatie.

5.1.4 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de gevoeligheden van enkele modelinstellingen en modelkeuzes beschreven. De modelinstellingen zijn gebaseerd op de generieke specificaties voor D-HYDRO-modellen (Minns et al., 2019) en de ervaringen uit het onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO (Tiessen et al., 2018). De modelkeuzes en -instellingen zoals terug te vinden in hoofdstuk 4 beschrijven de instellingen van het gekalibreerde model. Dezelfde modelkeuzes en -instellingen zijn gebruikt voor het modelleren van de overige simulatieperioden ten behoeve van de validatie van het model.

5.2 Stormopzet

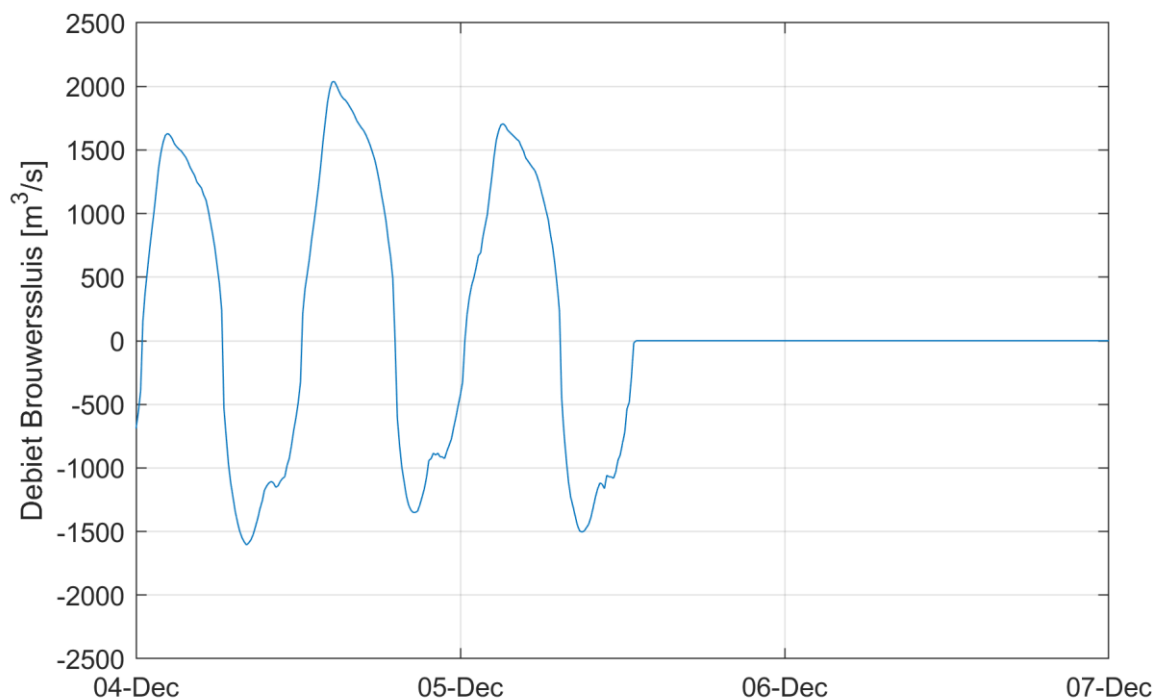
5.2.1 Methodiek

Omdat scheefstand waarschijnlijk in de toekomst een stuurparameter zal worden (na realisatie van het nieuwe doorlaatmiddel), is het gebruik van adequate windforcering en een goede afregeling van scheefstand belangrijk.

Aangezien voor verschillende toepassingen van het model (bijv. bureaustudies t.b.v. het nieuwe doorlaatmiddel en operationeel peilbeheer) gebruik gemaakt zal worden van verschillende soorten databronnen (metingen of een verwachting/modelvoorspelling), is het mogelijk een scheiding te maken tussen het gebruik van een meetstation voor het modelleren van jaarsommen waarin saliniteit en temperatuur gemodelleerd wordt (eventueel ten behoeve van een waterkwaliteitsstudie) en het operationeel voorspellen van waterstanden in de Grevelingen. Voor jaarsommen is het gewenst om hetzelfde meetstation te gebruiken voor de windgegevens als dat gebruikt wordt voor overige meteo-gegevens zoals de luchttemperatuur, de luchtvochtigheid en de bewolingsgraad.

Net als in de modelontwikkeling van het SOBEK3-model (Groenenboom & Verploegh, 2016) en het WAQUA-model (Minns & Aguilar, 2015), zijn twee stormachtige perioden (oktober 2002 en december 2013) doorgerekend om de op- en afwaaiing (stormopzet) in de meetstations Brouwerssluis Binnen, Bommenede en Grevelingen hevel West te modelleren met een 2Dh (dieptegemiddelde) versie van het D-HYDRO-model. De beschrijving van deze twee stormperioden is te vinden in bijlage C.6.

Voor de verificatie van de stormopzet is tijdens de voorgaande studies een korte simulatieperiode gekozen op basis van het criterium dat peilfluctuaties ten gevolge van het peilbeheer daarin beperkt zijn (deze zouden niet goed door het model voorspeld kunnen worden door het gebruik van een maandgemiddelde waterbalans) én dat er een duidelijk signaal waarneembaar is in de waterstand ten gevolge van de windforcering. Er zijn geen volumebalansen opgesteld. Voorafgaand aan de Sinterklaasstorm heeft er wel significante in- en uitstroom op de Grevelingen plaatsgevonden. Deze debieten door de Brouwerssluis, zie Figuur 5-5, zijn wel in de simulatieperiode van december 2013 opgenomen.



Figuur 5-5 Debiet door de Brouwerssluis (m^3/s) tijdens de simulatieperiode van stormperiode december 2013

5.2.2 Gevoeligheidsonderzoek

5.2.2.1 Windstations

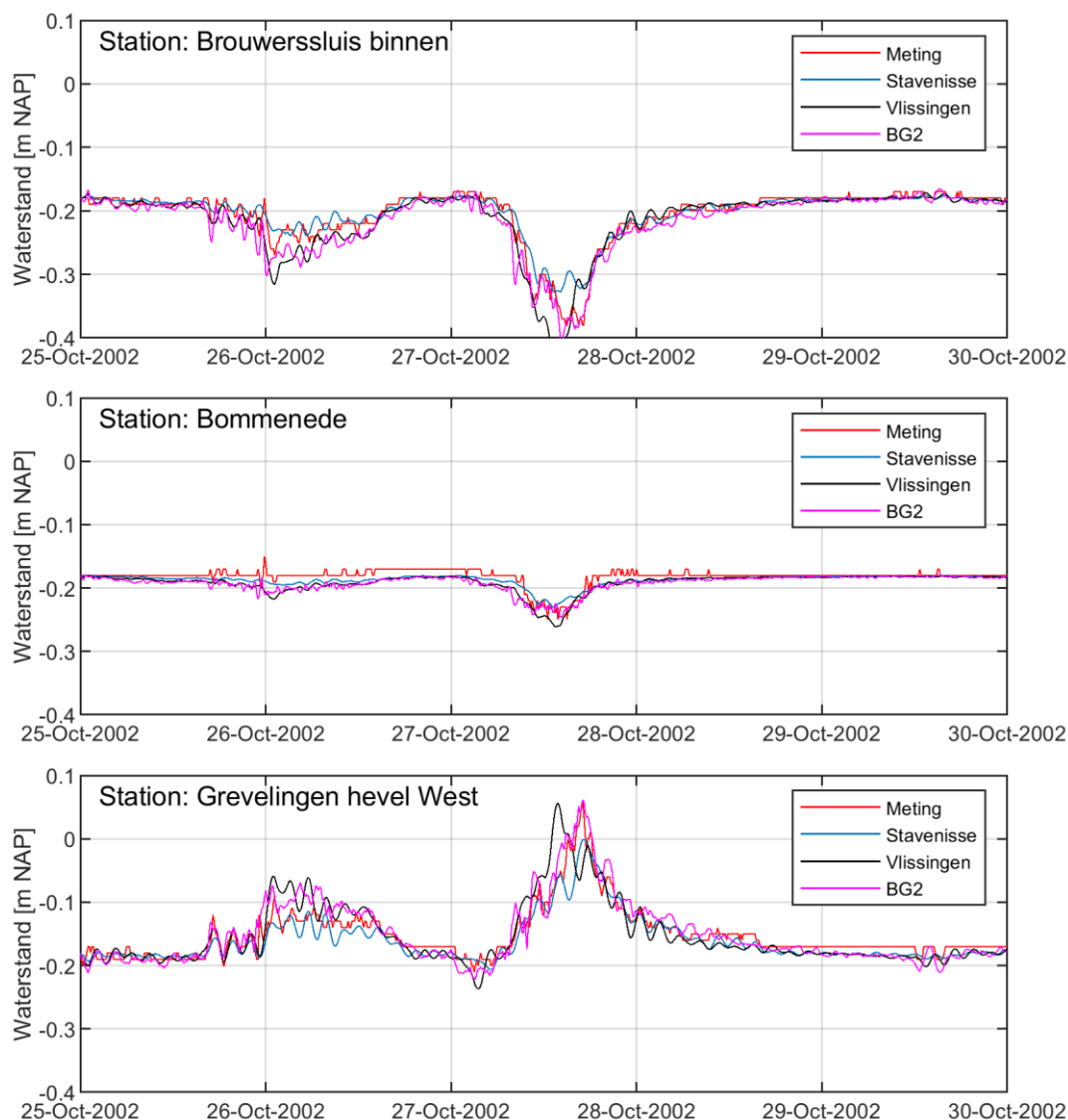
In Tabel 5.4 is een overzicht gegeven van de verschillende windstations/windbronnen die gebruikt zijn in het gevoeligheidsonderzoek naar de stormopzet. Van station Bruinisse is geen data beschikbaar voor de stormperiode in oktober 2002. Voor station Stavenisse is voor de Sinterklaasstorm (december 2013) data beschikbaar met zowel een 10 als 60 minuten interval. Deze meetgegevens zijn gebruikt om het effect van de temporele resolutie op de berekende stormopzet te bekijken.

Tabel 5.4 Overzicht van verschillende toegepaste windstations/windbronnen

Windforcering	Okt 2002	Dec 2013
Vlissingen	60 min. interval	60 min. interval
Stavenisse	60 min. interval	10 en 60 min. interval
BG2	10 min. interval	10 min. interval
Bruinisse	<Niet beschikbaar>	10 min. interval
HARMONIE	<Niet beschikbaar>	60 min. interval

Figuur 5-6 toont de berekende waterstand tijdens de storm van oktober 2002 voor de meetpunten Brouwerssluis binnen, Bommende en Grevelingen hevel West in drie verschillende subplots. In deze gevoeligheidstests van de windstations is gebruik gemaakt van de D-HYDRO standaardinstelling voor wind: Smith & Banke met break points $6,3E-4$ (0 m/s) en $7,23E-3$ (100 m/s).

In verschillende kleuren zijn de modelresultaten op basis van drie windstations weergegeven: Vlissingen, Stavenisse en BG2. De rode lijn geeft de gemeten waterstand weer.



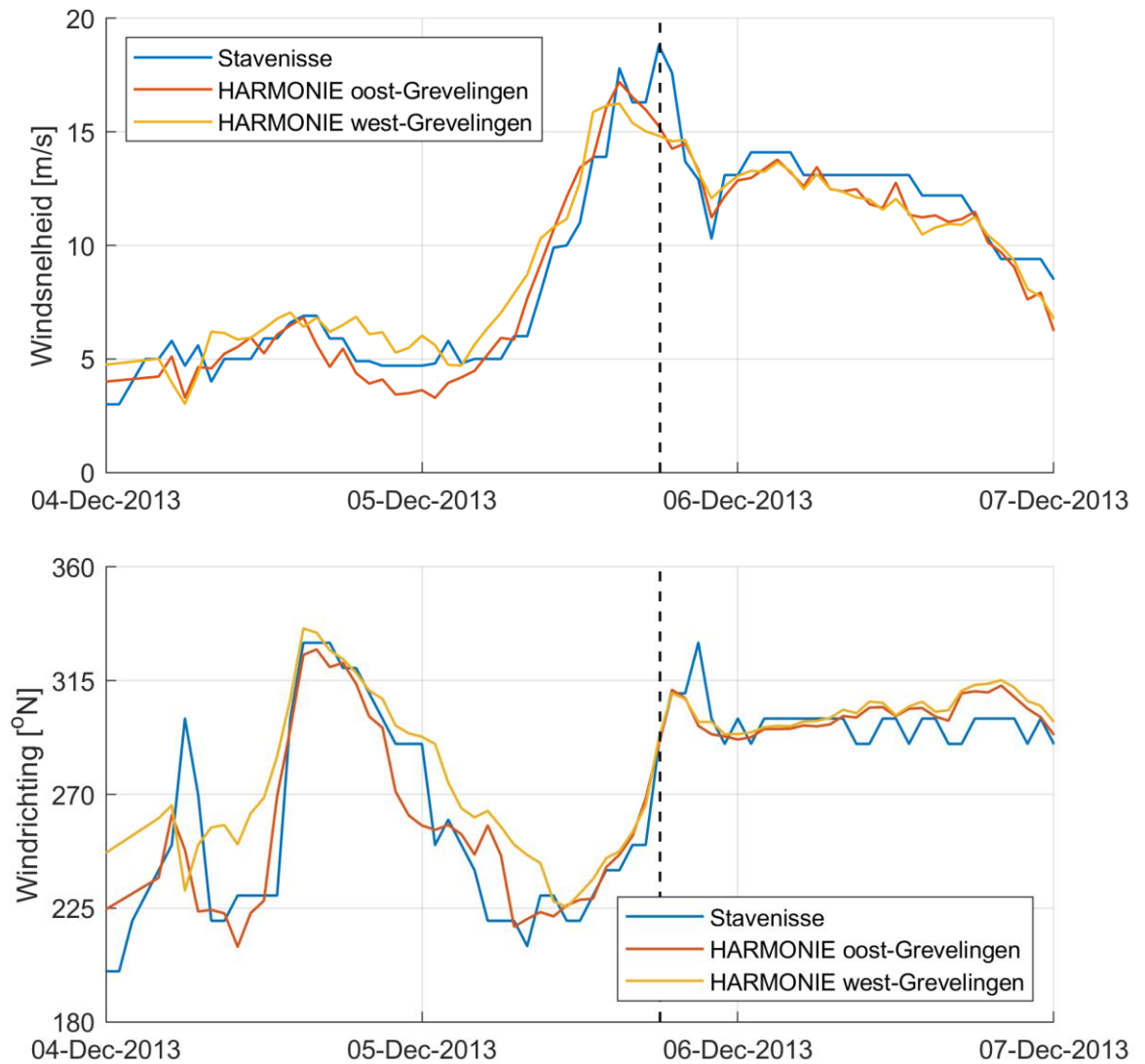
Figuur 5-6 Waterstandverloop tijdens de storm van oktober 2002 voor Brouwerssluis binnen, Bommeneede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: Vlissingen (60 min.), zwart: Stavenisse (60 min.) en magenta: BG2 (10 min.)

Het gebruik van de winddata van station Vlissingen en BG2 zorgen voor een grotere stormopzet dan het meer landinwaarts gelegen meetstation Stavenisse. Tijdens de eerste piek in de waterstand (op de vroege ochtend van 26 oktober) wordt hierdoor de afwijking ten opzichte van de gemiddelde waterstand overschat, de berekende waterstand op basis van meetstation Stavenisse geeft een betere overeenkomst met de gemeten waterstand. De stormopzet tijdens de piek van de storm (in de middag van 27 oktober) wordt het best voorspeld door de simulatie waarin de windgegevens van meetstation BG2 gebruikt zijn. Met de data van meetstation Stavenisse wordt de stormopzet iets onderschat. Meetstation Vlissingen ligt van de gebruikte meetstations geografisch gezien het verst weg van de Grevelingen en dit geeft waarschijnlijk de verklaring voor het afwijken van het tijdstip waarop de hoogste/laagste waterstand in het D-HYDRO-model van de Grevelingen bereikt wordt.

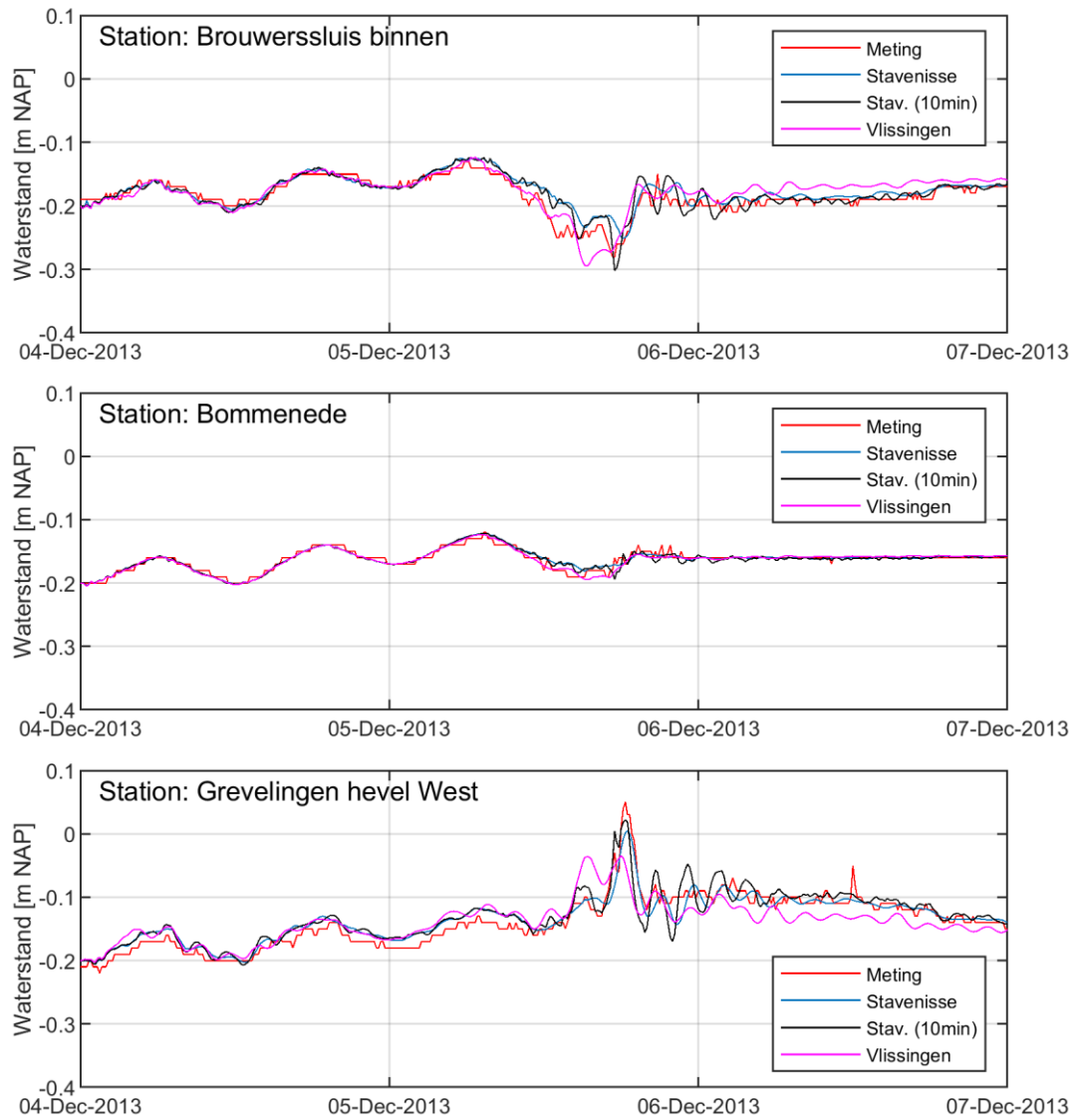
Vergelijkbare afbeeldingen, maar dan voor stormperiode december 2013, zijn opgenomen in Figuur 5-8 en Figuur 5-9. Voor deze periode zijn naast de eerder genoemde meetstations ook meetstation Bruinisse en de windgegevens met een 10-minuutsinterval van Stavenisse beschikbaar.

Omdat in operationele toepassing ook de windforcering op basis van HARMONIE relevant is, is naast bovenstaande station ook een tijdserie op basis van het ruimtelijk-variërende HARMONIE-model van het KNMI gebruikt. In Figuur 5-7 worden de windsnelheid en -richting uit HARMONIE getoond van een punt in het oosten en het westen van het Grevelingenmeer. Als referentie zijn ook de meetgegevens van station Stavenisse geplote. De zwarte stippellijn geeft het moment van grootste windsnelheid van meetstation Stavenisse aan. Deze piek is niet terug te zien in de modelvoorspelling van HARMONIE. Verder valt op dat het gebruik van ruimtelijk-variërende wind (in deze beperkte vergelijking van slechts 1 periode) niet noodzakelijk lijkt aangezien het model van KNMI vergelijkbare windsnelheden en -richtingen berekent voor het oosten en westen van de Grevelingen.

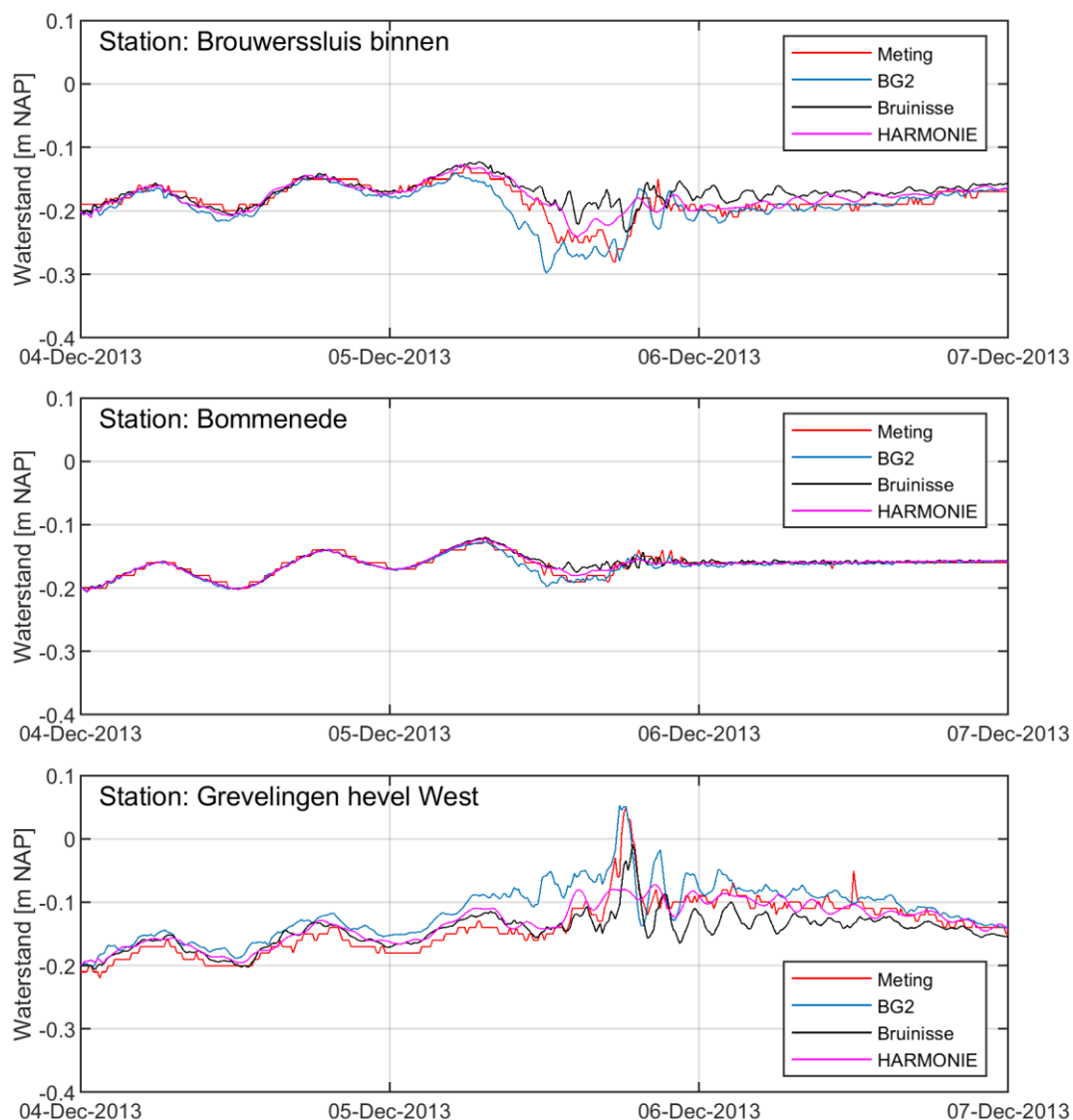
Voor een eerste test waarbij het Grevelingen-model geforceerd wordt met HARMONIE-gegevens, is gebruik gemaakt van slechts 1 punt uit HARMONIE (in het midden van het modeldomein) en een tijdreeks van de windsnelheid en -richting. Het direct aansluiten van de HARMONIE-uitvoer (windschuifspanningen op een sferisch grid) was nog niet mogelijk in de huidige software.



Figuur 5-7 Windsnelheid (m/s) en -richting (graden t.o.v. het Noorden) in meetstation Stavenisse en uit het KNMI HARMONIE-model tijdens de Sinterklaasstorm (december 2013)



Figuur 5-8 Waterstandverloop tijdens de Sinterklaasstorm voor Brouwerssluis binnen, Bommenede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: Stavenisse (60 min.), zwart: Stavenisse (10min.), magenta: Vlissingen (60 min.))



Figuur 5-9 Waterstandverloop tijdens de Sinterklaasstorm voor Brouwerssluis binnen, Bommeneede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: BG2 (10 min.), zwart: Bruinisse (10 min.) en magenta: HARMONIE (60 min.))

Opvallend is dat tijdens de Sinterklaasstorm de modelresultaten op basis van meetstation BG2 substantieel afwijken van de gemeten waterstand, voor de stormperiode oktober 2002 gaf dit station een betere voorspelling. Ook de reproductie van de waterstanden op basis van de meetgegevens van Vlissingen en Bruinisse wijkt op sommige momenten erg af van de geobserveerde waterstandsveranderingen. Meetstation Stavenisse blijkt het meest geschikt om het waterstandverloop tijdens de storm te modelleren.

Wanneer de berekende waterstanden op basis van de windtijdreeks van meetstation Stavenisse voor de verschillende intervallen (10 min. en 60 min.) vergeleken wordt, is te zien dat er niet alleen kleinere fluctuaties ten opzichte van de gemiddelde waterstand gemodelleerd worden maar dat er ook een verschuiving in de fase en een vergroting van de uitwijking van de piekstormopzet is. De hogere tijdsresolutie komt de reproductie van de waterstanden tijdens deze storm ten goede.

De stormopzet wordt niet juist gemodelleerd in de modelsom waarin de HARMONIE-gegevens als modelinvoer gebruikt zijn. Dit komt waarschijnlijk doordat de windsnelheid op dat moment, aangegeven met de zwarte stippellijn in Figuur 5-7, onderschat wordt door HARMONIE. De

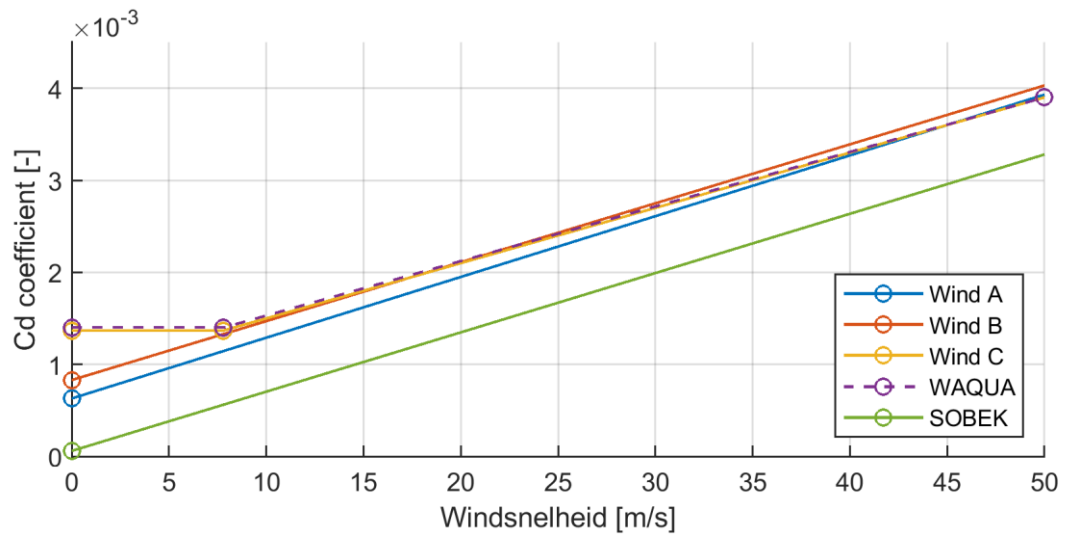
magnitude wordt met ca. 20% onderschat tijdens de piek van de storm, dit betekent een onderschatting van de windschuifspanning van ongeveer 40%. Het gebruik van HARMONIE-gegevens zou in een later stadium nader onderzocht moeten worden.

5.2.2.2 Windcoëfficiënten

In de vorige paragraaf is gevonden dat met het gebruik van de windsnelheid en -richting van meetstation Stavenisse de beste reproductie van de stormopzet gehaald kon worden (in een hindcast). In deze paragraaf wordt op basis van meetstation Stavenisse verschillende vertalingen van windgegevens (windsnelheid en -richting) naar schuifspanningen op het wateroppervlak getoetst. Er is gekozen om de 60-minuutstijdreeks te gebruiken aangezien deze voor beide stormperiodes beschikbaar is. In Tabel 5.5 is een overzicht van verschillende toegepaste windcoëfficiënten gegeven. In Figuur 5-10 is de vertaling van windsnelheid naar wind drag coëfficiënt gevisualiseerd voor windforcering A, B en C.

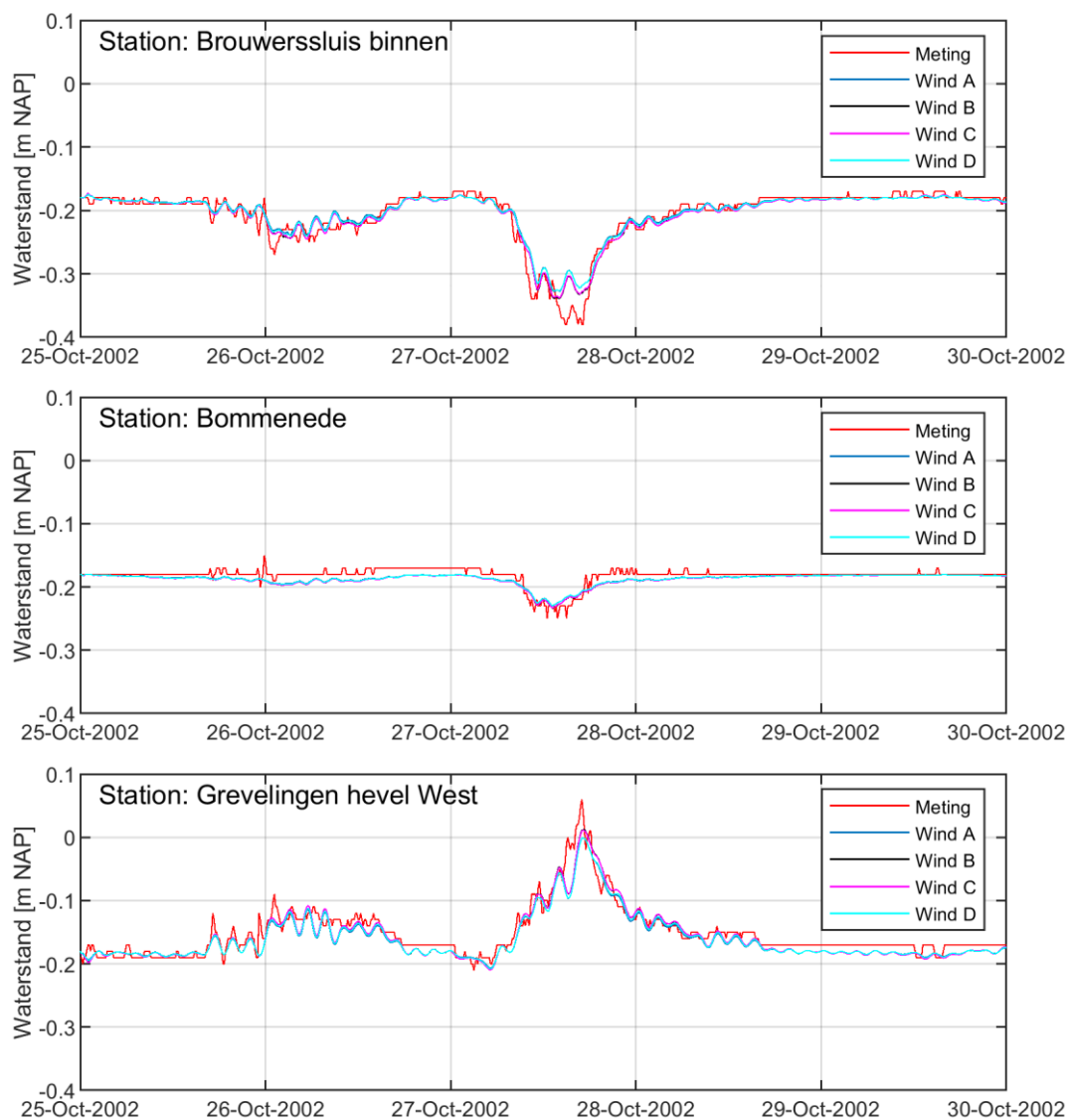
Tabel 5.5 Overzicht van verschillende toegepaste windcoëfficiënten

Windforcering	Omschrijving
Wind A	Windforcering volgens de generieke instellingen voor D-HYDRO (Minns et al., 2019): Smith & Banke; break points: 6,3E-4 (0 m/s) en 7,23d-3 (100 m/s).
Wind B	Windforcering zoals toegepast in het Delft3D 4-model van de Grevelingen (Spiteri & Nolte, 2010): Smith & Banke; break points: 8,3E-4 (0 m/s) en 7,23d-3 (100 m/s)
Wind C	Windforcering zoals toegepast in het D-HYDRO-model van het Markermeer en de Veluwerandmeren (Genseberger et al., 2018): Smith & Banke; break points: 1,3667E-3 (7,77886 m/s) en 3.9E-3 (50 m/s)
Wind D	Windforcering uit HARMONIE met bijbehorende Charnock-coëfficiënt voor meren van 0,015.

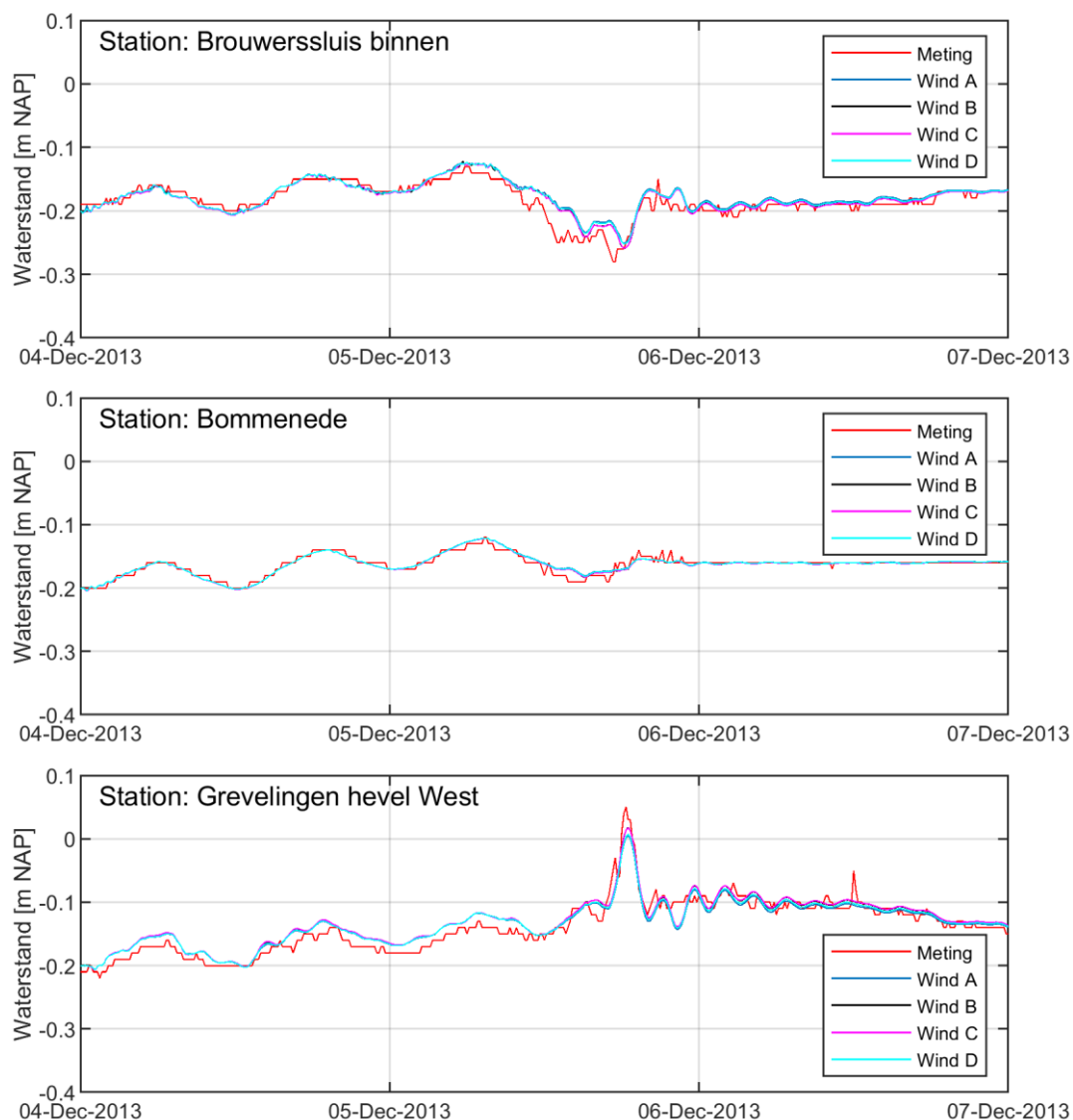


Figuur 5-10 Wind drag coëfficiënt als functie van de windsnelheid voor windforcering A, B en C. Daarnaast zijn de wind drag coëfficiënten voor het WAQUA- en SOBEK-model van de Grevelingen weergegeven.

In Figuur 5-11 en Figuur 5-12 is het waterstandverloop tijdens de storm van oktober 2002 en december 2013 voor Brouwerssluis binnen, Bommende en Grevelingen hevel West in verschillende subplots weergegeven. De gekleurde lijnen geven het verschil in gemodelleerde waterstanden aan wanneer gebruik gemaakt wordt van verschillende windforceringen/windcoëfficiënten.



Figuur 5-11 Waterstandverloop tijdens de storm van oktober 2002 voor Brouwerssluis binnen, Bommenede en Grevelingen hevel West (rood: meting, overige lijnen: verschillende windcoëfficiënten zie Tabel 5.5)



Figuur 5-12 Waterstandverloop tijdens de storm van december 2013 (Sinterklaasstorm) voor Brouwerssluis binnen, Bommenede en Grevelingen hevel West (rood: meting, overige lijnen: verschillende windcoëfficiënten zie Tabel 5.5)

Tijdens de pieken van de storm zit de windsnelheid grofweg tussen de 10 – 20 m/s. Zoals ook af te lezen is uit Figuur 5-10 is voor deze windsnelheden de wind drag coëfficiënt van windforcering B en C zo goed als gelijk. Dit verklaart dan ook dat dit geen zichtbaar verschil in gemodelleerde waterstanden geeft.

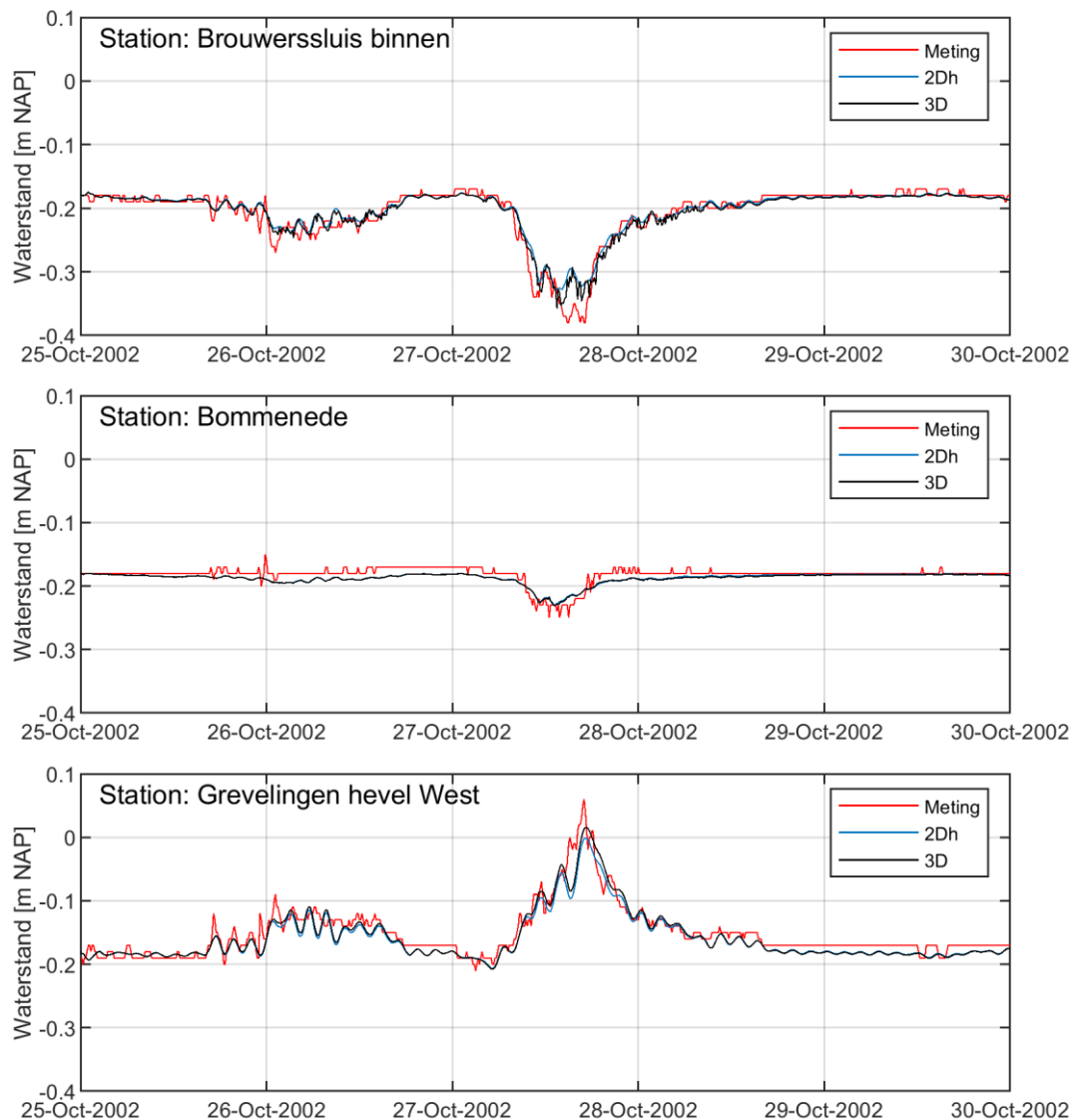
In meteorologische modellen wordt veelal met een Charnock-formulering gewerkt om het verband tussen de windsnelheid en de Cd-coëfficiënt te berekenen. Wanneer de windgegevens uit een meteorologisch model worden gebruikt, wordt veelal de Charnock-formulering en -coëfficiënt uit het meteorologische model overgenomen in het hydrodynamische model om zo een consistente aanpak te hanteren.

De gevoeligheidstest waarin de Charnock-formulering en bijbehorende Charnock-coëfficiënt is toegepast, leidt tijdens deze storm tot zeer vergelijkbare modelresultaten als het gebruik van windforcering A.

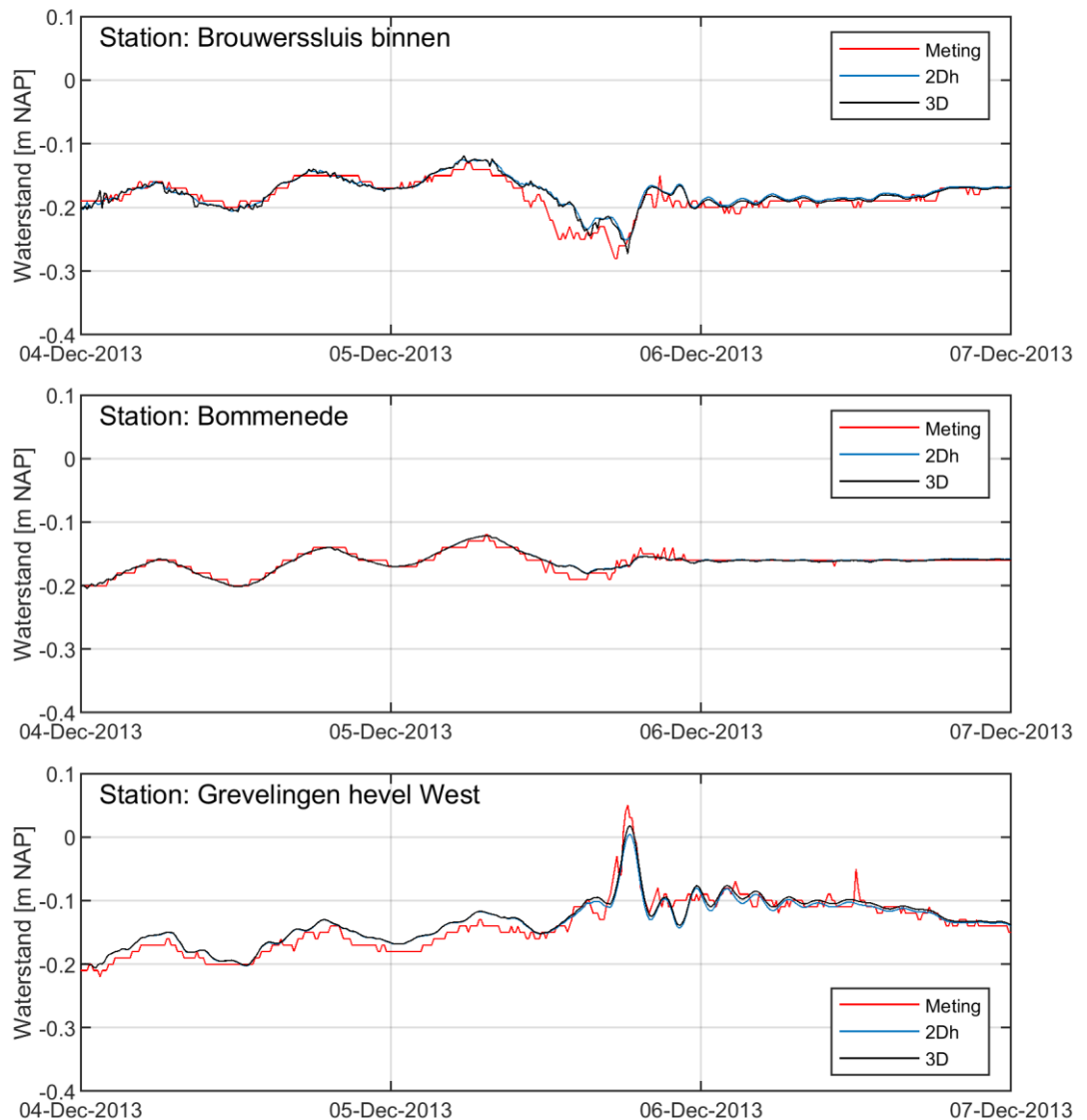
De gevoeligheid van de toegepaste windforcering op de berekende stormopzet is beperkt. Er is daarom gekozen om aan te sluiten bij de generieke instellingen voor D-HYDRO-model en voor windforcering A te kiezen. De andere windforceringen leiden bij een gegeven windsnelheid tot iets hogere Cd-coëfficiënten, in de modelresultaten leidt dit tot 1 a 2 cm verschil in maximale/minimale opzet tijdens het hoogtepunt van de storm.

5.2.2.3 2Dh versus 3D

Om het effect van dieptegemiddeld- (2Dh) versus 3D-modellering vast te stellen, zijn de stormperiodes ook gemodelleerd met een 2Dh-versie van het Grevelingenmodel. Figuur 5-13 en Figuur 5-14 tonen de gemeten waterstanden (rood) en berekende waterstanden (zwart: 3D en blauw: 2Dh) voor de drie waterstandstations.



Figuur 5-13 Waterstandverloop tijdens de storm van oktober 2002 voor Brouwerssluis binnen, Bommeneede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: 2Dh en zwart: 3D)



Figuur 5-14 Waterstandverloop tijdens de storm van december 2013 (Sinterklaasstorm) voor Brouwerssluis binnen, Bommenede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: 2Dh en zwart: 3D)

Op basis van bovenstaande figuren kan gesteld worden dat het 3D-model een iets hogere piekwaterstand berekent en dat de 3D-modelresultaten daardoor beter overeenkomen met de gemeten piekwaterstanden.

Het verschil in rekentijd tussen beide modellen is (afhankelijk van de storm) ongeveer een factor 3,5 (bij een gelijk aantal partities). Ondanks dat de 3D-versie van het model de piekwaterstand iets beter berekent, kan voor het modelleren van stormopzet gebruik worden gemaakt van een diepte-gemiddeld (2Dh) model omdat de additionele opzet door 3D-modellering relatief klein is ten opzichte van de totale stormopzet.

5.2.2.4 Overige instellingen

Naast bovenstaande parameters zijn er nog enkele gevoeligheidssommen uitgevoerd. Een overzicht van de parameters die aangepast zijn en de toegepaste waarden, zijn te vinden in Tabel

5.6. De conclusies op basis van deze tests zijn hieronder beschreven, de bijbehorende figuren (voor de stormperiode in december 2013) staan in bijlage C.7.

Tabel 5.6 Overzicht van parameters en de toegepaste waarden in de gevoeligheidssommen

Parameter	Waarden		
UnifFrictCoef (bodemruwheid)	0,020 s/m ^{1/3}	0,023 s/m ^{1/3}	0,026 s/m ^{1/3}
Rhomean (dichtheid water)	1000 kg/m ³	1023 kg/m ³	1029 kg/m ³
Rhoair (dichtheid lucht)	1,205 kg/m ³		1,2265 kg/m ³
Relativewind	0		1
Kmx	0		1
Windhuorzwsbased	0		1
Windpartialdry	0		1

Een hogere Manning-coëfficiënt (een 'ruwere' bodem) zorgt voor een iets lagere piekwaterstand. Het effect is echter relatief klein (minder dan 1 cm) ten opzichte van de totale opzet. Aangezien het aanpassen van de bodemruwheid weinig effect heeft, de eerder gekozen Manning-coëfficiënt van 0,020 s/m^{1/3} al relatief glad is en een aanpassing van de bodemruwheid mogelijk ook een herkalibratie van zout/temperatuur vraagt vanwege het effect op verticale menging, is besloten de bodemruwheid niet aan te passen.

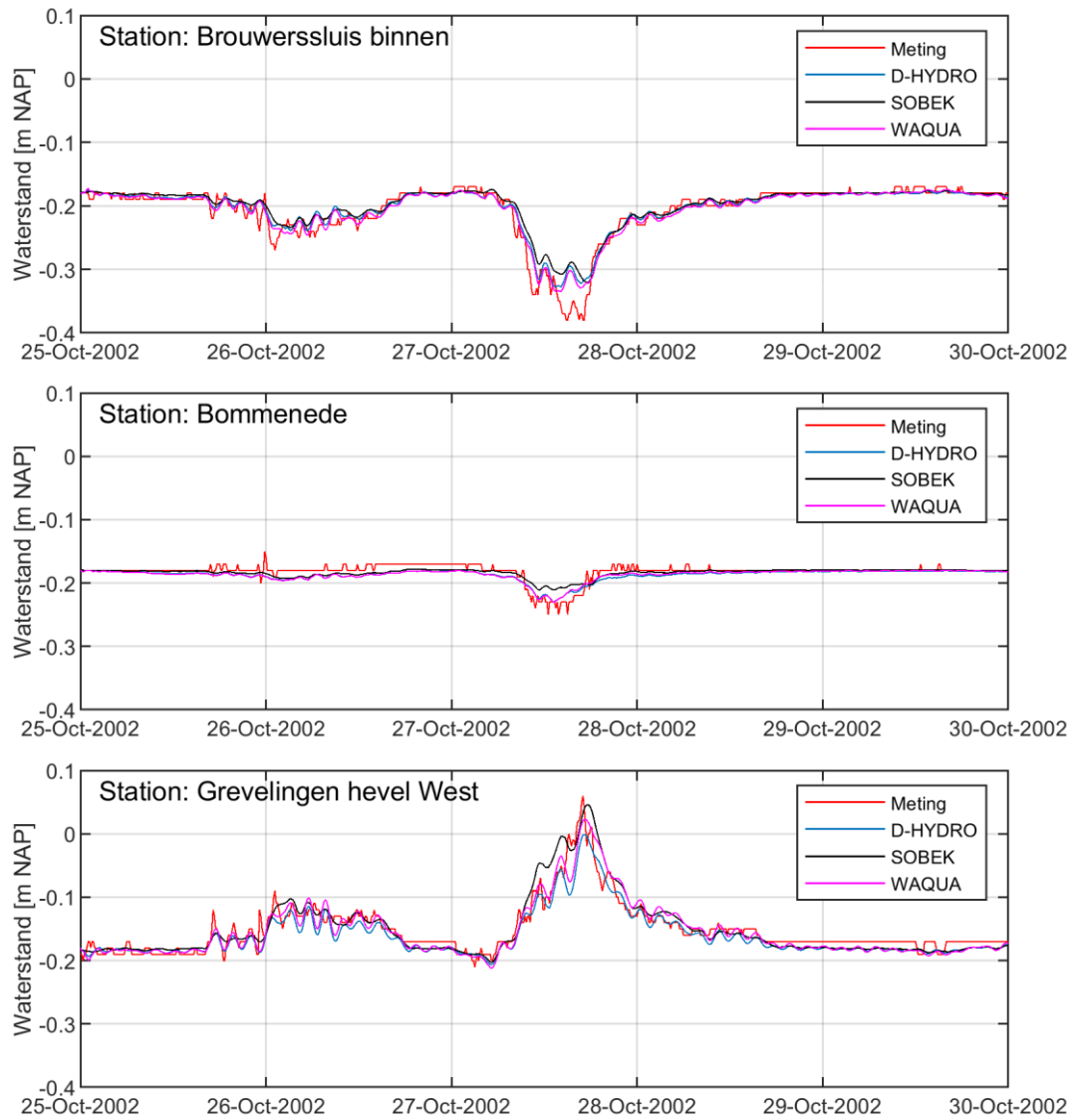
Het keyword Windhuorzwsbased (dat bepaalt of de lokale diepte in het snelheidspunt of waterstandspunt gebruikt wordt in de berekening van de windschuifspanningsterm) heeft/had een andere default waarde in 2D- en 3D-modellering. Deze waarde staat in zowel 2D- als 3D-simulaties op 0 (snelheidspunt) om een eerlijke vergelijking te maken. Deze instelling (Windhuorzwsbased = 0) resulteert in een iets hogere opzet; dit is te verklaren doordat de lokale diepte in het snelheidspunt per definitie ondieper ligt dan het waterstandspunt (bij de standaardinstellingen voor BedlevType en Conveyance2D).

Overige parameters die effect hebben op de gemodelleerde windopzet, maar een verwaarloosbare invloed bleken te hebben op de berekende stormopzet in het Grevelingenmeer zijn: Windpartialdry (reducer windstress op flowlink die deels droog is), Rhomean (dichtheid van het water), Rhoair (dichtheid van de lucht), kmx = 0 of 1 (beide waarden geven een tweedimensionaal model, maar in de D-Flow FM code wordt in sommige routines anders afgehandeld) en Relativewind (gebruik windsnelheid t.o.v. stroming aan het wateroppervlak).

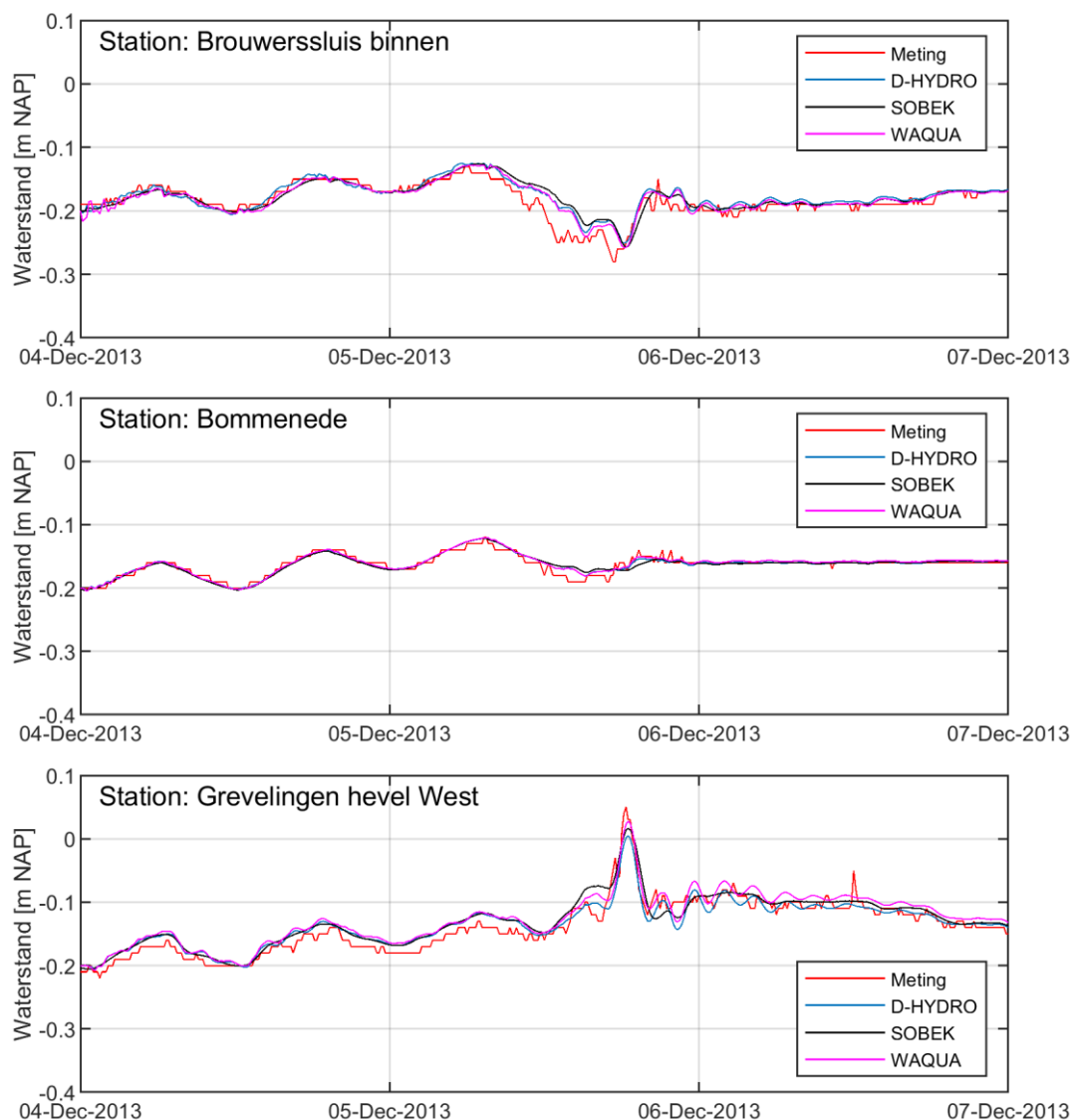
5.2.3

Vergelijking met het WAQUA- en SOBEK3-model van de Grevelingen

In Figuur 5-15 en Figuur 5-16 is voor beide stormperiodes de vergelijking gemaakt tussen het gemeten waterstandverloop en de berekenden waarden van het 2Dh D-HYDRO-, SOBEK3- en WAQUA-model.



Figuur 5-15 Waterstandverloop tijdens de storm van oktober 2002 voor Brouwerssluis binnen, Bommeneede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: 2Dh D-HYDRO, zwart: SOBEK en magenta: WAQUA)



Figuur 5-16 Waterstandverloop tijdens de storm van december 2013 (Sinterklaasstorm) voor Brouwerssluis binnen, Bommeneede en Grevelingen hevel West (rood: meting, blauw: 2Dh D-HYDRO, zwart: SOBEK en magenta: WAQUA)

Het 2Dh D-HYDRO-model geeft zeer vergelijkbare voorspellingen van de stormopzet als het SOBEK3- en het WAQUA-model van de Grevelingen. NB: dezelfde tijdreeks van windforcering is gebruikt en ook de wind-coëfficiënten zijn vergelijkbaar (zie Figuur 5-10). De piekwaterstanden worden door het zesde-generatie model onderschat. Dit zou verbeterd kunnen worden door de windcoëfficiënten aan te passen zodat hogere windsnelheden tot hogere wind drag coëfficiënt leiden dan dat nu gebeurt. Dit zal als resultaat hebben dat met name de reproductie van de piekwaterstanden toeneemt. Daarnaast geeft het gebruik van windgegevens met een hogere temporele resolutie ook een verbetering van de voorspelling van de piekwaterstanden.

5.2.4 Conclusie

Het gevoeligheidsonderzoek naar de stormopzet heeft aangetoond dat de berekende opzet en afwaaiing vooral beïnvloed wordt door de keuze van het gebruikte meetstation en de winddrag-coëfficiënten. Voor het specifiek modelleren van stormopzet in de Grevelingen wordt, voor hindcasts, aangeraden de windgegevens van station Stavenisse te gebruiken aangezien deze voor de beste reproductie van het waterstandverloop zorgden. Het toepassen van hogere winddrag-coëfficiënten zal tot hogere piekwaterstanden leiden. Dit verbetert het berekenen van deze minimale/maximale waterstanden iets, maar er zal dan van de standaard D-HYDRO-instellingen afgeweken moeten worden. Door gebruik te maken van 10-minuutsgegevens in plaats van 60-minuutsgegevens zal de modelprestatie ook verbeteren.

Er is een data-modelvergelijking met HARMONIE uitgevoerd aangezien dit als windforcering in operationele setting gebruikt kan worden. Hier is slechts een eerste test gedaan (met een locatie in het midden van het Grevelingenmeer) en is niet het effect van verschillende meetlocaties uit HARMONIE meegenomen.

Het gevoeligheidsonderzoek heeft verder aangetoond dat meetstation Vlissingen niet de meest geschikte bron van meetgegevens is voor het berekenen van de stormopzet, maar dat dit station afgezien van het exacte moment van optreden wel vergelijkbare waterstandsuitwijkingen geeft als de metingen (zie figuren in paragraaf 5.2.2.1). Hierdoor is het uiteindelijke effect van de windforcering op de (verticale) menging in een jaarsom met saliniteit en temperatuur wel in de juiste mate aanwezig en kunnen de meetgegevens van dit observatiestation dus goed gebruikt worden als modelinvoer voor jaarsommen. Er wordt afgeweken van meetstation Stavenisse omdat ter plaatse van meetlocatie Vlissingen wel de benodigde meteo-gegevens voor de temperatuurmodellering gemeten worden.

Aangezien de kalibratie van de winddrag-coëfficiënten afhankelijk is van het toegepaste meetstation en het resterende verschil in piekwaterstand enkele centimeters is, is besloten om deze waarden niet aan te passen en gebruik te maken van de standaardinstellingen voor D-HYDRO-modellen. Bij toepassing binnen BOI zal mogelijk, wanneer bekend is van welk meetstation de windgegevens gebruikt zullen worden, opnieuw naar deze winddrag-coëfficiënten gekeken moeten worden.

6 Validatie saliniteit en temperatuur

In deze paragraaf worden de modelresultaten ter validatie van het model voor jaarsom 2000 (paragraaf 6.2.1) en jaarsom 2017 (paragraaf 6.2.2) beschreven en wordt een beperkt aantal figuren gebruikt om deze beschrijving te ondersteunen. Meer figuren van horizontale- en verticale doorsnedes en tijdreeksen in extra GTSO-stations, zijn te vinden in bijlage D.

6.1 Validatiemethodiek

Het model, waarvan de modelopzet is besproken in hoofdstuk 4, wordt gevalideerd op saliniteit en temperatuur op basis van een jaarsom voor het jaar 2000 en 2017.

Met behulp van tijdseries, z,t-diagrammen, dwarsdoorsnedes en horizontale doorsnedes worden de berekende saliniteit en temperatuur vergeleken met de meetgegevens. Deze vergelijking wordt zowel kwantitatief (bias, standaarddeviatie en RMSE) als kwalitatief uitgevoerd.

6.2 Modelresultaten

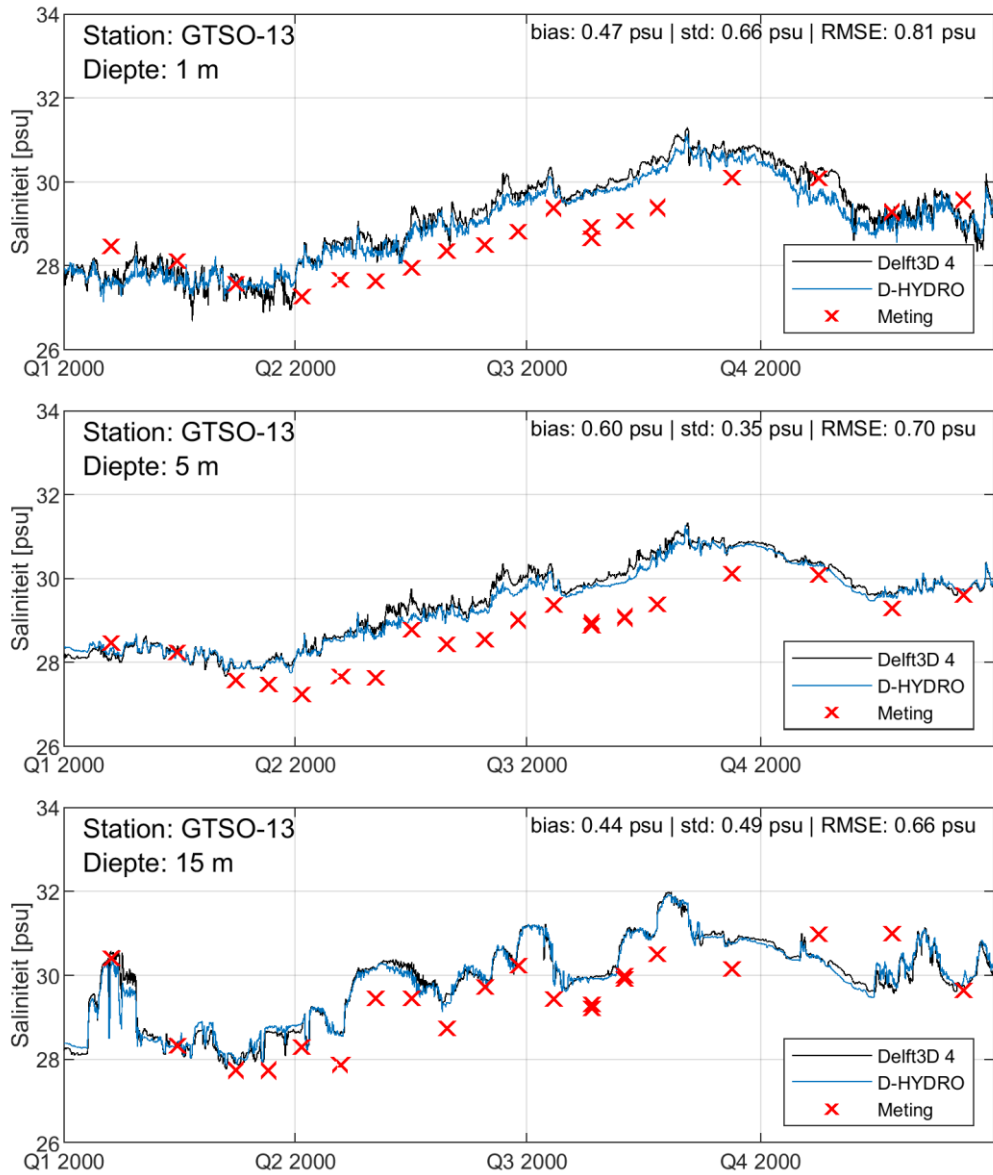
Vergelijkbaar met de kalibratieresultaten, zijn in bijlage D verschillende soorten figuren opgenomen waarin de modelresultaten (saliniteit en temperatuur) van het model voor jaarsom 2000 en 2017 worden vergeleken met de beschikbare metingen. In de rapportage zijn (vergelijkbaar met voorgaande Grevelingen-rapportages) voor de tijdseries en de z,t-plots de meetstations GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 gebruikt. Deze stations liggen goed verspreid in het modeldomein. Voor jaarsom 2017 waren geen meetgegevens beschikbaar in GTSO-19 en is GTSO-18 gebruikt als representatief punt voor het oosten van het Grevelingenmeer. Voor de horizontale- en verticale dwarsdoorsnedes zijn twee momenten gekozen in de zomer waarop temperatuurstratificatie aanwezig is.

6.2.1 Jaarsom 2000

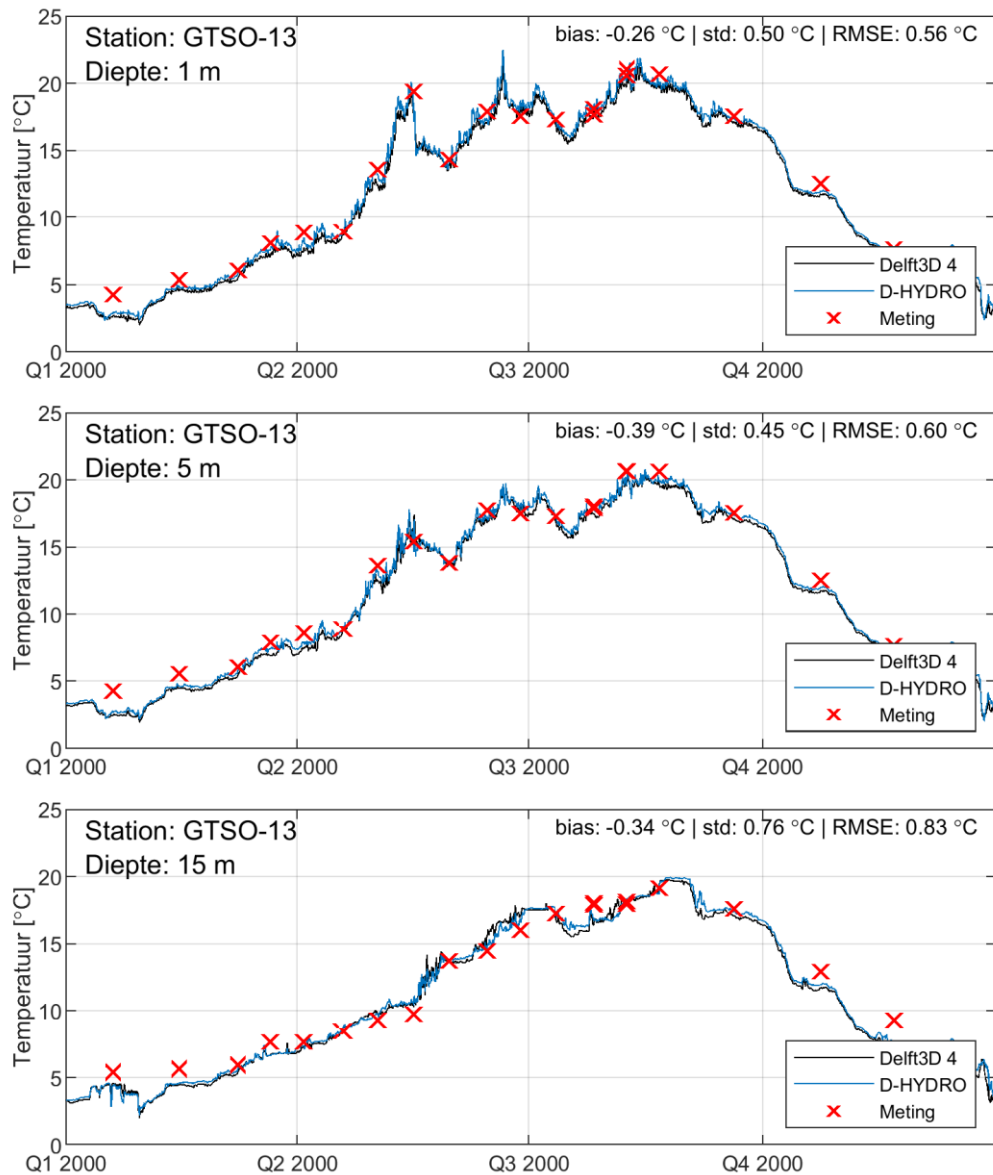
Figuur 6-1 en Figuur 6-2 tonen de tijdreeksen van resp. de saliniteit en temperatuur in GTSO-13 (in het midden van het Grevelingenmeer) van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes.

Uit de tijdreeks van de saliniteit blijkt dat de magnitude van de seizoensvariatie door het model gereproduceerd wordt, maar dat timing afwijkt en de seizoensvariaties vroeger optreden dan in de metingen. Hierdoor is er in de zomerperiode een overschatting van de saliniteit van ongeveer 1 PSU. Dezelfde bevinding werd gedaan door Spiteri & Nolte (2010) met het Delft3D 4-model. Een significant betere overeenkomst tussen model en meting voor jaarsom 2000 werd gevonden in Zijl & Nolte (2006) alsmede met dit model in 5.1.3. Er zijn meerdere aanpassingen in de modelopzet gedaan die de verschillen zouden kunnen verklaren met als belangrijkste verschil de afhandeling van verdamping en de implementatie van Brouwerssluis. Er zijn verschillende testen gedaan om te vinden welke modelkeuze dit tot gevolg had, zodat vervolgens de modelopzet van het D-HYDRO-model op dat vlak verbeterd zou kunnen worden, maar er is geen duidelijke oorzaak gevonden.

De overeenkomst tussen de gemeten en berekende temperatuur is goed. Het D-HYDRO-model presteert zeer vergelijkbaar wanneer vergeleken wordt met de resultaten van het Delft3D 4-model.



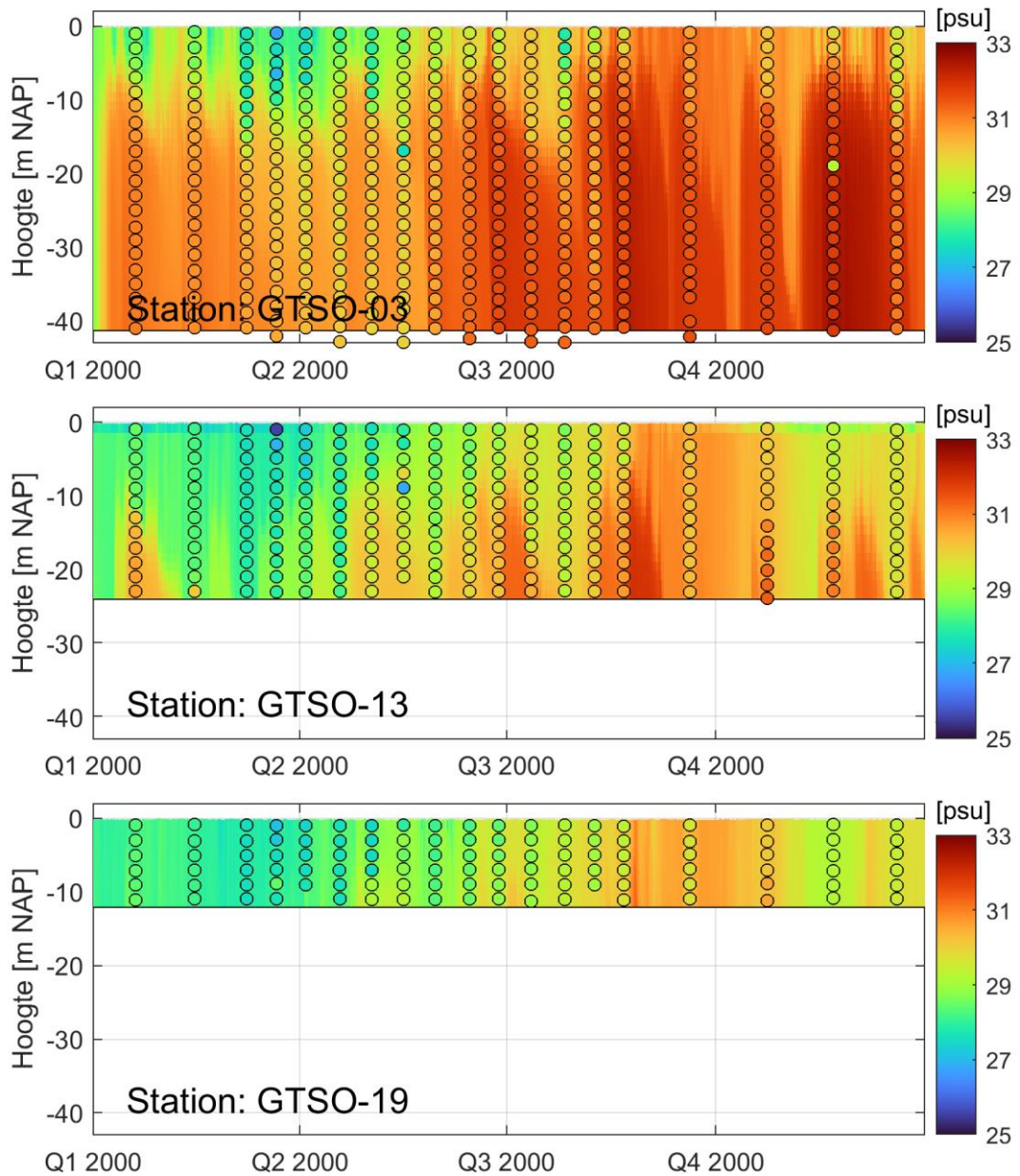
Figuur 6-1 Tijdreeks van de temperatuur in GTSO-13 van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes



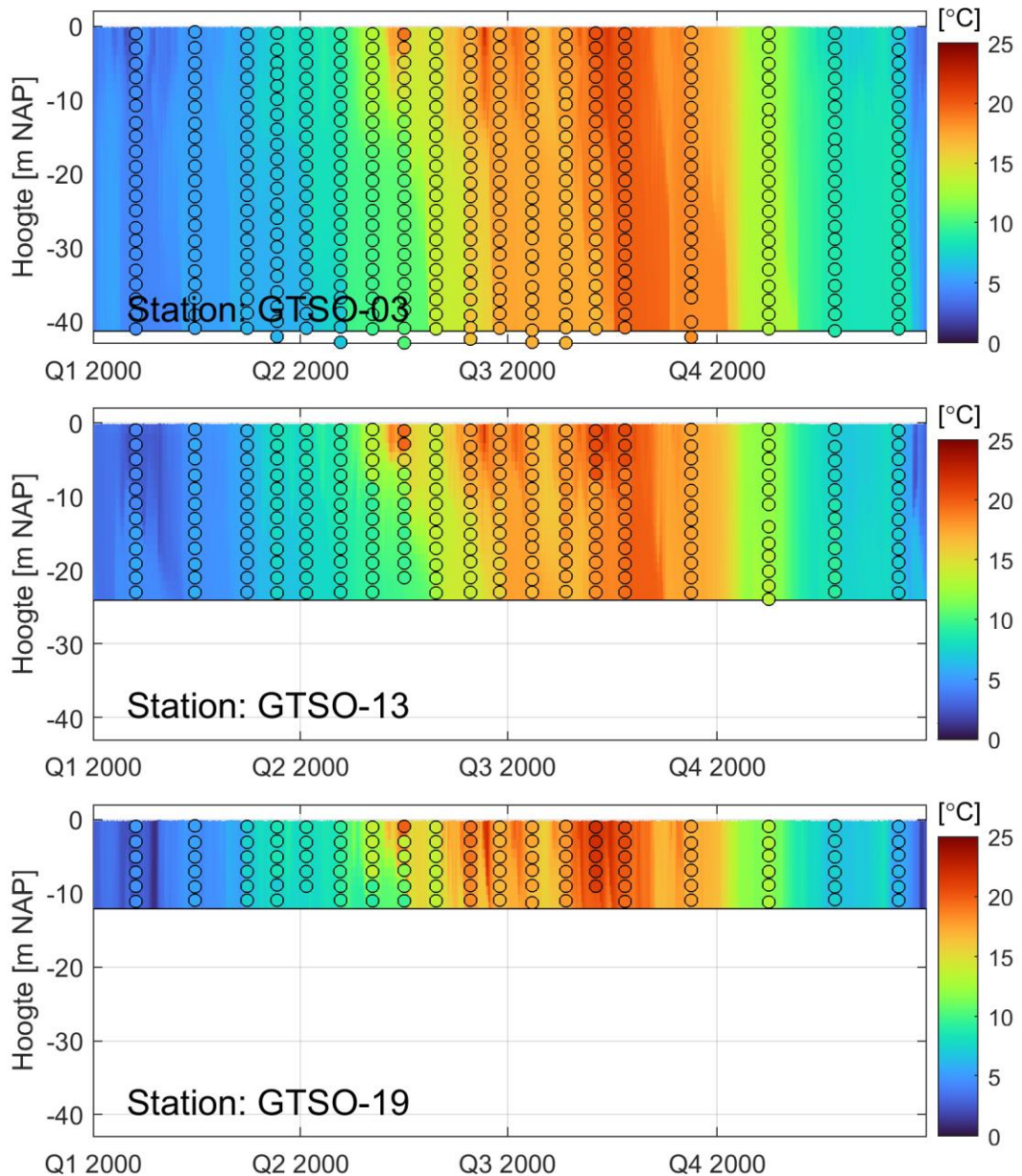
Figuur 6-2 Tijdreeks van de temperatuur in GTSO-13 van het Delft3D 4-model (zwart), het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes

Het z,t-diagram van de berekende saliniteit en temperatuur in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 (weergegeven als achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels) is te vinden in resp. Figuur 6-3 en Figuur 6-4.

Ondanks de hierboven beschreven afwijking in saliniteit die op kan lopen tot circa 1 PSU wordt de mate van stratificatie, de verandering van de saliniteit in de tijd en de verschillen tussen de oost- en westzijde van het Grevelingenmeer goed door het model berekend. Hetzelfde kan gezegd worden over de temperatuur, hier is de overeenkomst van bovengenoemde aspecten tussen de metingen en het model zelfs zeer goed.



Figuur 6-3 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende saliniteit in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels)



Figuur 6-4 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende temperatuur in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-19 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels)

Een overzicht van de bias, standaarddeviatie (std) en RMSE voor alle GTSO-stations voor jaarsom 2000 is te vinden in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Statistische kengetallen van saliniteit en temperatuur voor jaarsom 2000 met D-HYDRO Grevelingen

Saliniteit (PSU)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-01	0.66	1.03	1.22	0.94	1.02	1.39			
GTSO-02	0.79	0.55	0.96	0.85	0.53	1.00	0.66	0.34	0.74
GTSO-03	0.79	0.48	0.92	0.72	0.41	0.83	0.67	0.32	0.75
GTSO-04	0.75	0.46	0.88	0.78	0.39	0.87	0.65	0.34	0.73
GTSO-05	0.75	0.45	0.88	0.56	0.49	0.74	0.65	0.30	0.71
GTSO-06	0.65	0.47	0.80	0.60	0.67	0.90	0.63	0.30	0.70
GTSO-07	0.67	0.46	0.82	0.60	0.29	0.67			
GTSO-08	0.67	0.47	0.82	0.54	0.32	0.63	0.36	0.45	0.58
GTSO-09	0.64	0.45	0.78	0.49	0.37	0.61	0.35	0.46	0.58
GTSO-10	0.68	0.51	0.85	0.55	0.31	0.63			
GTSO-11	0.79	0.70	1.06	0.55	0.33	0.64	0.38	0.52	0.64
GTSO-12	0.71	0.61	0.93	0.54	0.34	0.64	0.40	0.57	0.70
GTSO-13	0.47	0.66	0.81	0.60	0.35	0.70	0.45	0.49	0.66
GTSO-14	0.59	0.39	0.71	0.52	0.34	0.62			
GTSO-15	0.69	0.61	0.92	0.53	0.33	0.62	0.22	0.65	0.69
GTSO-16	0.60	0.36	0.70	0.53	0.33	0.63			
GTSO-17	0.58	0.39	0.70	0.53	0.37	0.64			
GTSO-18	0.61	0.40	0.73	0.48	0.40	0.62			
GTSO-19	0.63	0.40	0.75	0.55	0.38	0.67			
GTSO-20	0.79	0.63	1.01	0.56	0.42	0.71			
Gemiddelde	0.68	0.52	0.86	0.60	0.42	0.74	0.49	0.43	0.68
RMS	0.68	0.55	0.87	0.61	0.45	0.76	0.51	0.45	0.68
Temperatuur (°C)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-01	0.00	0.58	0.58	-0.13	0.50	0.52			
GTSO-02	-0.13	0.56	0.58	-0.15	0.48	0.50	0.10	0.47	0.48
GTSO-03	-0.09	0.55	0.56	-0.06	0.64	0.64	0.10	0.43	0.44
GTSO-04	-0.02	0.58	0.58	-0.19	0.43	0.47	0.06	0.34	0.35
GTSO-05	-0.06	0.56	0.56	-0.19	0.50	0.53	0.08	0.39	0.40
GTSO-06	-0.11	0.49	0.51	-0.25	0.55	0.60	0.07	0.37	0.38
GTSO-07	-0.18	0.53	0.57	-0.22	0.54	0.58			
GTSO-08	-0.24	0.47	0.53	-0.23	0.67	0.71	0.04	0.53	0.53
GTSO-09	-0.20	0.51	0.55	-0.18	0.84	0.86	-0.03	0.61	0.61
GTSO-10	-0.26	0.59	0.64	-0.34	0.41	0.53			
GTSO-11	-0.27	0.55	0.61	-0.25	0.89	0.92	-0.05	0.78	0.78
GTSO-12	-0.28	0.52	0.60	-0.42	0.49	0.65	-0.11	0.78	0.79
GTSO-13	-0.26	0.50	0.56	-0.39	0.45	0.60	-0.34	0.76	0.83
GTSO-14	-0.25	0.52	0.58	-0.38	0.42	0.57			
GTSO-15	-0.30	0.54	0.62	-0.43	0.46	0.63	-0.33	0.83	0.90
GTSO-16	-0.37	0.53	0.64	-0.17	1.20	1.21			
GTSO-17	-0.34	0.56	0.66	-0.31	0.80	0.86			
GTSO-18	-0.50	0.60	0.77	-0.37	0.94	1.01			
GTSO-19	-0.57	0.64	0.85	-0.52	0.75	0.91			
GTSO-20	-0.59	0.92	1.10	-0.59	0.66	0.89			
Gemiddelde	-0.25	0.57	0.63	-0.29	0.63	0.71	-0.04	0.57	0.59
RMS	0.30	0.57	0.65	0.32	0.66	0.74	0.16	0.60	0.62

Om een vergelijking te kunnen maken met het Delft3D 4-model wordt de gemiddelde RMSE (o.b.v. de 20 GTSO-stations) voor saliniteit (Tabel 6.2) en temperatuur (Tabel 6.3) van het voorgaande 3D Grevelingenmodel en het D-HYDRO-model hieronder getoond voor jaarsom 2000.

Tabel 6.2 Gemiddelde statistiek (bias, std, RMSE) saliniteit (PSU) van het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations voor een jaarsom van het jaar 2000

Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Saliniteit (PSU)									
Delft3D 4	0.74	0.55	0.93	0.69	0.47	0.84	0.49	0.47	0.71
D-HYDRO	0.68	0.52	0.86	0.60	0.42	0.74	0.49	0.43	0.68

Tabel 6.3 Gemiddelde statistiek (bias, std, RMSE) temperatuur (°C) van het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations voor een jaarsom van het jaar 2000

Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Temperatuur (°C)									
Delft3D 4	-0.59	0.54	0.82	-0.56	0.63	0.86	-0.17	0.65	0.68
D-HYDRO	-0.25	0.57	0.63	-0.29	0.63	0.71	-0.04	0.57	0.59

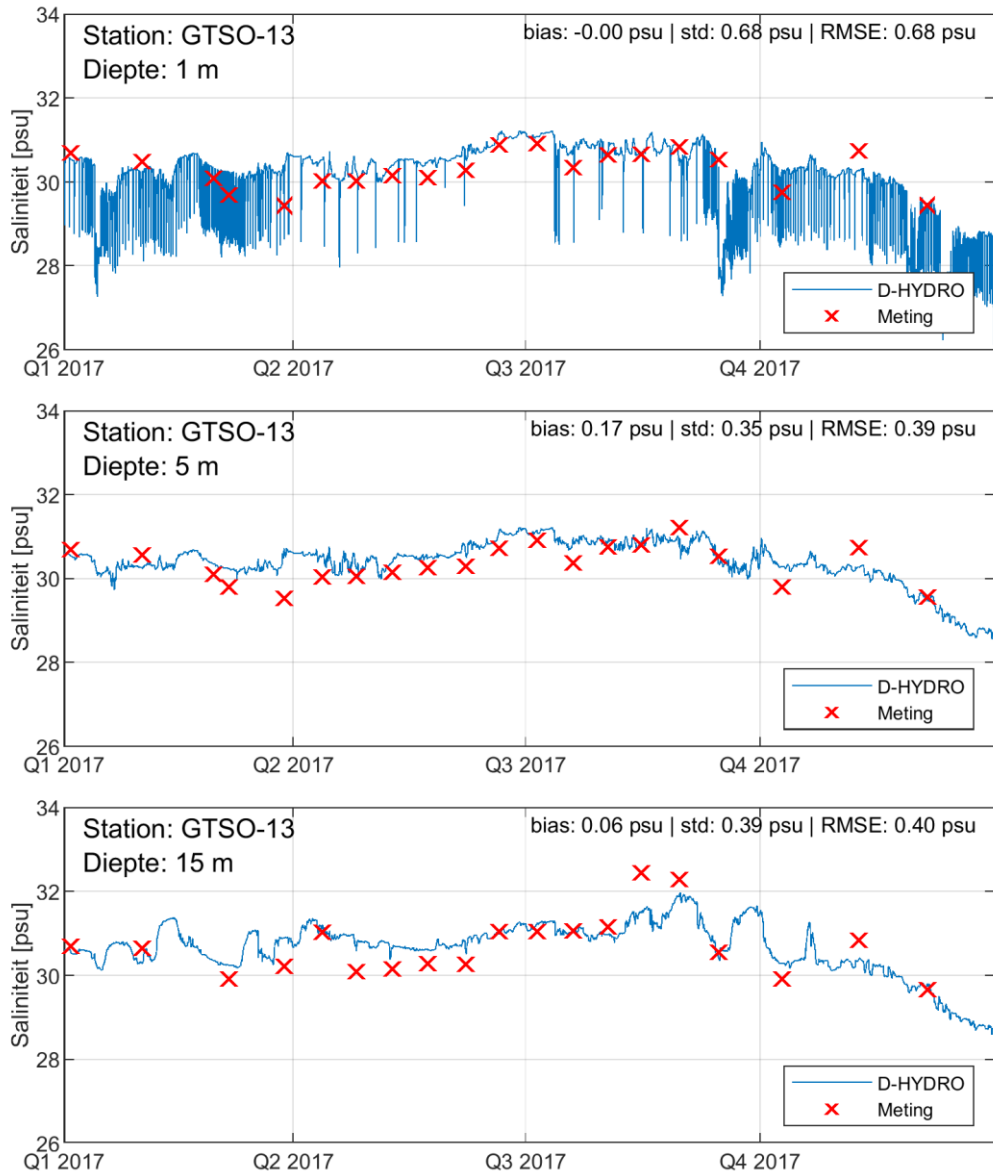
In de validatieperiode, jaarsom 2000, geeft het D-HYDRO-model betere voorspellingen van zowel saliniteit als temperatuur in vergelijking tot het Delft3D 4-model. De gemiddelde RMSE over drie dieptes van saliniteit bedraagt circa 0,76 PSU. De gemiddelde RMSE over drie dieptes van temperatuur is zo'n 0,64 °C.

6.2.2 Jaarsom 2017

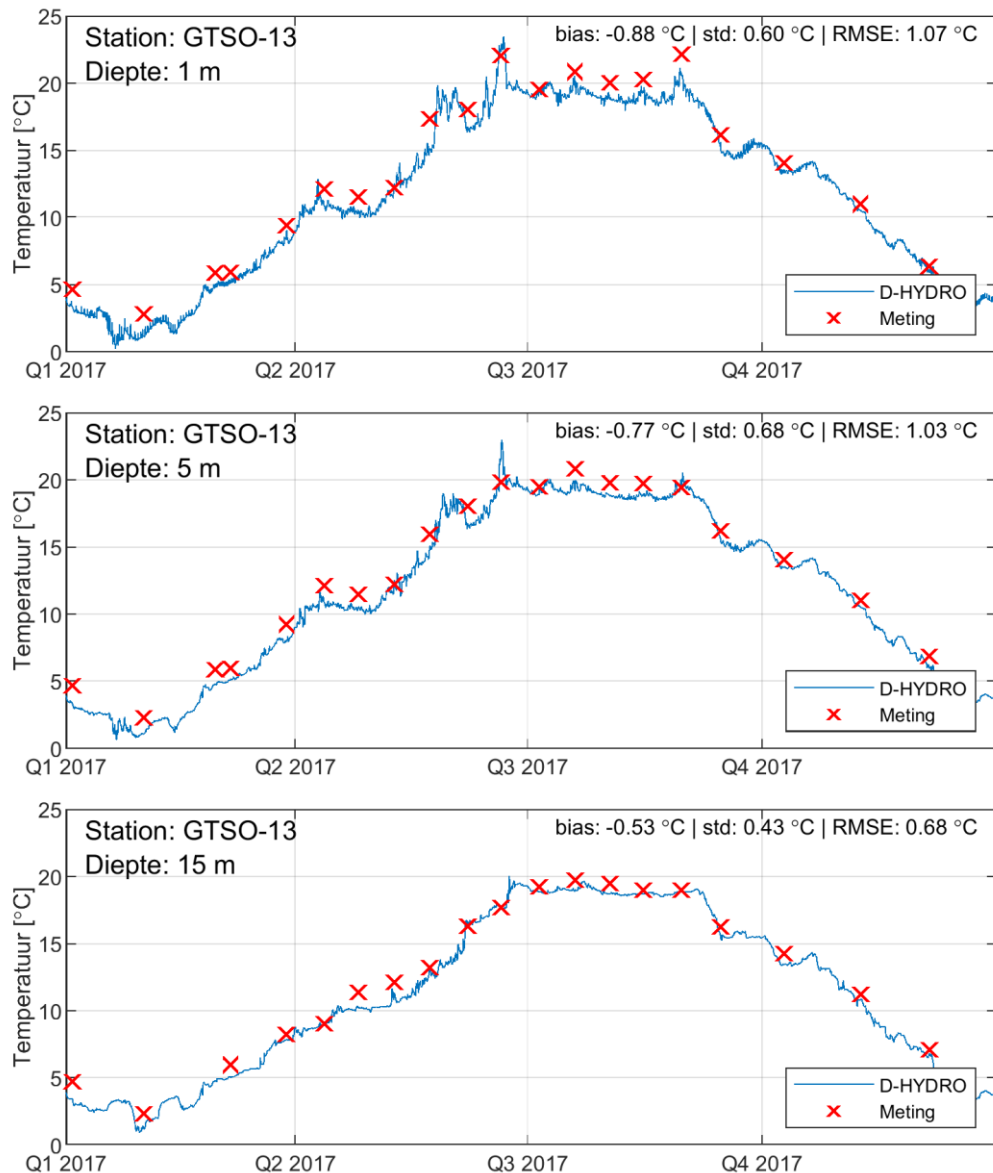
Figuur 6-5 en Figuur 6-6 tonen de tijdreeksen van resp. de saliniteit en temperatuur in GTSO-13 (in het midden van het Grevelingenmeer) van het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes. De (zoetwater)pieken in de saliniteit ter plaatse van GTSO-13 zijn te verklaren door het feit dat dit observatiepunt in de rekencel naast de lozing van poldergemaal Dreischor ligt. Voor dit lozingsdebiet is gebruik gemaakt van de meetgegevens met een hogere frequentie, waardoor de lozing op sommige momenten substantieel hoger is in vergelijking tot de jaarsommen 2000 en 2008.

Vergelijken met jaarsom 2000 en 2008 is de variatie in de gemeten saliniteit in 2017 kleiner. De trend in de saliniteit over het jaar wordt goed door het model gereproduceerd. De temperatuur in de Grevelingen wordt iets onderschat door het model (negatieve bias).

Aangezien er in voorgaande Delft3D 4-modelstudies geen simulatie van het jaar 2017 gemaakt is, kunnen de modelresultaten van het D-HYDRO-model voor deze jaarsom niet worden vergeleken met die van het Delft3D 4-model.



Figuur 6-5 Tijdreeks van de saliniteit in GTSO-13 van het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes



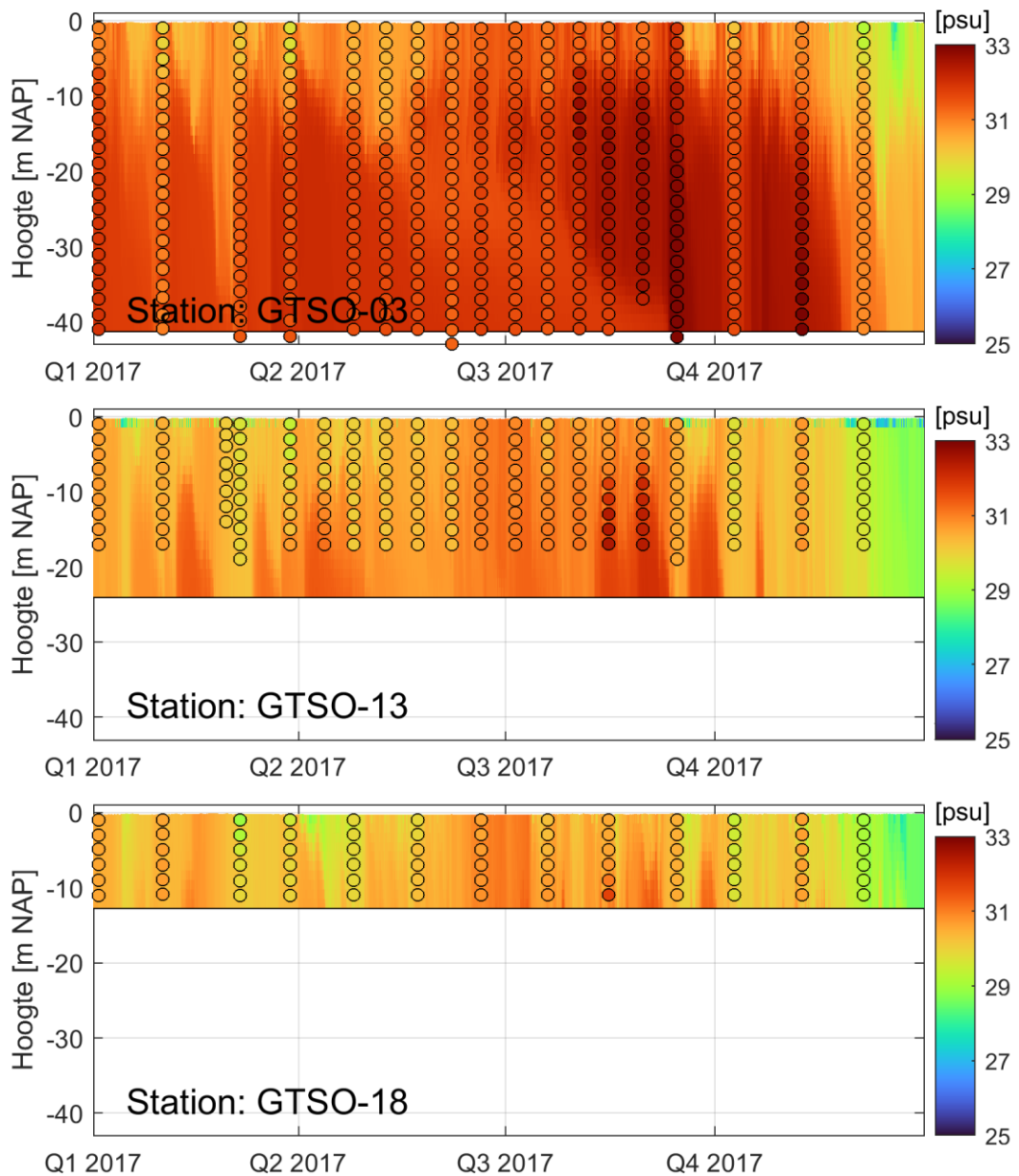
Figuur 6-6 Tijdreeks van de temperatuur in GTSO-13 van het D-HYDRO-model (blauw) en de gemeten waarden (rode kruisjes) op drie verschillende dieptes

Het z,t-diagram van de berekende saliniteit en temperatuur in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-18 (weergegeven als achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels) is te vinden in resp. Figuur 6-7 en Figuur 6-8.

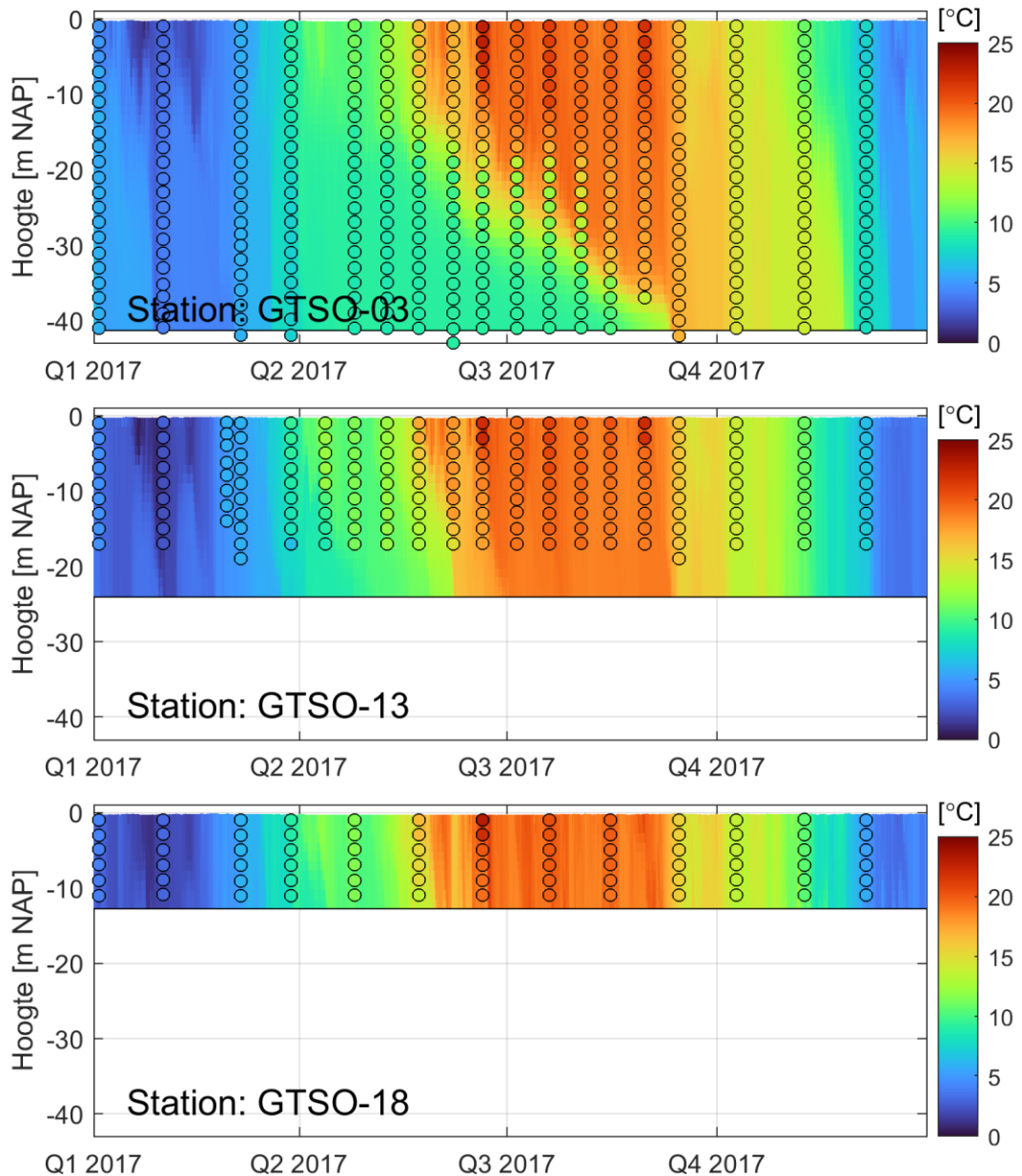
Vooraf nabij de Brouwerssluis (GTSO-03) is stratificatie van saliniteit gemeten. Rond september 2017 is deze stratificatie ook duidelijk zichtbaar in het midden van het meer (GTSO-13). Dit verschil in saliniteit over de waterkolom en de variatie van de saliniteit in de tijd wordt goed door het model gemodelleerd.

Het z,t-diagram van de temperatuur (Figuur 6-8) laat zien dat de berekende temperatuur in deze periode een goede overeenkomst toont met de metingen. In de zomer van 2017 wordt de oppervlaktetemperatuur, en daarmee ook de mate van stratificatie, nabij de Brouwerssluis (GTSO-03) iets onderschat. Dit kan mogelijk worden verklaard door de ontbrekende saliniteitsgegevens bij meetstation *Brouwershavensche Gat 08* (en dus in de randvoorwaarden voor de Brouwerssluis, zie Figuur 4-15). Mogelijk verandert hierdoor in deze korte periode lokaal de hydrodynamica. Ook valt

op dat op deze locatie de thermocline in het model te laag zit. Doordat de thermocline te laag zit (of zelfs een tweede spronglaag mist, mogelijk als gevolg van zoutstratificatie), wordt de warmteflux vanuit de atmosfeer over een groter volume verdeeld. Dit zou ook een verklaring kunnen zijn voor het onderschatten van de oppervlaktetemperatuur rond juni 2017.



Figuur 6-7 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende saliniteit in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-18 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels)



Figuur 6-8 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende saliniteit in GTSO-03, GTSO-13 en GTSO-18 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels)

Een overzicht van de bias, standaarddeviatie (std) en RMSE voor alle GTSO-stations voor jaarsom 2017 is te vinden in Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Statistische kengetallen van saliniteit en temperatuur voor jaarsom 2017 met D-HYDRO Grevelingen

Saliniteit (PSU)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-01									
GTSO-02	0.30	0.38	0.49	0.35	0.38	0.52	0.11	0.36	0.38
GTSO-03	0.24	0.36	0.43	0.30	0.32	0.45	0.06	0.36	0.36
GTSO-04	0.28	0.36	0.45	0.32	0.39	0.50	0.15	0.31	0.34
GTSO-05									
GTSO-06	0.20	0.35	0.41	0.23	0.39	0.45	0.19	0.39	0.43
GTSO-07	0.16	0.37	0.40	0.15	0.37	0.40			
GTSO-08	0.18	0.40	0.43	0.14	0.39	0.41	-0.08	0.33	0.34
GTSO-09									
GTSO-10	0.14	0.38	0.40	0.13	0.37	0.39			
GTSO-11									
GTSO-12	0.14	0.33	0.36	0.14	0.33	0.36	-0.02	0.38	0.38
GTSO-13	0.00	0.68	0.68	0.17	0.35	0.39	0.06	0.39	0.40
GTSO-14	0.12	0.41	0.42	0.09	0.32	0.33			
GTSO-15									
GTSO-16	0.17	0.48	0.51	0.08	0.30	0.31			
GTSO-17									
GTSO-18	0.16	0.55	0.57	0.07	0.34	0.35			
GTSO-19									
GTSO-20	0.04	0.76	0.76	0.14	0.57	0.59			
Gemiddelde	0.16	0.45	0.49	0.18	0.37	0.42	0.07	0.36	0.38
RMS	0.18	0.47	0.50	0.20	0.38	0.43	0.11	0.36	0.38
Temperatuur (°C)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-01									
GTSO-02	-0.75	0.52	0.91	-0.68	0.57	0.89	0.03	0.56	0.56
GTSO-03	-0.72	0.48	0.87	-0.72	0.44	0.85	0.12	0.43	0.44
GTSO-04	-0.74	0.46	0.88	-0.75	0.48	0.89	-0.02	0.43	0.43
GTSO-05									
GTSO-06	-0.78	0.42	0.89	-0.87	0.43	0.97	-0.07	0.46	0.47
GTSO-07	-0.81	0.45	0.92	-0.95	0.43	1.05			
GTSO-08	-0.85	0.59	1.04	-0.83	0.45	0.94	-0.31	0.33	0.45
GTSO-09									
GTSO-10	-0.81	0.53	0.97	-0.92	0.46	1.03			
GTSO-11									
GTSO-12	-0.72	0.44	0.84	-0.98	0.40	1.06	-0.65	0.41	0.77
GTSO-13	-0.88	0.60	1.07	-0.77	0.68	1.03	-0.53	0.43	0.68
GTSO-14	-0.83	0.66	1.06	-0.92	0.28	0.96			
GTSO-15									
GTSO-16	-0.74	0.50	0.90	-0.78	0.41	0.88			
GTSO-17									
GTSO-18	-0.82	0.64	1.04	-0.78	0.40	0.88			
GTSO-19									
GTSO-20	-0.60	0.56	0.83	-0.56	0.60	0.82			
Gemiddelde	-0.77	0.53	0.94	-0.81	0.46	0.94	-0.20	0.44	0.54
RMS	0.78	0.53	0.94	0.82	0.47	0.94	0.34	0.44	0.56

In onderstaande tabellen zijn de gemiddelde RMSE (o.b.v. de 20 GTSO-stations) voor saliniteit (Tabel 6.5) en temperatuur (Tabel 6.6) van het D-HYDRO-model weergegeven voor jaarsom 2017. De beschikbaarheid van metingen over alle 20 GTSO-stations is minder dan in de jaren 2000 en 2008.

Tabel 6.5 Gemiddelde RMSE saliniteit (PSU) van het D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations voor een jaarsom van het jaar 2017

Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Saliniteit (PSU)									
D-HYDRO	0.16	0.45	0.49	0.18	0.37	0.42	0.07	0.36	0.38

Tabel 6.6 Gemiddelde RMSE temperatuur (°C) van het D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations voor een jaarsom van het jaar 2017

Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Temperatuur (°C)									
D-HYDRO	-0.77	0.53	0.94	-0.81	0.46	0.94	-0.20	0.44	0.54

De gemiddelde RMSE over de drie dieptes bedraagt voor saliniteit 0,43 PSU en voor de temperatuur zo'n 0,81 °C. De gemiddelde RMSE van de temperatuur is in vergelijking met jaarsom 2000 en 2008 (beiden gemiddeld 0,64 °C) iets hoger in jaarsom 2017.

6.3 Conclusie

In Tabel 6.7 en Tabel 6.8 is de statistiek voor resp. saliniteit en temperatuur voor de drie jaarsommen nog eens samengevat weergegeven, voor zowel het Delft3D 4- als het D-HYDRO-model.

Tabel 6.7 Gemiddelde RMSE saliniteit (PSU) van het D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations

Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Saliniteit (PSU)									
2000 (Delft3D 4)	0.74	0.55	0.93	0.69	0.47	0.84	0.49	0.47	0.71
2000 (D-HYDRO)	0.68	0.52	0.86	0.60	0.42	0.74	0.49	0.43	0.68
2008 (Delft3D 4)	-0.04	0.41	0.42	-0.01	0.43	0.43	-0.13	0.46	0.54
2008 (D-HYDRO)	-0.13	0.40	0.43	-0.13	0.41	0.44	-0.18	0.38	0.46
2017 (D-HYDRO)	0.16	0.45	0.49	0.18	0.37	0.42	0.07	0.36	0.38

Tabel 6.8 Gemiddelde RMSE temperatuur (°C) van het D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer o.b.v. de 20 GTSO-stations

Gemiddelde statistiek	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP		
	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE
Temperatuur (°C)									
2000 (Delft3D 4)	-0.59	0.54	0.82	-0.56	0.63	0.86	-0.17	0.65	0.68
2000 (D-HYDRO)	-0.25	0.57	0.63	-0.29	0.63	0.71	-0.04	0.57	0.59
2008 (Delft3D 4)	-0.09	0.49	0.51	-0.17	0.51	0.54	0.11	0.67	0.69
2008 (D-HYDRO)	0.27	0.62	0.69	0.12	0.57	0.59	0.14	0.62	0.64
2017 (D-HYDRO)	-0.77	0.53	0.94	-0.81	0.46	0.94	-0.2	0.44	0.54

De vergelijking met het Delft3D 4-model van jaarsom 2000 toont aan dat het zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel zeer vergelijkbare modelresultaten berekent. Het verschil tussen beide modellen is kleiner dan het verschil tussen de modeluitkomsten en de metingen. Jaarsom 2017 was niet eerder gemodelleerd en laat zien dat het model in deze periode de saliniteit en temperatuur met een vergelijkbare kwaliteit berekent.

De kwaliteit van de reproductie van saliniteit voor jaarsom 2000 wijkt iets af, er is een grotere bias in vergelijking met de jaarsommen 2008 en 2017. Ondanks het absolute verschil van ongeveer 1 PSU in een bepaalde perioden, worden de seizoensvariatie, de mate van stratificatie en de verdeling in het modeldomein wel juist door het model berekend. Wat betreft het modelleren van de temperatuur valt op dat de oppervlaktetemperatuur (-1 m NAP) voor jaarsom 2017 een grotere absolute bias heeft (-0.77 °C) dan in jaarsommen 2000 en 2008 (-0.25 en 0.27 °C). Hier is geen duidelijke verklaring voor gevonden.

7 Modeltoepassing

7.1 Toetsing voor gebruikstoepassingen

7.1.1 Mappenstructuur

De mappenstructuur van het D-HYDRO-model is uitgelijnd met de generieke mappenstructuur voor D-HYDRO-modelschematisaties (de Jong, 2020). Hierdoor is het mogelijk om het model eenvoudig aan te sluiten op de Sommengenerator Watermodellen (SGWM).

7.1.2 Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta

Eind juni heeft er een (online) bijeenkomst plaatsgevonden waarin de huidige en toekomstige inzet van het Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta is besproken met de regio. Het volledige verslag is te vinden in bijlage E.1. Hieronder is een beknopte samenvatting opgenomen.

Op dit moment wordt een 2D WAQUA-model gebruikt om het meerpeil in de Grevelingen te sturen. Dit operationele model draait al vele jaren en naar tevredenheid bij Rijkswaterstaat. Dit systeem wordt Online Grevelingen genoemd en maakt onderliggend gebruik van een WAQUA-model uit de jaren '90 (vierde-generatie Rijkswaterstaatmodellen).

Volgens Rijkswaterstaat zou IWP (Instrument voor Waterpeilbeheer) op korte termijn (binnen 1 tot 2 jaar) Online Grevelingen moeten vervangen. Met IWP zal er nauwkeuriger gestuurd kunnen worden op peilbeheer dan via Online Grevelingen.

In de huidige situatie wordt er alleen op meerpeil gestuurd en is het sturen op scheefstand in de Grevelingen zelf nog niet zo belangrijk, maar in de toekomst is het waarschijnlijk wel wenselijk om ook op scheefstand te kunnen sturen. Niet alleen kunnen hiermee nauwkeuriger de debieten door de kunstwerken berekend worden, zo kan mogelijk ook gestuurd worden op de waterstand ter plaatse van verschillende locaties in het Grevelingenmeer (bijv. broedplaatsen voor vogels). Daarnaast zal in de toekomst de aansturing complexer gaan worden door zowel de opgelegde peilen voor getijslag als de additionele sturing van het nieuwe doorlaatmiddel en de Flakkeese Spuisluis.

Een mogelijke belangrijke doelvariabele voor toekomstige Grevelingenstudies omtrent waterkwaliteit is de zuurstofloosheid in het meer. Deze parameter zal waarschijnlijk eerst vooral binnen bureaustudies onderzocht worden (bijv. met betrekking tot het effect van verschillende doorspoelstrategieën op de wateruitwisseling en het zuurstofgehalte), maar hiervoor kan op termijn mogelijk ook een operationeel 3D model gewenst zijn.

Er is geconstateerd dat het mooi zou zijn om, waar mogelijk (binnen de HMC-omgeving), over te gaan stappen op de zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen. Dit kan niet van de een op de andere dag, daarom is het goed om niet te wachten tot de realisatie van het doorlaatmiddel maar om te overwegen om al eerste stappen met het toepassen van de D-HYDRO-modellen (in een pilot) te zetten. Zo zal er uitgezocht moeten worden of het functioneel mogelijk is om 3D modellen operationeel te restarten in RWsOS (i.v.m. zout, temperatuur en evt. waterkwaliteitsparameters).

Het huidige D-HYDRO Grevelingen model beslaat alleen het Grevelingenmeer en zal in een operationele toepassing mogelijk gekoppeld moeten worden aan gegevens/modellen van de Voordelta en de Oosterschelde. Hiervoor is het waarschijnlijk nodig om kunstwerken (general structures) binnen de D-HYDRO Suite toe te passen, iets wat op dit moment nog niet mogelijk is in een 3D model.

7.2 Toepassing binnen BOI

7.2.1 Inleiding

In het verleden is, in het kader van WBI, het WAQUA-model van het Grevelingenmeer ingezet om de waterstanden nabij de dijken te berekenen voor verschillende combinaties van meerpeilen, windrichtingen en windsnelheden. Voor BOI2023 is momenteel het beeld dat er opnieuw randvoorwaarden voor dit watersysteem bepaald moeten gaan worden. Daarom wordt in deze paragraaf bekeken of het D-HYDRO-model geschikt is voor eventuele toepassing binnen BOI en wordt geïnventariseerd wat er aan eventuele modelaanpassingen nodig is om het model geschikt te maken.

7.2.2 Methodiek

Er wordt een beschouwing gemaakt van de rekentijden en tijdstaplimitaties van het model bij extreme condities: tijdens dergelijke condities treden hogere stroomsnelheden op waardoor de rekentijdstap (door D-Flow FM) geknepen wordt. Daarnaast geldt dat bij extremere condities mogelijk (kleine) rekencellen actief worden die onder normale omstandigheden droog en inactief zijn, waardoor rekencellen met kleine *flowlinks* (verbindingen tussen waterstandspunten) plotseling de variabele tijdstap kunnen gaan knijpen – met lange rekentijden als gevolg. In dit project is daarom, voorafgaand aan mogelijk gebruik binnen BOI2023, vastgesteld of het model tijdens extreme condities nog steeds een behapbare rekentijd heeft.

Om een eerste beeld van de geschiktheid te krijgen, zijn slechts enkele combinaties van randvoorwaarden doorgerekend. Hiervoor is op basis van een zogenoemde hoekpuntenanalyse een aantal scenario's vastgesteld (zie voor een overzicht Tabel 7.1) die verschillende extremen uit het spectrum bevatten. Meer informatie hierover is te vinden in de memo *Hoekpuntenanalyse D-HYDRO Grevelingen t.b.v. BOI*, opgenomen in bijlage E.2.

Tabel 7.1 Overzicht scenario's

Scenario	Meerpeil (m NAP)	Windsnelheid (m/s)	Windrichting (graden)	Doorlaatmiddel Getijslag (m) - tweemaaldaags
1	+0,30	42	270	gesloten
2	-0,30	42	270	Tweemaaldaags getijslag 40 cm
3	0	42	270	Gesloten
4	+0,30	42	135	Gesloten
5	-0,30	42	135	Gesloten

De scenario's bevatten een laag meerpeil (-0,30 m NAP), gemiddeld meerpeil (0 m NAP) en een hoog meerpeil (+0,30 m NAP). Daarnaast wordt in scenario 2 een tweemaaldaagse getijslag gesimuleerd (t.g.v. het toekomstige doorlaatmiddel), waardoor het meerpeil tijdens de simulatie varieert. De wind loopt in elke simulatie op van 0 m/s naar een maximale windsnelheid van 42 m/s, om vervolgens weer af te nemen tot 0 m/s. In de scenario's wordt een westelijke wind of zuidoostelijke wind verondersteld. De duur van de simulatieperiode is 2 dagen en 2 uur.

Om een eerlijke vergelijking te kunnen maken met de modelresultaten berekend met het WAQUA-model, zijn de Cd-coëfficiënten (0,0014 bij 7,8 m/s en 0,0039 bij 50 m/s) uit dit vijfde-generatie model overgenomen in de uitgevoerde BOI-simulaties met het D-HYDRO-model. Om het effect van deze aanpassing te bekijken, zijn extra simulaties gedaan waarbij de Cd-coëfficiënten gelijk zijn gehouden aan die van de standaardinstellingen voor D-HYDRO-modellen (0,00063 bij 0 m/s en 0,00723 bij 100 m/s).

Aangezien de simulaties zich richten op het berekenen van de (storm)opzet, wordt (vergelijkbaar met voorgaande (1D- en 2D-)modellen waarin de stormopzet berekend is) in deze sommen geen

saliniteit en temperatuur berekend. De verwachting is dat het achterwege laten van zout en temperatuur geen significante invloed heeft op de berekende waterstanden. De eerder gekozen stormperiodes zijn in de herfst en er zal daardoor weinig stratificatie geweest zijn bij het wel modelleren van zout en temperatuur.

Aangezien in paragraaf 5.2 is aangetoond dat een 3D-model een iets betere reproductie geeft van de piekwaterstanden tijdens storm, worden in de test naast diepte-gemiddelde berekeningen ook sommen met het 3D-model gedaan (met de Cd-coëfficiënten zoals in het WAQUA-model).

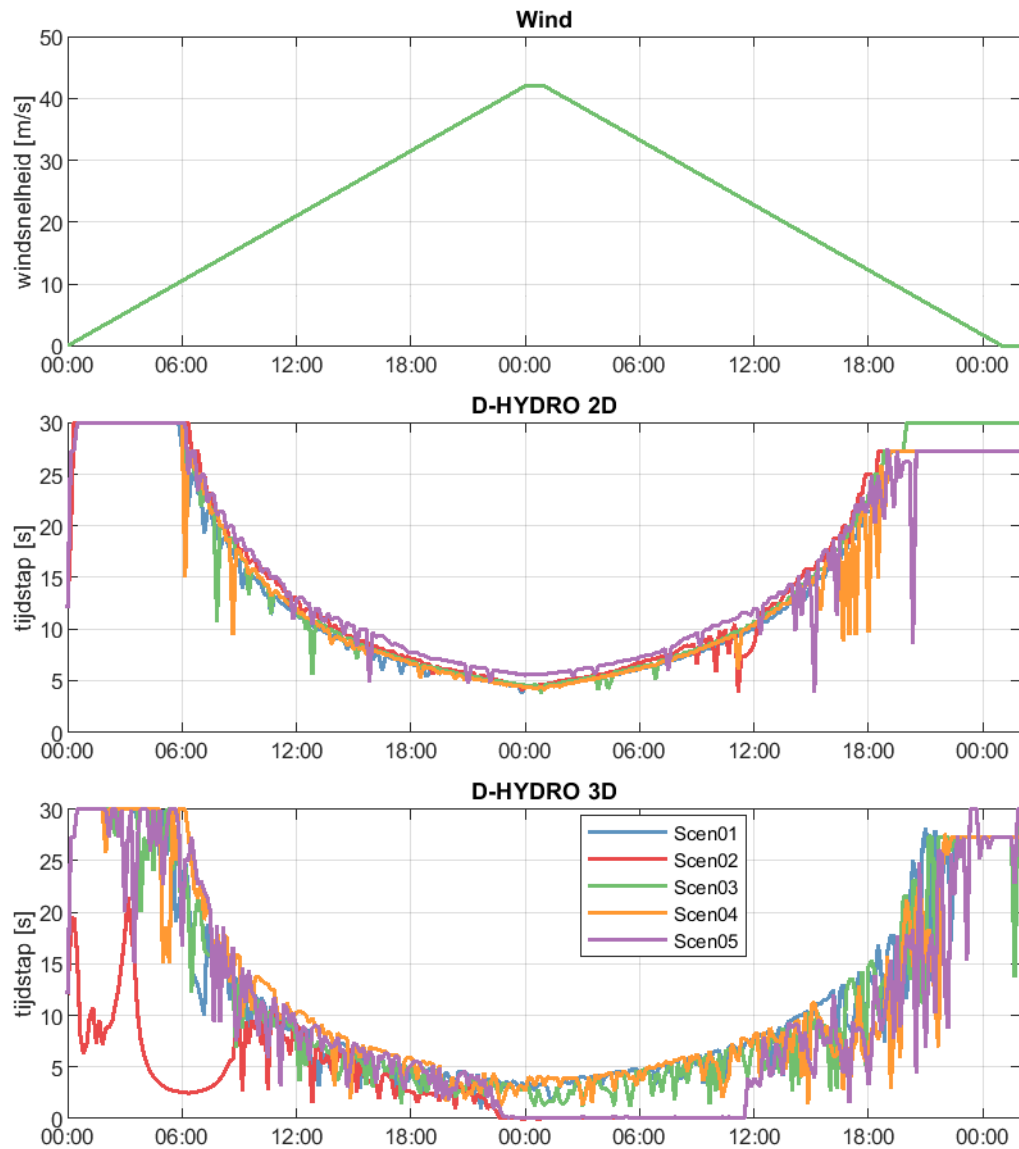
7.2.3 Rekentijden

In tegenstelling tot de overige modelsommen binnen deze rapportage, zijn de 5 onderzochte scenario's doorgerekend op het Deltares rekencluster op één (i.p.v. 2) virtuele rekennode (Intel Xeon CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz) gebruik makend van vier rekenkernen. Een overzicht van de resulterende rekentijden is gegeven in Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Rekentijden in secondes per scenario voor WAQUA en D-HYDRO (2D en 3D)

Scenario ▼ / Software ►	WAQUA	D-HYDRO (2D)	D-HYDRO (2D) wind volgens D-HYDRO	D-HYDRO (3D)
2D of 3D:	2D	2D	2D	3D
Cd-coëfficiënten:	“WAQUA”	“WAQUA”	“D-HYDRO”	“WAQUA”
1: (+0,3m, 270°)	203,3	425,4	390,8	1359,2
2: (-0,3m, 270°, 0,4m getij)	202,1	417,0	365,6	NaN
3: (0m, 270°)	195,1	376,0	370,3	1487,1
4: (+0,3m, 135°)	202,5	382,2	350,8	1400,6
5: (-0,3m, 135°)	193,4	350,1	370,2	75356,1

In WAQUA wordt een rekentijdstap van 15 seconden opgegeven. Deze tijdstap blijft constant, wat de vergelijkbare rekentijden voor alle scenario's verklaart. In D-HYDRO varieert de tijdstap gedurende de berekening op basis van het CFL-criterium (standaardwaarde van 0,7). Figuur 7-1 toont de windsnelheid en resulterende rekentijdstap in het D-HYDRO-model (2D en 3D, waarbij de Cd-coëfficiënten zijn ingesteld zoals in het WAQUA-model).



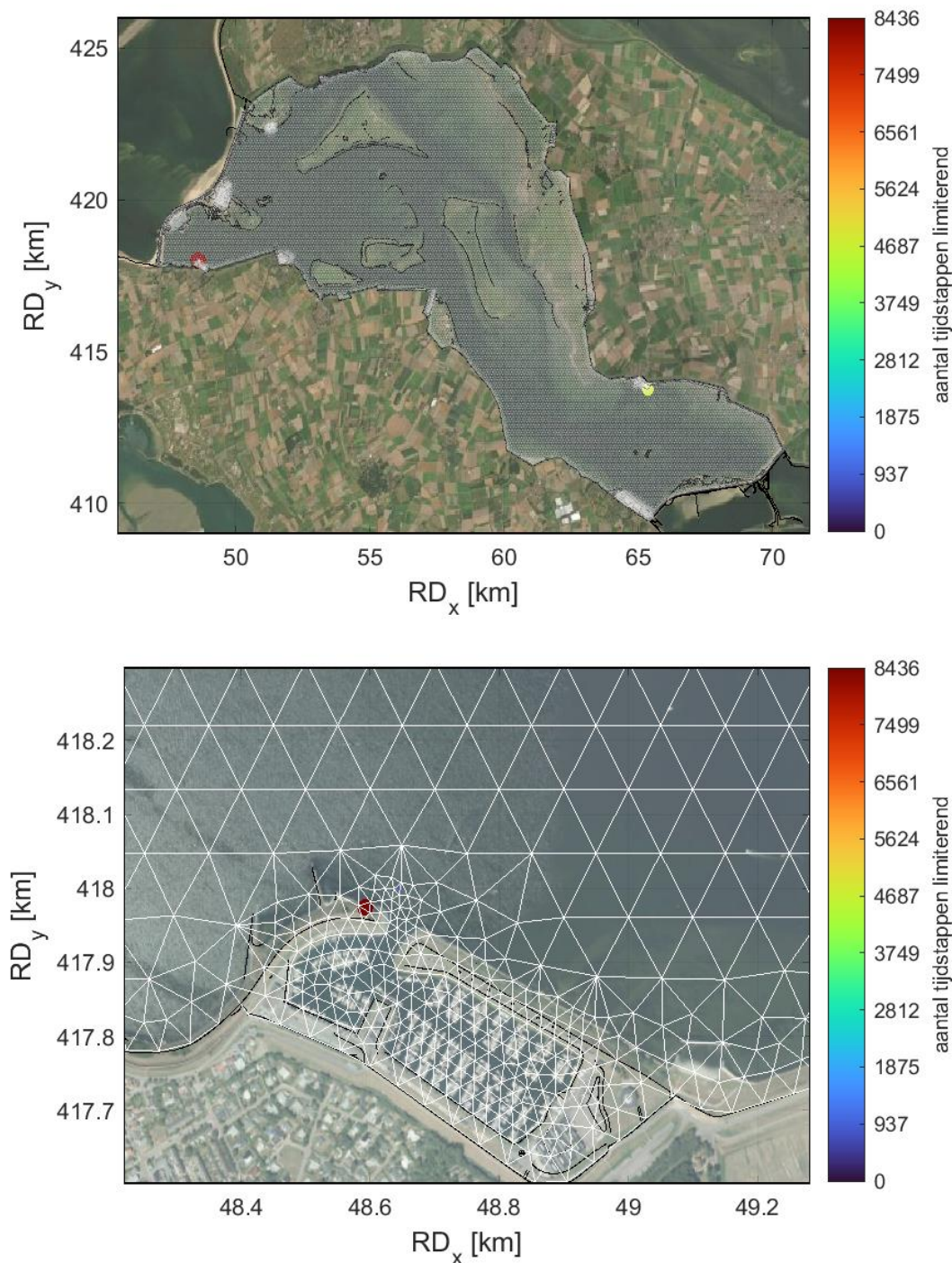
Figuur 7-1 Verloop van tijdstap per scenario tijdens storm (boven) voor D-HYDRO 2D (midden) en D-HYDRO 3D (onder)

Bovenstaand figuur laat een duidelijk verband zien tussen de toenemende windsnelheden in het model en de gehanteerde rekentijdstap. Bij hogere stroomsnelheden neemt de tijdstap significant af en vertraagt de berekening. Er zijn grote verschillen tussen de D-HYDRO rekentijden voor de onderzochte scenario's. In alle gevallen neemt de rekentijd toe ten opzichte van WAQUA. Dit kan grotendeels verklaard worden door het groter aantal rekencellen van het D-HYDRO-model. De totale toename voor een 2D berekening is ongeveer een factor 2 (afhankelijk van het scenario). Het toepassen van de Cd-coëfficiënten volgens de D-HYDRO-instelling zorgt voor iets kortere rekentijden dan bij het gebruik van de waarden uit het WAQUA-model.

In 3D is een toename met een factor van ongeveer 3,5 zichtbaar of in het meest extreme geval kan de tijdstap een waarde van nul benaderen, waardoor de berekening vastloopt. Dit is het geval voor scenario 2 (de simulatie met gedempt getij) voor een berekening met het 3D D-HYDRO-model. Scenario 5 laat echter ook een onwerkbare toename van de rekentijd zien. In deze som wordt een tijd gerekend met een zeer kleine tijdstap, maar wanneer de windsnelheid afneemt loopt de rekentijdstap weer op.

7.2.4 Tijdstaplimitaties

Naast de resulterende rekentijdstap, kan ook de locatie van de meest tijdstapbeperkende cellen bekeken worden. Een overzicht van de limiterende cellen voor het diepte-gemiddelde model waarbij de Cd-coëfficiënten van het WAQUA-model zijn gebruikt voor scenario 5, is gegeven in Figuur 7-2.



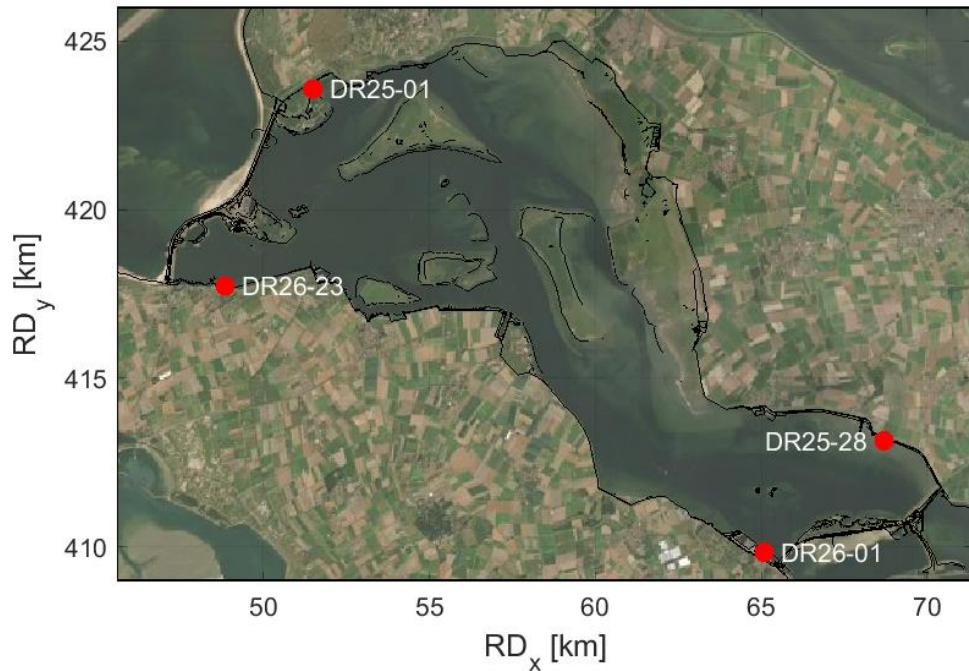
Figuur 7-2 Limiterende cellen voor scenario 5 met het aantal keren dat een cel limiterend is voor het gehele domein (boven) en nabij Scharrendijke (onder)

De maximale tijdstap wordt met name bepaald door de verfijnde delen van het rooster. Rond de havens bij Den Osse, Herkingen en vooral Scharrendijke zijn relatief kleine cellen aanwezig, waardoor deze korte *flow links* hebben en de tijdstap blijkbaar flink geknepen wordt met daarmee een lange rekentijd tot gevolg. Voor scenario 5, waarbij een sterke zuidoosten wind gesimuleerd

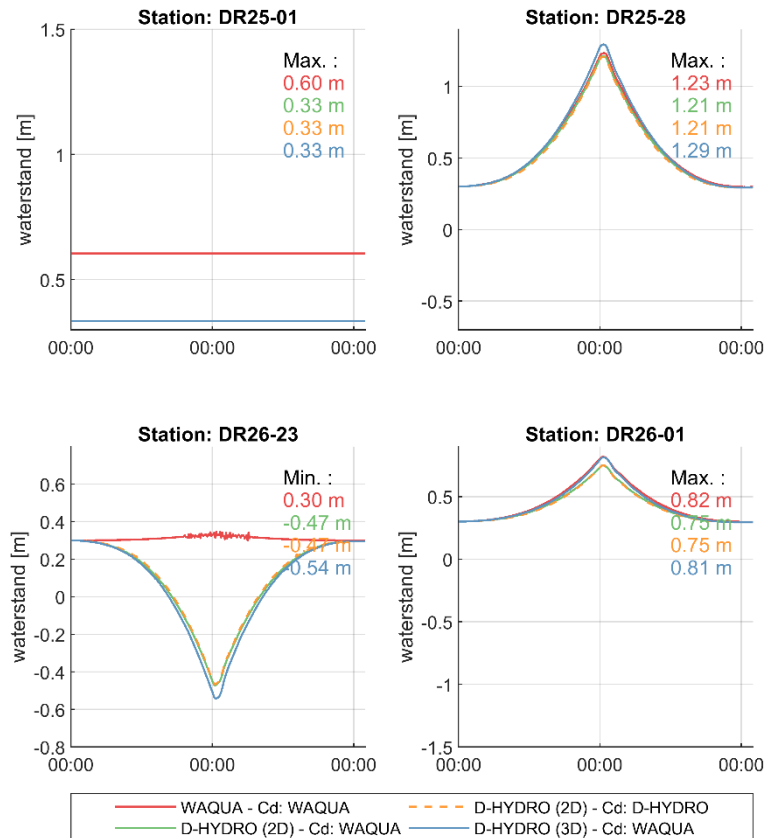
wordt, zijn ook veel limiterende grote cellen aanwezig in het droogvallende deel aan de Grevelingendam.

7.2.5 Verschillen in waterstanden

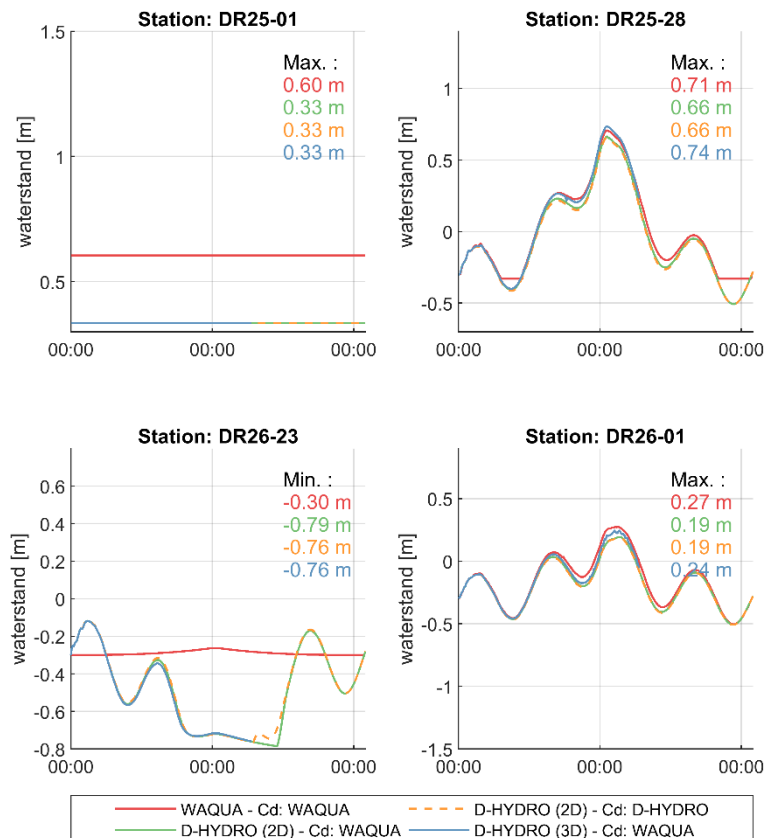
Voor een vergelijking van de waterstanden uit de verschillende sommen zijn vier representatieve hoekpunten gekozen. Dit betreft twee locaties per dijkkring in de buurt van de dammen, waar de positieve of negatieve opzet tijdens de doorgerekende scenario's het grootst is. De vier gekozen locaties staan aangegeven in Figuur 7-3. Voor deze locaties zijn de berekende waterstanden voor scenario 1 – 5 gegeven in Figuur 7-4 tot en met Figuur 7-8. In deze figuren zijn ook de waarden van de (maximale of minimale) piekwaterstanden opgenomen.



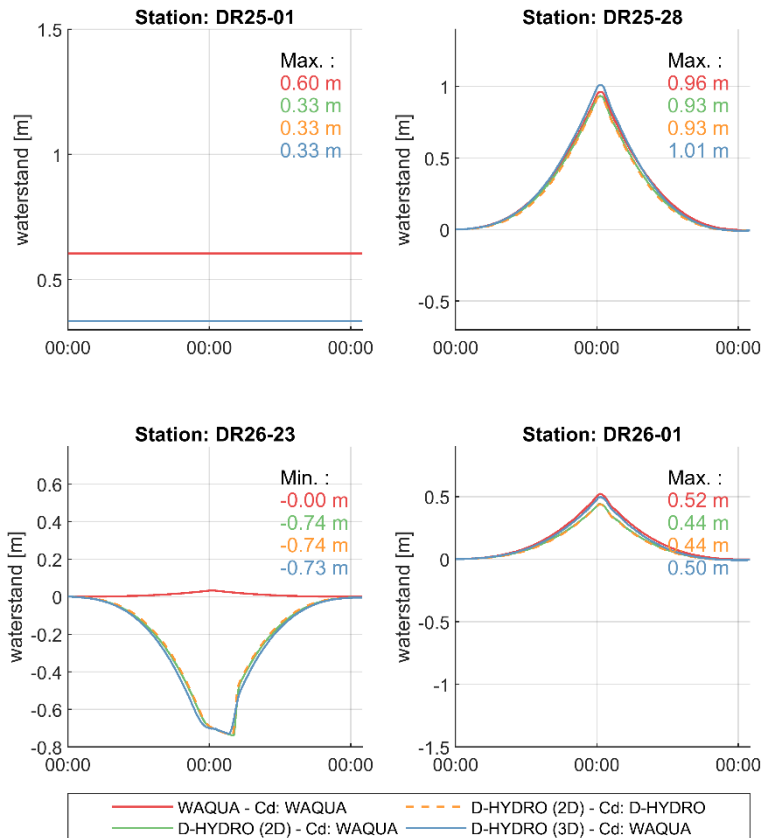
Figuur 7-3 Overzicht van hoekpunten voor waterstanden uit WAQUA en D-HYDRO



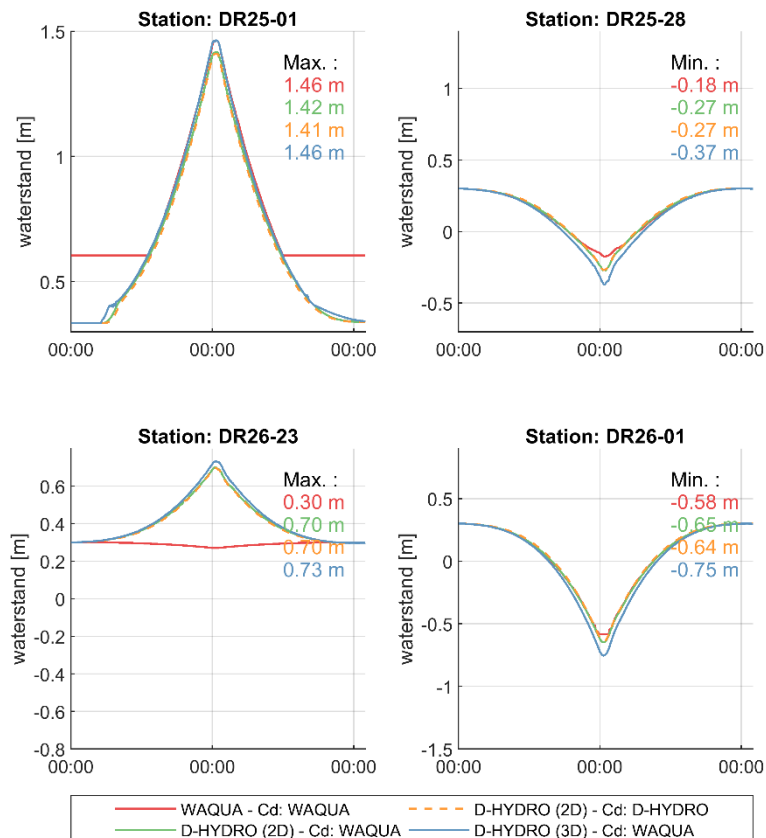
Figuur 7-4 Berekende waterstanden uit WAQUA (rood), D-HYDRO 2D (groen), D-HYDRO 2D met Cd-coëfficiënten uit D-HYDRO (oranje gestippeld) en D-HYDRO 3D (blauw) voor scenario 1



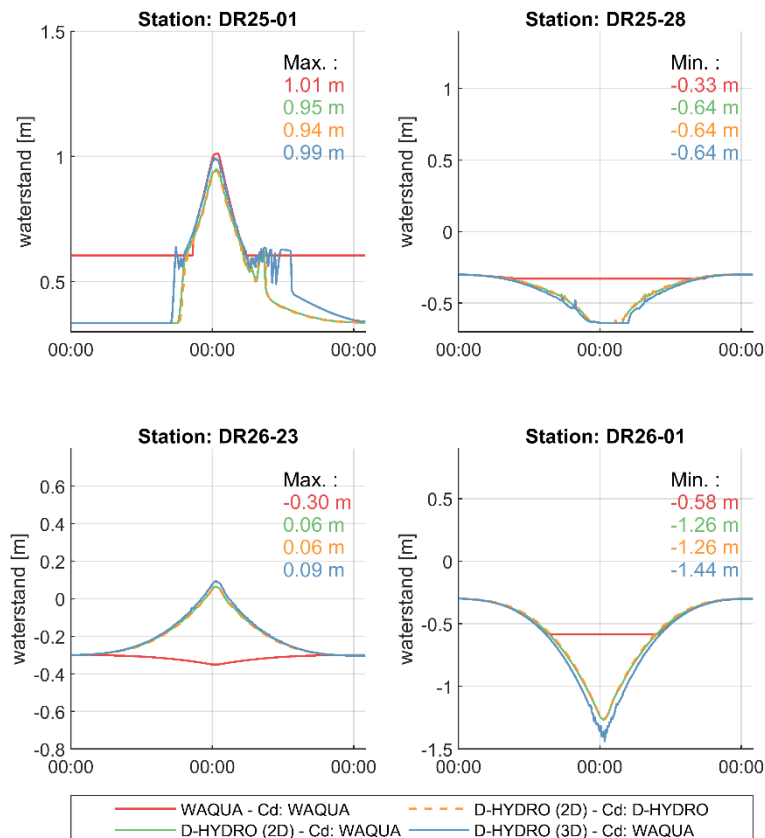
Figuur 7-5 Berekende waterstanden uit WAQUA (rood), D-HYDRO 2D (groen), D-HYDRO 2D met Cd-coëfficiënten uit D-HYDRO (oranje gestippeld) en D-HYDRO 3D (blauw) voor scenario 2



Figuur 7-6 Berekende waterstanden uit WAQUA (rood), D-HYDRO 2D (groen), D-HYDRO 2D met Cd-coëfficiënten uit D-HYDRO (oranje gestippeld) en D-HYDRO 3D (blauw) voor scenario 3



Figuur 7-7 Berekende waterstanden uit WAQUA (rood), D-HYDRO 2D (groen), D-HYDRO 2D met Cd-coëfficiënten uit D-HYDRO (oranje gestippeld) en D-HYDRO 3D (blauw) voor scenario 4



Figuur 7-8 Berekende waterstanden uit WAQUA (rood), D-HYDRO 2D (groen), D-HYDRO 2D met Cd-coëfficiënten uit D-HYDRO (oranje gestippeld) en D-HYDRO 3D (blauw) voor scenario 5

Een horizontale lijn in bovenstaande figuren betekent dat de waterstand op dat moment lager is dan de bodemligging. Hierdoor kan bijvoorbeeld vastgesteld worden dat de lokale bodemligging van station DR25-01 in het WAQUA- en D-HYDRO-model bijna 30 cm verschilt.

De gestippelde gele lijn en de groene lijn liggen in alle stations en in alle scenario's zo goed als op elkaar. Ook de piekwaterstanden van deze sommen verschilt maximaal een millimeter. Het effect van de Cd-coëfficiënten gelijk stellen aan de waarden uit het WAQUA-model of aan die van het D-HYDRO-model is dus zeer beperkt.

Uit bovenstaande figuren blijkt ook dat er hogere/lagere piekwaterstanden door het 3D D-HYDRO-model (blauw) berekend worden dan in de 2D variant (groen). Daar waar een zinnige tijdreeks van waterstanden met het WAQUA-model (rood) berekend wordt, blijkt dat het 2D D-HYDRO-model (groen) een iets kleinere opzet (positief of negatief) berekent en dat het 3D D-HYDRO-model (blauw) iets dichterbij de resultaten van het WAQUA-model (rood) komt doordat een iets grotere opzet berekend wordt in het 3D-model. Doordat de 3D D-HYDRO-som voor scenario 2 vastliep, bevat deze geen volledige reeks van waterstanden.

7.2.6 Conclusie

Om de mogelijke toepassing van het D-HYDRO Grevelingenmodel binnen BOI 2023 te testen, zijn vijf simulaties met extreme condities gedraaid waarin een combinatie van verschillende meerpeilen en windrichtingen toegepast is. Waarschijnlijk leiden de hoge stroomsnelheden (t.g.v. de olopende windsnelheid) in combinatie met lokaal (zeer) dunne z-lagen in bepaalde scenario's (waarin 3D-

modellering is toegepast) tot het automatisch limiteren van de rekentijdstap tot bijna 0 s. Een van de gemodelleerde scenario's loopt zelfs vast.³

Het effect van de Cd-coëfficiënten gelijk stellen aan de waarden uit het WAQUA-model of aan die van het D-HYDRO-model is zeer beperkt. Wat betreft berekende waterstanden is er een klein verschil (orde centimeters) tussen de berekende piekwaterstanden (orde decimeters) in het 2D- en 3D D-HYDRO-model, waarbij het 3D model waterstanden berekent die dichter in buurt komen van de resultaten van het WAQUA-model van het Grevelingenmeer.

Het D-HYDRO-model heeft meer rekencellen dan het WAQUA-model en rekt daardoor ook iets langzamer. Het verschil in rektijd tussen het 2D- en 3D D-HYDRO-model is grotendeels te verklaren door de extra verticale lagen. Uitzondering hierop zijn de simulaties waarbij de rektijdstap de 0 s benaderde.

7.3 Rekentijden

De simulaties zijn uitgevoerd op het h6 Linux-cluster van Deltares. Elke node bevat één Intel quad-core e3-1276 v3 processor, dat wil zeggen 4 cores per node met 3.6 GHz per core. In deze studie is telkens parallel gerekend op 8 partities (2 nodes met 4 cores per node). De rektijd voor de uitgevoerde jaarsommen op basis van deze configuratie is 3,4 minuten per simulatiedag (oftewel 0,85 dagen per simulatiejaar). De rektijd komt hiermee in de buurt van de wens om, voor operationele toepassingen, rond de ca. 3 minuten per simulatiedag te blijven. De gemiddelde rektijdstap in het model, bij de uitgevoerde jaarsommen, is ongeveer 20 seconden. Het berekenen van extreme condities leidt echter tot langere rektijden vanwege de automatische tijdstapbeperking (zie paragraaf 7.2.3).

Ter vergelijking, het Delft3D 4-model van het Grevelingenmeer had destijds een rektijd van ongeveer 1 dag per simulatiejaar (Spiteri & Nolte, 2010). Het is niet bekend met welke hardware destijds gerekend is, dit verklaart mogelijk ook deels de gevonden verschillen in rektijd. Ondanks de substantiële toename van horizontale resolutie en de toename in verticale resolutie, heeft het D-HYDRO-model dus een vergelijkbare rektijd. Dit is onder andere te verklaren door het feit dat het Delft3D 4-model niet parallel gedraaid kon worden en bij het huidige D-HYDRO-model deze functionaliteit wel ondersteund wordt.

³ Recent zijn er codewijzigingen in D-Flow FM geweest waardoor het ook mogelijk is om een combinatie van Z- en sigma-lagen te gebruiken. Aangezien daarmee in de bovenste lagen sigma-lagen gebruikt worden en deze robuuster blijken te zijn, is de verwachting dat dit tot stabielere simulaties leidt. Een eerste test met deze aanpak zorgt er inderdaad voor dat scenario 5 wel tot een goed einde komt.

8 Waterkwaliteitsmodellering

8.1 Introductie

8.1.1 Zuurstofhuishouding in het Grevelingenmeer

De zuurstofhuishouding in het Grevelingenmeer is sterk gerelateerd aan de stratificatie, dat wil zeggen het verschil in dichtheid tussen de boven- en onderlaag van de waterkolom, welke bepaald wordt door de saliniteit en watertemperatuur. Door opwarming van de oppervlaktelaag in de lente en zomer kan (temperatuur)stratificatie ontstaan waardoor het oppervlaktewater minder mengt met de diepere lagen. De stratificatie veroorzaakt door verschillen in watertemperatuur kan het transport van saliniteit beïnvloeden (en vice versa) en daarmee de stratificatie vergroten. Over het algemeen vertoont het zoutgehalte weinig variatie in het Grevelingenmeer; enkel door het inlaten van water via de Brouwerssluis kan een beperkte zoutstratificatie optreden. Deze inlaat kan wel leiden tot verschillen in stratificatie binnen het Grevelingenmeer. Zo zal bij locaties die dichterbij de Brouwerssluis liggen eerder verversing als gevolg van doorspoeling optreden. Verderop in het meer zijn de gevolgen hiervan minder dominant aanwezig. Op dezelfde manier kan zeewater dat via de Brouwerssluis wordt binnengelaten juist voor zoutstratificatie zorgen wanneer de saliniteit in de Voordelta substantieel afwijkt van de heersende saliniteit in het Grevelingenmeer.

Bij de afbraak van organisch materiaal wordt zuurstof verbruikt, waardoor deze tijdens gestratificeerde condities in de diepere delen van het meer uitgeput kan raken. Vanwege het zwak-dynamische karakter van de Grevelingen kan een beperkte stratificatie al tot lage zuurstofconcentraties nabij de bodem leiden. De zoutstratificatie treedt niet per se periodiek op, dit hangt af van het saliniteitsverschil tussen de Noordzee en het Grevelingenmeer. Door de seizoensale temperatuurstratificatie treden er vrijwel iedere zomer zuurstofarme condities op in de diepere waterlagen. Het is dus cruciaal om deze processen te vatten in de numerieke modellen waarmee modelstudies naar de zuurstofhuishouding uitgevoerd kunnen worden.

Ten behoeve van onderzoek naar mogelijke maatregelen – in het bijzonder door het herintroduceren van getij – om de zuurstofhuishouding in het Grevelingenmeer te verbeteren, is in 2010 een 3D model opgezet, gekalibreerd en gevalideerd (Spiteri & Nolte, 2010) en vervolgens toegepast in een scenariostudie (Nolte & Spiteri, 2011). Dit Delft3D 4-model is sindsdien in diverse onderzoeken toegepast, als laatste in Maarse et al. (2019). Sinds 2011 is één wijziging toegepast, te weten een verbetering van de randvoorwaardeconcentraties van nutriënten en organisch materiaal op de Voordelta (Nolte, 2017).

8.1.2 Transitie van Delft3D 4 naar D-HYDRO

In het kader van de modelontwikkeling van de zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen is een nieuw 3D hydrodynamisch D-Flow FM model voor de Grevelingen ontwikkeld (dit rapport). Het waterkwaliteitsmodel van het Grevelingenmeer wordt niet opnieuw opgezet, maar zal direct worden omgezet. De doelstelling van dit project wat betreft de waterkwaliteitsmodellering is om de omzetting van het voorgaande waterkwaliteitsmodel naar modelinvoer voor gebruik binnen D-HYDRO af te ronden. Hierbij wordt het waterkwaliteitsmodel (D-Water Quality module) zo opgezet dat dit online-gekoppeld kan rekenen met het hydrodynamische model (D-Flow FM module).

Met het omgezette D-HYDRO waterkwaliteitsmodel worden twee periodes die eerder in modelstudies beschouwd zijn (jaarsom 2000 en jaarsom 2008) gesimuleerd. Vanwege de toepassing van het model om het effect van getij op de zuurstofhuishouding te beoordelen, is ook een getijscenario uit het project “Getij Grevelingen” (Maarse et al., 2019) doorgerekend met het nieuwe D-HYDRO-waterkwaliteitsmodel en vergeleken met de Delft3D 4-modelresultaten.

Met een model-model-vergelijking worden de eventueel ontstane verschillen tussen de uitkomsten van het Delft3D 4- en D-HYDRO-model geïdentificeerd. Om deze verschillen in perspectief te plaatsen, zal ook met metingen vergeleken worden (data-model-vergelijking). Een uitgebreide data-model-vergelijking, kalibratie en validatie van het waterkwaliteitsmodel valt buiten de scope van dit project. Er wordt in dit hoofdstuk daarom ook gesproken over verificatie van het waterkwaliteitsmodel (*werkt het waterkwaliteitsmodel nog vergelijkbaar na een directe omzetting bij toepassing in de nieuwe D-HYDRO software?*) en niet over de validatie hiervan.

8.1.3 Voorgaande studies

In voorgaande studies, KPP2019 (Groenenboom & Kleissen, 2019) en KPP2020 (Groenenboom et al., 2020), zijn stappen gezet om het bestaande waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen (Delft3D-WAQ) om te zetten. In die studies zijn enkele onduidelijkheden/vraagstukken onderzocht die inmiddels niet meer relevant zijn of te wijten zijn aan inmiddels ontdekte fouten in de eerdere versies van de modelomzetting. Verder is er eind 2020 en begin 2021 een aanvullend onderzoek geweest naar de geconstateerde verschillen tussen de door het Delft3D 4-model en het D-HYDRO-model van het Grevelingenmeer berekende impact van een getij-scenario. Tijdens dit aanvullende onderzoek zijn inconsistenties naar voren gekomen en lessen geleerd die in het uiteindelijke D-HYDRO waterkwaliteitsmodel verwerkt zijn (De samenvattende memo is opgenomen in bijlage F). Dit hoofdstuk beschrijft het resulterende waterkwaliteitsmodel.

8.2 Waterkwaliteitsmodel Grevelingenmeer

8.2.1 Beschrijving waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen

Hieronder is een beknopte beschrijving van het waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen opgenomen. Aangezien het model een directe omzetting is van het voorgaande Delft3D 4-model wordt voor meer details verwezen naar Spiteri & Nolte (2010) en Nolte (2017).

In het waterkwaliteitsmodel worden de volgende processen gesimuleerd:

- fytoplankton processen: primaire productie, respiratie en mortaliteit
- extinctie van licht
- afbraak van organisch materiaal in water en sediment
- nitrificatie en denitrificatie
- reaeratie
- sedimentatie, resuspensie en begraving van organisch materiaal

Het waterkwaliteitsmodel berekent de concentraties van nutriënten (nitraat, ammonium, ortho-fosfaat, silicium), opgelost zuurstof, fytoplankton (diatomeeën, flagellaten, dinoflagellaten en Phaeocystis), en detritus in de waterkolom. In de bodem wordt uitsluitend de voorraad van organisch materiaal berekend (in g/m²), gedetailleerde bodemprocessen en poriewaterconcentraties worden niet gemodelleerd. De begrazing van detritus en algen door schelpdieren en zoöplankton en de water-bodemuitwisseling van fosfaat worden schematisch gemodelleerd.

Vanwege de online-koppeling tussen hydrodynamica en waterkwaliteit, is het rekenrooster (in zowel horizontale als verticale richting) gelijk aan het hydrodynamische Grevelingenmodel. Het transport van de constituenten gebeurt op de (hydrodynamische) transport-tijdstapbasis. De waterkwaliteitsprocessen worden met een tijdstap van 1 uur geëvalueerd. Het model start vanuit ingespeelde condities en er wordt een inspeelperiode van twee maanden (voorafgaand aan de jaarsom) toegepast.

8.2.2 Verschillen tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van de Grevelingen

In het voorgaande waterkwaliteitsmodel van het Grevelingenmeer (Delft3D 4) werd gebruik gemaakt van een offline-koppeling (tijdstep van 60 min.) tussen de hydrodynamische module Delft3D-FLOW en de waterkwaliteitsmodule Delft3D-WAQ. In de D-HYDRO Suite wordt gebruik gemaakt van een online-koppeling van het hydrodynamische- (D-Flow FM) en waterkwaliteitsmodel (D-Water Quality). Hierdoor wordt het transport van de constituenten nu, hoger frequent, op transport-tijdstepbasis (variërend in de tijd van enkele seconden tot een halve minuut) uitgerekend door D-Flow FM.

Door de online-koppeling werken de wijzigingen in het hydrodynamische model (beschreven in hoofdstuk 4) ten opzichte van het voorgaande model, ook door in de waterkwaliteitsmodellering. Zo wordt er, ten opzichte van het voorgaande Grevelingenmodel, met een veel fijner horizontaal grid gewerkt en is ook de verticale resolutie iets toegenomen aan het wateroppervlak en in de diepere delen. In het voorgaande model werden de bovenste 3 verticale lagen geaggregeerd ten behoeve van de waterkwaliteitsmodellering, dat is in het D-HYDRO-model niet het geval. Hieronder zijn de verschillen tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van de Grevelingen opgesomd:

- Verschillen in software (Delft3D 4-FLOW vs. D-Flow FM en Delft3D-WAQ vs. D-Water Quality)
- Online- vs. offline-koppeling
- Gridresolutie (zowel horizontaal als verticaal)
- Modelbathymetrie
- Windforcering (C_d -coëfficiënten)
- Horizontale achtergrondviscositeit en -diffusiviteit
- Andere manier/discretisatie van het modelleren van kunstwerken
- Verschil in droge punten, dunne dammen en overlaten
- Droogvalcriterium
- Gebruik van trachytopen (beschrijving bodemgebruik t.b.v. bodemruwheid)
- Wel/niet meenemen van polderlozingen in de waterkwaliteitsmodellering
- Wel/geen aggregatie van verticale lagen in de waterkwaliteitsmodellering

8.2.3 Rekeningtijd

De waterkwaliteitssimulaties zijn uitgevoerd op het h6-c7 Linux-cluster van Deltares. Bij de online-gekoppelde simulaties is gerekend op 16 partities (4 nodes met 4 cores per node). De rekeningtijd van dit model voor jaarsom 2008 bedraagt 5,7 minuten per simulatiedag (oftewel 1,4 dagen per simulatiejaar).

Met een online-koppeling tussen 3D D-Flow FM en D-Water Quality kan de snelheid van het waterkwaliteitsmodel substantieel verhoogd worden (bij het gebruik van meerdere partities) ten opzichte van een offline-gekoppelde modelsom. Dit komt doordat bij een online-koppeling het modeldomein opgesplitst wordt in deeldomeinen i.p.v. dat de waterkwaliteitsprocessen geparallelliseerd worden.

De offline-gekoppelde simulatie (waarbij rekenschema 21 is gebruikt) van jaarsom 2008 is op 4 partities gesimuleerd en had een rekeningtijd van 17,2 minuten per simulatiedag (oftewel 4,4 dagen per simulatiejaar).

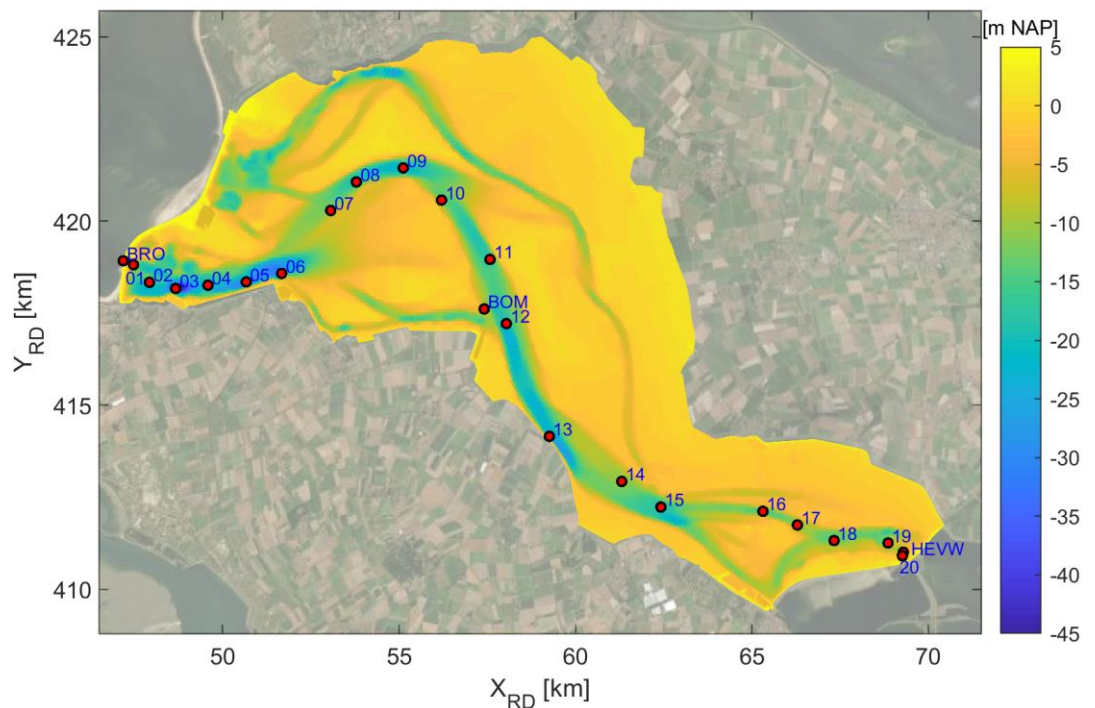
8.3 Verificatie waterkwaliteit

8.3.1 Inleiding

De modelresultaten van de belangrijkste waterkwaliteitsparameters uit het nieuwe online-gekoppelde D-HYDRO-model zijn, op basis van jaarsommen voor de jaren 2000 en 2008,

vergeleken met de door het Delft3D 4-model berekende waarden. Naast deze model-model-vergelijking, is er ook een vergelijking gemaakt met de gemeten waarden (data-model-vergelijking).

Voor de vergelijking van het berekende zuurstofgehalte met metingen worden de GTSO-metingen, weergegeven in Figuur 4-8, (Grevelingen Temperatuur Saliniteit en O₂ (zuurstof)) gebruikt. Aangezien dit profielmetingen betreffen, zijn over de gehele waterkolom meetwaarden beschikbaar. Bij de data-model-vergelijking van zuurstof wordt een vergelijking op verschillende hoogtes gemaakt: nabij het wateroppervlak, in het midden van de waterkolom en net boven de bodem. Om de berekende en gemeten zuurstofgehalten met elkaar te vergelijken worden 4 van de 20 GTSO-locaties gebruikt die verspreid over de Grevelingen liggen; GTSO-03 (nabij de Brouwerssluis, aan de westzijde), GTSO-09 en GTSO-13 (in het midden van het meer) en GTSO-19 (nabij de Flakkeese Spuisluis, aan de oostzijde). Voor de vergelijking van nutriënten (nitraat, ammonium, totaal stikstof, ortho-fosfaat, totaal fosfaat en silicium) en de chlorofylconcentratie worden de observaties van meetlocatie Dreischor (gelegen nabij GTSO-13, in het midden van het meer) gebruikt. Hier wordt op drie verschillende dieptes gemeten; nabij het wateroppervlak (1 m diep), in het midden van de waterkolom (exacte diepte onbekend) en 1 m boven de bodem. Bovenstaande is samengevat in Tabel 8.1.



Figuur 8-1 Overzicht observatiepunten: waterstandsmeetpunten (BRO, BOM en HEVW) en TSO-stations (1 t/m 20). Vanwege de leesbaarheid is in dit figuur het prefix 'GTSO-' weglaten bij de 20 GTSO-stations.

Tabel 8.1 Overzicht van beschikbare meetgegevens van verschillende waterkwaliteitsparameters

Parameters	Bron	Dieptes		
Temperatuur, saliniteit en zuurstof	GTSO	Profielmetingen: beschikbaar over bijna de gehele waterkolom (en afhankelijk van lokale waterdiepte)		
Nutriënten en chlorofyl	Waterbase / Waterinfo	Nabij het wateroppervlak	In het midden van de waterkolom	Nabij de bodem

In paragraaf 8.3.2 en 8.3.3 wordt de verificatie van het D-HYDRO-model op basis van resp. jaarsom 2000 en jaarsom 2008 besproken.

De verschillen tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model, zoals beschreven in paragraaf 8.2.1, werken door in de model-model-vergelijkingen en de data-model-vergelijkingen. Vanwege het verschil in rekenrooster en modelbathymetrie is ervoor gekozen om de vergelijking op basis van tijdseries op een bepaalde diepte onder NAP uit te voeren. Het bekijken van bijv. de zuurstofconcentratie op 1 m boven de bodem in GTSO-03, zou geen eerlijke vergelijking zijn aangezien de lokale diepte in beide modellen substantieel verschillend is (Delft3D 4-model: ca. 29 m; D-HYDRO-model; ca. 41 m). Dit verschil kan verklaard worden door de hogere roosterresolutie en het opnieuw afleiden van de modelbathymetrie (nu via een zogenoemde Baseline-projectie).

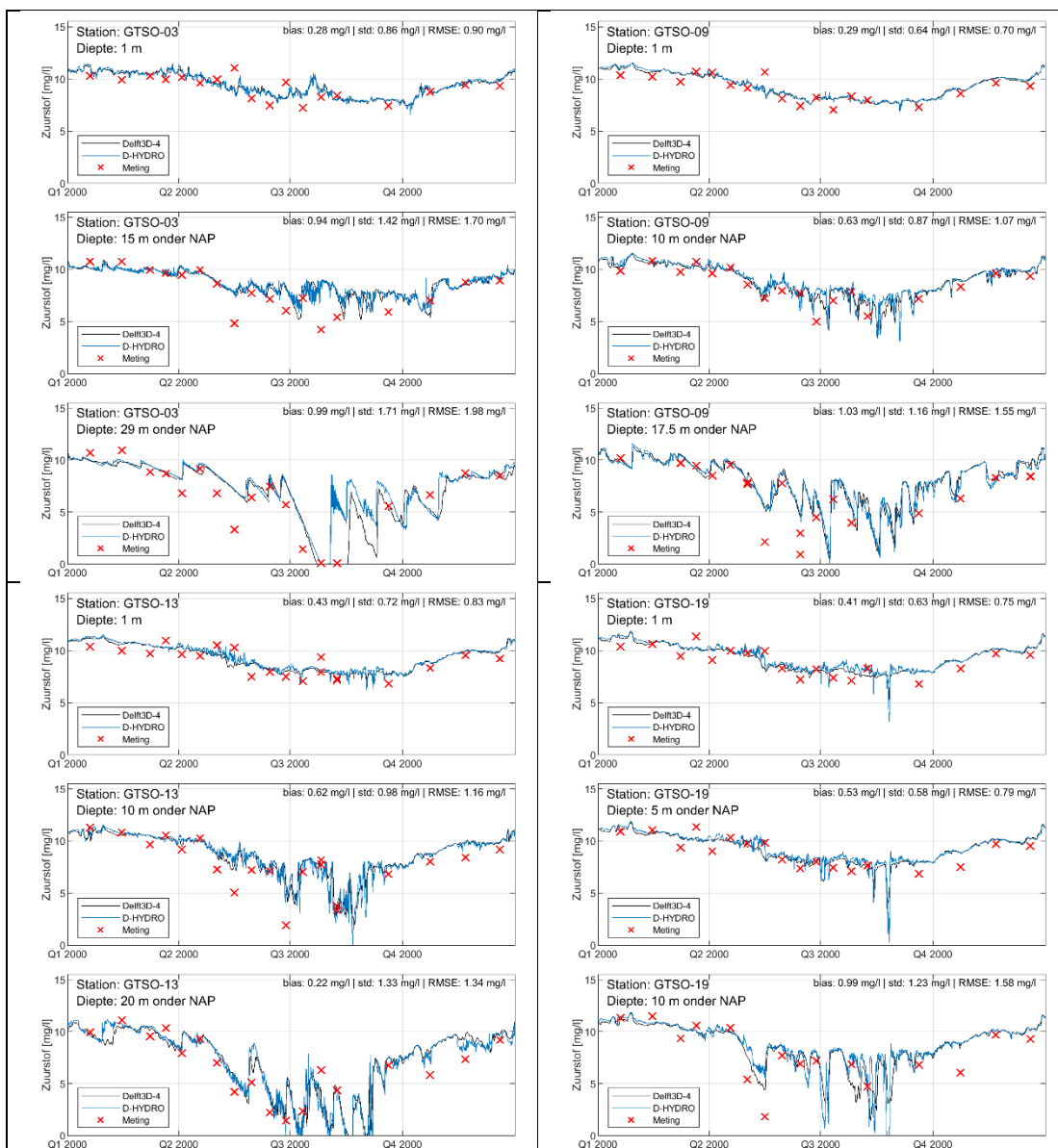
Bij het vergelijken van de indicator “zuurstofarm areaal” is gekeken naar de opgeloste-zuurstofconcentraties in de bodemlaag (en dus niet op een vaste diepte onder NAP). De gewijzigde beschrijving van de bodemligging van het Grevelingenmeer (modelbathymetrie) kan daardoor dus ook enige invloed hebben op de uiteindelijke berekende waarde van deze indicator.

8.3.2 Resultaten voor het jaar 2000

8.3.2.1 Opgeloste-zuurstofconcentratie

Tijdseries

In Figuur 8-2 wordt de geobserveerde en gemodelleerde zuurstofconcentratie op locaties GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19 op drie verschillende dieptes voor jaarsom 2000 getoond. Naast de door het D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentratie (blauw), zijn ter vergelijking ook de tijdseries van het voorgaande Delft3D 4-model (zwart) en de geobserveerde waarden weergegeven (rode kruisjes). De statistische kengetallen (bias, standaarddeviatie en RMSE) van de data-model-vergelijking van zowel het D-HYDRO-model als het Delft3D 4-model zijn opgenomen in Tabel 8.2.



Figuur 8-2 Berekende (Delft3D 4 (zwart) en D-HYDRO (blauw)) en gemeten (rode kruizen) zuurstofconcentraties (mg/L) voor het jaar 2000 voor verschillende GTSO-meetstations: GTSO-03 (paneel linksboven), GTSO-09 (paneel rechtsboven), GTSO-13 (paneel linksonder), GTSO-19 (paneel rechtsonder). Zuurstofconcentraties zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak, halverwege de waterkolom (afhankelijk van de lokale waterdiepte) en net boven de bodem.

Tabel 8.2. Statistische kengetallen (bias, standaarddeviatie en RMSE) voor berekende waarden van zuurstofconcentraties vergeleken met metingen voor verschillende dieptes bij de stations GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19 in het jaar 2000.

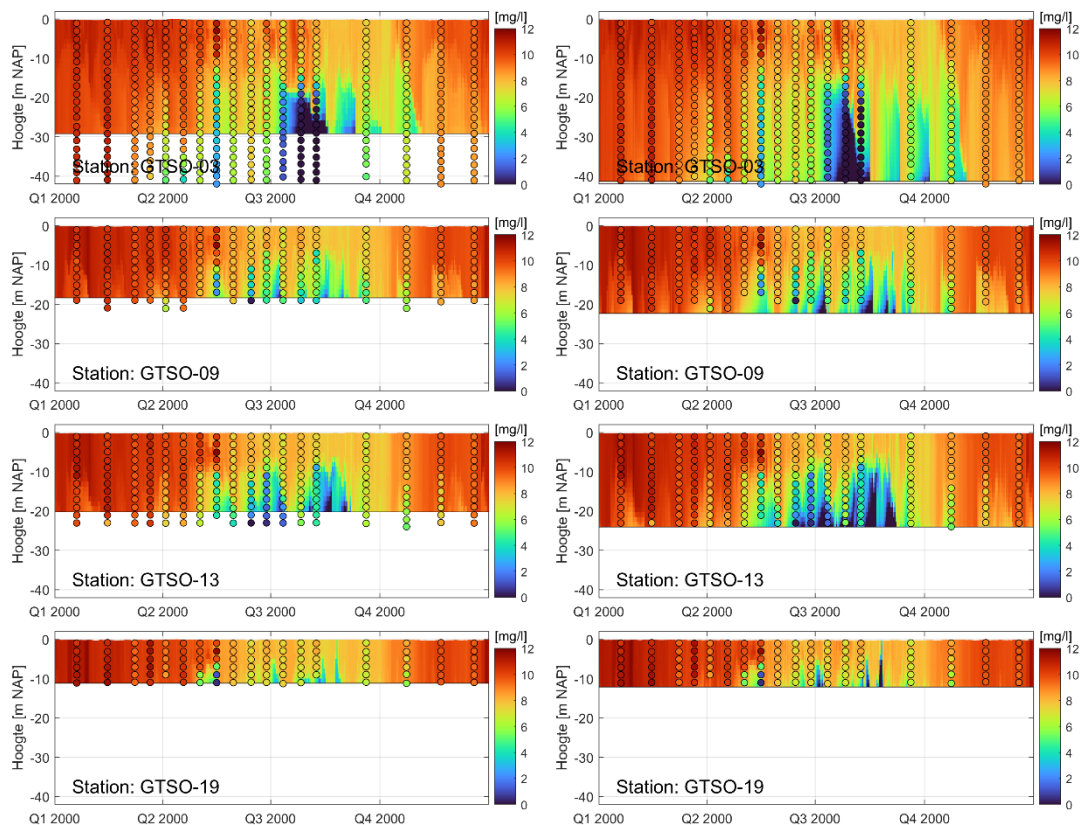
Station	Diepte (in m)	Bias		Standaarddeviatie		RMSE	
		Delft3D 4	D-HYDRO	Delft3D 4	D-HYDRO	Delft3D 4	D-HYDRO
GTSO-03	1	0,26	0,28	0,83	0,86	0,87	0,90
	15	0,80	0,94	1,41	1,42	1,62	1,70
	29	0,29	0,99	1,67	1,71	1,69	1,98
GTSO-09	1	0,21	0,29	0,67	0,64	0,70	0,70
	10	0,50	0,63	0,58	0,87	0,77	1,07
	17,5	1,17	1,03	1,05	1,16	1,58	1,55
GTSO-13	1	0,27	0,43	0,78	0,72	0,82	0,83
	10	0,68	0,62	1,21	0,98	1,39	1,16
	20	0,46	0,22	1,34	1,33	1,42	1,34
GTSO-19	1	0,24	0,41	0,76	0,63	0,80	0,75
	5	0,25	0,53	0,80	0,58	0,84	0,79
	10	0,57	0,99	1,19	1,23	1,32	1,58

De zuurstofconcentraties nabij het wateroppervlak en halverwege de waterkolom zoals berekend door het D-HYDRO-model komen voor de verschillende GTSO-locaties goed overeen met de door het Delft3D 4-model berekende waarden voor jaarsom 2000. De model-model-vergelijking laat zien dat verschillen ontstaan in de diepere delen van het Grevelingenmeer tijdens de zomerperiode (bijv. GTSO-03 op 29 m diepte). Het patroon en de timing van zuurstofuitputting zijn gelijk, de mate van zuurstofuitputting is (soms) groter in het D-HYDRO-model dan in het Delft3D 4-model.

De data-model-vergelijking toont aan dat de met D-HYDRO berekende waarden opgeloste-zuurstofconcentratie stations GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19 sterk overeen komen met de gemeten waarden voor het jaar 2000. De geobserveerde zuurstofafname in de diepere delen in het tweede en derde kwartaal (met zuurstofstratificatie tot gevolg), wordt ook weergegeven door de modellen. Op de bodemlaag van GTSO-09 na, is de bias op alle meetpunten minder dan 1 mg/L. Het verschil tussen het Delft3D 4- en het D-HYDRO-model (model-model-vergelijking) is kleiner dan het verschil tussen de gemodelleerde en geobserveerde waarden (data-model-vergelijking).

z,t-plot

In Figuur 8-3 is het verloop van de zuurstofconcentratie over de diepte gedurende het jaar 2000 in een zogenoemde z,t-plot weergegeven voor de eerder beschouwde vier GTSO-locaties. Het linkerpaneel toont op de achtergrond de modelresultaten van het Delft3D 4-model met daarbovenop de gemeten waarden in cirkels, het rechterpaneel toont deze data-model-vergelijking voor het D-HYDRO-model.



Figuur 8-3 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van zuurstofconcentraties voor het Delft3D 4-model (linkerzijde) en D-HYDRO-model (rechterzijde) in het jaar 2000 voor verschillende meetstations (van boven naar beneden).

Vanwege een ander rekenrooster (het D-HYDRO-model heeft een fijner rekenrooster) en de opnieuw afgeleide modelbathymetrie, kan de lokale waterdiepte in een GTSO-locatie anders zijn in het Delft3D 4-model (linkerpaneel) dan in het D-HYDRO-model (rechterpaneel). De vergelijking met profielmetingen tonen aan dat de bodemligging in het D-HYDRO-model op deze locaties beter in overeenstemming is met de daadwerkelijke bodemligging dan het voorgaande, grovere model.

Door rekening te houden met de iets gewijzigde lokale bodemligging kan op basis van de model-model-vergelijking gesteld worden dat het verloop van de door het D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentratie (en ook de zuurstofstratificatie) kwalitatief gezien vergelijkbaar is met die van het Delft3D 4-model.

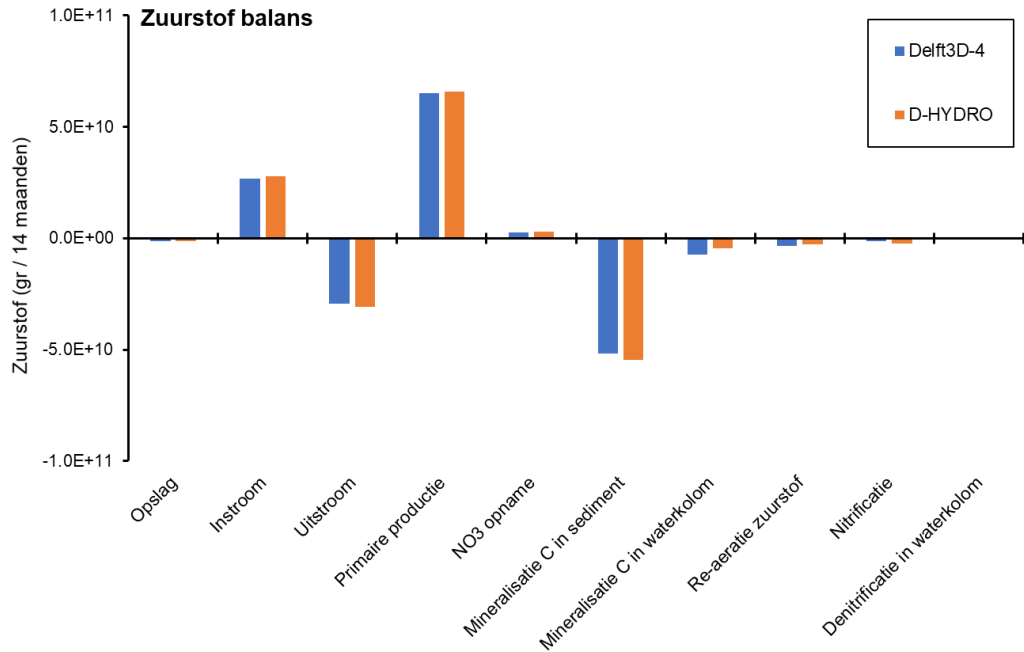
De data-model-vergelijking laat zien dat de zuurstofstratificatie in het voorjaar onderschat wordt, voornamelijk bij GTSO-03. Het model berekent niet de gemeten zuurstofafname in de lenteperiode (halverwege Q2), iets wat ook bij het beschouwen van de tijdseries naar voren kwam. Verder tonen de z,t-plots aan dat er in de zomerperiode geen permanente zuurstofarme condities in de diepere delen worden berekend, maar dat deze perioden van zuurstofstratificatie onderbroken worden (naar verwachting met name door windmenging). In de metingen is dit gedrag ook terug te zien, al wordt de data-model-vergelijking hier bemoeilijkt door het feit dat hier profielmetingen gebruikt worden en er geen continue gegevens beschikbaar zijn.

Massabalans

Figuur 8-4 geeft de zuurstofbalans van het Delft3D 4- en D-HYDRO-model van de Grevelingen weer. Aangezien er in het D-HYDRO-model een sluitfout wordt opgelegd in de randvoorwaarden, en dus een extra post ten opzichte van het Delft3D 4-model, is de verwachting dat de totale instroom niet exact hetzelfde is. Ondanks dit kleine verschil in de opgelegde instroom aan zuurstof, is deze

term voldoende vergelijkbaar en dit toont aan dat het omzetten van de randvoorwaarden goed is uitgevoerd.

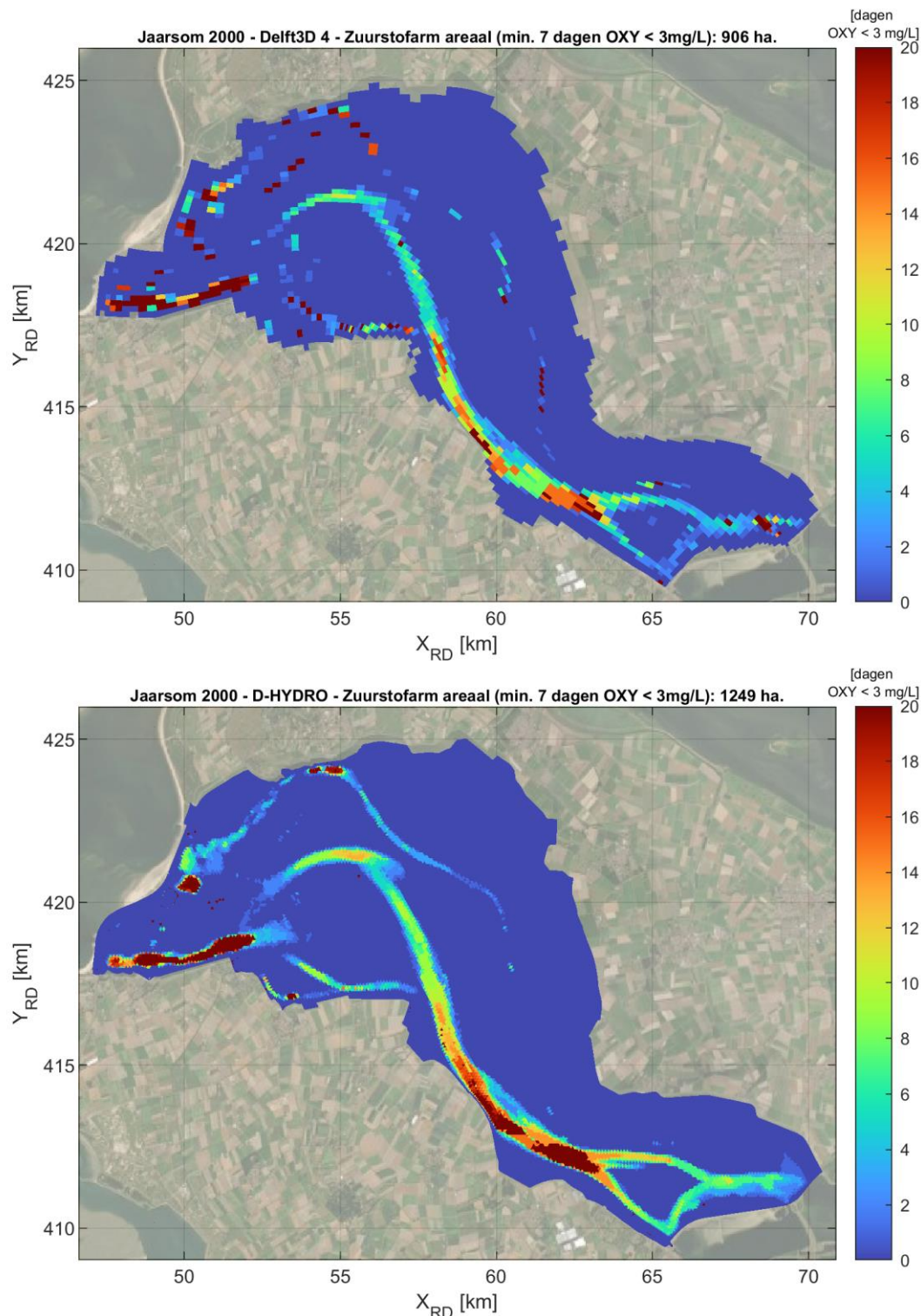
De balans laat kleine verschillen zien tussen beide modelsummen in de manier waarop zuurstof uit het systeem verdwijnt. In de Delft3D 4-som verdwijnt een iets groter gedeelte zuurstof door re-aeratie van zuurstof aan het wateroppervlak en door mineralisatie van koolstof in de waterkolom. Bij de D-HYDRO-som verdwijnt er meer zuurstof uit het systeem door mineralisatie van koolstof in het sediment.



Figuur 8-4 Vergelijking van de zuurstofbalans in het Grevelingen meer voor het jaar 2000. De toename of afname van zuurstof massa is opgedeeld in zuurstof uit/naar opslag, instroom, uitstroom, primaire productie, NO3 opname, mineralisatie van koolstof (C) in het sediment, mineralisatie van koolstof (C) in de waterkolom, re-aeratie van zuurstof, nitrificatie en denitrificatie in de waterkolom.

Zuurstofarm areaal

Een parameter die in voorgaande Grevelingenstudies is gebruikt om de zuurstofloosheid in kaart te brengen is het zogenoemde zuurstofarme areaal; deze indicator is gedefinieerd als het oppervlak (in hectare) waarvan de zuurstofconcentratie aan de bodem voor minimaal 7 aaneengesloten dagen lager is dan 3 mg/L. Het maximale aantal aaneengesloten dagen waarop de zuurstofconcentratie in de bodemlaag lager is dan 3 mg/L is weergegeven voor het Delft3D 4- en D-HYDRO-model in resp. het bovenste en onderste paneel van Figuur 8-5.



Figuur 8-5. Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het Delft3D 4-model (bovenste paneel) en het D-HYDRO-model (onderste paneel). Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.

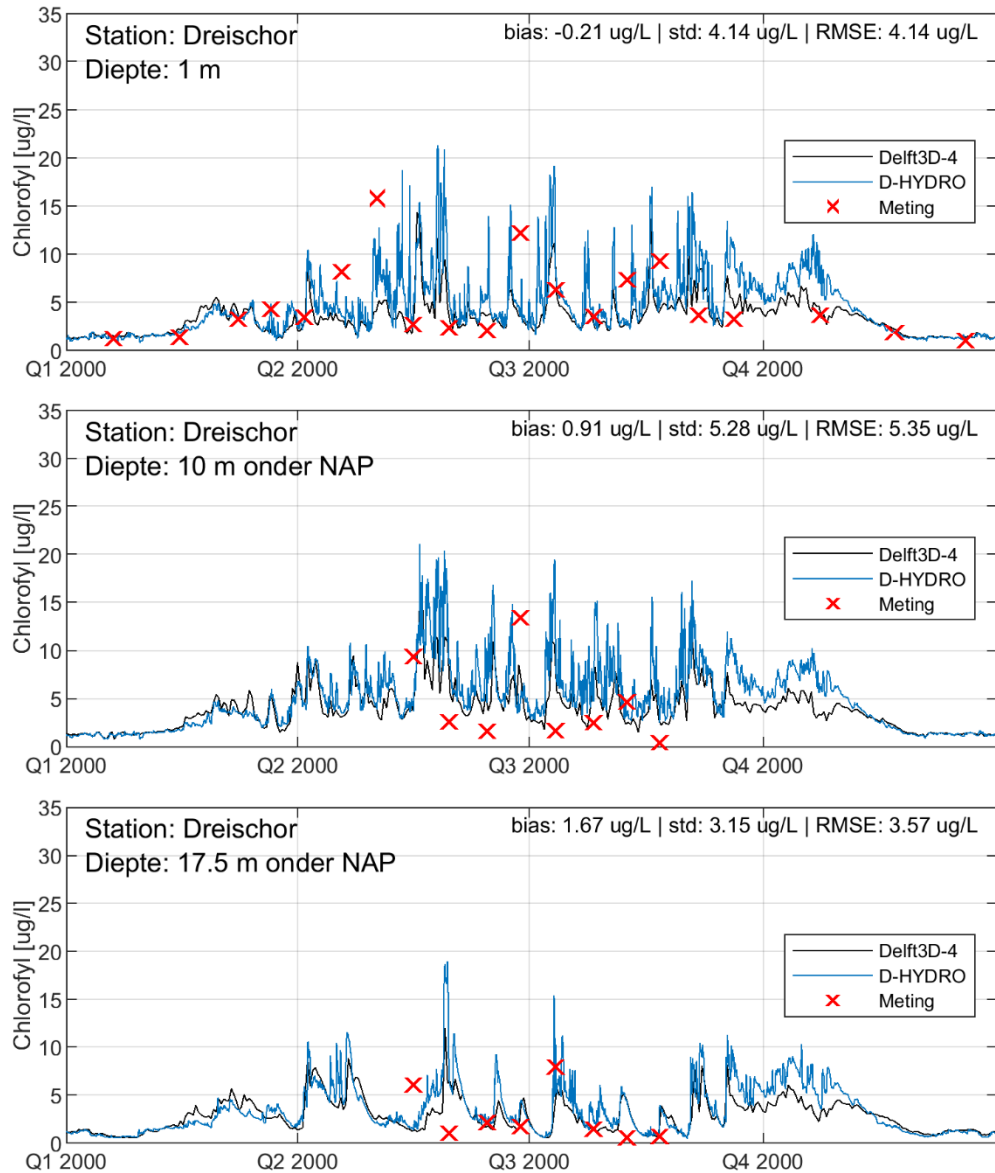
De patronen van zuurstofarme gebieden komen in het Delft3D 4- en D-HYDRO-model kwalitatief gezien goed overeen. Het Delft3D 4-model berekent een zuurstofarm areaal van 906 ha voor jaarsom 2000. Met het D-HYDRO-model wordt een waarde van 1249 ha gevonden. Vanwege de vele verschillen in de modelopzet van het hydrodynamische Delft3D- en het D-HYDRO-model

(waaronder de roosterresolutie), de toepassing van een ander softwaresysteem en de gevoeligheid van de indicator (met 'harde' grenzen 7 aaneengesloten dagen en 3 mg/L) is niet eenvoudig een verklaring te geven voor dit verschil in berekend areaal.

8.3.2.2 Chlorofylconcentratie

Chlorofylconcentraties in het Grevelingenmeer nemen toe tijdens periodes van algenbloei, die vaak in de lente en herfst plaatsvinden. Door de Delft3D 4-som worden enkele kleine stijgingen in chlorofylconcentraties (algenbloei) berekend tijdens het 2^e en 3^e kwartaal van 2000 (Figuur 8-6). Deze toenames in concentraties worden ook berekend door de D-HYDRO-som al vallen de berekende waarden voor dit model vaak iets hoger uit. Ook worden enkele toenames berekend door D-HYDRO die niet of nauwelijks naar voren kwamen tijdens de Delft3D 4-berekening. Op deze verschillen na vertonen beide modelsommen wel een zeer vergelijkbaar patroon.

In de metingen is aan het begin van het tweede kwartaal de lentebloei in 2000 terug te zien. Deze lentebloei wordt door het D-HYDRO-model deels berekend in de oppervlaktelaag (zie piek net onder de hoogste gemeten waarde), de Delft3D 4-som berekent echter lagere chlorofylconcentraties. Dit leidt tot kleine verschillen in de statistische kengetallen met een bias van $-1,27 \mu\text{g/L}$ voor Delft3D 4 en $-0,21 \mu\text{g/L}$ voor de D-HYDRO-som (Tabel 8.3). De overige kengetallen (standaarddeviatie en RMSE) voor de oppervlaktelaag wijken echter nauwelijks af. Voor de diepere waterlagen tonen beide modelsommen kleine verschillen in statistische kengetallen.



Figuur 8-6 Vergelijking van berekende chlorofylconcentraties ($\mu\text{g/l}$) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

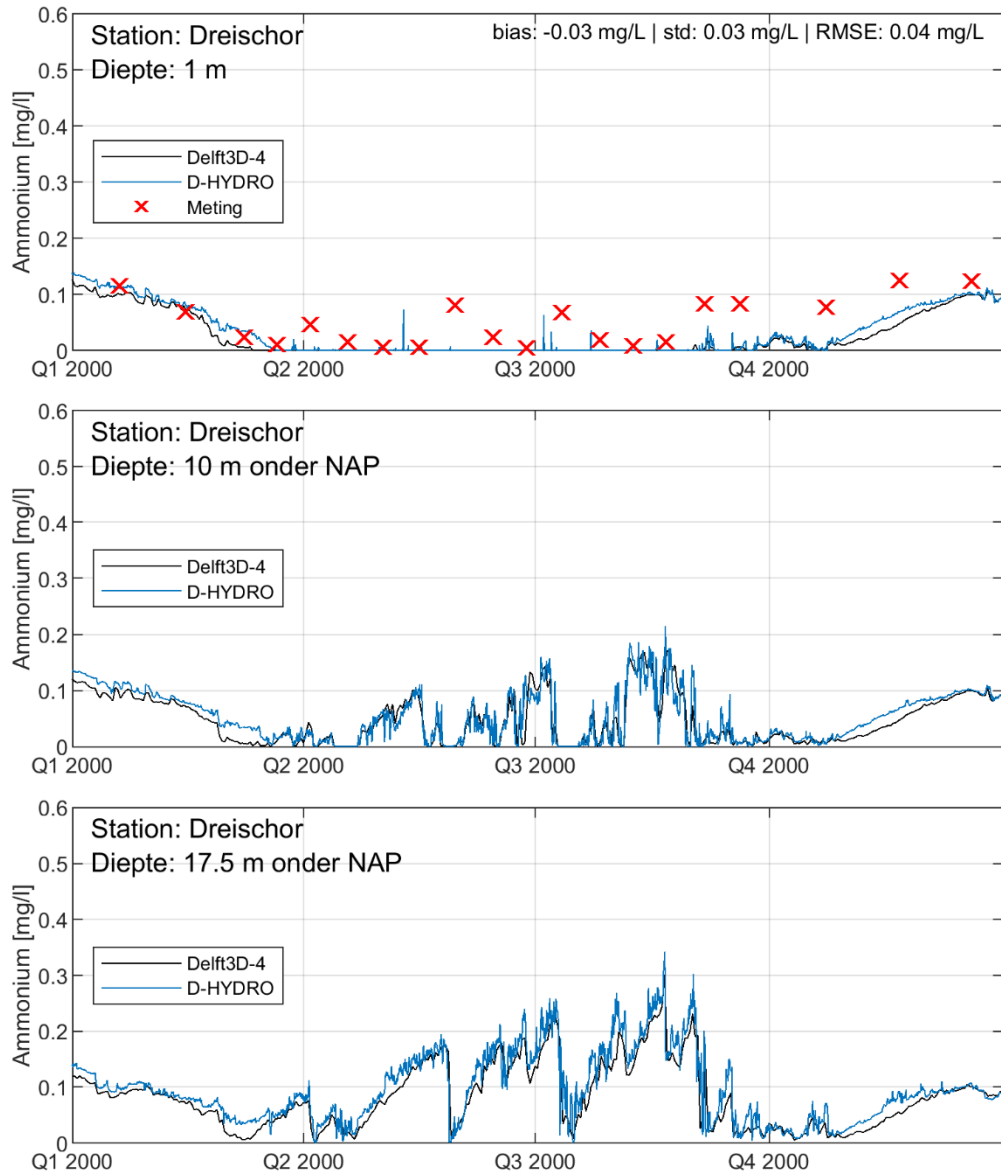
Tabel 8.3. Statistische kengetallen (bias, std. en RMSE) voor berekende waarden van waterkwaliteitsparameters vergeleken met metingen voor het station Dreischor in het jaar 2000. Waterkwaliteitsparameters hier weergegeven zijn chlorofyl-, ammonium-, nitraat-, zuurstof-, fosfaat- en silicium-, totale stikstof- en totale fosforconcentraties.

Station	Diepte (in m)	Parameter	Bias		STDEV		RMSE	
			Delft3D 4	D-HYDRO	Delft3D 4	D-HYDRO	Delft3D 4	D-HYDRO
Dreischor	1	Chlorofyl	-1,27	-0,21	3,67	4,14	3,89	4,14
	10		1,16	0,91	4,47	5,28	4,62	5,35
	17,5		0,42	1,67	3,12	3,15	3,15	3,57
	1	Ammonium	-0,03	-0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
	1	Nitraat	-0,03	0,02	0,06	0,09	0,07	0,09
	10		0,01	0,04	0,04	0,07	0,04	0,08
	17,5		0,02	0,04	0,04	0,05	0,04	0,07
	1	Zuurstof	0,21	0,31	0,80	0,79	0,82	0,85
	1	Fosfaat	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	1	Silicaat	-0,06	0,01	0,12	0,16	0,13	0,16
	1	Totale stikstof	-0,06	0,01	0,08	0,12	0,10	0,12
	10		0,03	0,07	0,08	0,12	0,08	0,14
	17,5		-0,01	0,02	0,10	0,08	0,10	0,08
	1	Totale fosfor	-0,02	-0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
	10		-0,03	-0,03	0,02	0,02	0,03	0,04
17,5	-0,05		-0,05	0,03	0,03	0,06	0,06	

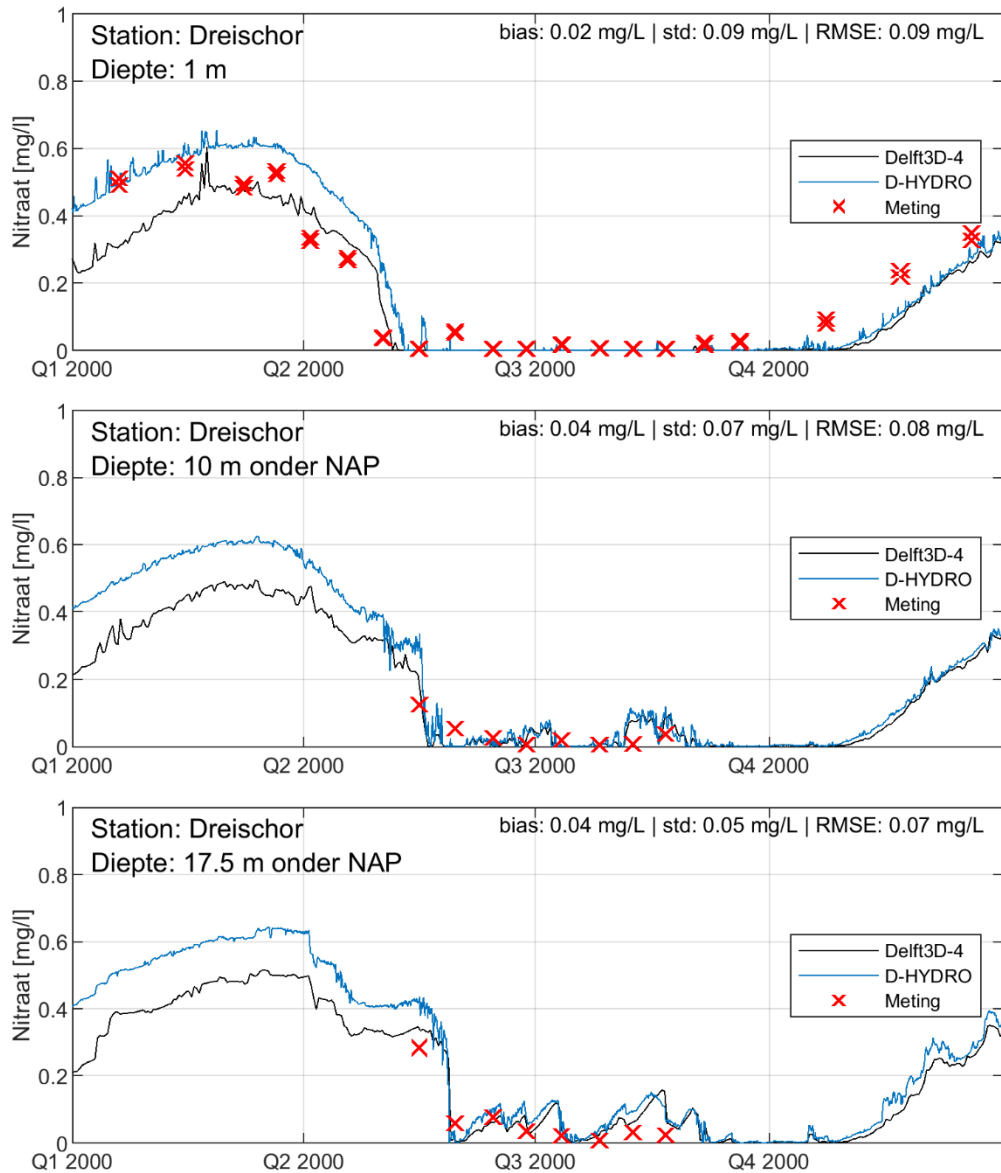
8.3.2.3 Nutriënten: stikstofconcentraties

Berekende waarden van ammoniumconcentraties (Figuur 8-7) zijn grotendeels gelijk voor beide modelsummen. Het D-HYDRO-model berekent gemiddeld genomen iets hogere waarden. Voor nitraatconcentraties geldt dat voornamelijk in het eerste kwartaal de D-HYDRO berekening iets hogere waarden laat zien dan de Delft3D 4-som (Figuur 8-8). Voor zowel ammonium- als nitraatconcentraties wordt een limitatie van deze nutriënten berekend in de zomerperiode door beide modelsummen (2^e en 3^e kwartaal).

De berekende limitatie van nitraat en ammonium in de oppervlaktelaag gedurende de zomer wordt ook waargenomen in de metingen. Metingen komen voor een groot gedeelte van het jaar ook overeen met de berekeningen van ammonium in de oppervlaktelaag. Ook nitraatconcentraties van de gemeten waarden en de berekende waarden zijn nagenoeg gelijk in alle waterlagen. Omdat berekende concentraties van beide modelsummen nagenoeg gelijk zijn, zijn de statistische kengetallen ook nauwelijks onderscheidend (Tabel 8.3). De *bias* van -0,03 mg/L voor ammoniumconcentraties wordt voornamelijk veroorzaakt door de onderschatte waarden in de lente- en zomerperiode. Berekende nitraatconcentraties hebben een *bias* t.o.v. de gemeten waarden variërend van -0,03 tot 0,02 mg/L voor Delft3D 4 en van 0,02 tot 0,04 mg/L voor de D-HYDRO-som.



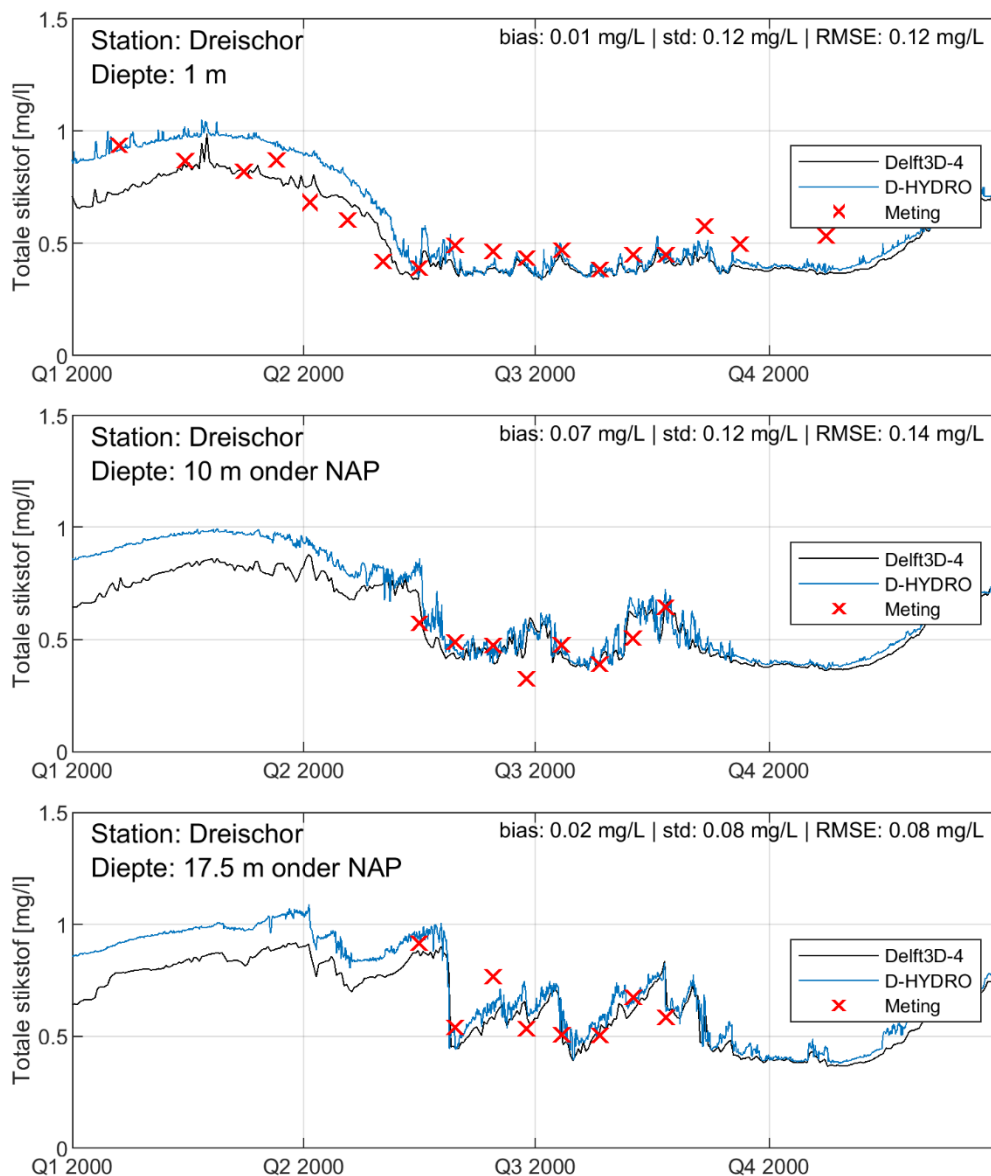
Figuur 8-7 Vergelijking van berekende ammoniumconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).



Figuur 8-8 Vergelijking van berekende nitraatconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

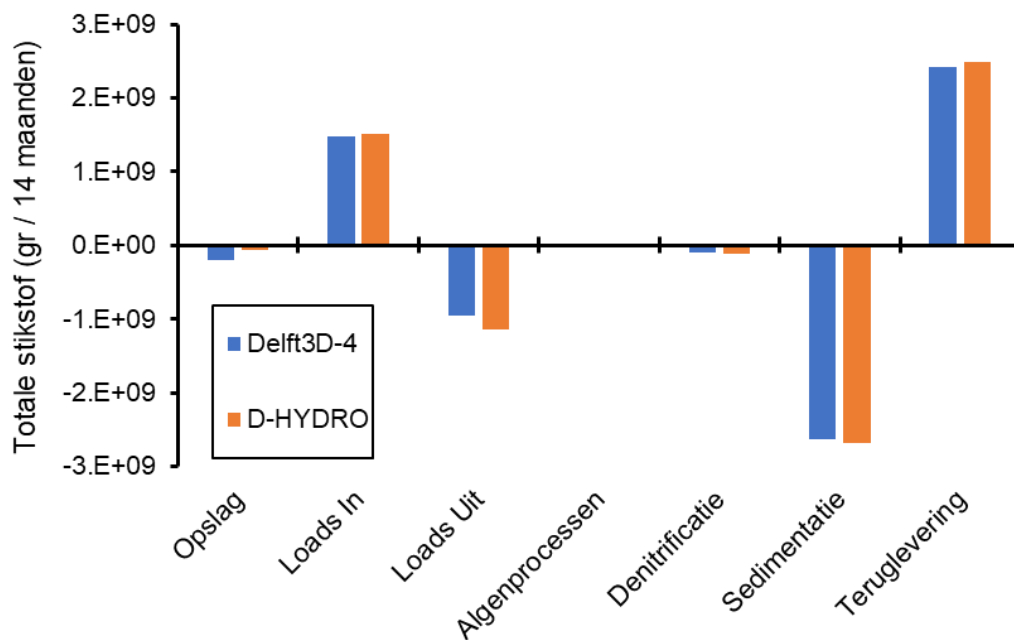
Voor de totale stikstofconcentraties zijn de verschillen tussen het oude Delft3D 4-model en de nieuwe D-HYDRO-som relatief klein, met uitzondering van het eerste kwartaal (Figuur 8-9). Dit is niet (bovenstaand figuur wekt wellicht die veronderstelling) het gevolg van verschillende initiële condities. Ook geldt hier dat, net zoals bij nitraat, de berekende waarden voor het D-HYDRO-model hogere waarden laten zien in het eerste kwartaal.

Berekende totale stikstofconcentraties komen nagenoeg overeen met de gemeten waarden. Enkel in het begin (Q1) en aan het einde van 2000 (Q4) worden totale stikstofconcentraties gemeten die hoger of lager uitvallen dan de berekende waarden, voor respectievelijk het Delft3D 4- en D-HYDRO-model. Dit leidt tot een *bias* in de oppervlaktelaag van -0,06 mg/L voor Delft3D 4 en 0,01 mg/L voor de D-HYDRO-som (Tabel 8.3).



Figuur 8-9 Vergelijking van berekende totale stikstofconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

De vergelijking van de massabalans aan totale stikstof in het systeem voor het Delft3D 4-model en het D-HYDRO-model vertoont enkele kleine verschillen (Figuur 8-10). Bij de Delft3D 4-som verdwijnt er meer stikstof naar de opslag en door sedimentatie. Bij de D-HYDRO-som komt er meer stikstof binnen door de instroom en door teruglevering van het sediment, en verdwijnt er meer stikstof door de uitstroom en door sedimentatie. Wanneer de sluitfout, die enkel in de D-HYDRO-som zit, niet meegerekend wordt is het verschil voor instromen van totale stikstof tussen beide modelsommen $\sim 2,0\%$.

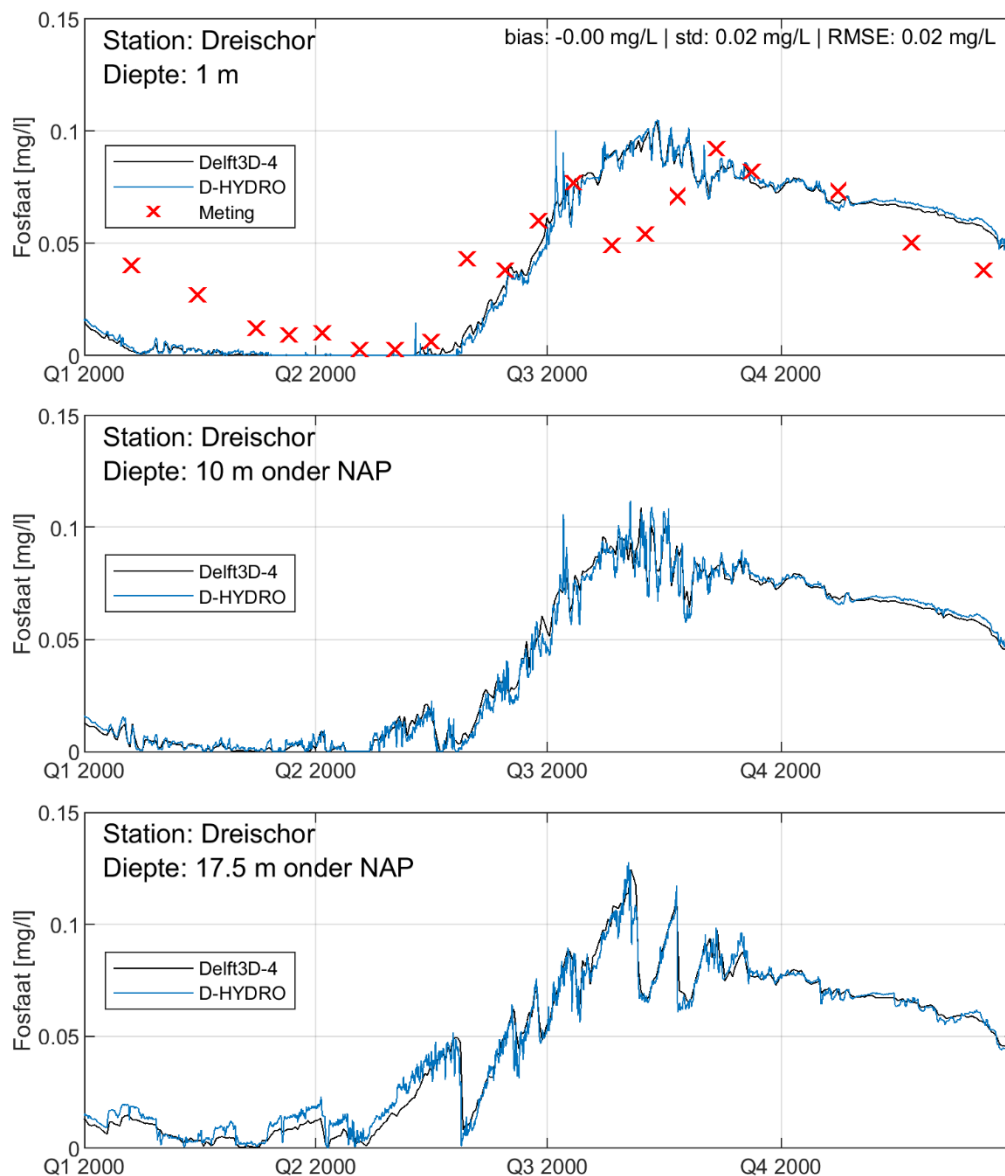


Figuur 8-10 Vergelijking van de balans van totale stikstof massa in het Grevelingen meer voor het jaar 2000 (1999-11-01 tot 2001-01-01). De toename of afname van stikstof massa is opgedeeld in stikstof uit/naar opslag, instroom, uitstroom en processen waarbij stikstof wordt opgenomen of afgestaan.

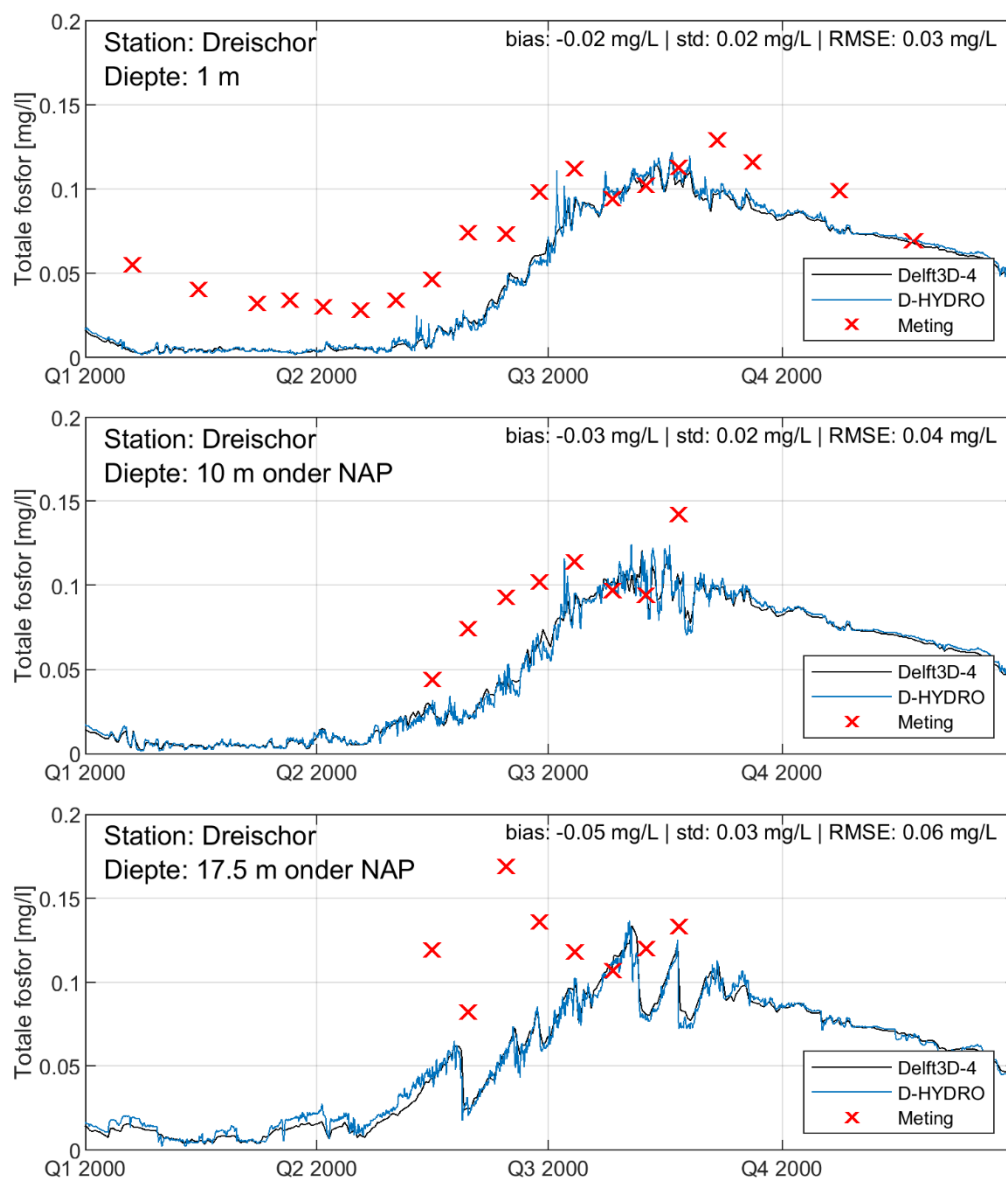
8.3.2.4 Nutriënten: fosfaatconcentraties

De berekende orthofosfaat- en totale fosfaatconcentraties zijn nagenoeg gelijk in de Delft3D 4- en D-HYDRO-som (Figuur 8-11 en Figuur 8-12).

Vergeleken met gemeten waarden zijn de berekende concentraties orthofosfaat redelijk gelijk vanaf het 2^e kwartaal, al wijken enkele gemeten waarden in het 3^e kwartaal ook af van de berekende waarden (Figuur 8-11). Voorafgaand aan het 2^e kwartaal zijn de waargenomen waarden hoger dan de berekende waarden en laten deze ook een minder uitgesproken fosforlimitatie zien t.o.v. berekeningen. Voor totale fosfaatconcentraties vallen de gemeten waarden constant hoger uit dan de berekende waarden, met uitzondering van twee tot vier meetwaarden in het derde kwartaal (Figuur 8-12). Dit leidt dan ook tot een *bias* variërend van -0,02 tot -0,05 mg/L voor Delft3D 4 en -0,02 tot -0,03 mg/L voor de D-HYDRO-som (Tabel 8.3).

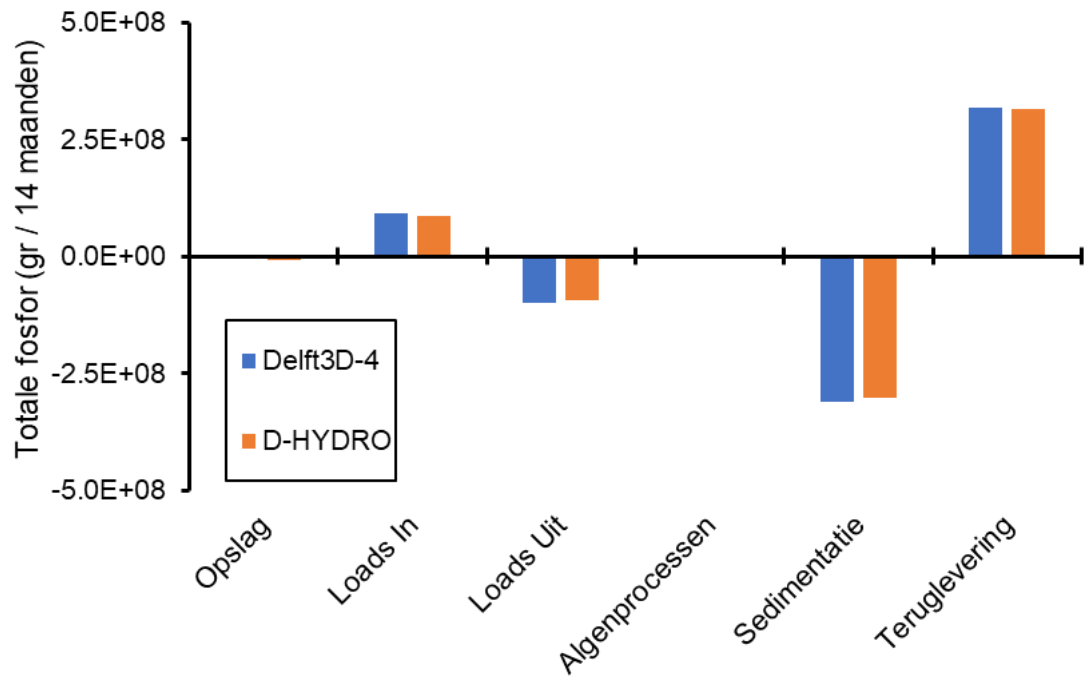


Figuur 8-11 Vergelijking van berekende orthofosfaatconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).



Figuur 8-12 Vergelijking van berekende totale fosfaatconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

Vergelijkingen van de massabalans voor totaal-fosfaat in het Grevelingenmeer tussen de modelsommen tonen redelijk kleine verschillen (Figuur 8-13). Het Delft3D 4-model toont een grotere hoeveelheid fosfaat die via instroming het systeem binnen komt en een grotere hoeveelheid fosfor wat het systeem uitstroomt. Ook komt er bij het Delft3D 4-model meer fosfor het systeem binnen door teruglevering van het sediment en verdwijnt er meer fosfor door sedimentatie. Verschillen in instroming zijn minimaal (< 5,0%) wanneer de sluitfout niet meegenomen wordt in de vergelijking.

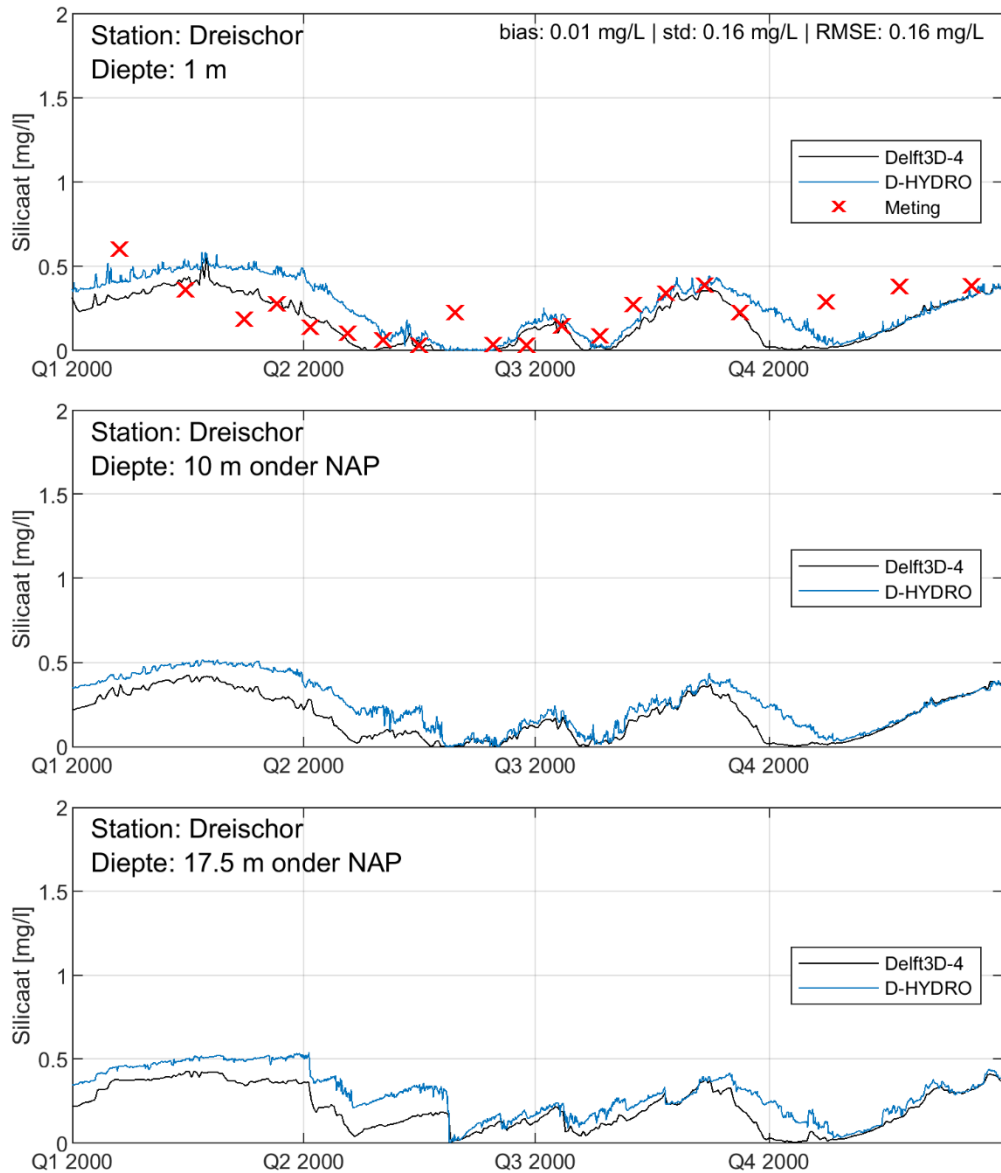


Figuur 8-13 Vergelijking van de balans van totale fosfor massa in het Grevelingen meer voor het jaar 2000 (1999-11-01 tot 2001-01-01). De toename of afname van fosfor massa is opgedeeld in fosfor uit/naar opslag, instroom, uitstroom en processen waarbij fosfor wordt opgenomen of afgestaan opgedeeld in algen en sediment gerelateerde processen.

8.3.2.5 Nutriënten: siliciumconcentraties

Voor siliciumconcentraties zijn de verschillen tussen het oude Delft3D 4-model en de D-HYDRO-som relatief groot (Figuur 8-14). De verschillen tussen deze modelsommen worden voornamelijk tijdens het eerste en vierde kwartaal van de jaarsom 2000 waargenomen. De berekende waarden van de D-HYDRO-som zijn wat meer afgevlakt, terwijl de Delft3D 4-som wat meer variatie laat zien. Ook daalt de siliciumconcentratie in de D-HYDRO-berekening minder snel tot het de waarde bereikt van een limiterende stof.

Door de afwijkingen in het 1^e en 4^e kwartaal van 2000 verschilt ook de benadering van gemeten waarden door berekeningen enigszins (Tabel 8.3). De Delft3D 4-berekening geeft een *bias* van -0,06 mg/L en de D-HYDRO-som komt op een *bias* van 0,01 mg/L uit.

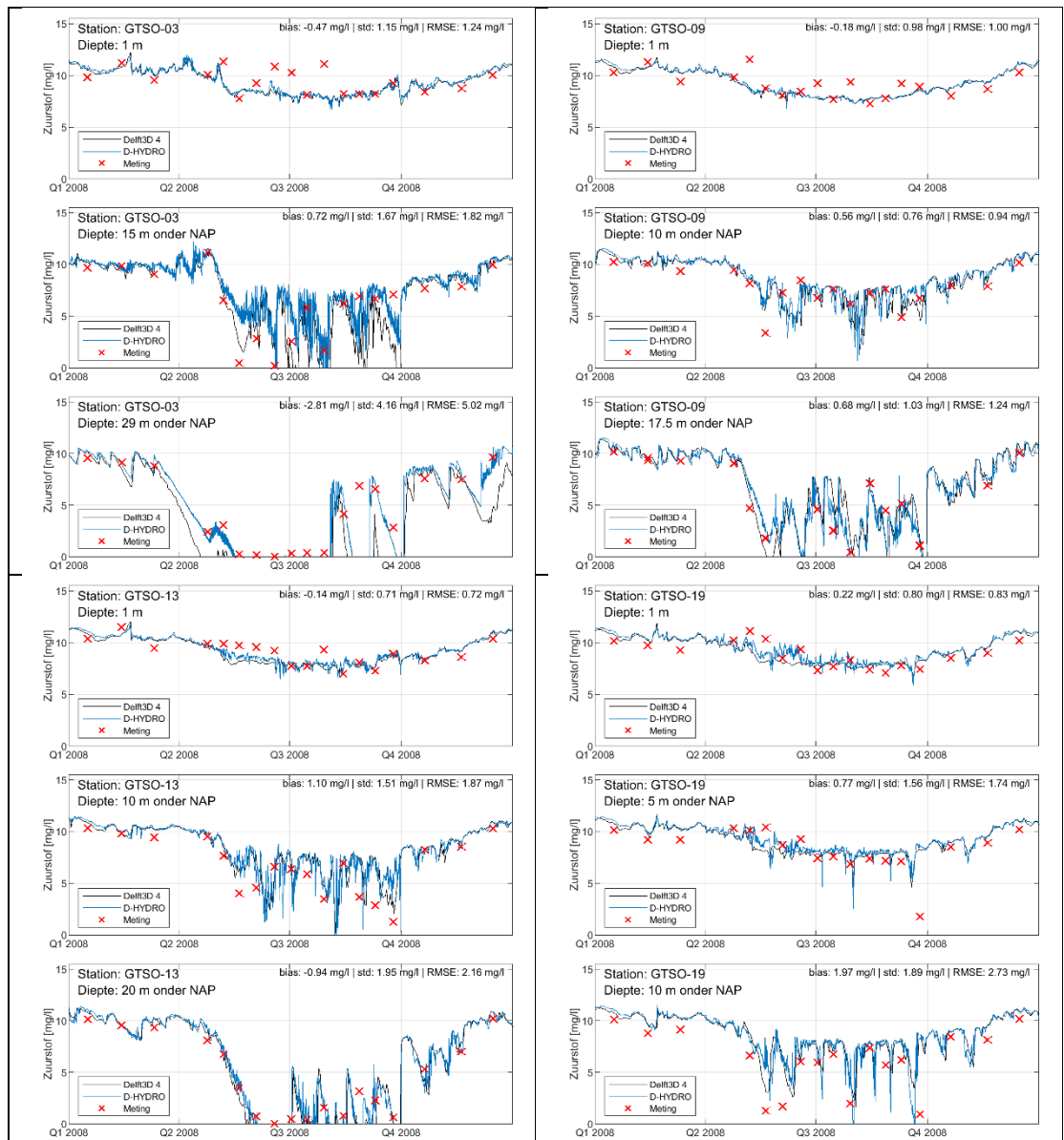


Figuur 8-14 Vergelijking van berekende siliciumconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

8.3.3 Resultaten voor het jaar 2008

8.3.3.1 Opgeloste-zuurstofconcentratie Tijdsreeksen

Figuur 8-15 toont de zuurstofconcentratie op locaties GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19 op drie verschillende dieptes (1 m diepte, halverwege de waterkolom en net boven de bodem) voor jaarsom 2008. In deze afbeelding worden de door het D-HYDRO-model (blauw) en Delft3D 4-model (zwart) berekende zuurstofconcentraties weergegeven. Met rode kruizen zijn de gemeten waarden aangegeven. De bijbehorende statistische kengetallen (bias, standaarddeviatie en RMSE) van de data-model-vergelijking van zowel het D-HYDRO-model als het Delft3D 4-model zijn opgenomen in Tabel 8.4.



Figuur 8-15 Berekende (Delft3D 4 (zwart) en D-HYDRO (blauw)) en gemeten (rode kruizen) zuurstofconcentraties (mg/L) voor het jaar 2008 voor verschillende GTSO-metstations: GTSO-03 (paneel linksboven), GTSO-09 (paneel rechtsboven), GTSO-13 (paneel linksonder), GTSO-19 (paneel rechtsonder). Zuurstofconcentraties zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak, halverwege de waterkolom (afhankelijk van de lokale waterdiepte) en net boven de bodem.

Tabel 8.4. Statistische kengetallen (bias, standaarddeviatie en RMSE) voor berekende waarden van zuurstofconcentraties vergeleken met metingen voor verschillende dieptes bij de stations GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19 in het jaar 2008.

Station	Diepte (in m)	Bias		Standaarddeviatie		RMSE	
		Delft3D 4	D- HYDRO	Delft3D 4	D- HYDRO	Delft3D 4	D- HYDRO
GTSO-03	1	-0,50	-0,47	1,22	1,15	1,32	1,24
	15	-0,44	0,72	2,07	1,67	2,11	1,82
	29	-5,93	-2,81	6,05	4,16	8,47	5,02
GTSO-09	1	-0,29	-0,18	1,01	0,98	1,05	1,00
	10	-0,10	0,56	1,31	0,76	1,31	0,94
	17,5	0,55	0,68	1,28	1,04	1,39	1,24
GTSO-13	1	-0,29	-0,14	0,84	0,71	0,89	0,72
	10	1,11	1,10	1,39	1,51	1,78	1,87
	20	-1,47	-0,94	2,47	1,95	2,88	2,16
GTSO-19	1	-0,03	0,22	0,92	0,80	0,92	0,83
	5	0,42	0,77	1,73	1,56	1,78	1,74
	10	1,78	1,97	1,78	1,89	2,51	2,73

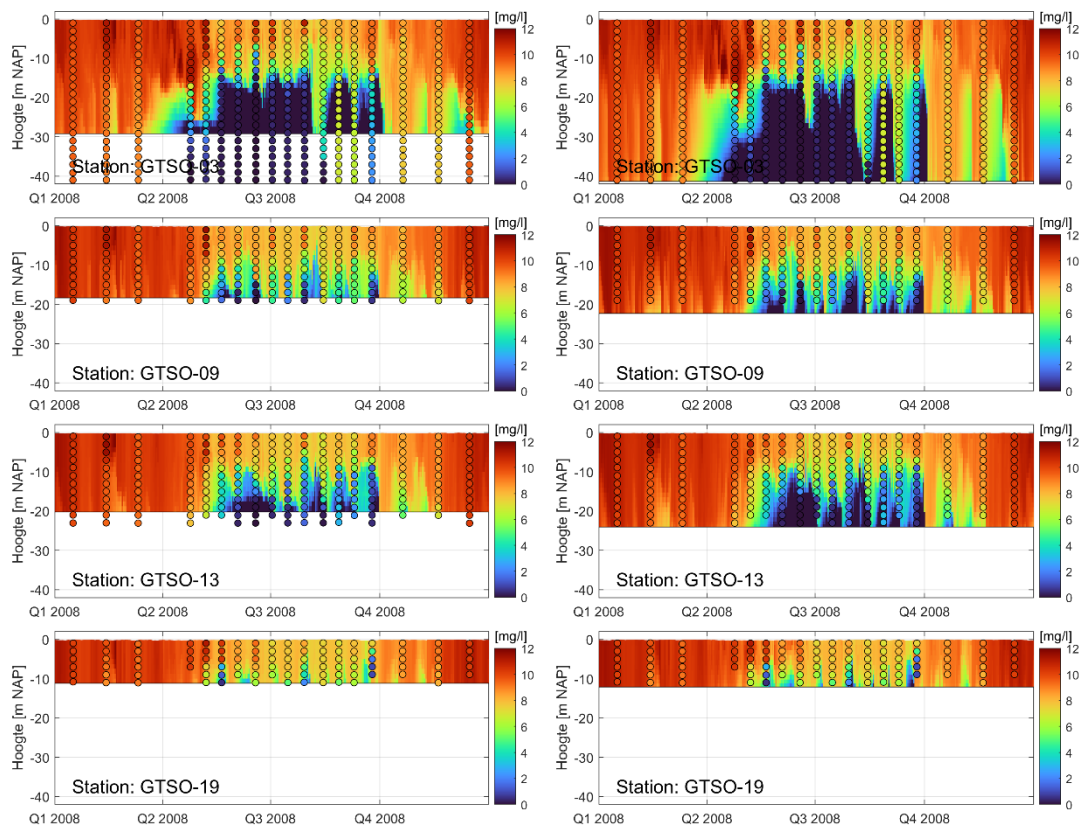
Zuurstofconcentraties berekend door het D-HYDRO-model komen voor de vier beschouwde stations grotendeels overeen met de door Delft3D 4 berekende waarden nabij het wateroppervlak. Op grotere dieptes zijn de verschillen groter: zo berekent het Delft3D 4-model een lagere zuurstofconcentratie in de zomer van 2008 (zie met name GTSO-03).

Uit de vergelijking van de D-HYDRO-modelresultaten met de geobserveerde waarden, blijkt dat het model goed in staat is de opgeloste-zuurstofconcentratie in de Grevelingen te reproduceren. De gemeten zuurstofstratificatie in het tweede en derde kwartaal is duidelijk terug te zien in het berekende zuurstofgehalte.

In het algemeen toont de model-model-vergelijking aan dat de door het D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentraties erg vergelijkbaar zijn met die van het voorgaande Delft3D 4-model. In combinatie met de data-model-vergelijking kan worden gesteld dat de modellen in staat zijn de gemeten waarden redelijk te reproduceren en dat het verschil tussen model en meting groter is dan tussen de modelresultaten onderling.

z,t-plot

Naast het verloop van zuurstofconcentraties over tijd op een aantal vaste dieptes is voor beide modellen ook gekeken naar het zuurstofprofiel over tijd (Figuur 8-16). In dit figuur zijn dezelfde vier representatieve GTSO-locaties gekozen.



Figuur 8-16 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van zuurstofconcentraties voor het Delft3D 4-model (linkerzijde) en D-HYDRO-model (rechterzijde) in het jaar 2008 voor verschillende meetstations (van boven naar beneden).

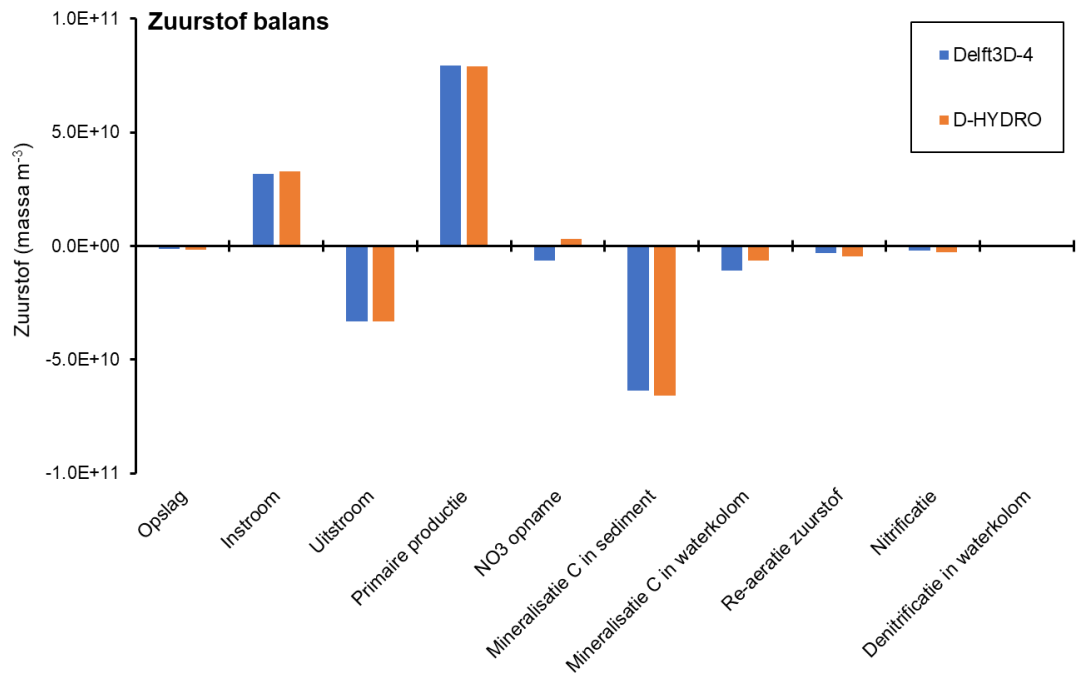
De model-model-vergelijking in bovenstaande z,t-plots laat zien dat beide modellen een erg vergelijkbaar patroon van zuurstofstratificatie gedurende het jaar 2008 berekenen.

Uit zowel de gemeten als de berekende waarden van zuurstofprofielen komt naar voren dat er, op de diepe putten na, geen sprake is van permanente zuurstofloosheid tijdens de gehele zomerperiode maar dat er meerdere periodes van zuurstofarme condities zijn. Windmenging speelt hier waarschijnlijk een belangrijke rol in, waar tijdens periodes met lagere windsnelheden stratificatie kan optreden (eventueel i.c.m. hogere temperatuur en zoninstraling). Deze stratificatie kan verdwijnen of minder worden tijdens periodes met hogere windsnelheden.

Massabalans

De berekende totale zuurstof massabalans in het Grevelingen van beide modelsommen laat kleine verschillen zien in de manier waarop zuurstof uit het systeem verdwijnt voor jaarsom 2008 (Figuur 8-17). In de Delft3D 4-som verdwijnt een groter gedeelte van de zuurstof door NO_3 opname en door mineralisatie van koolstof in de waterkolom. Bij de D-HYDRO-som verdwijnt er meer zuurstof uit het systeem door mineralisatie van koolstof in het sediment en door re-aeratie van zuurstof aan het wateroppervlak.

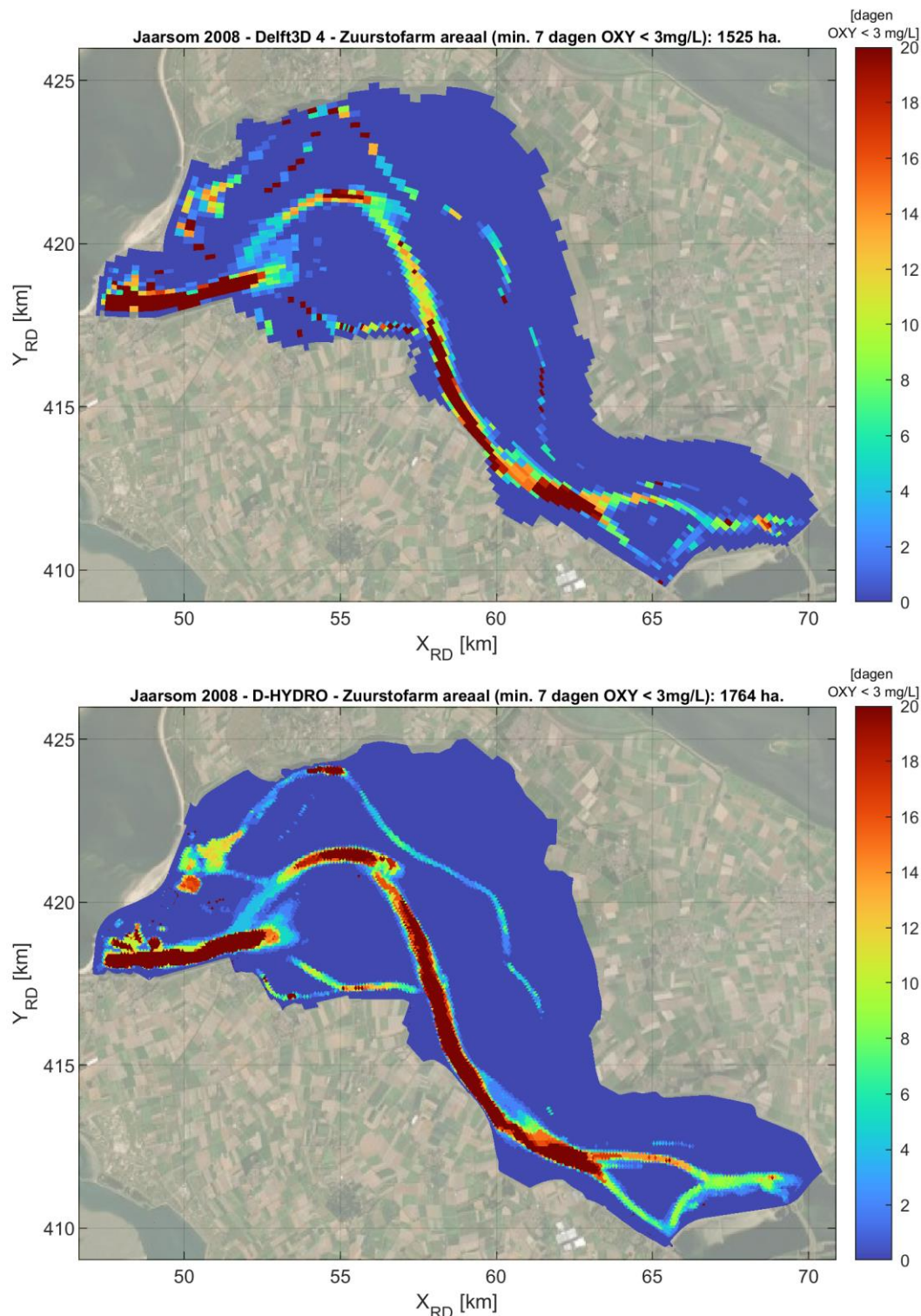
Net als voor jaarsom 2000 geldt dat ook voor jaarsom 2008 een groot deel van de randvoorwaarden exact hetzelfde is in beide modellen, maar dat door een klein verschil in de modelopzet (het opnemen van een sluitfout-term en mogelijk door kleine (interpolatie)verschillen in de softwaresystemen) de uiteindelijke instroom niet exact gelijk is. Desalniettemin geeft het onderstaande figuur weer dat de uiteindelijke zuurstofbalans in beide modellen erg vergelijkbaar is.



Figuur 8-17 Vergelijking van de zuurstofbalans in het Grevelingen meer voor het jaar 2008. De toename of afname van zuurstof massa is opgedeeld in zuurstof uit/naar opslag, instroom, uitstroom, primaire productie, NO3 opname, mineralisatie van koolstof (C) in het sediment, mineralisatie van koolstof (C) in de waterkolom, re-aeratie van zuurstof, nitrificatie en denitrificatie in de waterkolom.

Zuurstofarm areaal

Het Delft3D 4- en D-HYDRO-model berekenen een oppervlak van resp. 1525 en 1764 ha. aan zuurstofarme (< 3 mg/L) condities gedurende tenminste 7 aaneengesloten dagen. Het maximaal aantal aangesloten dagen dat opgeloste-zuurstofgehaltes < 3 mg/L worden berekend, is afgebeeld in Figuur 8-18. Kwalitatief gezien komt het ruimtelijke patroon van zuurstofarme condities in beide modelsommen aardig overeen.



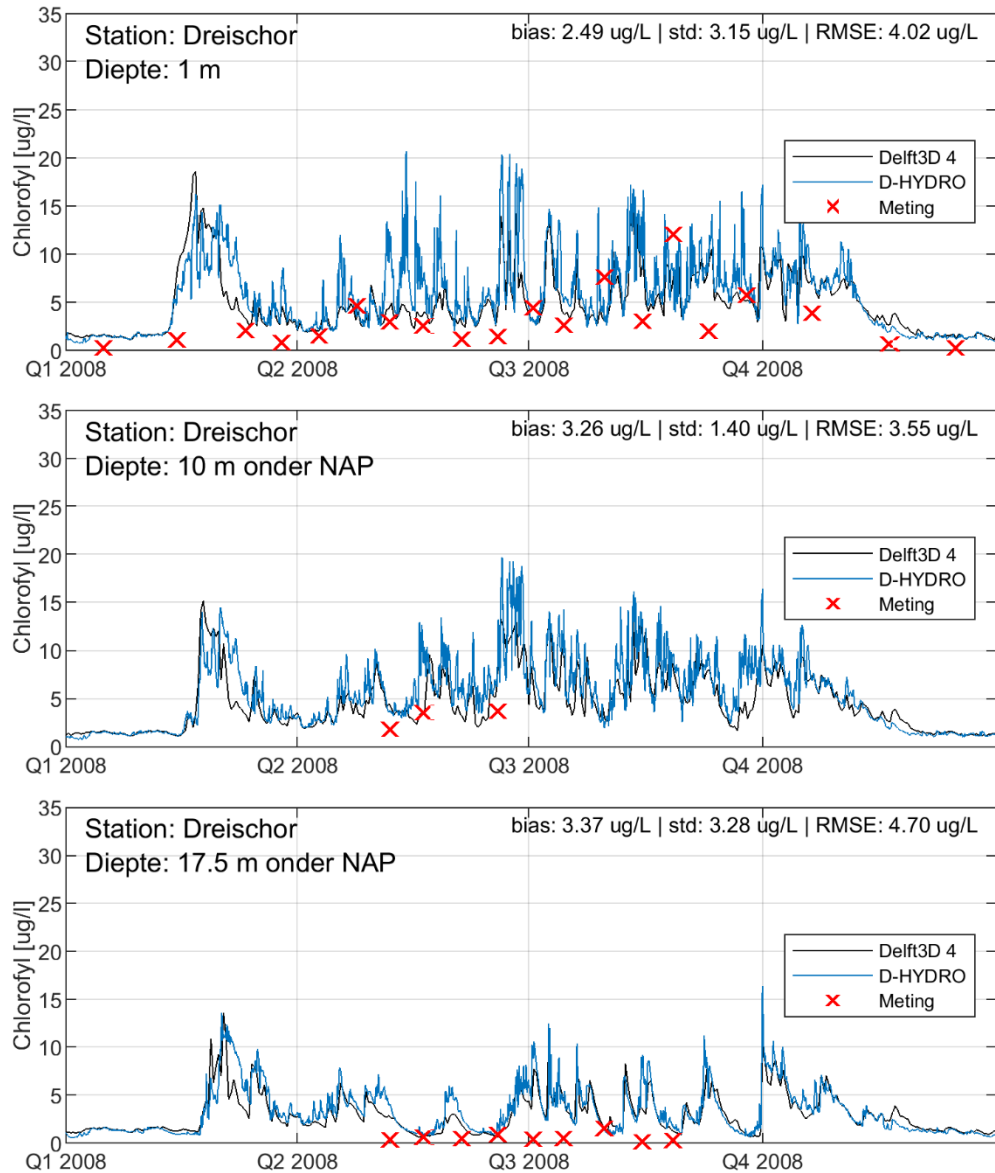
Figuur 8-18. Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie <math>< 3 \text{ mg/L}</math>) voor het Grevelingenmeer berekend met het Delft3D 4-model (bovenste paneel) en het D-HYDRO-model (onderste paneel). Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.

8.3.3.2 Chlorofylconcentratie

Berekende chlorofylconcentraties van beide modelsommen komen grotendeels overeen, al laat de model-model-vergelijking ook verschillen zien die voornamelijk zichtbaar zijn in de hoogte van de pieken tijdens het tweede kwartaal (Figuur 8-19). Deze hogere concentraties zijn voor

D-HYDRO-som vaak nog hoger dan voor de Delft3D 4-som berekeningen en resulteren in een lentebloei die enkel door D-HYDRO berekend wordt (tijdens het 2^e kwartaal). Berekende chlorofylconcentraties van beide modelsommen laten echter wel een algenbloei zien in de lente en herfst.

De berekende chlorofylconcentraties laten een overschatting zien t.o.v. de gemeten waardes (Tabel 8.5), zowel het Delft3D 4-model (*bias*: 1,35 µg/l; RMSE: 3,24 µg/l) als het D-HYDRO-model (*bias*: 2,49 µg/l; RMSE: 4,02 µg/l). De Delft3D 4-som benadert de gemeten concentraties wel beter dan de D-HYDRO-som voor alle waterlagen (Tabel 8.5). De lentebloei die door de modellen wordt berekend is niet terug te zien in de gemeten waardes. Ook een tweede (midden 2^e kwartaal door D-HYDRO) en derde piek (eind 2^e kwartaal door beide sommen) in berekende chlorofylconcentraties wordt niet waargenomen in de metingen. Het ontbreken van de vroege voorjaarsbloei in de metingen zou kunnen komen door de frequentie waarmee metingen worden afgenomen. De metingen vonden namelijk plaats aan het begin en het einde van de berekende lentebloei (piek tijdens 1^e kwartaal). Voor de tweede en derde piek in chlorofylconcentraties geldt dit echter niet en is er sprake van een redelijke overschatting.

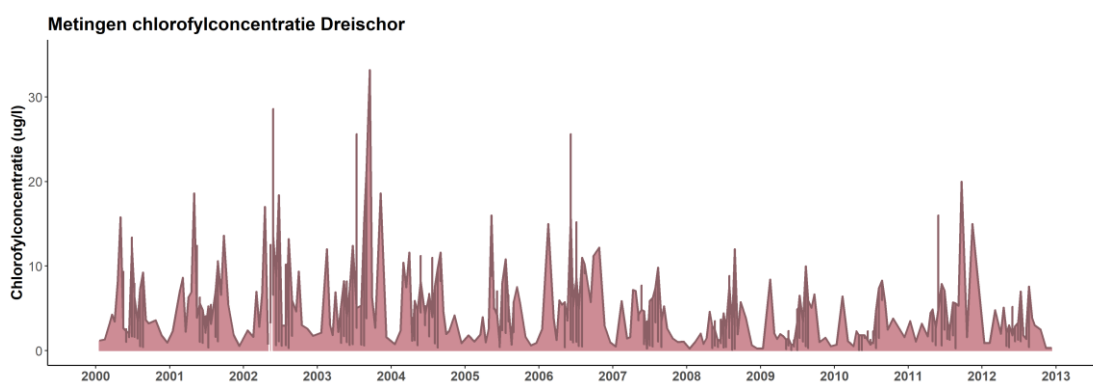


Figuur 8-19 Vergelijking van berekende chlorofylconcentraties ($\mu\text{g/l}$) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

Tabel 8.5. Statistische kengetallen (bias, std. en RMSE) voor berekende waarden van waterkwaliteitsparameters vergeleken met metingen voor het station Dreischor in het jaar 2008. Waterkwaliteitsparameters hier weergegeven zijn chlorofyl-, ammonium-, nitraat-, zuurstof-, fosfaat- en silicium-, totale stikstof- en totale fosforconcentraties.

Station	Diepte (in m)	Parameter	Bias		STDEV		RMSE	
			Delft3D 4	D- HYDRO	Delft3D 4	D- HYDRO	Delft3D 4	D- HYDRO
Dreischor	1	Chlorofyl	1,35	2,49	2,94	3,15	3,24	4,02
	10		1,90	3,26	1,31	1,40	2,31	3,55
	17,5		2,00	3,37	1,86	3,28	2,73	4,70
	1	Ammonium	-0,01	-0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
	1	Nitraat	-0,01	0,03	0,03	0,05	0,03	0,06
	10		-0,01	0,03	0,05	0,02	0,05	0,04
	17,5		0,07	0,10	0,05	0,06	0,08	0,11
	1	Zuurstof	-0,22	-0,07	0,76	0,70	0,79	0,70
	1	Fosfaat	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	1	Silicaat	0,01	0,06	0,11	0,12	0,11	0,13
	1	Totale stikstof	0,01	0,06	0,10	0,13	0,10	0,14
	10		0,14	0,19	0,11	0,12	0,18	0,23
	17,5		0,23	0,24	0,11	0,08	0,26	0,25
	1	Totale fosfor	-0,01	-0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	10		-0,01	-0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	17,5		-0,02	-0,02	0,03	0,03	0,04	0,04

Het uitblijven van een lentebloei in de gemeten waarden is nog wat beter onderzocht door te kijken naar de chlorofylconcentraties in locatie Dreischor over een langere periode (2000-2013; Figuur 8-20). Daaruit kwam naar voren dat het uitblijven van de lentebloei in 2008 een uitzondering was, zeker als je dat vergelijkt met gemeten chlorofylconcentraties in jaren waarin een duidelijke voorjaarsbloei is waargenomen (2000-2006). Voor het niet waarnemen van een voorjaarsbloei in 2008 zijn twee mogelijke verklaringen: of door de timing van metingen liep men de voorjaarsbloei mis of de voorjaarsbloei bleef geheel uit.



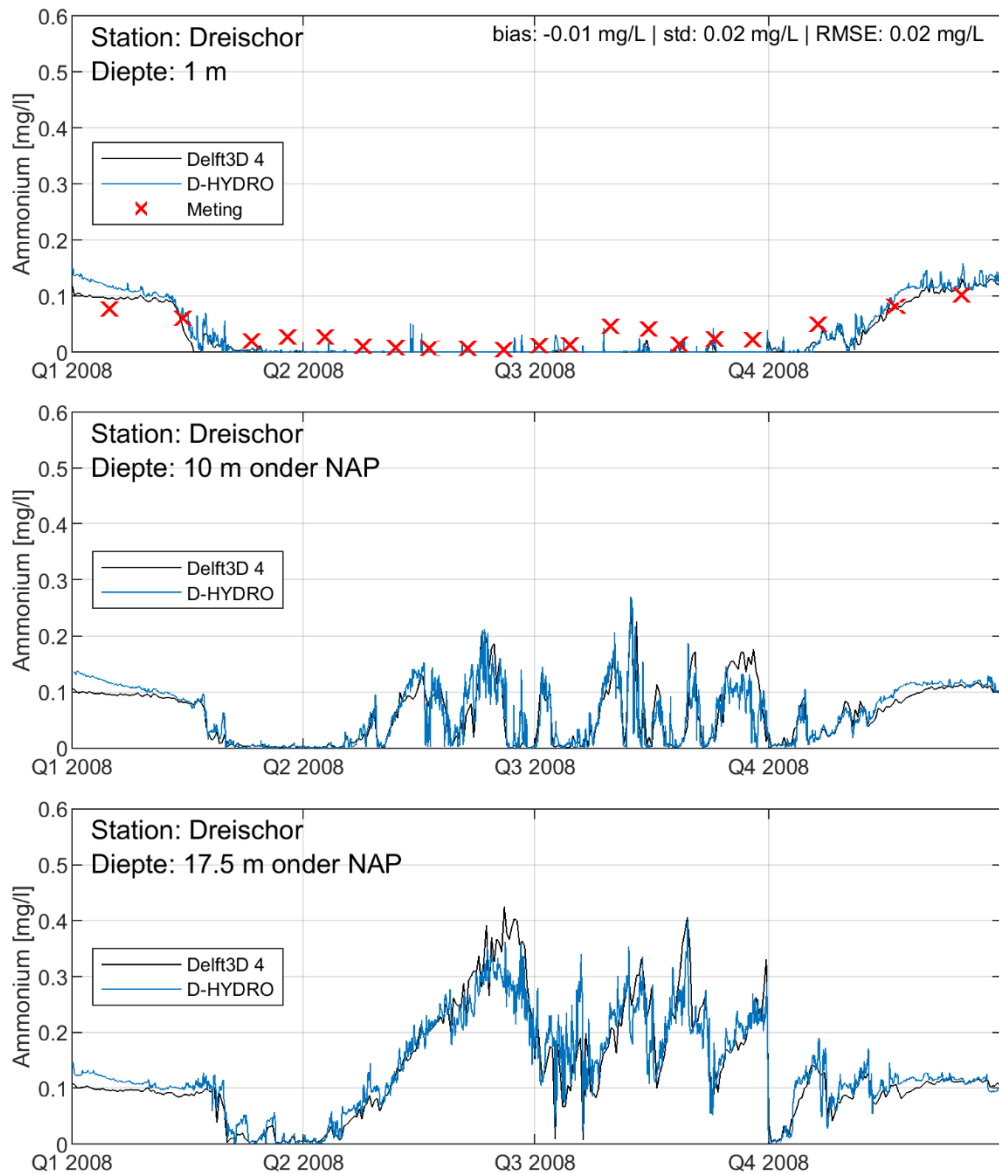
Figuur 8-20 Gemeten chlorofylconcentraties ($\mu\text{g/l}$) van het Dreischor, Grevelingen, over een langdurige periode (2000-2013).

8.3.3.3 Nutriënten: stikstofconcentratie

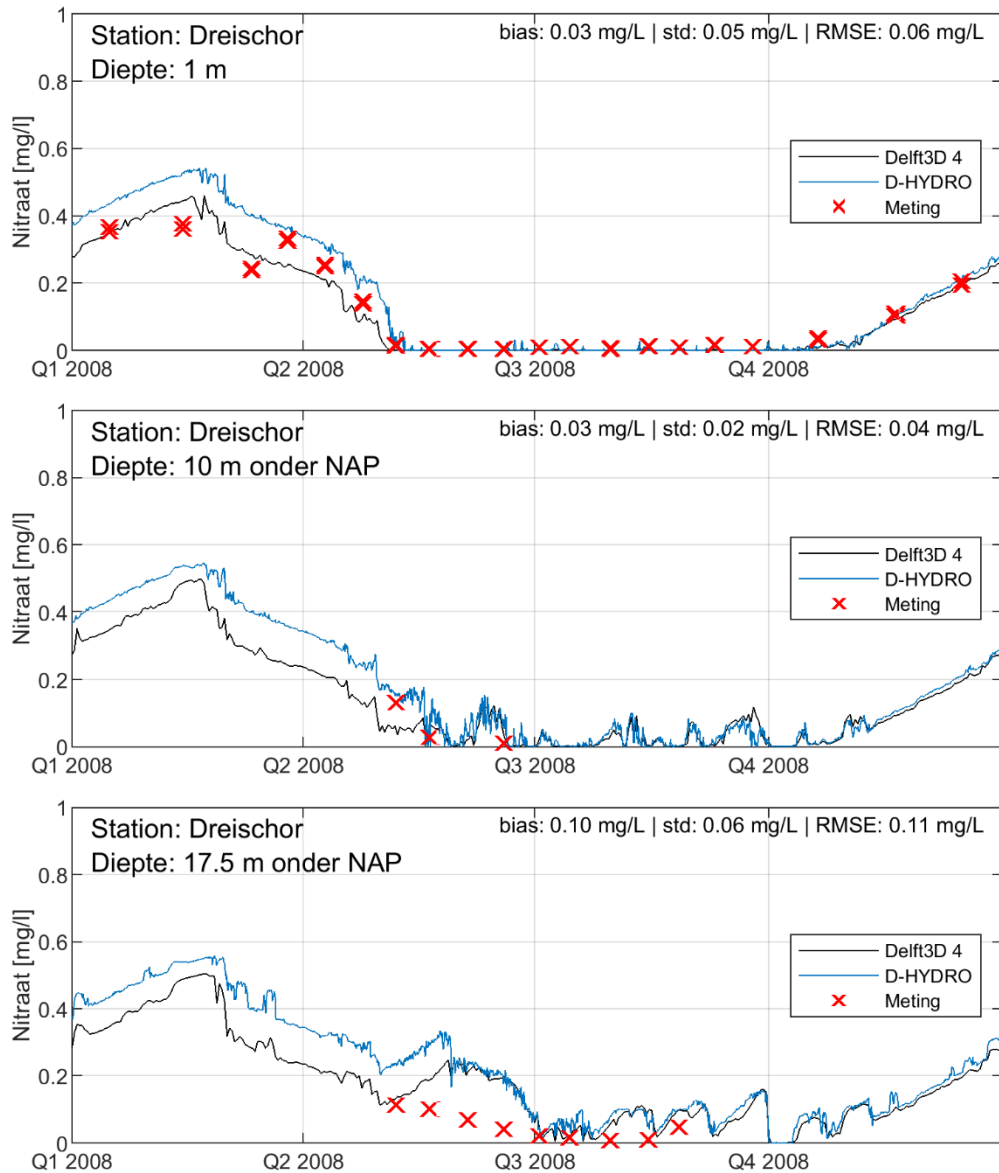
Verschillen tussen het oude Delft3D 4-model en de D-HYDRO-som zijn relatief klein voor ammonium- en nitraatconcentraties (Figuur 8-21 en Figuur 8-22). Berekende nitraatconcentraties

wijken voor alle getoonde waterlagen licht af in het eerste halve jaar van 2008 met ietwat hoger waarden berekend door de D-HYDRO-som.

Berekende ammonium- en nitraatconcentraties voor de oppervlaktelaag zijn nagenoeg gelijk aan de gemeten waarden in Dreischor, Grevelingen (Tabel 8.5). Dit leidt tot een *bias* van -0,01 mg/L en een RMSE van 0.02 mg/L voor ammonium en een *bias* variërend van -0,01 mg/L (Delft3D 4) tot 0,03 mg/L (D-HYDRO) en een RMSE variërend van 0,03 (Delft3D 4) tot 0,06 mg/L (D-HYDRO) voor nitraat. De stikstoflimitatie die duidelijk waargenomen wordt in de oppervlaktelagen wordt ook berekend door alle modelsommen, al is er een korte periode (Q2) dat in de diepere waterlaag nitraat overschat wordt.



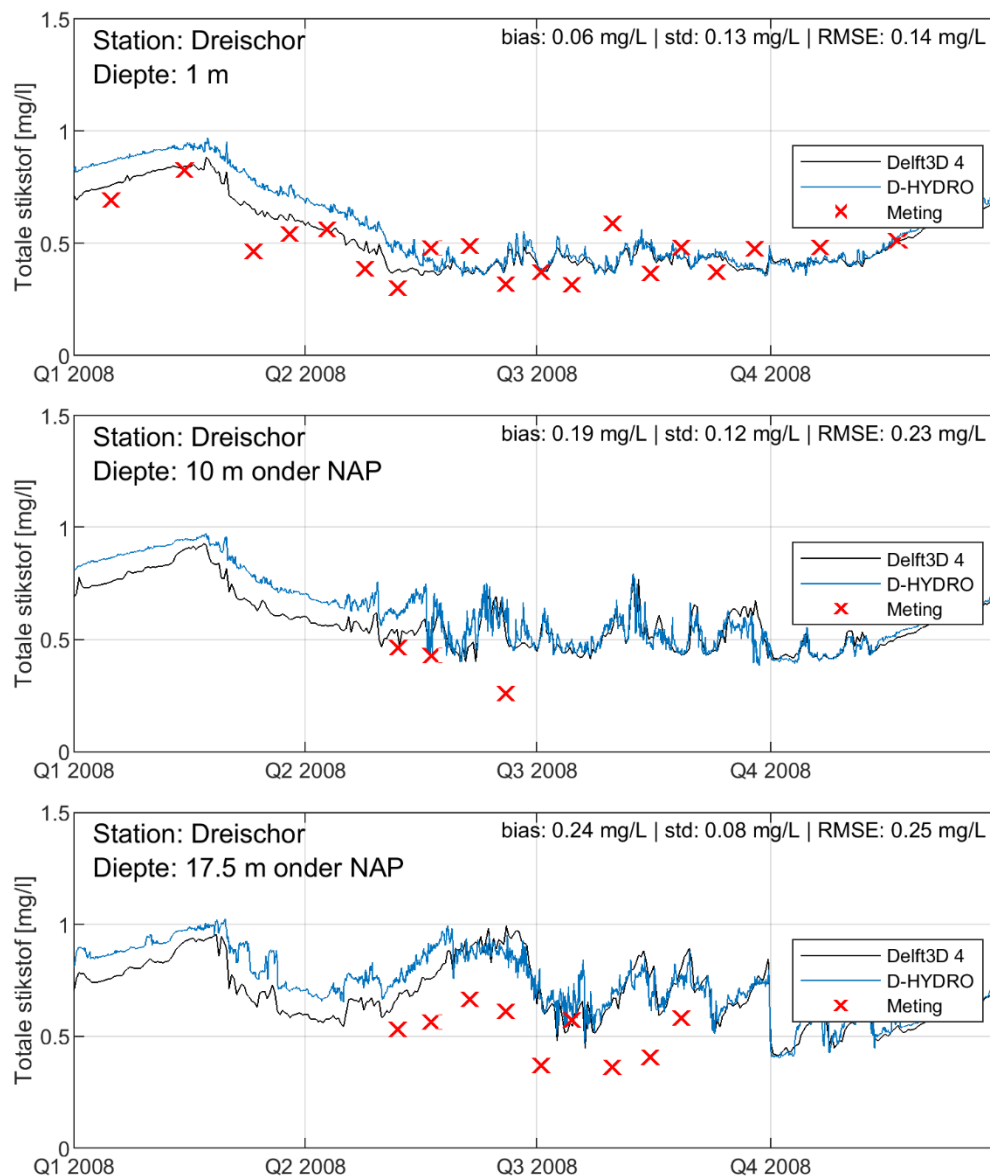
Figuur 8-21 Vergelijking van berekende ammoniumconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).



Figuur 8-22 Vergelijking van berekende nitraatconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

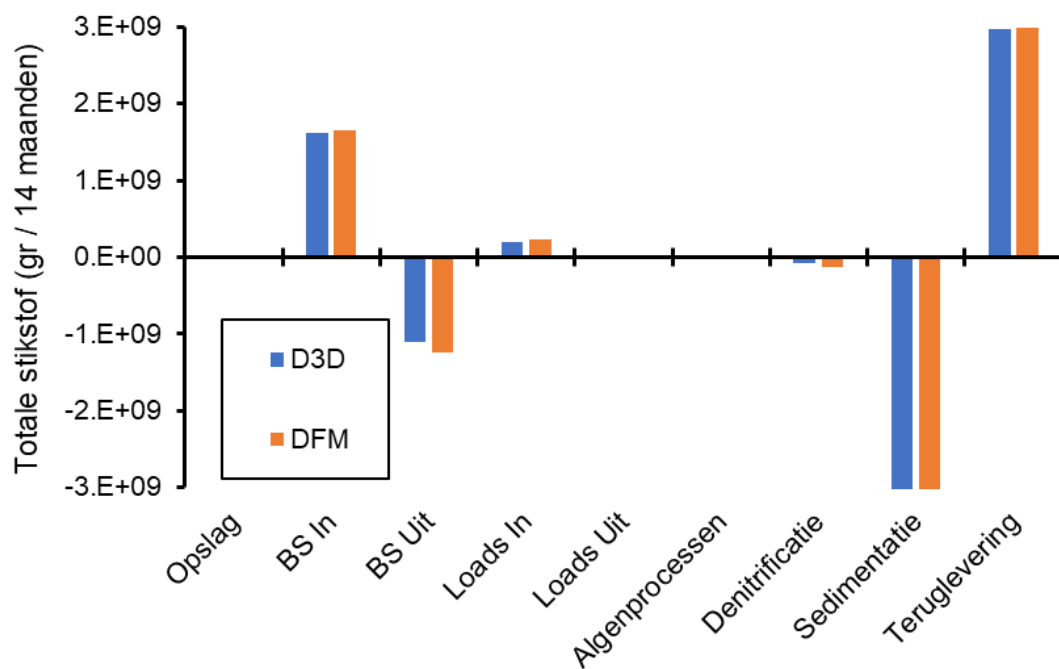
Als gevolg van verschillen in de berekeningen voor nitraat wijken ook de berekende concentraties totale stikstof in beide modelsommen lichtelijk van elkaar af (Figuur 8-23). Deze verschillen zijn voornamelijk zichtbaar in de eerste helft van het jaar zoals ook zichtbaar voor nitraatconcentraties.

Berekende totale stikstofconcentraties benaderen de gemeten waarden goed in het oppervlaktewater op locatie Dreischor voor het jaar 2008 (Tabel 8.5). In de oppervlaktelaag lijkt er wel sprake van een grotere variatie in de gemeten waarden dan wordt berekend door de modelsommen. In de diepste laag is sprake van een overschatting in beide modelsommen wat resulteert in een *bias* van 0,23-0,24 mg/L en een *RMSE* van 0,25-0,26 mg/L.



Figuur 8-23 Vergelijking van berekende totale stikstofconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

De vergelijking van massa aan totale stikstof in het systeem voor het Delft3D 4-model en het D-HYDRO-model toont aan dat er voornamelijk verschillen zitten in de in- en uitstroom van stikstof bij de lozingspunten (Figuur 8-24). Bij de D-HYDRO-som komt er meer stikstof het systeem in bij de Brouwerssluis en bij lozingspunten en verdwijnt ook meer door de uitstroom bij de Brouwerssluis. Ook verdwijnt er ietwat meer stikstof bij de D-HYDRO-som door denitrificatie.

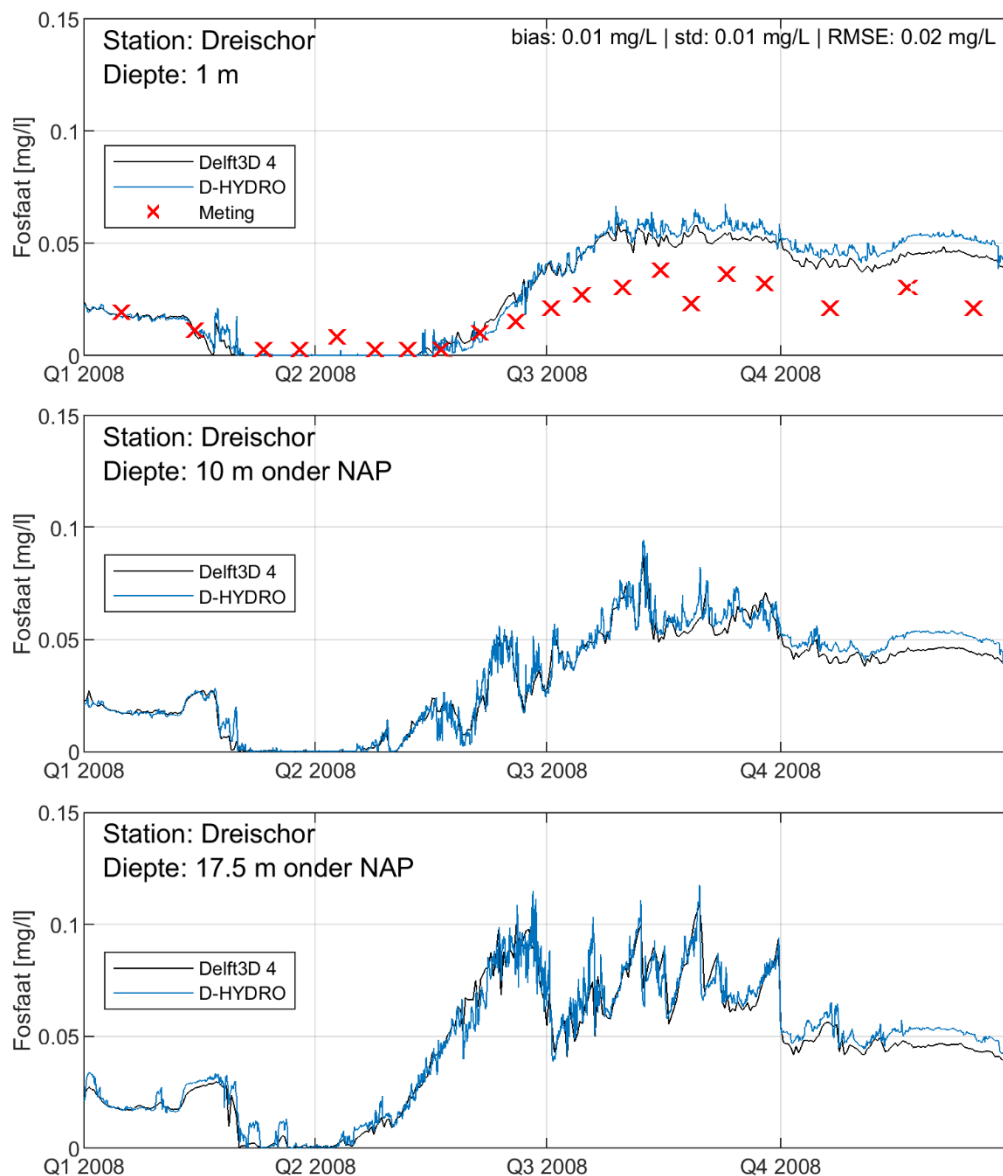


Figuur 8-24 Vergelijking van de balans van totale stikstof massa in het Grevelingen meer voor het jaar 2008 (2007-11-01 tot 2009-01-01). De toename of afname van stikstof massa is opgedeeld in stikstof uit/naar opslag, in- en uitstroom bij Brouwersluis (BS), in- en uitstroom voor andere lozingspunten, algenprocessen en andere processen waarbij stikstof wordt opgenomen of afgestaan.

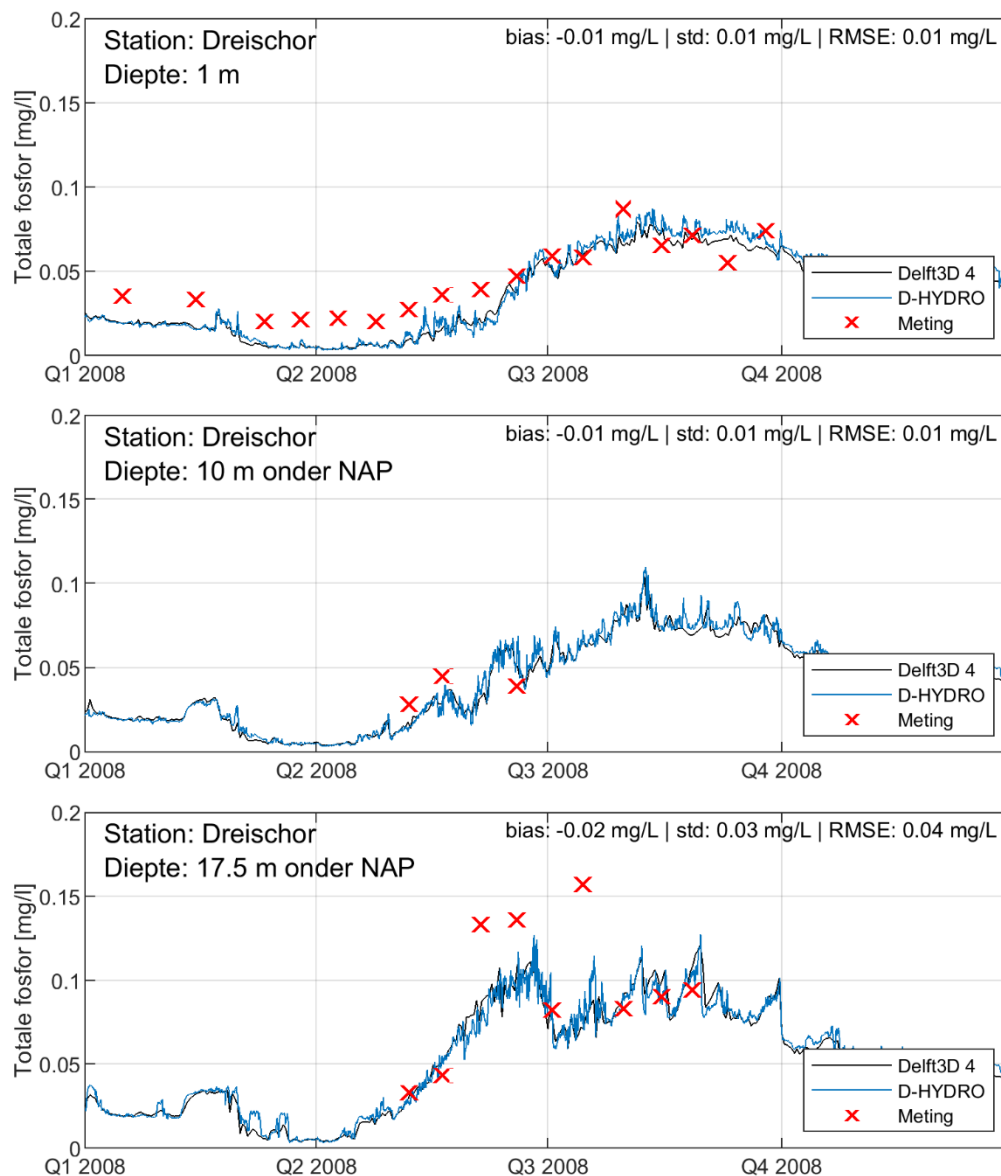
8.3.3.4 Nutriënten: fosfaatconcentratie

Orthofosfaatconcentraties en totale fosfaatconcentraties worden grotendeels gelijk berekend door het Delft3D 4-model en de D-HYDRO-som (Figuur 8-25 en Figuur 8-26). Enkel in het vierde kwartaal wijken de berekende concentraties wat af met hogere waarden in de D-HYDRO-som.

Berekende orthofosfaatconcentraties komen tot aan het begin van het derde kwartaal grotendeels overeen met de gemeten waarden (Tabel 8.5). In het tweede halfjaar van 2008 is er echter sprake van een overschatting van berekende waarden t.o.v. de gemeten waarden. Dit leidt tot een *bias* van 0,01 mg/L (beide modelsommen) en een RMSE van 0,01 (Delft3D 4) en 0,02 mg/L (D-HYDRO). Berekende totale fosfaatconcentraties op 1 m onder het wateroppervlak komen over het hele jaar grotendeels overeen met de gemeten waarden (Figuur 8-26) wat leidt tot een *bias* van -0,01 mg/L en een RMSE van 0,01 mg/L voor beide modelsommen. Voor de diepste waterlaag zijn enkele momenten van onderschatting van gemeten waarden waar te nemen, wat leidt tot een *bias* van -0,02 mg/L en een RMSE van 0,04 mg/L.

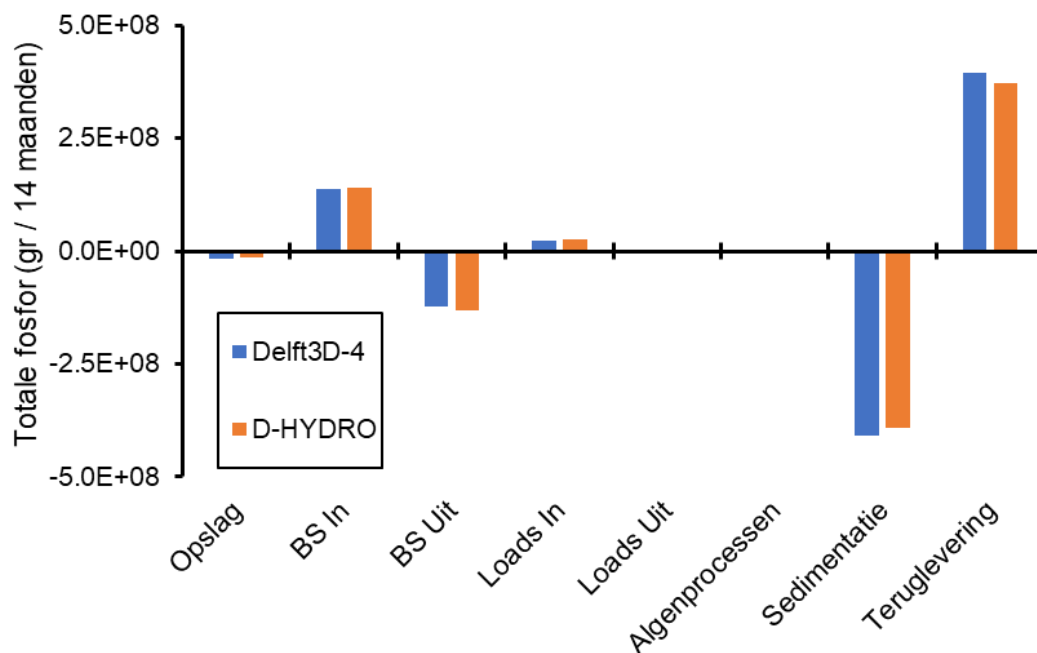


Figuur 8-25 Vergelijking van berekende orthofosfaatconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).



Figuur 8-26 Vergelijking van berekende totale fosfaatconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

De vergelijking van de modelsommen voor wat betreft de berekende totale massa fosfor in het Grevelingenmeer toont verschillen die vergelijkbaar zijn met die van totale stikstof; verschillen zijn er voornamelijk in de toename aan fosfor uit lozingen en de toename of afname van fosfor gerelateerd aan sedimentatie en teruglevering uit het sediment (Figuur 8-27). Bij de D-HYDRO-som verdwijnt er meer fosfor door uitstroom bij de Brouwerssluis. In de Delft3D 4-som komt er meer fosfor het systeem in door de teruglevering vanuit het sediment en verdwijnt er meer uit het systeem door sedimentatie.

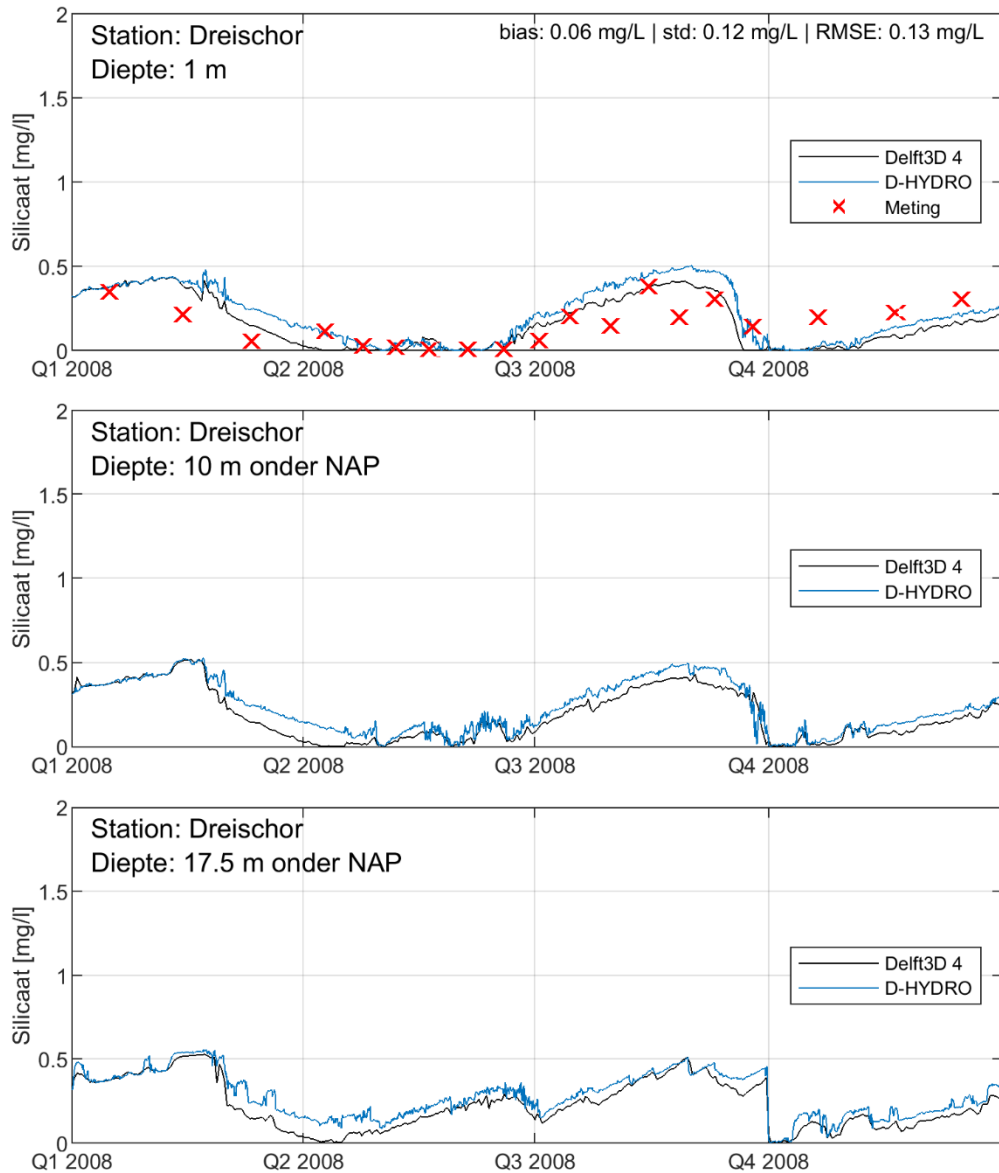


Figuur 8-27 Vergelijking van de balans van totale fosfor massa in het Grevelingen meer voor het jaar 2008 (2007-11-01 tot 2009-01-01). De toename of afname van fosfor massa is opgedeeld in fosfor uit/naar opslag, instroom, uitstroom en processen waarbij fosfor wordt opgenomen of afgestaan door algen, sediment of andere gerelateerde processen.

8.3.3.5 Nutriënten: siliciumconcentratie

De berekende siliciumconcentraties laten minimale verschillen zien tussen de Delft3D 4-som en de D-HYDRO-som (Figuur 8-28): de siliciumconcentratie neemt in het D-HYDRO-model in het eerste kwartaal langzamer af. Voor beide modelsommen is er sprake van een limitatie van silicium in het tweede en vierde kwartaal.

De berekende siliciumconcentraties tonen een goede overeenkomst met de gemeten waarden tijdens jaarsom 2008 (Tabel 8.5). De benadering van gemeten waardes lijkt beter voor de Delft3D 4-som (*bias*: 0,01 mg/L) dan voor de D-HYDRO-som (*bias*: 0,06 mg/L), al oogt het verschil minimaal wanneer gekeken wordt naar de RMSE (Delft3D 4: 0,11 mg/L; D-HYDRO: 0,13 mg/L).



Figuur 8-28 Vergelijking van berekende siliciumconcentraties (mg/L) (lijnen; Delft3D 4 en D-HYDRO) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) bij meetlocatie Dreischor. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: 1 m onder het wateroppervlak (bovenste paneel), in het midden van de waterkolom (middelste paneel) en 1 m boven het bodemoppervlakte (onderste paneel).

8.3.4 Conclusie

8.3.4.1 Model-model vergelijking

Het bestaande waterkwaliteitsmodel is omgezet van het Delft3D 4-format naar modelinvoer voor D-HYDRO (D-Water Quality), waarna de berekende waarden van beide modelsommen met elkaar vergeleken zijn om te verifiëren of deze omzetting tot vergelijkbare resultaten leidt. De resultaten van het D-HYDRO-model verschillen gemiddeld genomen weinig van de Delft3D 4-berekeningen voor zowel het jaar 2000 als het jaar 2008. De zuurstofconcentraties komen in beide modelsommen grotendeels overeen. In de diepere lagen zijn verschillen tussen de berekeningsresultaten van beide modelsommen te zien. Deze verschillen leiden tot relatief grotere verschillen in de indicator "zuurstofarm areaal". Ook voor chlorofylconcentraties zijn, hoewel gemiddeld genomen vergelijkbaar voor beide jaren, op bepaalde momenten verschillen gevonden. Het voornaamste

verschil is zichtbaar tijdens een door enkel het D-HYDRO-model berekende voorjaarsbloei in het jaar 2008.

De berekende nutriëntenconcentraties zijn gemiddeld genomen voor beide modelsommen nagenoeg gelijk, zowel voor het jaar 2000 als het jaar 2008. Kleine uitzonderingen hierop zijn de berekende siliciumconcentraties in 2000, met een hogere berekende waarde voor D-HYDRO, en de nitraat en totaal stikstofconcentraties in 2008, die tijdens het eerste en tweede kwartaal een hogere berekende waarde laten zien in het geval van D-HYDRO. Verschillen in de massabalansen van beide modelsommen voor stikstof en fosfor zijn ook gering. Voor het jaar 2000 laat de Delft3D 4-som een grotere instroom van stikstof zien bij lozingspunten terwijl in het jaar 2008 de D-HYDRO-som de grootste instroom van stikstof laat zien bij de Brouwerssluis en andere lozingspunten. Verschillen tussen beide modelsommen wat betreft sedimentatie en teruglevering vanuit het sediment zijn zeer klein. Voor fosfor zien we kleine verschillen in de in- en uitstroom van fosfor tussen beide modelsommen, voor zowel het jaar 2000 als 2008. De fosfor die het systeem binnenkomt door teruglevering vanuit het sediment is voor beide jaren wel groter voor de Delft3D 4-som, terwijl er ook meer fosfor het systeem uitgaat door sedimentatie.

8.3.4.2 Model-meting vergelijking

De door het D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentraties komen, voor zowel jaarsom 2000 als jaarsom 2008, grotendeels overeen met de geobserveerde waarden. Ook de berekende chlorofylconcentraties komen voor beide jaarsommen grotendeels overeen met de gemeten waardes, met uitzondering van een berekende vroege lentebloei in 2008 die niet gemeten werd.

Berekende ammonium- en nitraatconcentraties tonen vergelijkbare waardes en trends voor zowel de gemeten waardes als de berekende waardes (voor jaarsom 2000 en 2008). Ook de totale stikstofconcentraties, van zowel de Delft3D 4- als de D-HYDRO-berekening, komen grotendeels overeen met de metingen. Uitzondering hierop is de diepste waterlaag in het jaar 2008 waarbij sprake is van een lichte overschatting t.o.v. de metingen. De orthofosfaatconcentraties uit jaarsom 2000 toonde zowel een onderschatting (1^e kwartaal) als een overschatting (3^e kwartaal) t.o.v. de metingen. De totale fosfaatconcentratie wordt voornamelijk in de eerste helft van 2000 onderschat. In jaarsom 2008 zijn de waardes voor de berekeningen en metingen nagenoeg gelijk, met uitzondering van orthofosfaatconcentraties in het laatste halfjaar waarbij het model een kleine overschatting geeft. Berekende siliciumconcentraties zijn in beide jaarsommen zeer vergelijkbaar met de gemeten waardes.

8.4 Herberekening scenario's uit project "Getij Grevelingen"

8.4.1 Inleiding

Vanwege de zuurstofproblematiek in de zomerperiode in de diepere delen van het Grevelingenmeer, is men op zoek gegaan naar een maatregel om de zuurstofhuishouding op grotere diepte te verbeteren. Een van de mogelijke oplossingen bleek het herintroduceren van getij, wat de aanvoer van zuurstof naar de onderlaag kan vergroten door een toenemende menging met de zuurstofrijke bovenlaag.

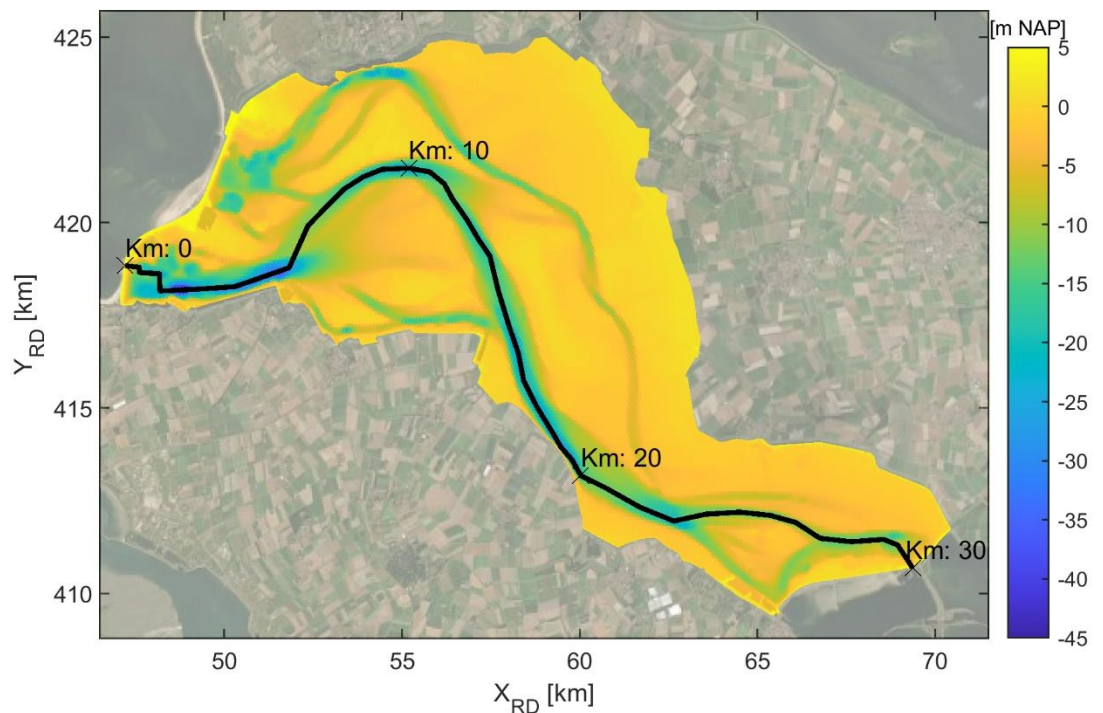
Het in 2019 uitgevoerde project "Getij Grevelingen" (Maarse et al., 2019), gericht op de optimalisatie van het peilbeheer door aansturing van het toekomstige doorlaatmiddel in de Brouwersdam, heeft hiervoor verschillende scenario's doorgerekend. Een van deze scenario's is opnieuw doorgerekend met behulp van het nieuwe D-HYDRO waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen. Het gaat hierbij specifiek om het scenario "TMBW" (Tussenscenario + peilverlaging Broedseizoen en Winteropzet), waarbij een getijslag van ca. 40 cm wordt gesimuleerd.

In het “Getij Grevelingen”-project is het in Delft3D 4-model van het Grevelingenmeer als startpunt gebruikt. Dit is dezelfde modelschematisatie als waar eerder in dit hoofdstuk de vergelijking van het nieuwe D-HYDRO-model voor jaarsom 2000 en jaarsom 2008 mee is gemaakt. Aangezien in de “Getij Grevelingen”-studie scenario’s met een verschillende getijslag doorgerekend zijn, zijn de randvoorwaarden van dit basismodel aangepast. Het model werd aangestuurd met behulp van synthetische tijdreeksen voor het debiet door de Brouwerssluis en het mogelijk toekomstige doorlaatmiddel. Het effect van neerslag, verdamping, afstroming en polderlozingen op de waterbalans/zuurstofhuishouding is in de getij-scenario’s buiten beschouwing gelaten.

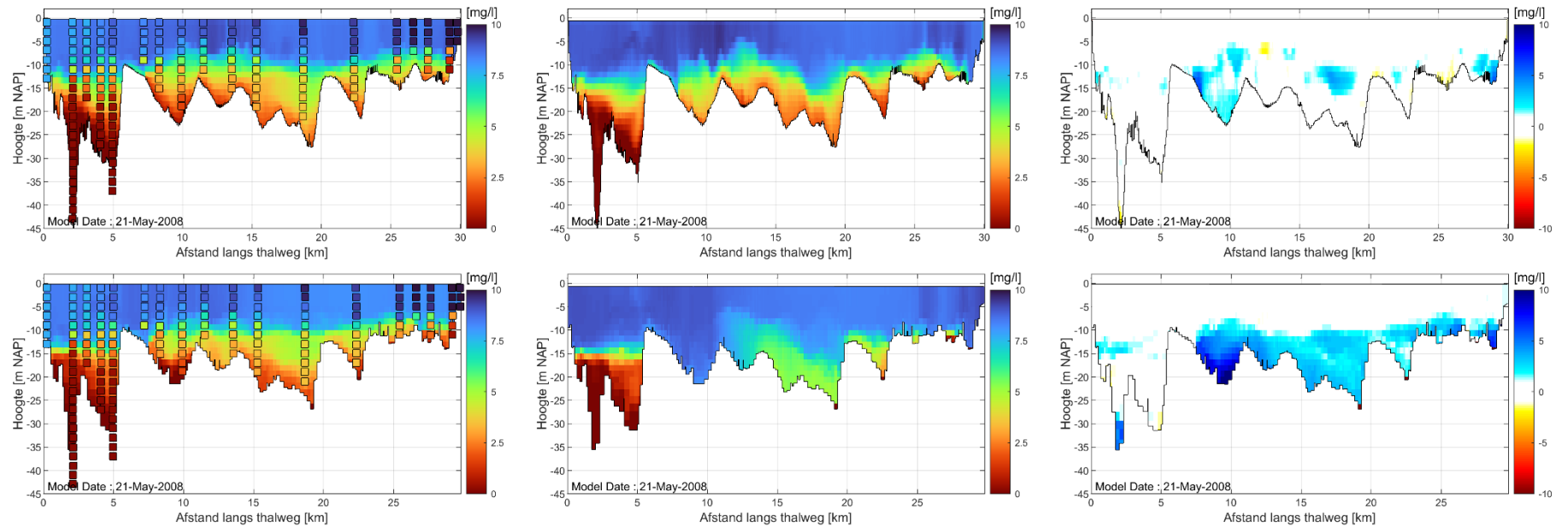
8.4.2 Vergelijking impact van getij-scenario

Om vast te stellen of het nieuwe D-HYDRO-model een vergelijkbare impact van de herintroductie van getij op de zuurstofconcentraties berekent, is het TMBW-getij-scenario ook doorgerekend met het D-HYDRO-model.

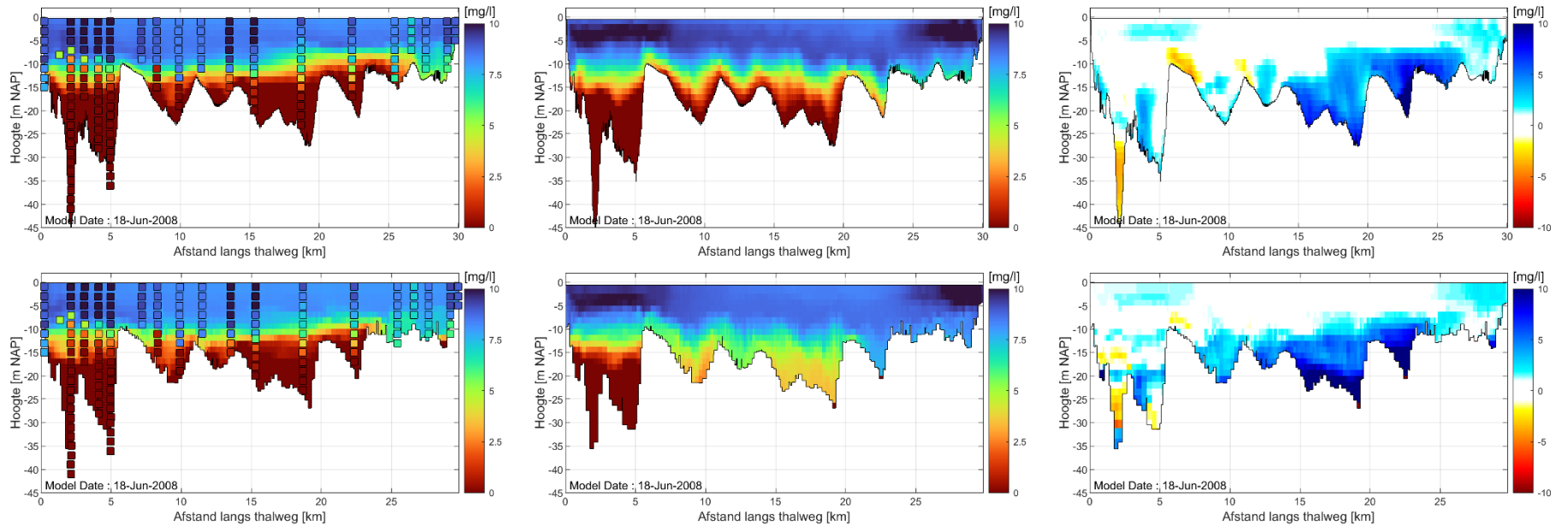
In Figuur 8-30 – Figuur 8-32 wordt de opgeloste-zuurstofconcentratie op drie willekeurige momenten in de zomerperiode (wanneer er zuurstofstratificatie optreedt) langs een dwarsdoorsnede (zijaanzicht) door de Grevelingen, zie Figuur 8-29, in het D-HYDRO-model (bovenste panelen) en het Delft3D 4-model (onderste panelen) getoond. Van links naar rechts bevat dit figuur het berekeningsresultaat voor: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), het TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario).



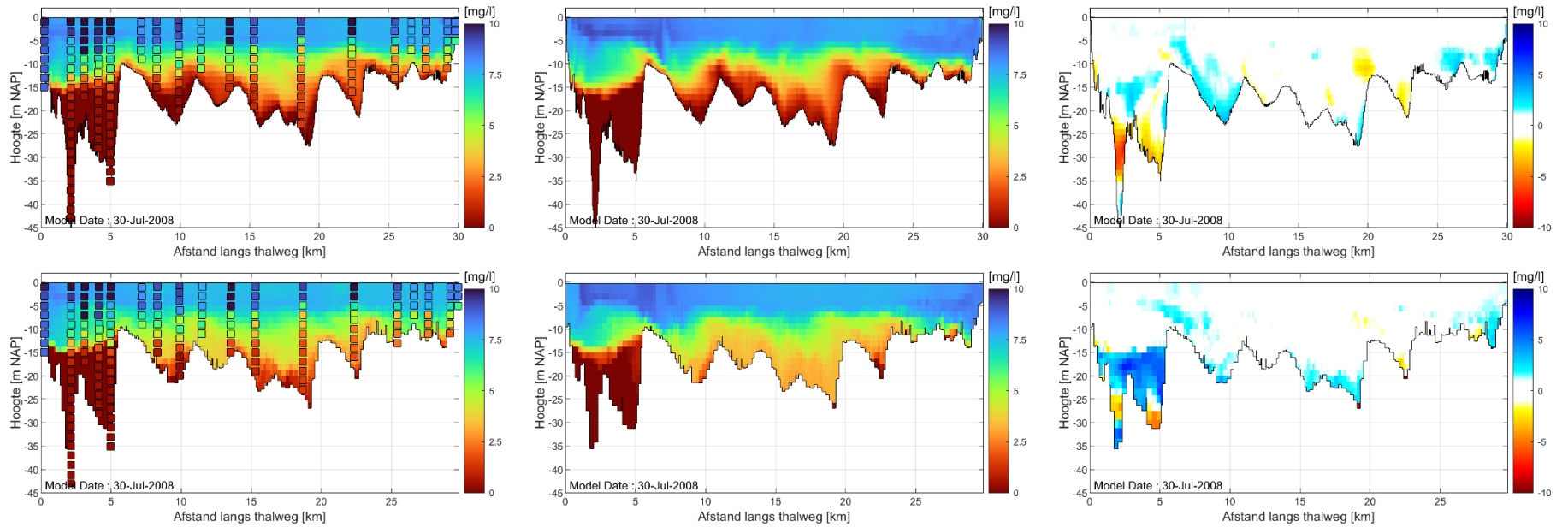
Figuur 8-29 De talweg (lijn die het natuurlijke profiel van de diepe geul volgt) die gebruikt is bij het plotten van dwarsdoorsneden



Figuur 8-30 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 21 mei 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen in het D-HYDRO-model (boven) en het Delft3D 4-model (onder). Van links naar rechts: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)



Figuur 8-31 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 18 juni 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen in het D-HYDRO-model (boven) en het Delft3D 4-model (onder). Van links naar rechts: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)



Figuur 8-32 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 30 juli 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen in het D-HYDRO-model (boven) en het Delft3D 4-model (onder). Van links naar rechts: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)

In lijn met de model-model-vergelijking uit paragraaf 8.3 tonen de linker panelen uit bovenstaande figuren aan dat de gemodelleerde zuurstofconcentratie in het Delft3D 4- en D-HYDRO-model erg vergelijkbaar is. Het D-HYDRO-model lijkt tot iets hoger in de waterkolom lagere zuurstofconcentraties (oranje/rode kleur) te berekenen. In vergelijking met de gemeten waarden lijkt het D-HYDRO-model daarmee, op basis van deze langsddoorsnede op drie willekeurige momenten, de werkelijkheid iets beter te benaderen.

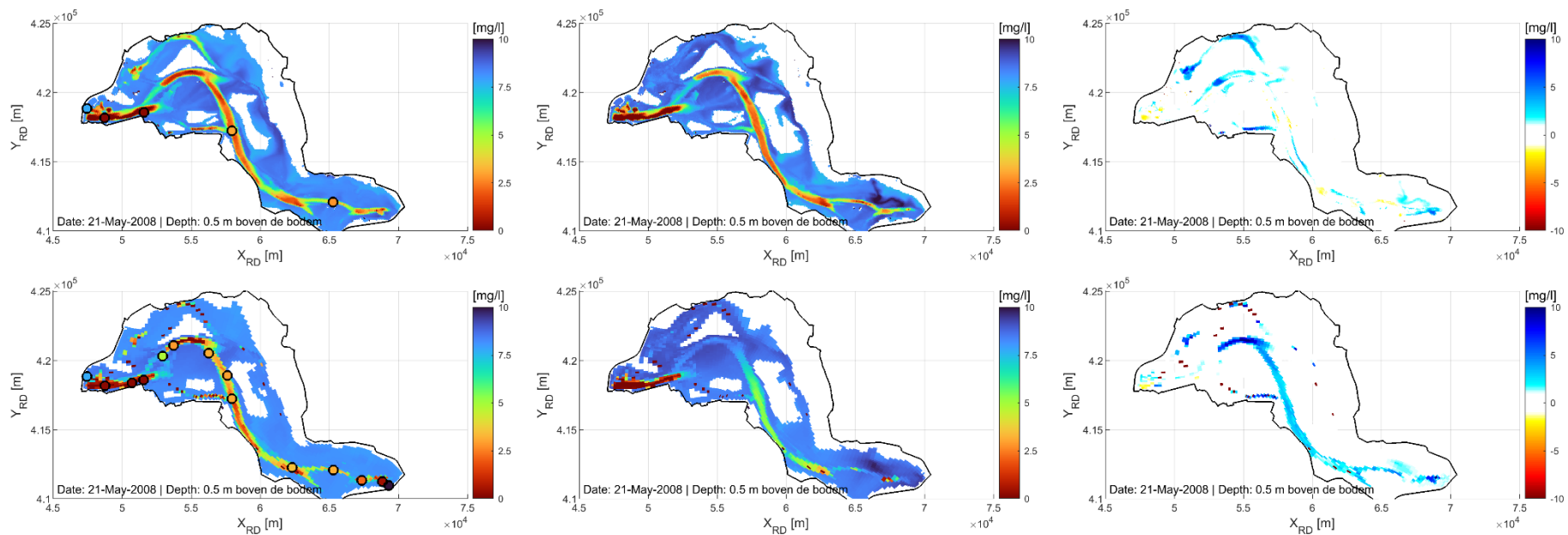
In deze zijaanzichten is ook terug te zien dat het D-HYDRO-model een fijnere resolutie heeft (het bodemprofiel wordt minder blokkerig weergegeven) en een iets andere bodemligging (de bodemligging van de diepe put op $x = 2$ km is in het D-HYDRO-model beter in overeenstemming met de gemeten zuurstofprofielen op deze locatie).

De zuurstofconcentraties voor het TMBW-scenario laten een groter verschil zien tussen de modeluitkomsten van het Delft3D 4- (middelste paneel, onder) en D-HYDRO-model (middelste paneel, boven). In de langsddoorsneden is te zien dat nabij de bodem in het middelste gedeelte van het meer (van 5 – 25 kilometer op de x-as) hogere zuurstofconcentraties worden berekend door het Delft3D 4-model.

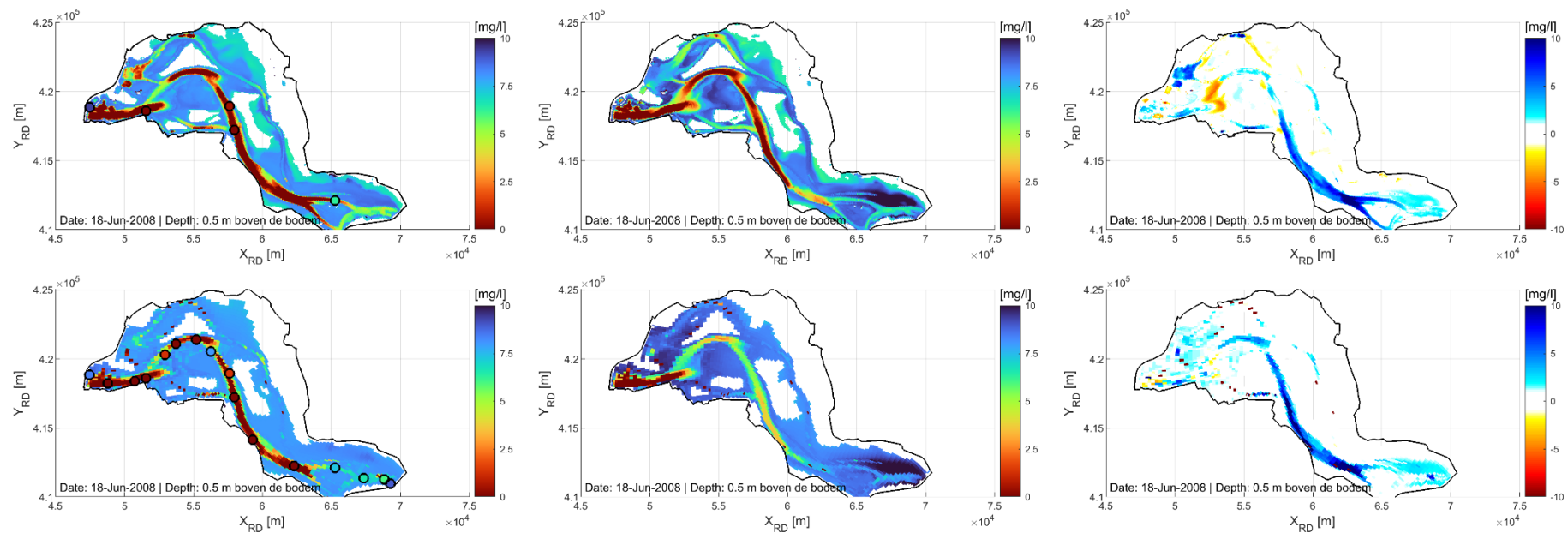
De rechter panelen tonen de resulterende impact van dit getij-scenario: een blauwe kleur komt overeen met een toename van de zuurstofconcentratie ('verbetering'), een oranje/rode kleur komt overeen met een afname van de zuurstofconcentratie ('verslechtering'). De patronen in de rechter panelen komen aardig overeen. Over het algemeen wordt er, met uitzondering van de diepte put nabij de Brouwerssluis (0 – 5 kilometer op de x-as), een toename (blauwe kleur) van de zuurstofconcentratie in de diepere delen van het Grevelingenmeer berekend.

Het verschil in de berekende zuurstofconcentraties voor het getij-scenario tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model (middelste panelen) werkt door in het verschil van de panelen waarin de impact van het TMBW-scenario wordt getoond (rechter panelen): ondanks dat de patronen erg vergelijkbaar zijn, lijkt het Delft3D 4-model een iets gunstiger effect (meer blauwe kleur) te berekenen.

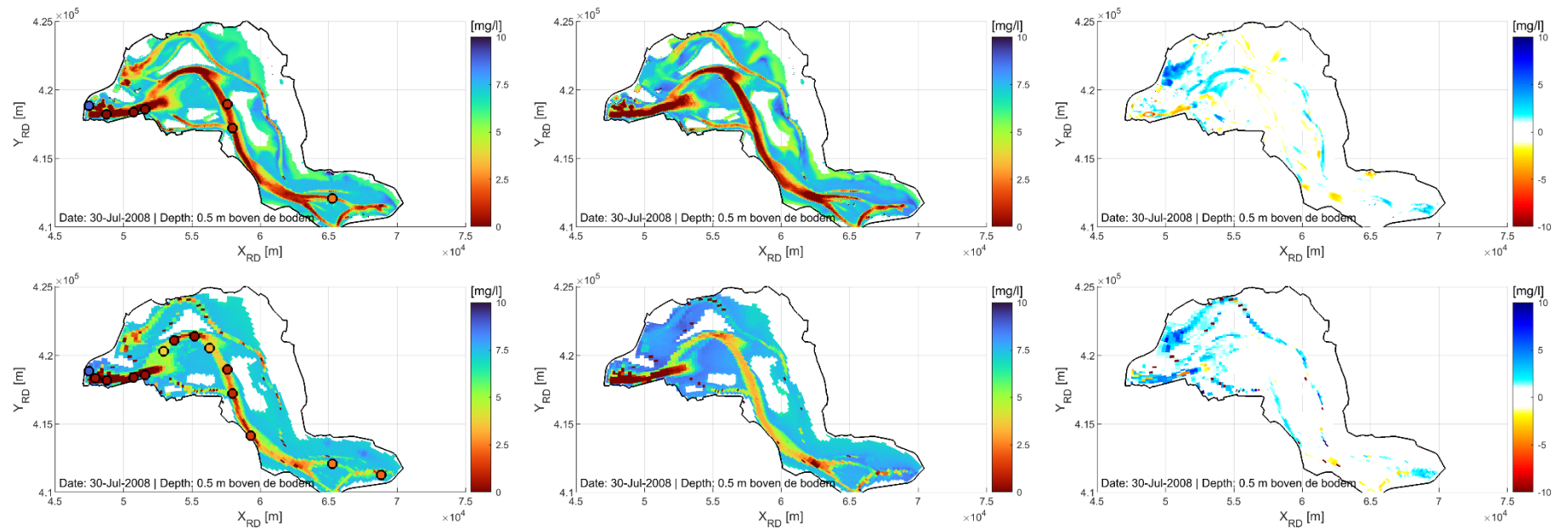
Eenzelfde vergelijking op basis van contourplots (bovenaanzichten) is te vinden in Figuur 8-33 – Figuur 8-35. In de figuren is de opgeloste-zuurstofconcentratie op 0,5 m boven de bodem afgebeeld. Ook in deze figuren, voor dezelfde drie momenten in de zomerperiode, geldt dat er verschillende subplots zijn voor D-HYDRO (boven) en Delft3D 4 (onder), en van links naar rechts voor Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), het TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)



Figuur 8-33 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 21 mei 2008 op 0,5 m boven de bodem in het D-HYDRO-model (boven) en het Delft3D 4-model (onder). Van links naar rechts: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)



Figuur 8-34 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 18 juni 2008 op 0,5 m boven de bodem in het D-HYDRO-model (boven) en het Delft3D 4-model (onder). Van links naar rechts: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)



Figuur 8-35 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 30 juli 2008 op 0,5 m boven de bodem in het D-HYDRO-model (boven) en het Delft3D 4-model (onder). Van links naar rechts: Jaarsom 2008 (inclusief metingen in cirkels), TMBW-scenario en de impact van het getij-scenario (Jaarsom 2008 minus TMBW-scenario)

In bovenstaande figuren wordt de zuurstofconcentratie op 0,5 m boven de bodem weergegeven. Het Delft3D 4- en het D-HYDRO-model hebben een iets andere bodemligging. Hier moet rekening mee gehouden worden bij de interpretatie van deze figuren. Dit verklaart ook waarom verschillende metingen zichtbaar zijn in de linker panelen (jaarsom 2008): op basis van de bodemligging wordt een gemeten waarde (indien beschikbaar op die diepte en rond die dag) geplot.

Ondanks dat de bijbehorende diepte niet exact hetzelfde is, geeft de model-model-vergelijking van de jaarsom 2008 (linker panelen) aan dat de modelresultaten van het Delft3D 4- en het D-HYDRO-model goed in overeenstemming zijn met elkaar. De data-model-vergelijking in deze panelen laat zien dat beide modellen in staat zijn om te berekenen in welke delen van de hoofdgeul van het Grevelingenmeer zuurstofarme condities optreden.

Net zoals in de zijaanzichten te zien was, is het verschil in de model-model-vergelijking voor het TMBW-scenario groter. De modelresultaten van het D-HYDRO-model tonen een groter areaal aan zuurstofarme (oranje/rode kleur) condities ten opzichte van het Delft3D 4-model.

Beide modellen berekenen, gemiddeld genomen, een toename van de zuurstofconcentraties nabij de bodem ten gevolge het doorrekenen van het TMBW-getij-scenario. Met name op het eerste willekeurige moment (21 mei 2008, Figuur 1.31) berekent het Delft3D 4-model een iets gunstiger effect van het getij-scenario dan het D-HYDRO-model.

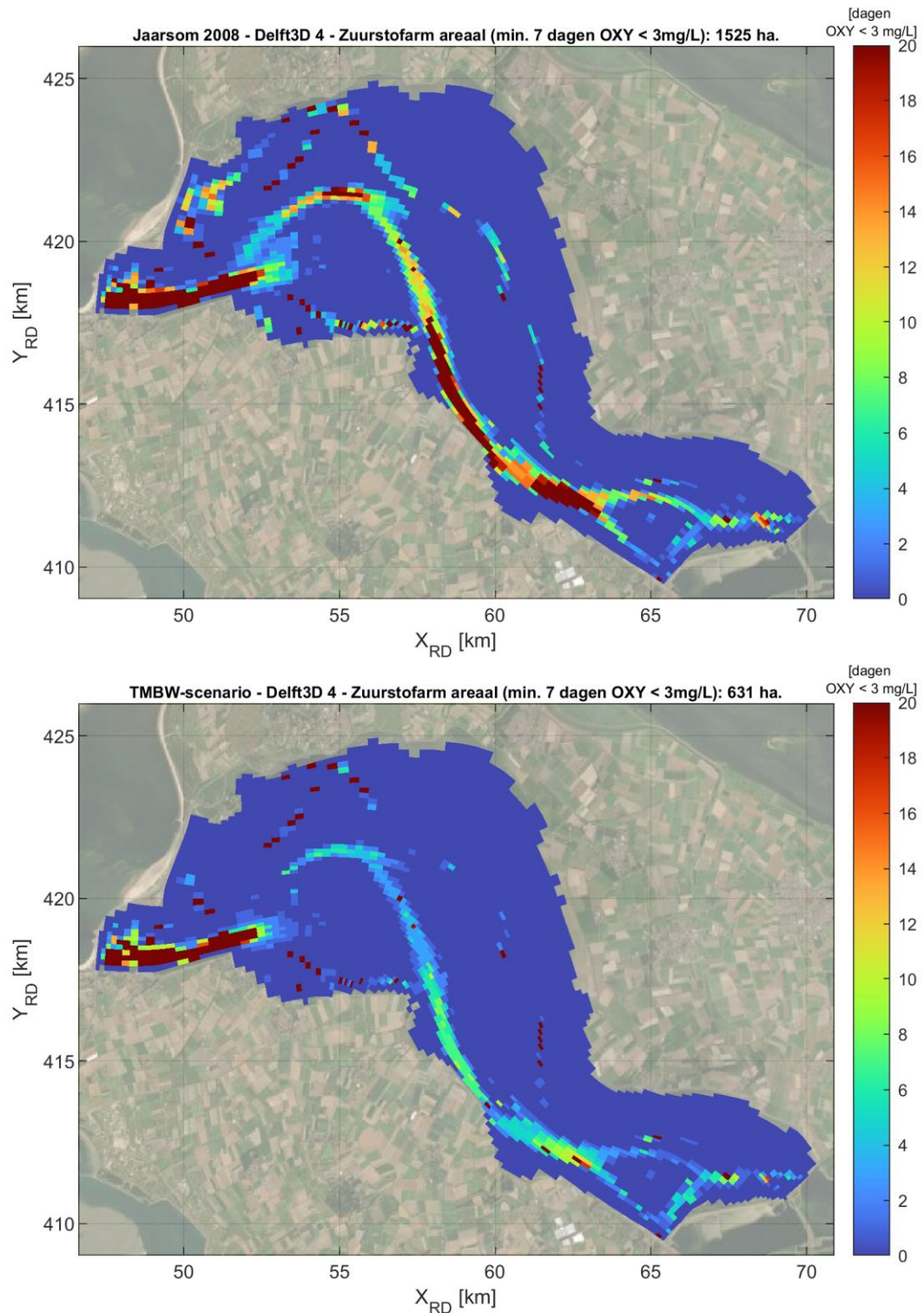
8.4.3 Indicator zuurstofarm areaal

Een belangrijke indicator voor het vaststellen van de impact van het getij-scenario op de zuurstofhuishouding in het Grevelingenmeer is het zuurstofarme areaal. In onderstaande figuren is het maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) afgebeeld voor zowel het Delft3D 4- (Figuur 8-36) als het D-HYDRO-model (Figuur 8-37). In het bovenste subplot is telkens de 'huidige' situatie (jaarsom 2008) afgebeeld, in het onderste subplot staat het resultaat voor het TMBW-getij-scenario.

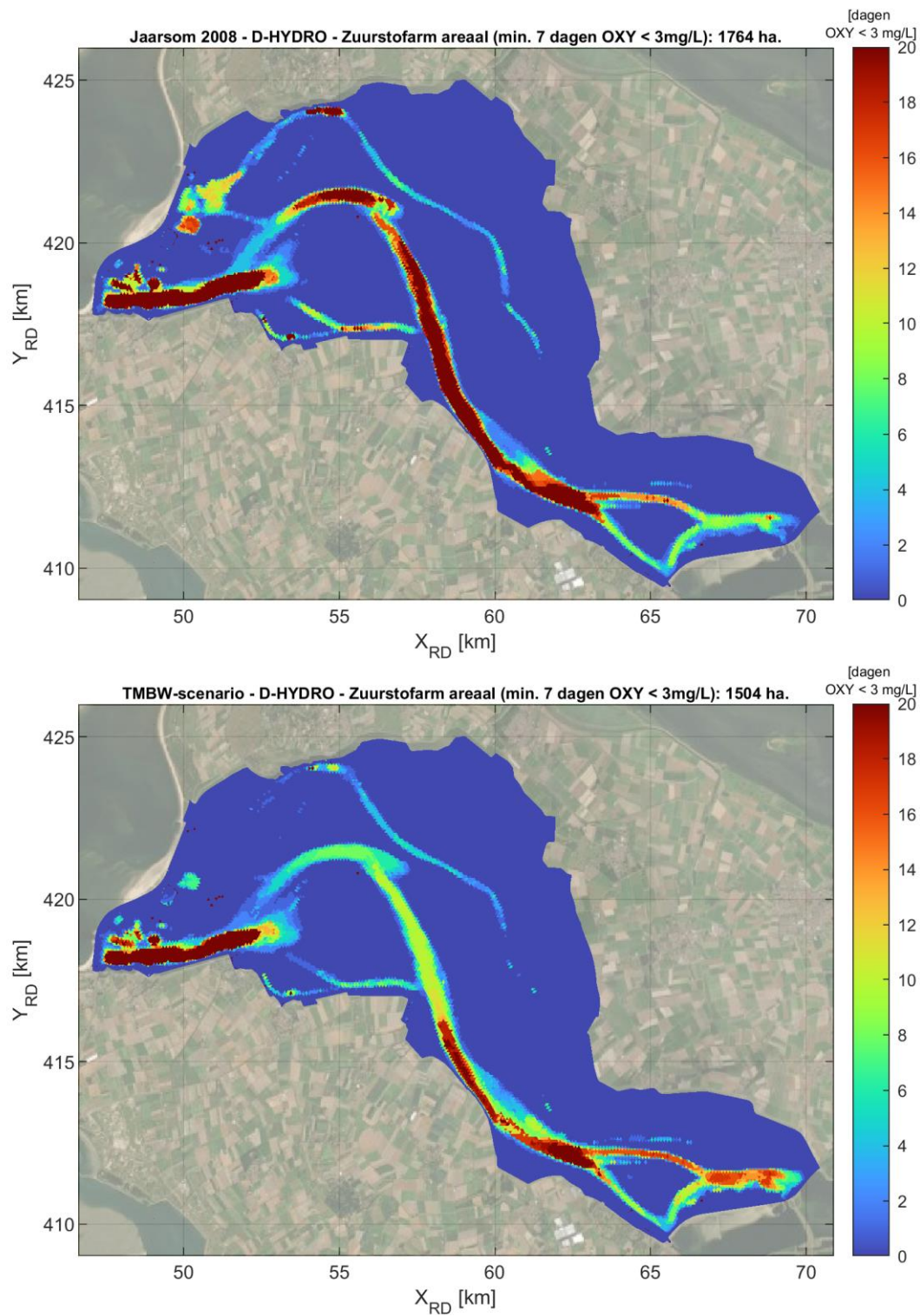
De resulterende arealen zijn samengevat in Tabel 8.6. Het daadwerkelijke zuurstofarme areaal wordt, op basis van metingen, op grofweg 1400 ha. geschat. Zowel het D-HYDRO- als het Delft3D 4-model overschatten deze waarde voor de jaarsom 2008. Op basis van nieuwe inzichten/beschikbaar gekomen metingen, zijn de DetC- en DetN-concentraties ter plaatse van de Brouwerssluis in recente modelstudies, zoals de "Getij Grevelingen"-studie, aangepast (verhoogd, Nolte (2017)). Deze wijziging in de randvoorwaarden is vanwege consistentieredenen ook doorgevoerd in de jaarsom met het Delft3D 4-model, waardoor het berekende areaal (1525 ha.) hoger uitvalt dan in voorgaande studies is berekend (1305 ha.).

Tabel 8.6 Overzicht berekend zuurstofarm areaal: bodemzuurstofconcentratie < 3 mg/L voor tenminste 7 dagen

Areaal (hectare)	Jaarsom 2008	TMBW-scenario	Vershil	Vershil (%)
D-HYDRO	1764	1504	-260	-15%
Delft3D 4	1525	631	-894	-59%



Figuur 8-36. Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het *Delft3D 4-model* voor *jaarsom 2008* (bovenste paneel) en het *TMBW-scenario* (onderste paneel). Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.



Figuur 8-37. Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het *D-HYDRO*-model voor jaarsom 2008 (bovenste paneel) en het *TMBW-scenario* (onderste paneel). Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.

Kwalitatief gezien is de impact van het getij-scenario in het Delft3D 4- en het D-HYDRO-model aardig vergelijkbaar. De bovenaanzichten laten zien hoe het TMBW-getij-scenario de bodemzuurstofconcentraties in met name het middelste gedeelte van de hoofdgeul beïnvloedt. Nabij de Brouwerssluis laten zowel het Delft3D 4- als D-HYDRO-model relatief weinig invloed zien (deels door de gekozen kleurenschaal); dit gebied heeft in alle simulaties voor een periode van meer dan 20 aaneengesloten dagen een zuurstofconcentratie lager dan 3 mg/L. Ten noorden hiervan, op de locatie waar het toekomstige doorlaatmiddel is geschematiseerd, berekenen beide modellen een lokale verbetering van de zuurstofarme condities.

Op basis van de indicator zuurstofarm areaal is het effect van het getij-scenario gekwantificeerd. Het Delft3D 4-model berekent een groter positief effect (-59%) dan het D-HYDRO-model (-15%). De indicator gebruikt bij de bepaling hiervan de 'harde' grenzen van een opgelost-zuurstofconcentratie van minder dan 3 mg/L voor tenminste 7 aaneengesloten dagen. In het onderste paneel van Figuur 8-37 laat de TMBW-berekening van het D-HYDRO-model zien dat een relatief groot areaal zo'n maximaal 8 tot 10 aaneengesloten dagen (lichtgroene kleur) een bodemzuurstofconcentratie heeft van minder dan 3 mg/L. Ondanks dat het getij-scenario in het D-HYDRO-model hier dus een kortere periode van zuurstofarme condities berekent in vergelijking met de jaarsom, treedt hier volgens de indicator geen verbetering op (in zowel de jaarsom 2008 als in het TMBW-scenario telt dit gebied mee in het zuurstofarme areaal). Een kleine wijziging in de indicator kan hiermee een substantiële invloed hebben op het berekende procentuele verschil in zuurstofarm areaal. Ditzelfde geldt voor de keuze van de drempelwaarde (3 mg/L) voor de bodemzuurstofconcentratie. Ter illustratie zijn in Tabel 8.7 nogmaals de berekende arealen opgenomen, maar dit keer voor een bodemzuurstofconcentratie lager dan 5 (i.p.v. 3) mg/L. Ondanks dat het Delft3D 4-model nog steeds een groter positief effect (-38%) berekent dan het D-HYDRO-model (-10%), is het verschil tussen beide modelsommen een stuk kleiner geworden (44 procentpunt bij 3 mg/L tegen 28 procentpunt bij 5 mg/L).

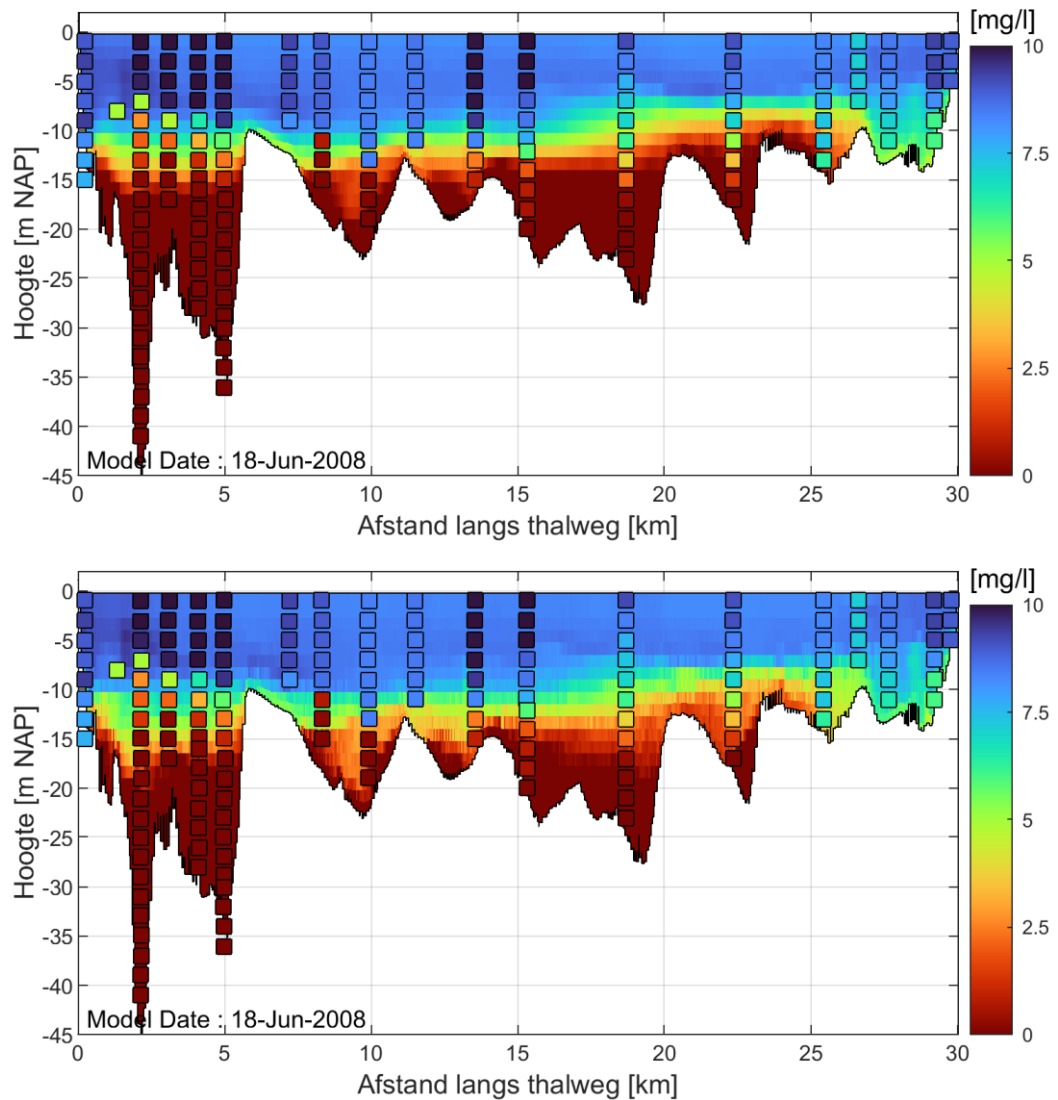
Tabel 8.7 Overzicht berekend zuurstofarm areaal: bodemzuurstofconcentratie < 5 mg/L voor tenminste 7 dagen

Areaal (hectare)	Jaarsom 2008	TMBW-scenario	Vershil	Vershil (%)
D-HYDRO	2555	2307	-248	-10%
Delft3D 4	2327	1443	-884	-38%

8.4.4 Online- vs. offline-koppeling

Ondanks dat het waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen direct is omgezet van modelinvoer van Delft3D 4 naar het benodigde format voor gebruik in de D-HYDRO-software, zijn verschillen in de modeluitkomsten te verwachten doordat het bijbehorende hydrodynamische model gewijzigd is bij de transitie van Delft3D 4 naar D-HYDRO en daarnaast wordt andere software (en dus numerieke keuzes/instellingen) gebruikt. In deze laatste categorie is een van de belangrijke verschillen tussen beide modellen dat het Delft3D 4-waterkwaliteitsmodel via offline-koppeling gesimuleerd werd en dat het D-HYDRO-model gebruik maakt van een online-koppeling. Om inzicht te krijgen in het effect van deze andere koppelingsmethode, wordt in deze paragraaf een vergelijking gemaakt tussen de modelresultaten met een online- en offline-gekoppeld D-HYDRO-model.

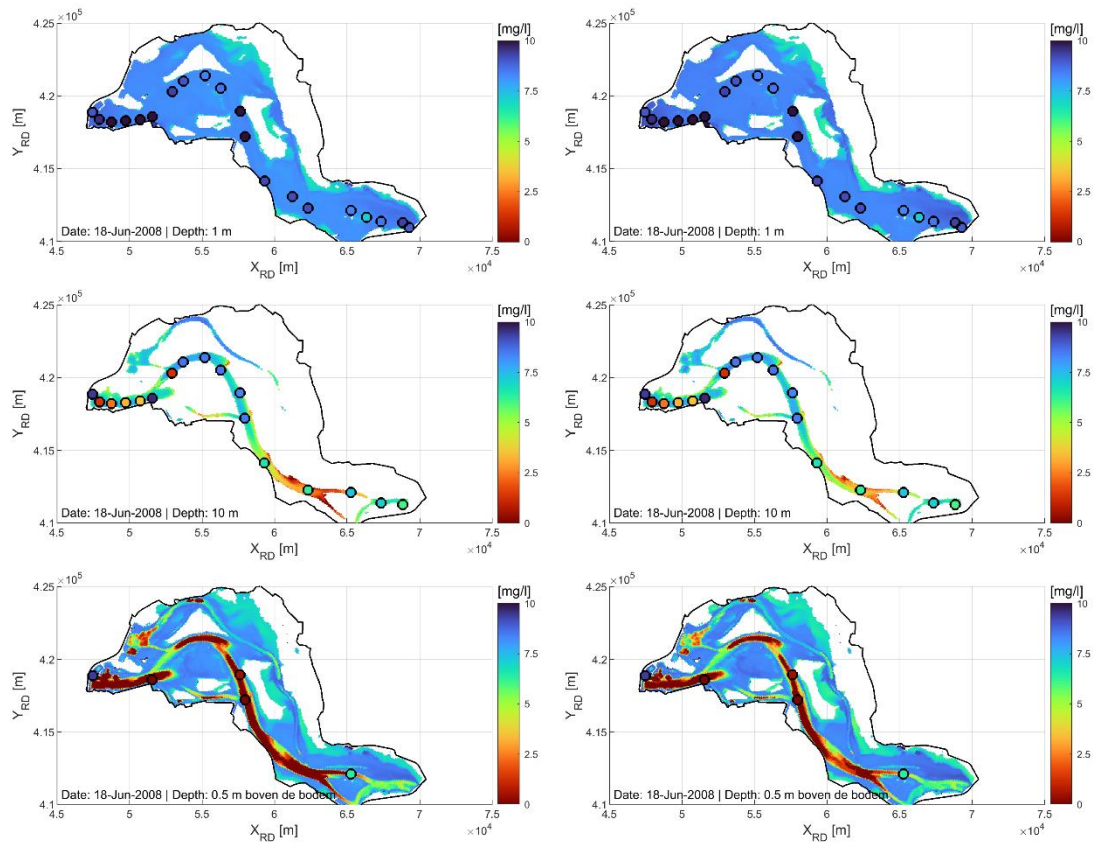
Figuur 8-38 toont de gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op een willekeurig moment in juni 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen in het online-gekoppelde (bovenste paneel) en offline-gekoppelde (onderste paneel) D-HYDRO-model.



Figuur 8-38 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 18 juni 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen in het online-gekoppelde (boven) en offline-gekoppelde (onder) D-HYDRO-model.

Vergelijking van de modelresultaten toont minimale verschillen. Het online-gekoppelde model lijkt iets meer zuurstofarme condities nabij de bodem te berekenen in vergelijking met het offline-gekoppelde model. In horizontale richting is het modelresultaat van het online-gekoppelde model uniformer/'gladder', dit komt waarschijnlijk doordat het transport van de constituenten (waaronder de opgeloste-zuurstofconcentratie) in D-HYDRO (hoger frequent) op rekestijdstapbasis worden berekend.

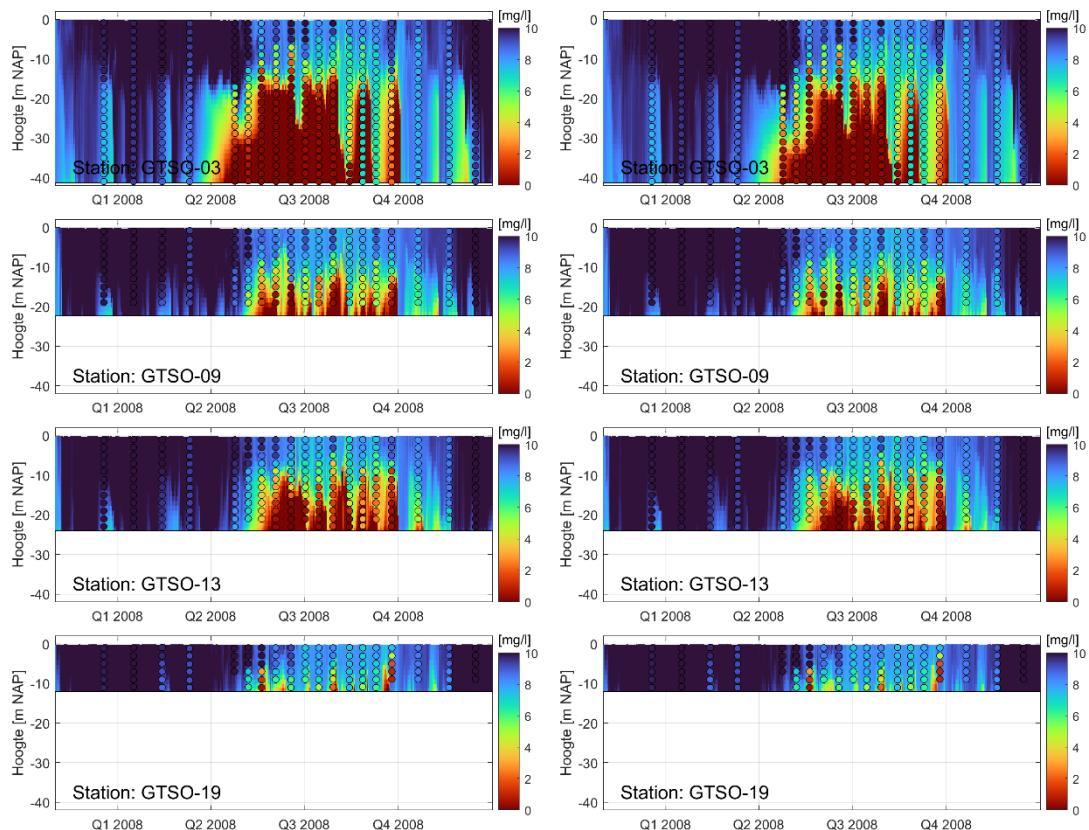
In Figuur 8-39 is de gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie op 18 juni 2008 op 1 m diepte, 10 m diepte en 0,5 m boven de bodem (van boven naar beneden) in het online-gekoppelde (links) en offline-gekoppelde D-HYDRO-model (rechts) geplot.



Figuur 8-39 Gemeten en berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 18 juni 2008 op 1 m diepte, 10 m diepte en 0,5 m boven de bodem (van boven naar beneden) in het online-gekoppelde (links) en offline-gekoppelde D-HYDRO-model (rechts).

Ook uit de model-model-vergelijking van de bovenaanzichten blijkt dat de gesimuleerde zuurstofconcentratie in het online- en offline-gekoppelde D-HYDRO-model vergelijkbaar is. Het berekeningsresultaat van het online-gekoppelde model bevat iets meer oranje/rode gebieden wat erop duidt dat er een iets groter areaal met zuurstofarme condities berekend wordt, maar de verschillen zijn minimaal.

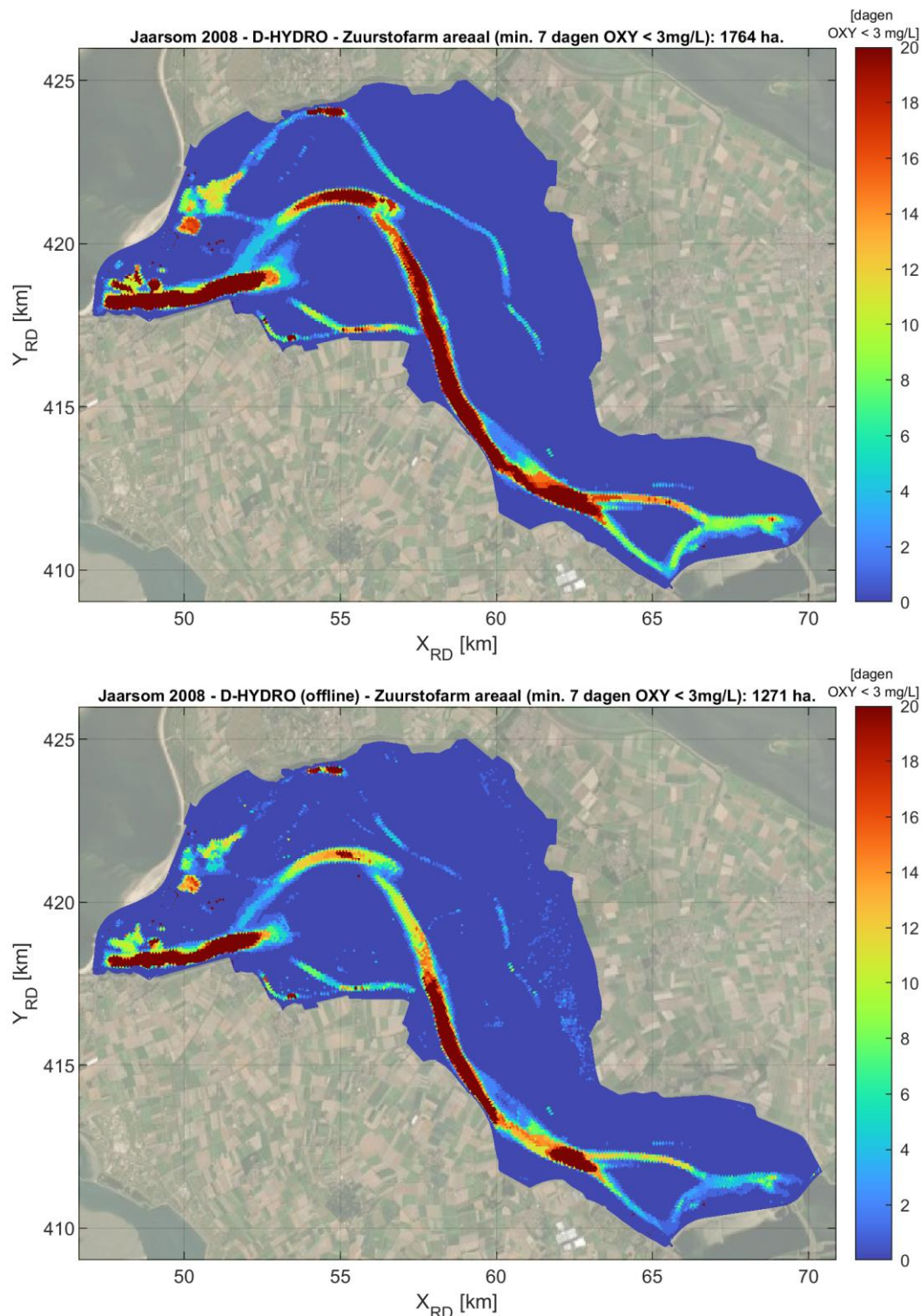
In Figuur 8-40 is een derde manier van het beschouwen van de modelresultaten opgenomen. Voor vier verschillende meetlocaties (GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19) is het verloop van de zuurstofconcentratie gedurende de jaarsom 2008 weergegeven in een z,t-plot.



Figuur 8-40 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van zuurstofconcentraties voor het online-gekoppelde (linkerzijde) en offline-gekoppelde D-HYDRO-model (rechterzijde) in het jaar 2008 voor verschillende meetstations (van boven naar beneden).

Ook uit de z,t-plots blijkt dat het online-gekoppelde D-HYDRO-model af en toe iets lagere zuurstofconcentraties berekent in de onderste helft van de waterkolom in vergelijking met het offline-gekoppelde model. De verschillen in berekeningsresultaat zijn kleiner dan het verschil tussen de geobserveerde en gemodelleerde waarden.

In Figuur 8-41 wordt de indicator zuurstofarm areaal voor het online- en offline-gekoppelde D-HYDRO-model voor jaarsom 2008 weergegeven. In overeenstemming met bovenstaande figuren berekent het online-gekoppelde model een groter areaal van zuurstofarme condities (< 3 mg/L) gedurende tenminste 7 dagen (1764 ha.) dan het offline-gekoppelde model (1271 ha.). Dit verschil van bijna 500 ha. is voor deze indicator significant te noemen in vergelijking met de verschillen die te zien waren in de dwarsdoorsnede, bovenaanzichten en z,t-plots van de online- en offline-gekoppelde modelresultaten. Dit geeft de gevoeligheid van de indicator "zuurstofarm areaal" aan: kleine verschillen in de berekende bodemuurstofconcentratie kunnen tot substantiële verschillen in de, bij Grevelingenstudies veel gebruikte, indicator leiden.



Figuur 8-41. Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het D-HYDRO-model voor jaarsom 2008 met online-koppeling (bovenste paneel) en offline-koppeling (onderste paneel). Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.

De zuurstofarme arealen van de online- en offline-gekoppelde som voor jaarsom 2008 (hierboven weergegeven) en voor het TMBW-getij-scenario zijn opgenomen in Tabel 8.8.

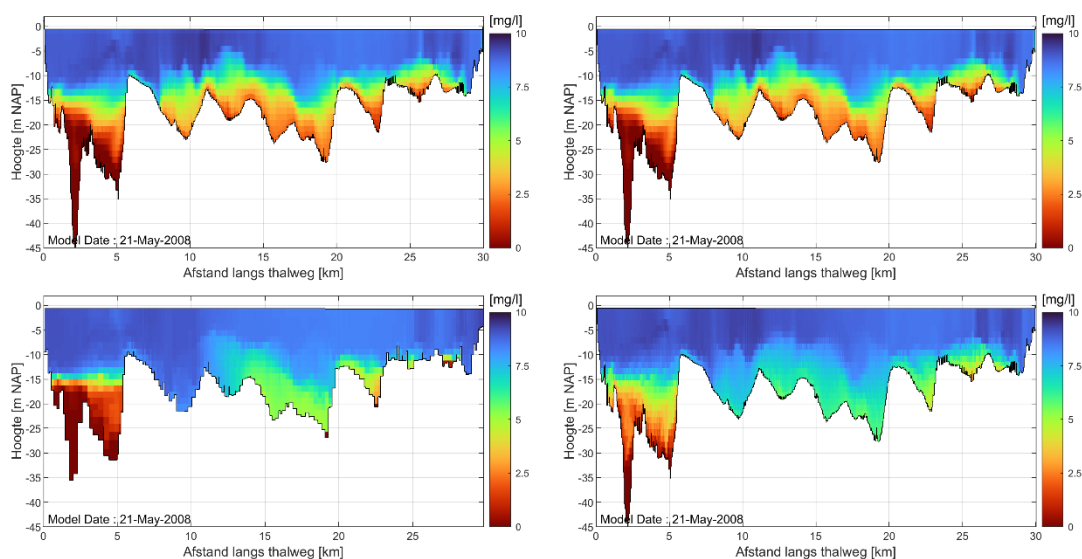
Tabel 8.8 Overzicht berekend zuurstofarm areaal: bodemzuurstofconcentratie < 3 mg/L voor tenminste 7 dagen

Areaal (hectare)	Jaarsom 2008	TMBW-scenario	Vershil	Vershil (%)
D-HYDRO (online)	1764	1504	-260	-15%
D-HYDRO (offline)	1271	607	-664	-52%
Delft3D 4	1525	631	-894	-59%

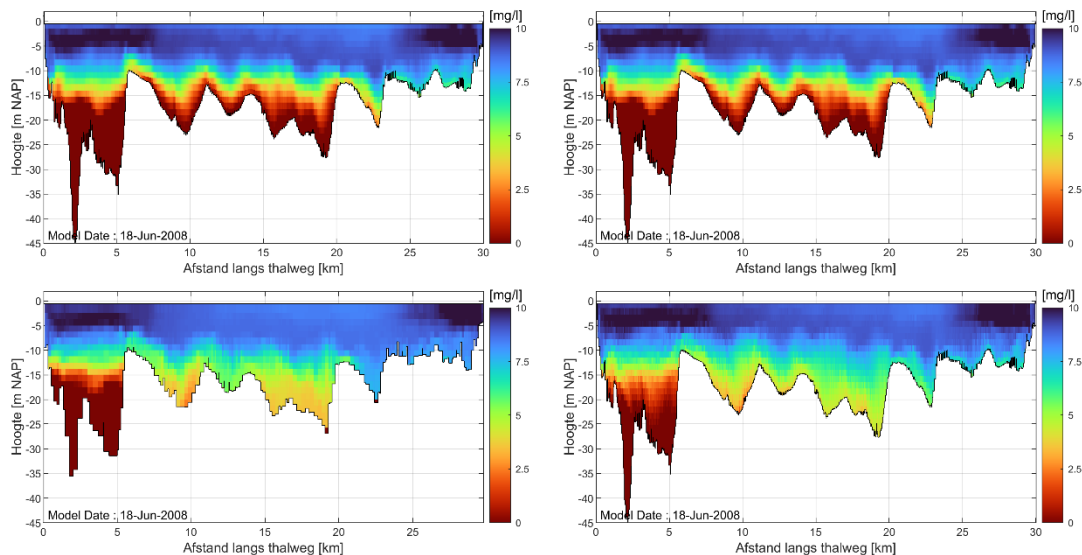
Het meer dynamische TMBW-scenario laat een groter verschil tussen de online- en offline-berekende arealen zien dan in de jaarsom. Hoe dynamischer het systeem, hoe belangrijker de frequentie van informatie-uitwisseling is. Dit kan een verklaring zijn voor de iets grotere verschillen tussen de Delft3D 4- en D-HYDRO-resultaten voor het TMBW-scenario in vergelijking met de modelresultaten voor de jaarsom.

Het offline-gekoppelde D-HYDRO-model berekent een procentuele afname van het zuurstofarme areaal (-52%) dat erg vergelijkbaar is met de waarde die wordt gevonden met het (per definitie offline-gekoppelde) Delft3D 4-model (-59%). Dit zou kunnen impliceren dat van alle verschillen die tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model (zie opsomming in paragraaf 8.2.1) bestaan, de methode voor offline- of online-koppeling van grote invloed is op de uiteindelijk berekende impact van het TMBW-getij-scenario.

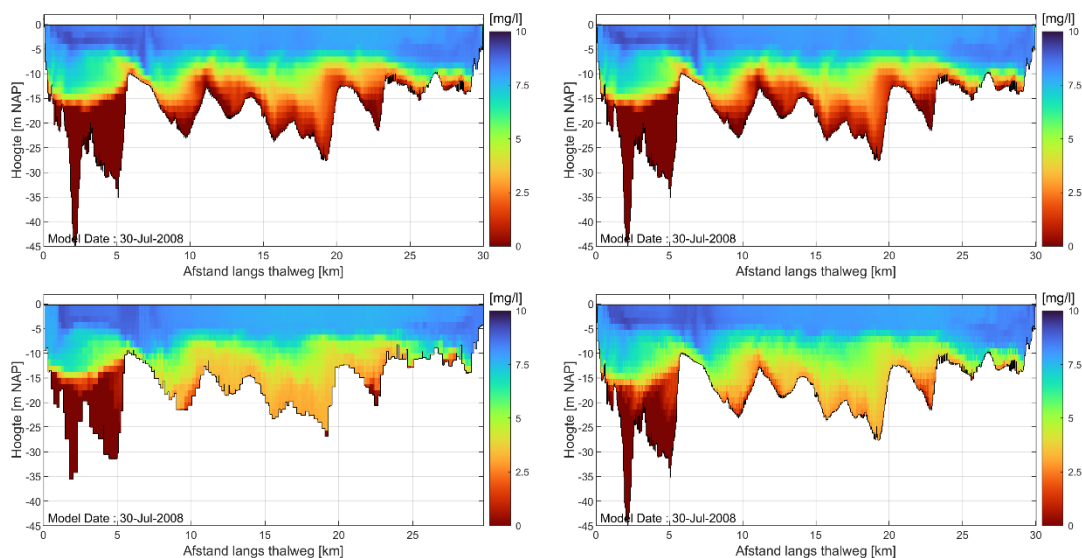
Dit beeld wordt bevestigd door Figuur 8-42 – Figuur 8-44 waarin de voor het TMBW-scenario berekende zuurstofconcentratie op 18 juni 2018 langs een transect door het Grevelingenmeer is geplote. De bovenste twee panelen zijn identiek en tonen het modelresultaat van de online-gekoppelde D-HYDRO-berekening. Het paneel linksonder toont de berekende zuurstofconcentratie in het (offline-gekoppelde) Delft3D 4-model, het paneel rechtsonder het resultaat van de offline-gekoppelde D-HYDRO-som.



Figuur 8-42 Berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 21 mei 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen (TMBW-scenario) in het online-gekoppelde D-HYDRO-model (boven; 2x hetzelfde paneel) en het (offline-gekoppelde) Delft3D 4-model (linksonder) en het offline-gekoppelde D-HYDRO-model (rechtsonder).



Figuur 8-43 Berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 18 juni 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen (TMBW-scenario) in het online-gekoppelde D-HYDRO-model (boven; 2x hetzelfde paneel) en het (offline-gekoppelde) Delft3D 4-model (linksonder) en het offline-gekoppelde D-HYDRO-model (rechtsonder).



Figuur 8-44 Berekende opgeloste-zuurstofconcentratie (mg/L) op 30 juli 2008 langs een dwarsdoorsnede door de Grevelingen (TMBW-scenario) in het online-gekoppelde D-HYDRO-model (boven; 2x hetzelfde paneel) en het (offline-gekoppelde) Delft3D 4-model (linksonder) en het offline-gekoppelde D-HYDRO-model (rechtsonder).

Op de drie willekeurige momenten in de zomer van 2008 wordt voor het TMBW-scenario duidelijk een hogere zuurstofconcentratie in de onderste helft van de waterkolom berekend in het (online-gekoppelde) D-HYDRO-model (paneel linksboven in Figuur 8-42 – Figuur 8-44) dan in het Delft3D 4-model (paneel linksonder in Figuur 8-42 – Figuur 8-44). Een erg vergelijkbaar verschil bestaat er tussen de berekeningsresultaten van het online-gekoppelde D-HYDRO-model (paneel rechtsboven in Figuur 8-42 – Figuur 8-44) en het offline-gekoppelde D-HYDRO-model (paneel rechtsonder in Figuur 8-42 – Figuur 8-44). Dit duidt erop dat de verschillen die tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model bestaan voor een groot deel toegedicht kunnen worden aan de koppelingmethodiek.

8.4.5 Conclusie

Het afgeregelde Delft3D 4- en D-HYDRO-model voor waterbeweging en waterkwaliteit van het Grevelingenmeer vertonen in algemene zin een zeer grote overeenkomst voor huidige situatie (jaarsom 2008). Uit de vergelijking met meetgegevens, blijkt dat de modellen de zuurstofconcentraties met een vergelijkbare kwaliteit kunnen reproduceren.

De model-model-vergelijking voor het TMBW-getij-scenario toont aan dat de modellen redelijk vergelijkbare zuurstofconcentraties berekenen. Het Delft3D 4-model berekent iets hogere zuurstofconcentraties in de onderste helft van de waterkolom. Daardoor pakt de impact van het getij-scenario, wanneer wordt vergeleken met jaarsom 2008 (de 'huidige situatie'), iets gunstiger uit (hogere bodemzuurstofconcentraties) in het Delft3D 4-model.

Ondanks de grote mate van overeenkomst wordt met het Delft3D 4-model een duidelijk groter effect van het getij-scenario op de specifieke indicator "langdurig zuurstofarm areaal" (oppervlakte waarvan de zuurstofconcentratie nabij de bodem voor tenminste 7 aaneengesloten dagen kleiner is dan 3 mg/L) berekend dan met D-HYDRO, respectievelijk -59% vs. -15%. Deze indicator is echter erg gevoelig gebleken: een kleine wijziging in gekozen drempelwaarde (7 aaneengesloten dagen, zuurstofconcentratie kleiner dan 3 mg/L) of modelinstelling kan deze procentuele afnames substantieel beïnvloeden. Desalniettemin wordt met de indicator consistent een groter positief effect in het Delft3D 4-model gevonden.

Een van de verschillen tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-waterkwaliteitsmodel is de koppelmethode (online- vs. offline-koppeling). Om de invloed hiervan op de berekende zuurstofconcentraties te bepalen is een model-model-vergelijking gemaakt met een offline- en online-gekoppelde D-HYDRO-berekening. Hieruit is gebleken dat voor de jaarsom 2008 de gemodelleerde zuurstofconcentratie erg vergelijkbaar is. Bij het doorrekenen van de TMBW-scenario's bleken de verschillen tussen beide modellen groter te worden. Net als het (offline-gekoppelde) Delft3D 4-model, berekent het offline-gekoppelde D-HYDRO-model hogere zuurstofconcentraties in de onderste helft van de waterkolom dan het online-gekoppelde D-HYDRO-model. Dit duidt erop dat de verschillen die tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model bestaan voor een groot deel toegedicht kunnen worden aan de koppelmethode. Dit vermoeden wordt versterkt door de met het offline-gekoppelde D-HYDRO-model berekende impact op de indicator zuurstofarm areaal: de procentuele afname van 52% komt dicht in de buurt van de impact berekend met het Delft3D 4-model (-59%).

Concluderend kan worden gesteld dat het omgezette D-HYDRO-waterkwaliteitsmodel, op basis van de model-model-vergelijking voor jaarsom 2000 en jaarsom 2008, geschikt is bevonden voor het toepassen in modelstudies gericht op de huidige situatie. Het nieuwe model berekent in dit geval vergelijkbare resultaten als het voorgaande Delft3D 4-model. Bij het toepassen van het D-HYDRO-model in simulaties gericht op situaties buiten het bereik waarvoor het model is vergeleken met metingen, wordt geadviseerd om naar meerdere doelvariabelen te kijken, voldoende gevoeligheidsonderzoek te doen en de resultaten met een bandbreedte/betrouwbaarheidsinterval te rapporteren.

9 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

9.1.1 Hydrodynamisch model

Het doel van deze studie is het ontwikkelen van een D-HYDRO zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel voor het Grevelingenmeer. Om aan de beoogde toepassingen te kunnen voldoen, is er een 3D-model opgezet dat getoetst is op het correct berekenen van saliniteit, temperatuur en stormopzet. Daarnaast is er een diepte-gemiddeld (2Dh) model afgeleid van dit 3D-model voor toepassing binnen BOI. Het bestaande waterkwaliteitsmodel is omgezet van het Delft3D 4-format naar modelinvoer voor D-HYDRO (D-Water Quality), waardoor het mogelijk is om online-gekoppelde waterkwaliteitssimulaties te maken.

De modelopzet van het zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel van de Grevelingen is gebaseerd op de generieke technische en functionele specificaties zoals beschreven in Minns et al. (2019). De 3D-instellingen zijn daarnaast ook gebaseerd op de ervaringen uit het onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO (Tiessen et al., 2018). Vergeleken met het bestaande 3D-model voor de Grevelingen heeft het D-HYDRO-model een hogere horizontale en verticale resolutie. Desalniettemin is, grotendeels door de mogelijkheid om simulaties geparalleliseerd uit te voeren, de rekentijd vergelijkbaar gebleven met het bestaande 3D-Grevelingenmodel.

In de kalibratie voor het hydrodynamische model zijn op basis van jaarsom 2008 verschillende modelkeuzes en -instellingen van het D-HYDRO-model beschouwd. Aangezien hiermee niet significant betere modelresultaten werden gevonden, is besloten om (met uitzondering van de achtergrondwaarde verticale eddy diffusiviteit om de menging af te regelen) niet af te wijken van de standaardinstellingen voor D-HYDRO-modellen.

Het gevoeligheidsonderzoek naar de stormopzet heeft aangetoond dat de berekende opzet en afwaaiing vooral beïnvloed wordt door de keuze van het gebruikte meetstation en de winddrag-coëfficiënten. De verificatie van de stormopzet (oktober 2002 en december 2013) heeft aangetoond dat meetgegevens van station Stavenisse tot de beste reproductie van de stormopzet leidt bij het doen van hindcasts. Doordat meetlocatie Vlissingen (waar wel de benodigde meteo-gegevens voor de temperatuurmodellering beschikbaar zijn) een vergelijkbare magnitude (maar iets andere timing) van windsnelheden heeft, kan dit station goed gebruikt worden voor het doen van jaarsommen aangezien het daarmee een vergelijkbaar effect op de verticale menging zal hebben en zo de gebruikte meteo-gegevens van hetzelfde meetstation afkomstig zijn.

Aangezien de kalibratie van de winddrag-coëfficiënten afhankelijk is van het toegepaste meetstation en het resterende verschil in piekwaterstand enkele centimeters is, is besloten om deze waarden niet aan te passen en gebruik te maken van de standaardinstellingen voor D-HYDRO-modellen. Bij toepassing binnen BOI zal mogelijk, wanneer bekend is van welk meetstation de windgegevens gebruikt zullen worden, opnieuw naar deze winddrag-coëfficiënten gekeken moeten worden.

Om het hydrodynamische model te valideren op het berekenen van saliniteit en temperatuur is ook jaarsom 2000 en jaarsom 2017 gemodelleerd. De reproductie van saliniteit en temperatuur met het zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel is vergelijkbaar met dat van het Delft3D 4-model.

Uit een test voor de BOI-toepassing waarin met het hydrodynamische model de waterstand langs de dijkkring bij extreme condities is berekend, is gebleken dat bij het 3D-model de rekentijden significant toe kunnen nemen of de simulatie zelfs tot stilstand komt door de automatische

tijdstapbeperking. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de hoge stroomsnelheden (t.g.v. de oplopende, extreme windsnelheid) in combinatie met lokaal (zeer) dunne z-lagen. Ondanks dat voor toepassing binnen BOI het 2D-model gebruikt zal worden, moet hier in samenwerking met de softwareafdeling een oplossing voor gezocht worden. Waarschijnlijk kan dit opgelost worden door het toepassen van een combinatie van z- en sigma-lagen, iets wat recent in de D-Flow FM geïmplementeerd is. Wat betreft berekende waterstanden is er een klein verschil (orde centimeters) tussen de berekende piekwaterstanden (orde decimeters) in het 2D- en 3D D-HYDRO-model, waarbij het 3D model waterstanden berekent die dichter in buurt komen van de resultaten van het WAQUA-model van het Grevelingenmeer.

9.1.2 Waterkwaliteitsmodel

De doelstelling van dit project wat betreft de waterkwaliteitsmodellering is om de omzetting van het voorgaande waterkwaliteitsmodel naar modelinvoer voor gebruik binnen D-HYDRO af te ronden. Het resulterende waterkwaliteitsmodel is zo opgezet dat dit online-gekoppeld kan rekenen met het hydrodynamische Grevelingenmodel.

Om te verifiëren dat deze omzetting tot vergelijkbare modelresultaten leidt in vergelijking met het voorgaande Delft3D 4-model, zijn jaarsom 2000 en jaarsom 2008 met het nieuwe D-HYDRO-model gesimuleerd. De resultaten van het D-HYDRO-model verschillen, gemiddeld genomen, weinig van de Delft3D 4-berekeningen voor zowel het jaar 2000 als het jaar 2008. De zuurstofconcentraties komen in beide modelsommen grotendeels overeen. In de diepere lagen zijn verschillen tussen de berekeningsresultaten van beide modelsommen te zien, wat tot een relatief groot verschil in indicator “zuurstofarm areaal” leidt. Op enkele kleine uitzonderingen na komen de door het D-HYDRO-model berekende chlorofyl- en nutriëntenconcentraties, voor zowel het jaar 2000 als het jaar 2008, goed overeen met de Delft3D 4-modelresultaten.

Uit de data-model-vergelijking blijkt dat het D-HYDRO-model over het algemeen goed in staat is om de geobserveerde zuurstof-, chlorofyl- en nutriëntenconcentraties te reproduceren. Het nieuwe model berekent deze concentraties met een vergelijkbare kwaliteit als het Delft3D 4-model.

Na deze eerste stap waarin het bestaande waterkwaliteitsmodel direct is omgezet en de hierbij ontstane verschillen zijn geïdentificeerd, kan het waterkwaliteitsmodel in een vervolgstudie verder ontwikkeld/verbeterd worden. Er wordt aanbevolen om het model uit te breiden met anorganisch slib en de bijbehorende processen zoals flocculatie. Aangezien dit om een herkalibratie zou vragen, zou er hierbij een uitgebreidere data-model-vergelijking uitgevoerd moeten worden. Verder zou het interessant zijn om een meer recente periode te simuleren.

Naast de ‘huidige situatie’ (jaarsom 2008), is ook een getij-scenario (TMBW) met het nieuwe D-HYDRO-model gesimuleerd. De model-model-vergelijking toont aan dat het D-HYDRO- en Delft3D 4-model redelijk vergelijkbare zuurstofconcentraties berekenen. Het Delft3D 4-model berekent iets hogere zuurstofconcentraties in de onderste helft van de waterkolom, waardoor het Delft3D 4-model een iets positiever effect (grotere toename in bodemzuurstofconcentraties) ten gevolge van het getij-scenario berekent dan het D-HYDRO-model. Wanneer dit verschil wordt gekwantificeerd in de afname van indicator “langdurig zuurstofarm areaal” (oppervlakte waarvan de zuurstofconcentratie nabij de bodem voor tenminste 7 aaneengesloten dagen kleiner is dan 3 mg/L), wordt een significant verschil gevonden van -59% (Delft3D 4) en -15% (D-HYDRO).

Een van de verschillen tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-waterkwaliteitsmodel is de koppelingmethodiek (online- vs. offline-koppeling). De verschillen tussen het online- en offline-gekoppelde model (zowel kwalitatief vergeleken in tijdseries en horizontale/verticale doorsnedes van de berekende zuurstofconcentraties als uitgedrukt in impact op de indicator “langdurig zuurstofarm areaal”) komen sterk overeen met de verschillen tussen het (offline-gekoppelde) Delft3D 4-model en het (online-gekoppelde) D-HYDRO-model. Dit duidt erop dat de verschillen die

tussen het Delft3D 4- en D-HYDRO-model bestaan (en die uitvergroet worden bij het modelleren van het getij-scenario) voor een groot deel toegedicht kunnen worden aan de koppelingsmethodiek.

Bij het toepassen van het D-HYDRO-model in simulaties gericht op situaties buiten het bereik waarvoor het model is vergeleken met metingen, wordt geadviseerd om naar meerdere doelvariabelen te kijken, voldoende gevoeligheidsonderzoek te doen en de resultaten met een bandbreedte/betrouwbaarheidsinterval te rapporteren. Daarnaast wordt aanbevolen om in dergelijke studies een voldoende lange inspeelperiode toe te passen: bij het doorrekenen van een (getij-)scenario is een spin-up periode (van minimaal een jaar) nodig om de bodemconcentraties te laten ontwikkelen naar een nieuw dynamische evenwicht.

9.2 Aanbevelingen

9.2.1 Kunstwerken

Er wordt aanbevolen om, in toekomstige studies wanneer de kunstwerken via *general structures* of als randvoorwaarden gemodelleerd worden, nog eens goed te kijken naar het rekenrooster en de bodemligging in de nabijheid van deze kunstwerken. Op basis van de huidige Baseline-projectie liggen de domeinranden droog (boven NAP) aangezien de modelrand bovenop de dijk ligt. Voor het modelleren van de kunstwerken als randvoorwaarden/*general structures* is daarom een Baseline-modelmaatregel nodig om de dieptepunten op deze locaties aan te passen. Met de huidige softwareversie lukt het niet om *general structures* i.c.m. een 3D-model te gebruiken.

In het huidige model, waarin het Grevelingenmeer als *stand-alone* model wordt gemodelleerd (en dus niet waterstanden aan bijv. de Noordzeezijde), worden de kunstwerken (zowel de Brouwerssluis, de Flakkeesse Spuisluis en de gemalen) via lozings-/onttrekkingspunten en op basis van gemeten/synthetische tijdreeksen gemodelleerd. De kunstwerken zijn soms enkele cellen van de exacte locatie of modelrand verplaatst om kunstwerken ter plaatse van droogliggende/-vallende cellen te voorkomen.

9.2.2 HARMONIE gebruiken voor modelleren stormopzet

Omdat er mogelijk behoefte is om het model in de toekomst voor operationeel beheer in te gaan zetten en het meteorologisch KNMI HiRLAM-model op korte termijn gaat worden uitgefaseerd, is er een eerste test uitgevoerd waarbij het D-HYDRO Grevelingenmodel geforceerd is met windsnelheden uit het KNMI HARMONIE-model. Vanwege beperkingen in de software is dit gedaan op basis van 1 HARMONIE-uitvoerpunt in het midden van het meer en een tijdreeks van de windsnelheid en -richting. Het wordt aanbevolen om in een later stadium de directe aansluiting van de ruimtelijk-variërende HARMONIE-gegevens (windschuifspanningen op een sferische grid) op het cartesische D-HYDRO-netwerk verder te testen. Op dit moment wordt HARMONIE al wel binnen andere modeltoepassingen gebruikt, maar dan in combinatie met de SIMONA-software.

9.2.3 Z-sigma-lagen

Het verticale rekenrooster van het D-HYDRO Grevelingenmodel wordt beschreven door middel van een z-lagenverdeling. Hierdoor kunnen in ondiepe gebieden of tijdens het onderlopen/droogvallen van rekencellen zeer dunne lagen ontstaan die in combinatie met een hoge stroomsnelheid tot significante beperkingen van de rekentijdstep kunnen leiden. In samenwerking met de softwareafdeling moet hier een oplossing voor gezocht worden. Recent zijn er codewijzigingen in D-Flow FM geweest waardoor het ook mogelijk is om een combinatie van z- en sigma-lagen te gebruiken. Aangezien daarmee in de bovenste lagen sigma-lagen gebruikt worden en deze robuuster blijken te zijn, is de verwachting dat dit tot stabielere simulaties leidt.

9.2.4 **Inspeelperiode**

In voorgaande modelstudies van het Grevelingenmeer, is soms gebruik gemaakt van een jaar als inspeelperiode (jaarsom 2000) waarbij in andere studies een vrij korte inspeelperiode van 2 maanden is toegepast (jaarsom 2008). Dezelfde modelrandvoorwaarden en simulatieperiodes zijn gebruikt in de modelontwikkeling van het D-HYDRO-model. Aangezien de saliniteit in de diepere delen en sommige waterkwaliteitsparameters meer tijd nodig hebben om tot een dynamisch evenwicht te komen, wordt aanbevolen om in vervolgstudies een langere inspeelperiode te hanteren.

10 Referenties/Literatuur

- Genseberger, M., Eijsberg – Bak, C., Fujisaki, A., Thiange, C. (2018). *Ontwikkeling zesde-generatie Markermeer en Veluwerandmeren model; Modelbouw en validatie*. Deltares rapport 11200569-009-ZWS-0013 (versie 2.0).
- Groenenboom, J., Verploegh, D. (2016). *5e generatie SOBEK3-model Grevelingen*. Deltares, rapport 1230072-007-ZKS-0003.
- Groenenboom, J., Kleissen, F.M. (2019). *Modelontwikkeling D-HYDRO Grevelingen; Een zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel*. Deltares, rapport 11203715-006-ZKS-0002.
- de Jong, J. (2020). *Toepassing van D-HYDRO: Mappenstructuur en sommengenerator water modellen (SGWM)*. Deltares, memo 11205259-002-ZKS-0004. <nog in de maak>
- Kuijper, K. van der Kaaij, Th., Kerkhoven, D. (2014). *Grevelingen-Volkerak-Zoommeer WAQUA-model 5e generatie; Modelopzet en validatie stormopzet en afwaaiing*. Deltares, rapport 1209448-005-ZKS-0005.
- Maarse, M.J., Nolte, A.J., Kleissen, F.M., Becker, B.P.J. (2019). *Optimalisatie van peilbeheer Getij Grevelingen door aansturing van het doorlaatmiddel in de Brouwersdam*. Deltares, rapport 11203818-001-ZKS-0003.
- Minns, T., Gaytan Aguilar, S. (2015). *5e generatie WAQUA model Grevelingen; modelverificatie voor stormopzet en afwaaiing*. Deltares, rapport 1220073-007-ZKS-0003.
- Minns, T., Spruyt, A., Kerkhoven, D. (2019). *Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO; Generieke technische en functionele specificaties*. Deltares, rapport 11203714-013-ZWS-0001.
- Nolte, A.J. (2017). *Expertsessies Slib- en zuurstofhuishouding Grevelingenmeer*. Deltares, memo 1230426-000-ZKS-0004.
- Nolte, A.J., Spiteri, C. (2011). *Effect van herinstructie van getij op waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer : scenarioberekeningen ten behoeve van de MIRT-Verkenning*. Deltares, rapport 1201650-000-ZKS-0033.
- Spiteri, C., Nolte, A.J. (2010). *Validatie van het 3D model van het Grevelingenmeer voor hydrodynamica, waterkwaliteit en primaire productie*. Deltares, rapport 1201650-000-ZKS-0015.
- Spruyt, A., Minns, T., Yossef, M., Kerkhoven, D., Zijl, F., & Genseberger, M. (2016): *Advies voor algemeen functioneel ontwerp voor de 6e-generatie modellen van RWS*. Deltares rapport 1230071-011-ZWS-0009.
- SVSD (Stormvloedseindienst; tegenwoordig de Stormvloedwaarschuwingsdienst) (2003).
- Tangelder, M. et al. (2019). *Ecologisch onderzoek Getij Grevelingen. Onderzoek naar de historische ontwikkeling van het watersysteem en inschatting van de autonome ontwikkeling vergeleken met getijscenario's en effecten op Natura 2000-soorten en habitats bij gedempt getij*. Wageningen University & Research rapport C089/19. <https://doi.org/10.18174/506617>

Tiessen, M.C.H., et al. (2018). *Onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO*. Deltares, rapport 11202219-006-DSC-0008.

van Doornik, W. (2019). *Actualisatie Baseline Zuid Westelijke Delta 2019*. Lieveense, documentnummer WAB008629_RAP001.

Zijl, F., Nolte, A. (2006). *Effect van ingebruikname Flakkeese spuisluis op de hydrodynamica en waterkwaliteit van het Grevelingenmeer*. Deltares, rapport Z4161.

A Prioritering gebiedsschematisaties RWS

Hieronder is de informatie uit de memo “Prioritering gebiedsschematisaties RWS – Martin Scholten en Yann Friocourt – 30 november 2018” opgenomen die betrekking heeft op het Grevelingenmeer.

Prioriteit 1: Grevelingenmeer

- Beoogde toepassingen
 - systeemwerking na realisatie doorlaatmiddel Brouwersdam t.b.v. peilbeheer en gezonde waterkwaliteit
 - verkenning mogelijkheid om peil te corrigeren voor scheefstand (stormopzet)
 - WBI
- Verwachte situaties
 - WBI sommen
 - Narekenen van opgetreden situaties
 - Scenario's berekenen situatie na realisatie doorlaatmiddel Brouwersdam en scenario's peilbeheer
- Benodigde functionaliteiten
 - Vanwege zwak dynamisch systeem: z-lagen
 - Temperatuurmodellering (geen lozing, alleen onder invloed van atmosferische forcering)
 - Realistische windforcering
 - Realistische initiële situatie (3D zoutstructuur, temperatuur)
 - Doorlaatmiddel Brouwersdam, Brouwerssluis en wellicht aanvoer via Flakkeese Spuisluis: forcering Q, T, en S met tijdreeksen, en bijbehorende verdeling naar z-lagen
 - Uitstroom Flakkeese Spuisluis (en wellicht doorlaatmiddel Brouwersdam en Brouwerssluis): negatieve debietrand en/of onttrekking, en bijbehorende laagverdeling en invloed op temperatuur en saliniteit
 - Lateralen (gemalen waterschappen) te forceren met reeksen van Q, T, en S, en bijbehorende laagverdeling
 - Verdamping en neerslag
 - Koppeling (online en offline) met WAQ t.b.v. modellering zuurstof, wellicht meer
 - Aandachtspunt bij narekenen: waterbalans
 - Op termijn is ook de werking van kunstwerken voorzien (doorlaat Brouwersdam)
- Acceptatiemodel:
 - Ontwikkeling zout en temperatuur gelaagdheid bij zwak dynamisch systeem onder invloed van atmosferische forcering
 - Aan de hand van GTSO metingen en vergelijking met Delft3D
 - Online koppeling zuurstofmodellering
 - Aan de hand van GTSO metingen en vergelijking met Delft3D
 - Offline koppeling zuurstofmodellering
 - Aan de hand van GTSO metingen en vergelijking met Delft3D

B Bijlage bij hoofdstuk 4 ‘Modelopzet’

B.1 Input voor generieke specificaties voor D-HYDRO meren-modelschematisaties

Op de volgende pagina's is de memo *Input voor generieke specificaties voor D-HYDRO meren-modelschematisaties* opgenomen.

Memo

Datum	Ons kenmerk	Aantal pagina's
18 augustus 2020	11203715-006-ZKS-0003	1 van 3
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Julien Groenenboom	+31(0)88 335 8546	Julien.Groenenboom@deltares.nl

Onderwerp

Input voor generieke specificaties voor D-HYDRO meren-modelschematisaties

Inleiding

Binnen KPP2020 Hydraulica Schematisaties wordt aan verschillende D-HYDRO-modelschematisaties gewerkt van gebieden die gekarakteriseerd kunnen worden als een meer. Het gaat hierbij specifiek om de volgende gebieden:

- IJsselmeer, IJssel-Vechtdelta en Overijsselse Vecht
- Markermeer en Veluwerandmeren.
- Grevelingenmeer
- Veerse Meer
- Volkerak-Zoommeer

Bij het ontwikkelen van D-HYDRO-modelschematisaties voor en in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS) dient zoveel mogelijk aangesloten te worden op de generieke en technische specificaties voor het opzetten van de zesde-generatie modellen voor Rijkswaterstaat (Minns et al., 2019). Aangezien er op dit moment nog geen richtlijnen zijn voor het opzetten van een “meren”-modelschematisatie¹, wordt hieronder een voorstel gedaan voor de toevoeging van twee onderwerpen aan de generieke specificaties die van belang zijn bij het opzetten van een dergelijke modelschematisatie. Het betreft de wijze van modelleren van neerslag en verdamping, het toepassen van een waterbalans en het opleggen van de sluitfout.

Onderstaande paragrafen kunnen na goedkeuring door deelprojectleiders van “meren”-modelschematisaties en Rijkswaterstaat worden opgenomen in de nieuwe versie van de “generieke en technische specificaties”-rapportage. Net als bij andere keuzes in de modelopzet geldt dat onderstaande informatie als richtlijn gezien kan worden waarmee de vereiste consistentie tussen verschillende D-HYDRO-modelschematisaties voor RWS vergroot wordt. Indien nodig, kan er met onderbouwing van deze richtlijnen afgeweken worden. Eveneens kunnen aanvullende inzichten op een later moment aan deze richtlijnen worden toegevoegd.

Wijze van modelleren van neerslag en verdamping

Gegevens van neerslag en verdamping zijn vaak beschikbaar in een eenheid als mm/dag. Bij de modelopzet van een meren-modelschematisatie wordt gebruik gemaakt van een waterbalans waarin dit is omgerekend naar een debiet (m^3/s). Indien geen vooraf opgestelde waterbalans beschikbaar is, kan de regenval en verdamping worden omgerekend naar een debiet door gebruik te maken van het totale wateroppervlak van het meer bij een representatief meerpeil.

Regenval en verdamping worden gemodelleerd in de D-HYDRO Suite door middel van het toepassen van een *lateral discharge*. Een *lateral discharge* zorgt voor het toevoegen (of onttrekken) van debiet aan het model. De *lateral discharge* kan worden opgegeven op een specifieke puntlocatie

¹ In dit geval een gesloten watersysteem. Deze aanpak kan daarom wellicht ook van toepassing zijn op kanalen.

of binnen een polygoon. In de laatste optie wordt het debiet naar rato van celgrootte verdeeld over de cellen binnen het polygoon. Naast een debietreeks is dan dus een polygoon nodig om het gebied aan te geven waarover de volumeverandering plaats zal vinden. Er worden geen (zout)concentraties en temperatuur van de regenval voorgeschreven, dat is op dit moment ook technisch (nog) niet mogelijk.

Om volledige controle te hebben over de inkomende en uitgaande fluxen wordt geadviseerd om de polygoon op een dieptelijn van het model te specificeren waarvan bekend is dat deze grens niet onderschreden zal worden² tijdens de beoogde berekening of het beoogde bereik waarbinnen het model gebruikt gaat worden. Wanneer de polygoon ook droogvallende gebieden beslaat, wordt het onttrekkingsdebiet gelimiteerd (met als gevolg een niet-sluitende waterbalans).

Bij een negatief debiet zal onttrekking van volume plaatsvinden, hierdoor wordt het celvolume kleiner en neemt de concentratie van constituenten in het resterende celvolume toe. Er worden dus, in tegenstelling tot het gebruik van put-termen, geen stoffen (zoals zout) uit het model onttrokken.

Waterbalans en sluitfout

Bij het opzetten van een D-HYDRO-model van een gesloten watersysteem kan er mogelijk gebruik worden gemaakt van een reeds beschikbare waterbalans. In het KPP BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties wordt gewerkt aan een generieke methode voor het opstellen van water- en stoffenbalansen³. Deze bouwsteen beoogt de informatie voor hindcast beschikbaar te hebben voor alle meren-modelschematisaties. Voor operationele toepassing van een D-HYDRO-model is deze methode wellicht niet geschikt of in ieder geval nog niet getest, daarom richt deze paragraaf zich enkel op de situatie waarin de waterbalans vooraf bekend is (bijv. in een hindcast of scenario-situatie).

Indien er voor een gebied nog geen waterbalans beschikbaar is, kan er op basis van metingen van bijvoorbeeld (indirect bepaalde) debieten door kunstwerken en gegevens over regenval/verdamping een waterbalans worden opgesteld. In combinatie met hypsometrische gegevens kan een theoretisch meerpeil berekend worden. Dit theoretische meerpeil wijkt hoogstwaarschijnlijk af van het geobserveerde (gemiddelde) meerpeil van het watersysteem.

Omgekeerd kan het geobserveerde (ruimtelijk gemiddelde) over tijd variërende meerpeil worden omgerekend in volumeveranderingen over tijd. Het verschil tussen het netto debiet uit de waterbalans en het verwachte netto debiet o.b.v. het geobserveerde (gemiddelde) meerpeil, wordt de sluitfout genoemd. Deze bepaling van de sluitfout kan voorafgaand van een modelsimulatie berekend worden en is dus niet gebaseerd op modeluitvoer.

Ondanks dat de waterstand- en debietgegevens vaak op een relatief hoogfrequent tijdsinterval beschikbaar zijn (bijv. 10 min.), wordt niet op deze tijdstap gecorrigeerd maar wordt de sluitfout/correctie over een langere periode verwerkt. Door middel van het toepassen van een lopend gemiddelde (bijv. van 7 dagen) ontstaat een gladdere debietreeks die als sluitfout kan worden toegepast.

De sluitterm wordt los van de overige forceringen gespecificeerd en wordt dus niet verdisconteerd in andere debieten. Wanneer de bepaling en verwerking van de sluitfout niet kan worden overgenomen uit het resultaat van de generieke methode voor het opstellen van water- en stoffenbalansen (KPP BOO Waterkwaliteitsmodelschematisaties), wordt geadviseerd om de sluitfout

² Dit gebied zou, na codewijzigingen, mogelijk ook door het rekenhart bepaald kunnen worden. Voorlopig wordt vastgehouden aan het handmatig opstellen van een polygoon om duidelijk te hebben welk gebied precies gebruikt wordt.

³ Deze methode is al toegepast en opgeleverd voor het IJsselmeer, voor het Volkerak-Zoommeer is dit in een vergevorderd stadium."

op te leggen op de plek waar de onzekerheid in het netto debiet (in absolute zin) het grootst is. Afhankelijk van deze locatie kan dit worden opgelegd als puntbron of als *lateral discharge*.

Kopie aan

Arthur van Dam
Yann Friocourt
Menno Genseberger
Erik de Goede
David Kerkhoven
Tony Minns
Arno Nolte
Martin Scholten
Aukje Spruyt
Jaco Stout
Meinard Tiessen
Theo van der Kaaij
Marlies van der Lugt
Toine Vergroesen
Firmijn Zijl

C Bijlage bij hoofdstuk 5 ‘Kalibratie saliniteit, temperatuur en stormopzet’

C.1 Statistische kengetallen

Root mean square error (RMSE)

De *RMSE* wordt gegeven door:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\zeta_{sim,i} - \zeta_{obs,i})^2}$$

waarbij n het aantal metingen in een bepaalde periode, ζ_{sim} de gesimuleerde waterstand en ζ_{obs} de geobserveerde waterstand. Bij de *RMSE* wordt het kwadraat van het verschil genomen. Hierdoor wordt elke afwijking meegenomen en worden grotere afwijkingen bovendien zwaarder gewogen.

Gemiddeld verschil (GV)

Het gemiddeld verschil *GV* (of bias) wordt gegeven door:

$$GV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\zeta_{sim,i} - \zeta_{obs,i})$$

waarbij n het aantal metingen in een bepaalde periode, ζ_{sim} de gesimuleerde waterstand en ζ_{obs} de geobserveerde waterstand. Bij het gemiddeld verschil kan een te hoog berekende waterstand een te laag berekende waterstand compenseren. In sommige gevallen kan dit gewenst zijn; het kan echter ook een vertekend beeld geven van de betrouwbaarheid van een model.

Standaarddeviatie (σ)

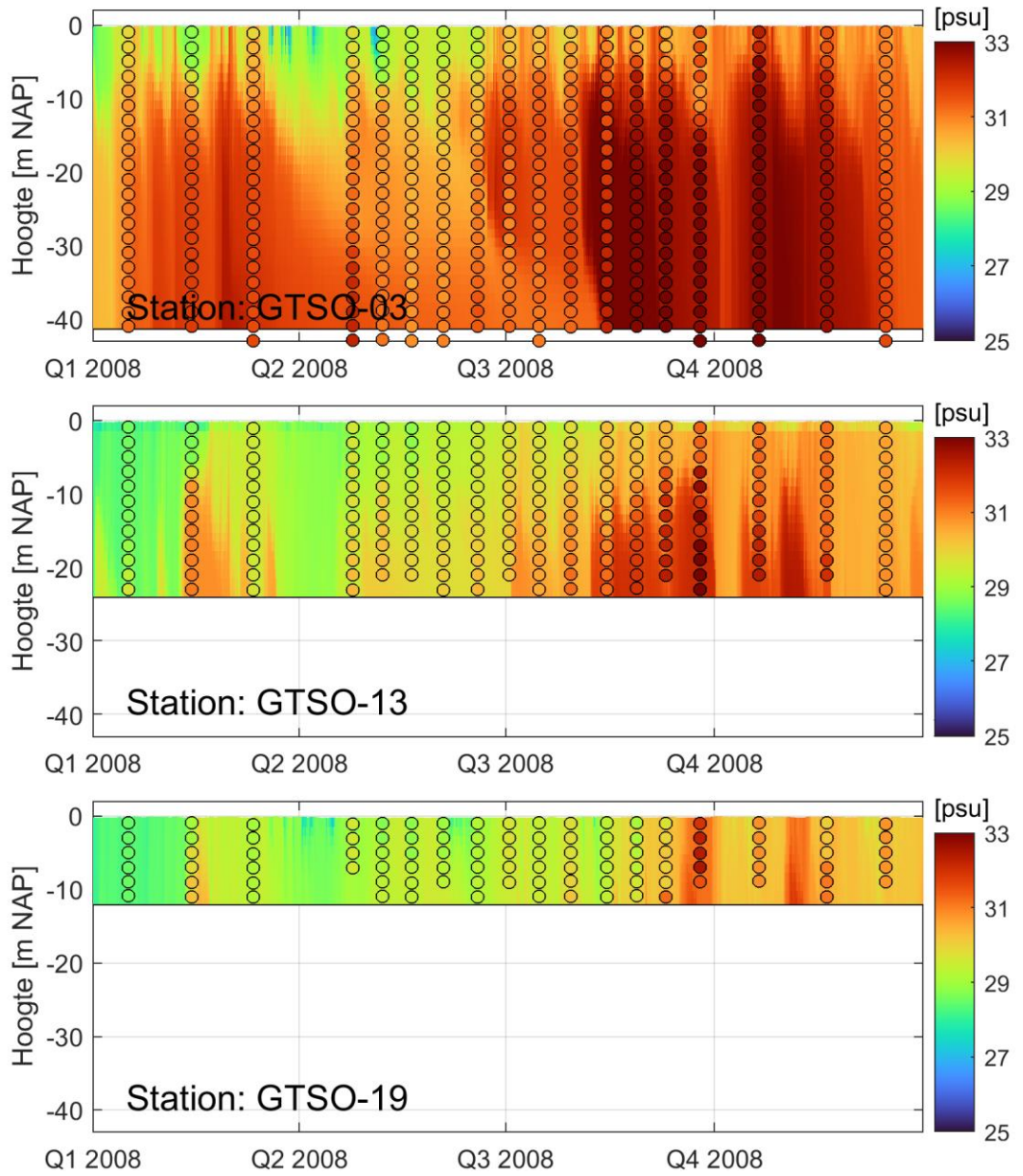
De standaarddeviatie σ wordt gegeven door:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((\zeta_{sim,i} - \zeta_{obs,i}) - GV)^2}$$

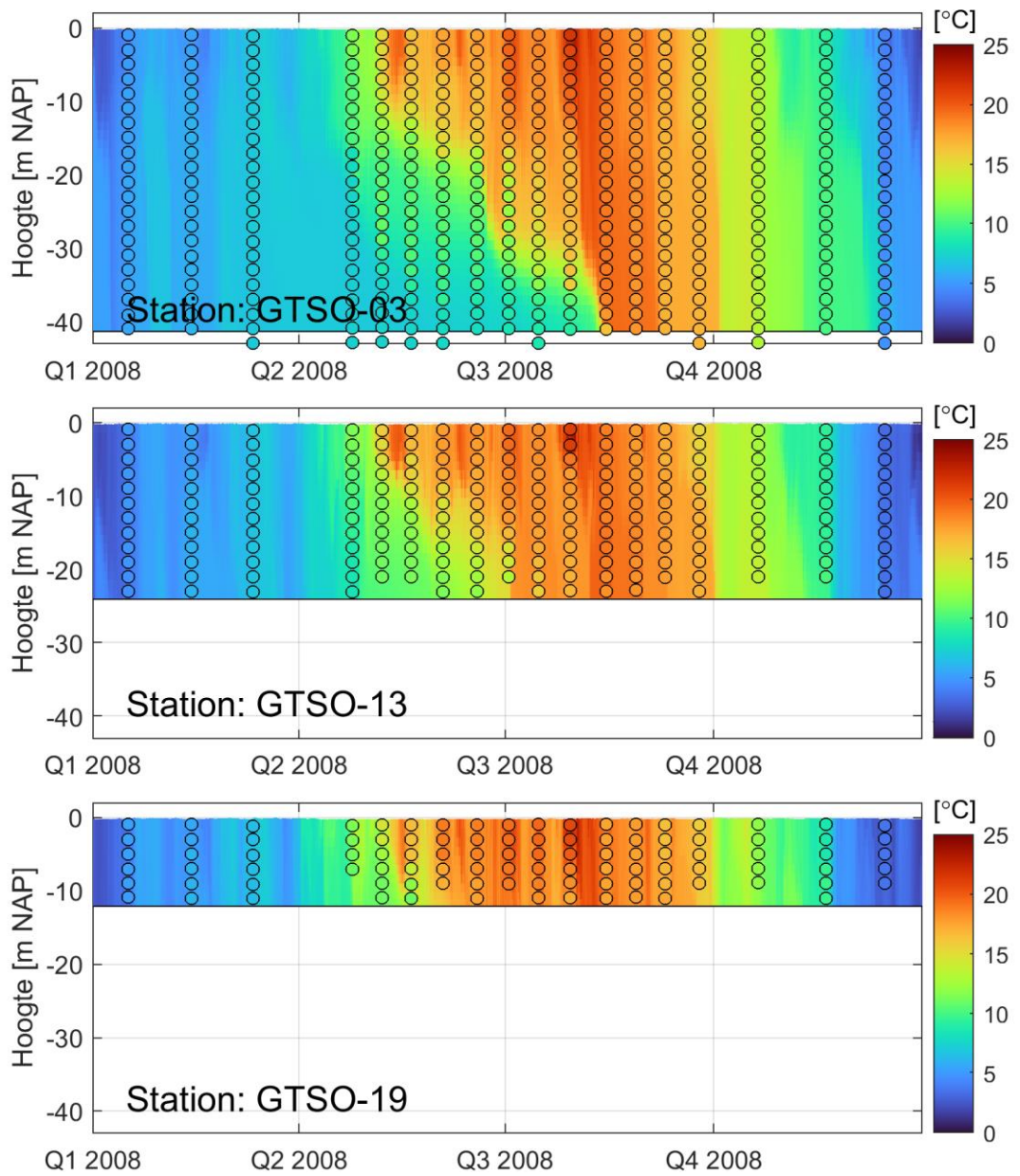
waarbij n het aantal metingen in een bepaald periode, ζ_{sim} de gesimuleerde waterstand, ζ_{obs} de geobserveerde waterstand en *GV* het gemiddeld verschil zoals hierboven gedefinieerd. De standaarddeviatie is een maat voor de spreiding van het verschil rondom het gemiddeld verschil.

C.2 Modelresultaten – z,t-diagram – 2008

C.2.1 Saliniteit

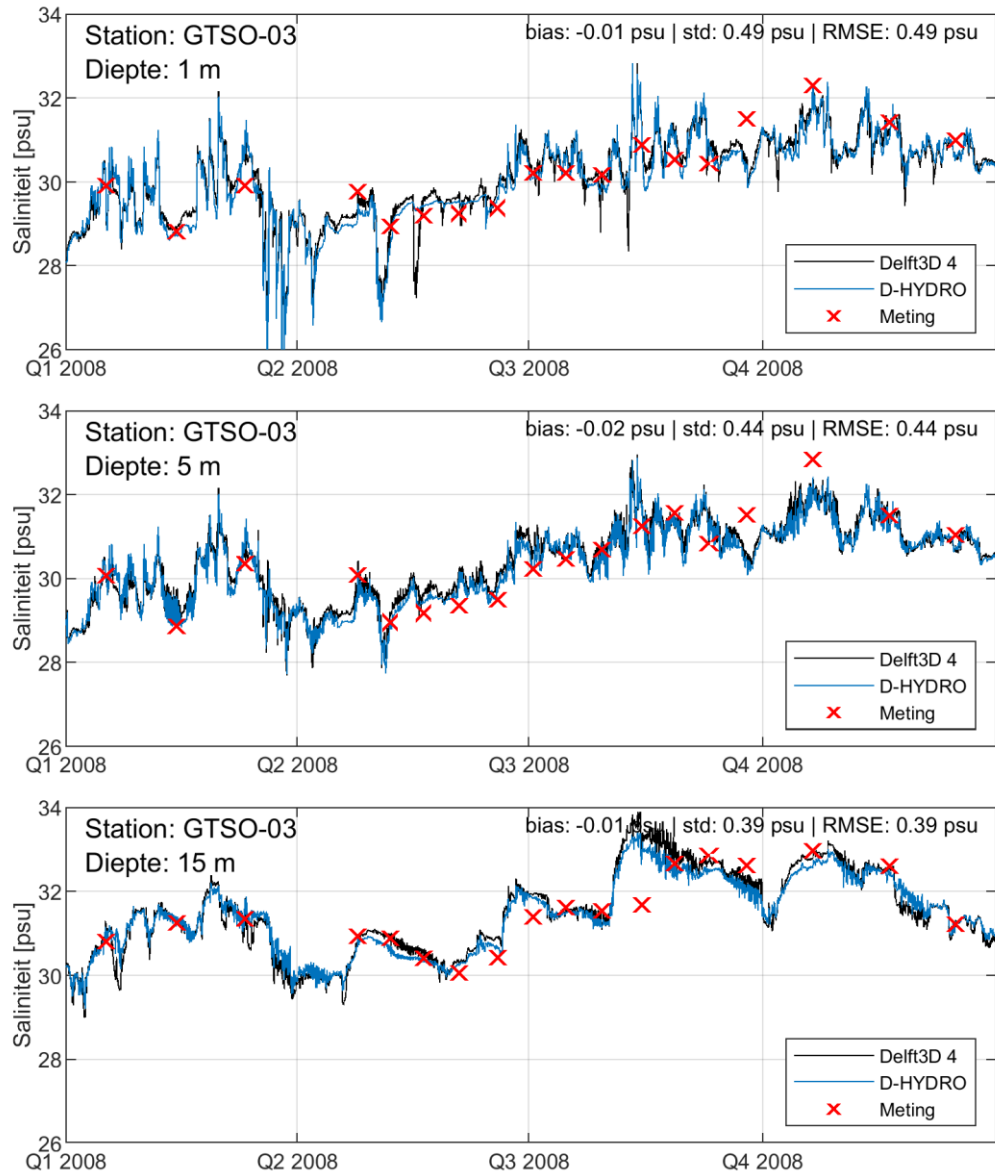


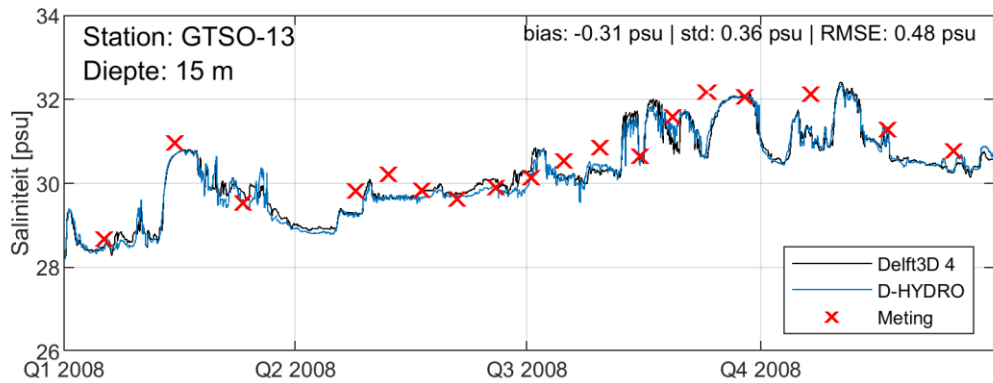
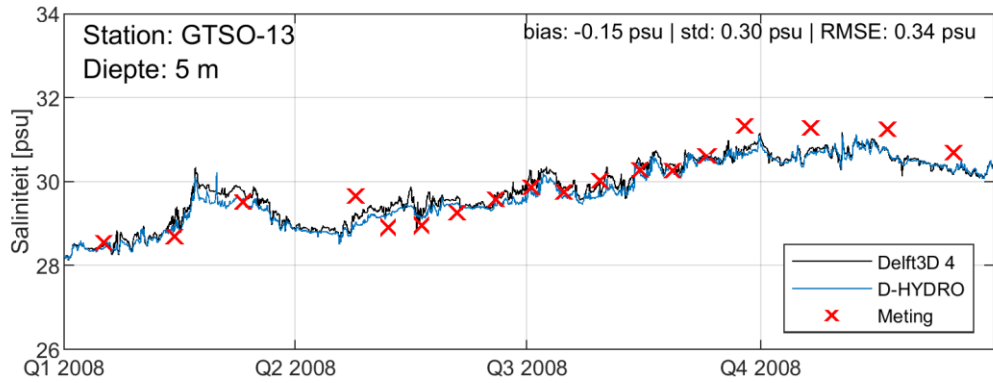
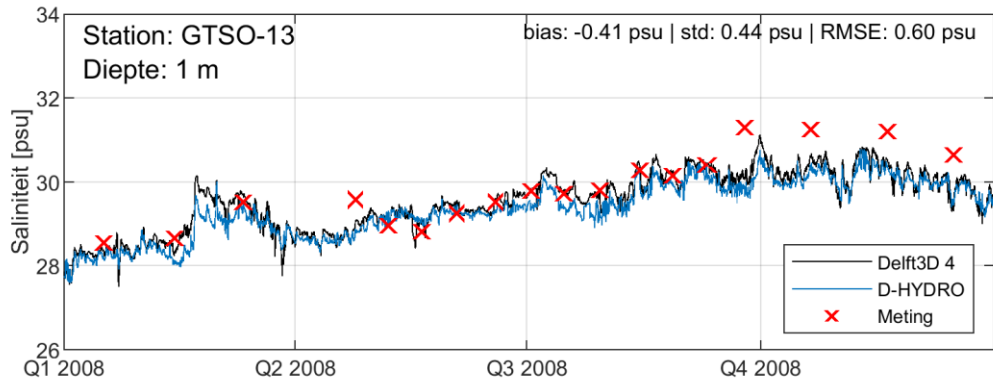
C.2.2 **Temperatuur**

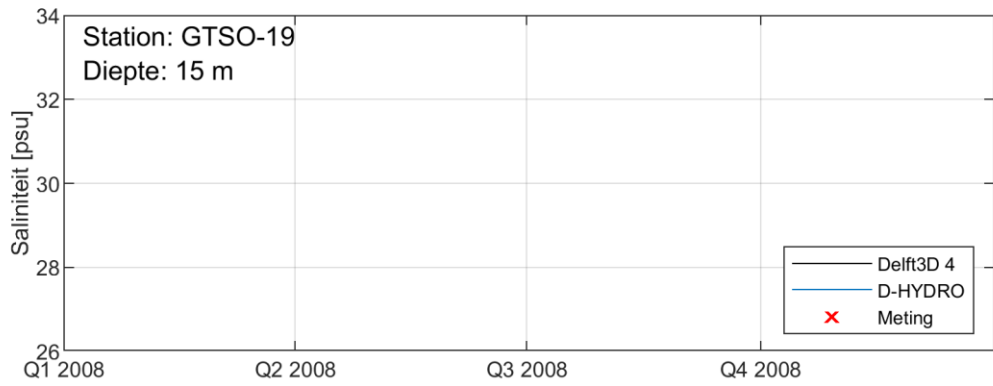
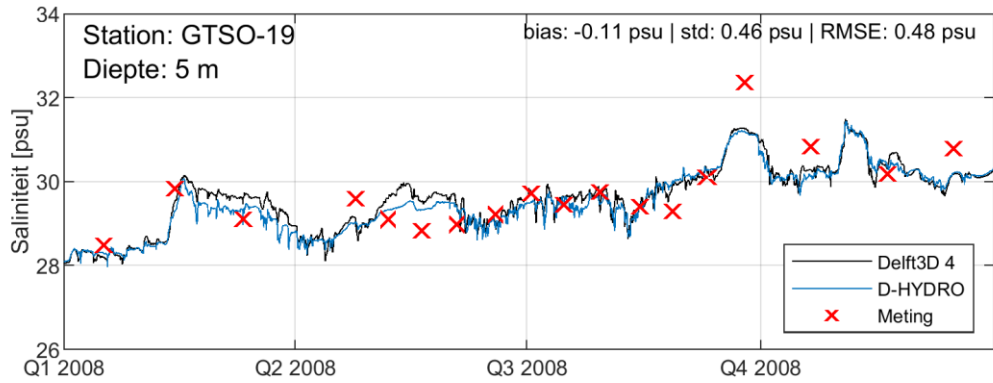
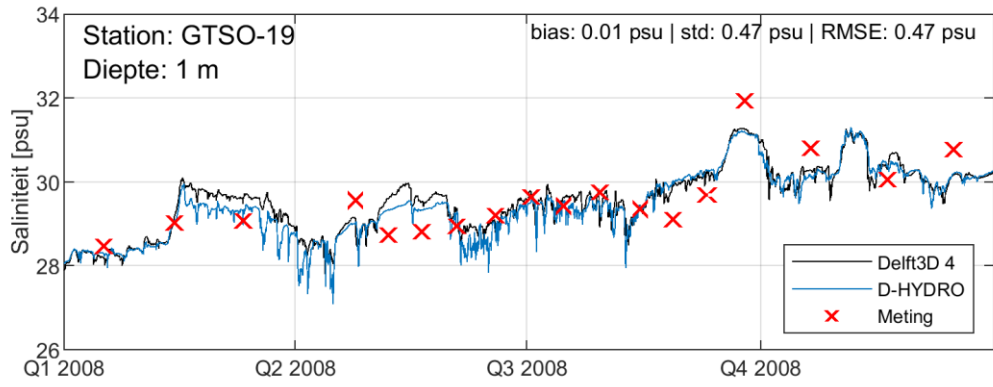


C.3 Modelresultaten – tijdseries – 2008

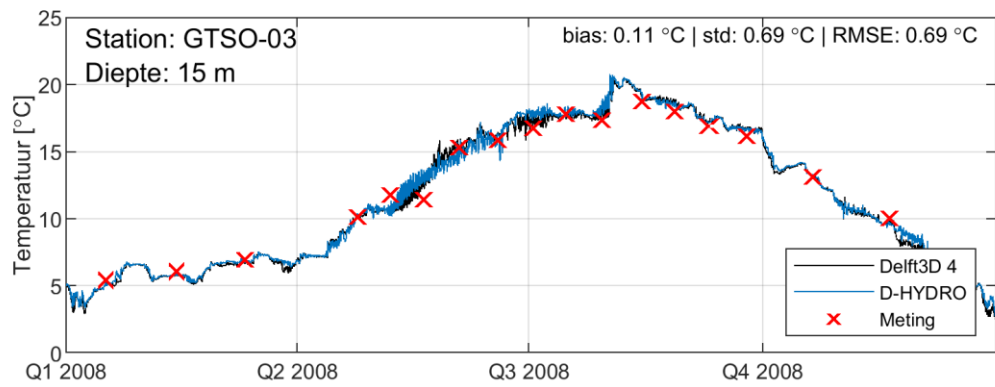
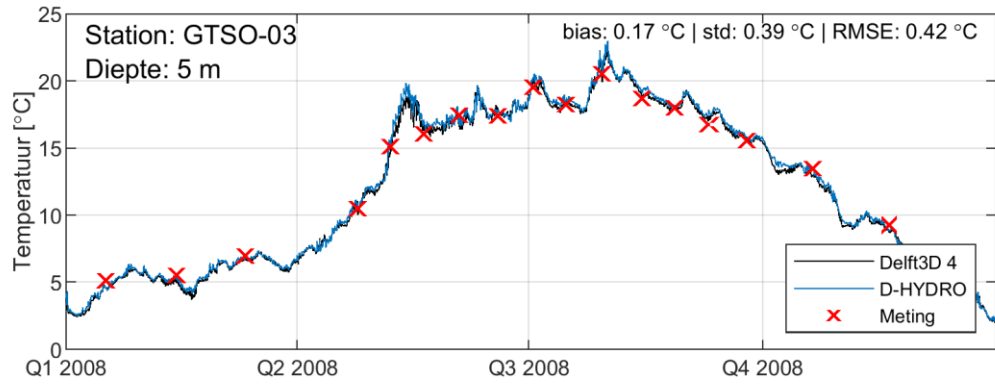
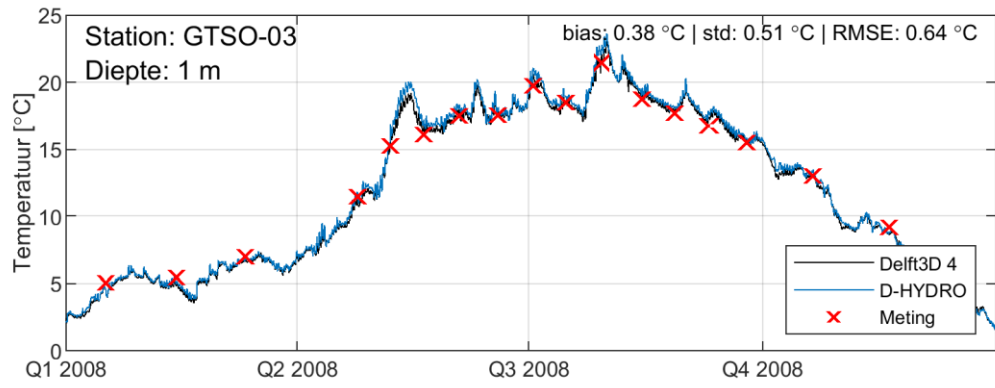
C.3.1 Saliniteit

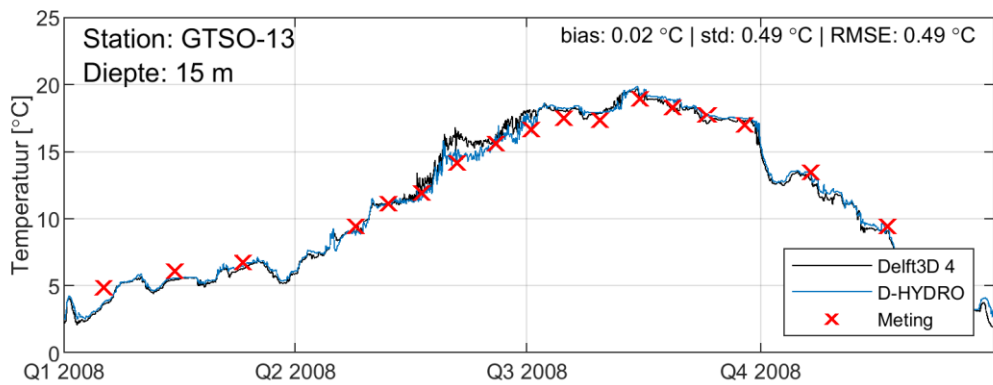
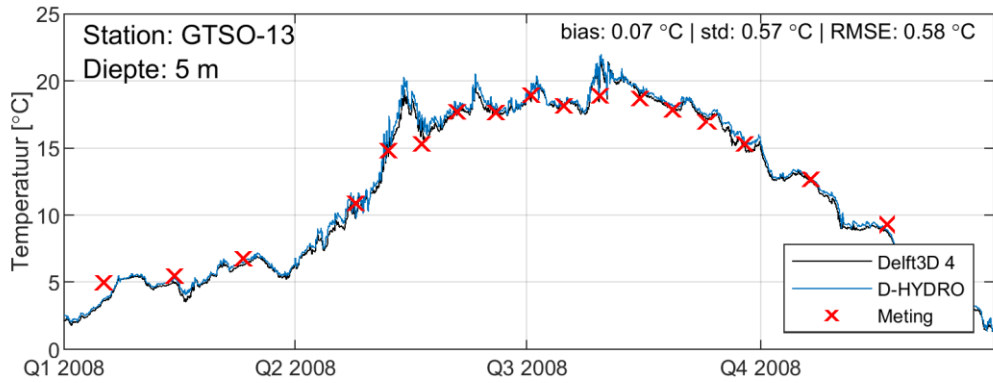
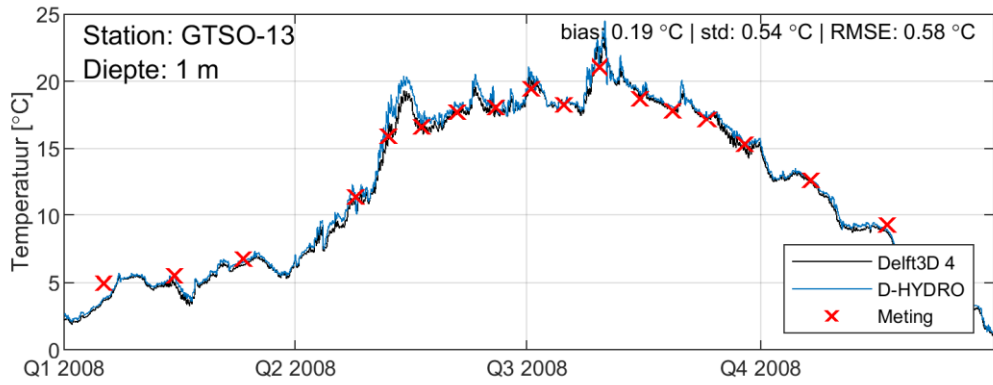


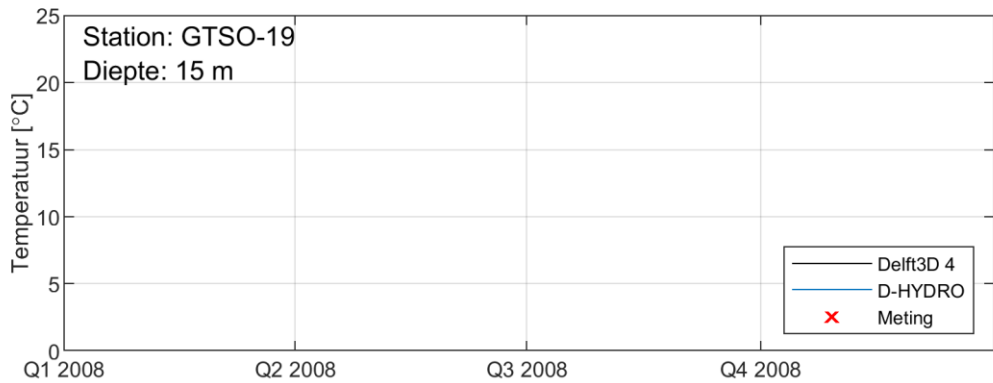
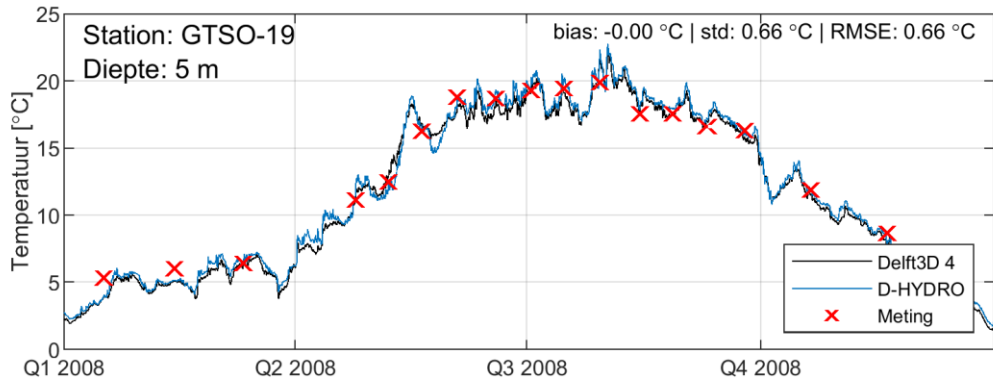
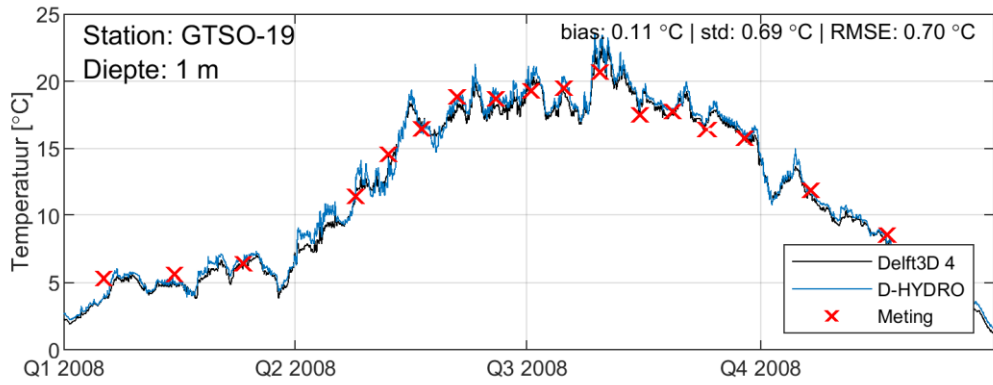




C.3.2 Temperatuur

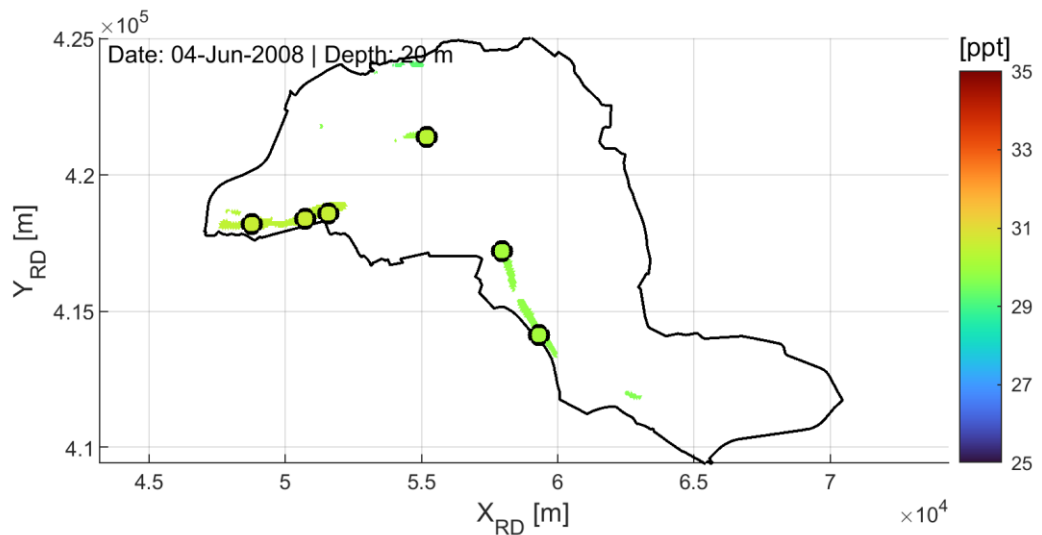
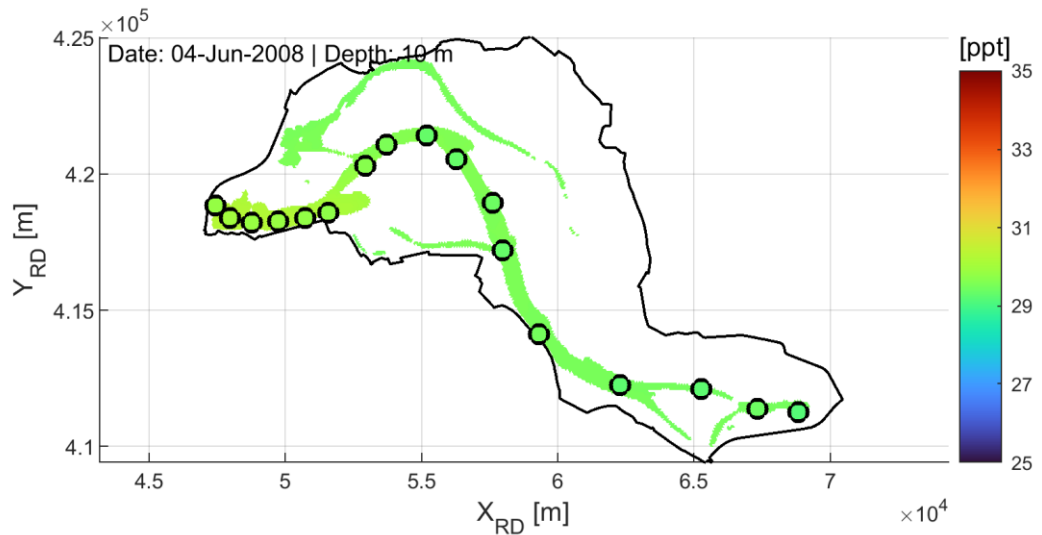
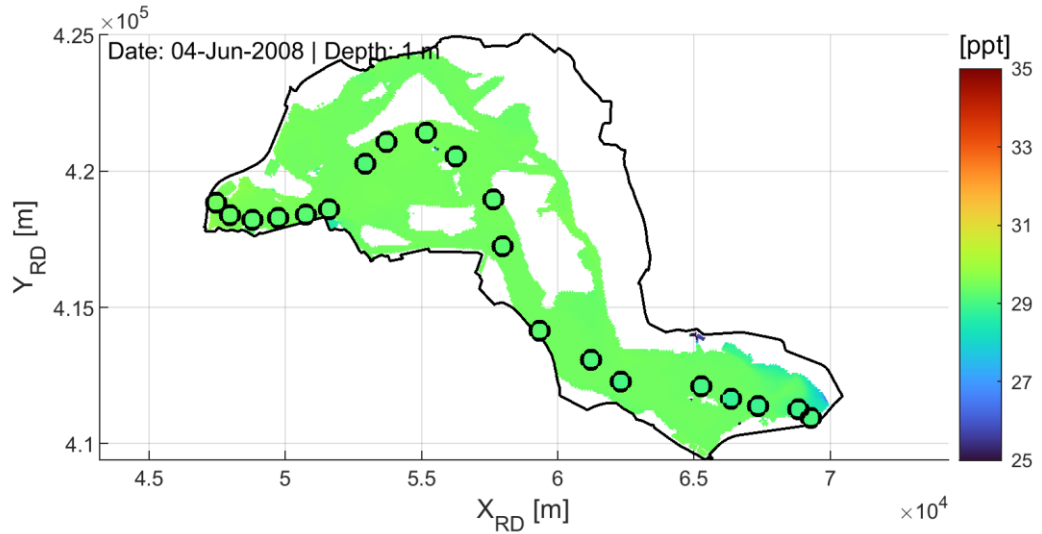


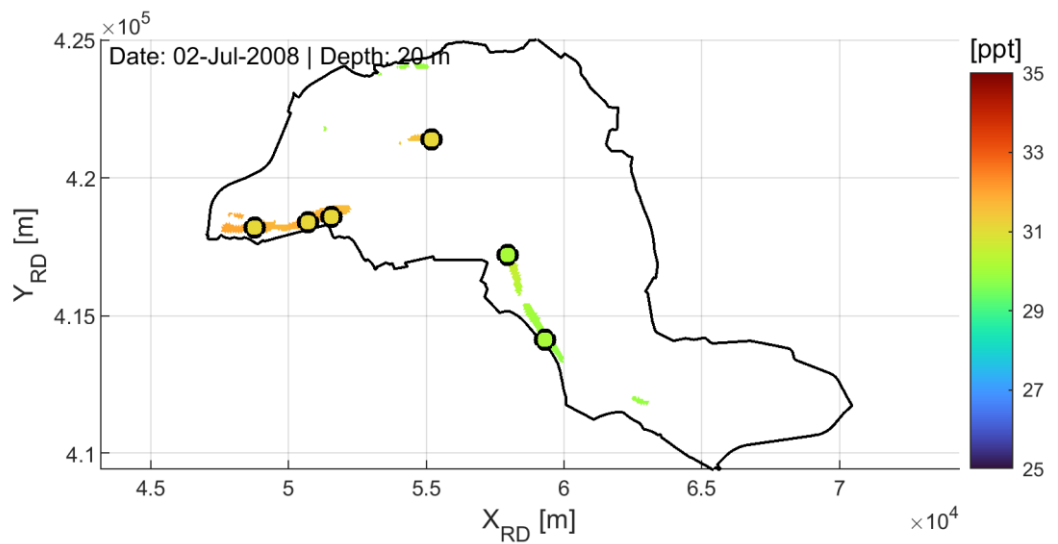
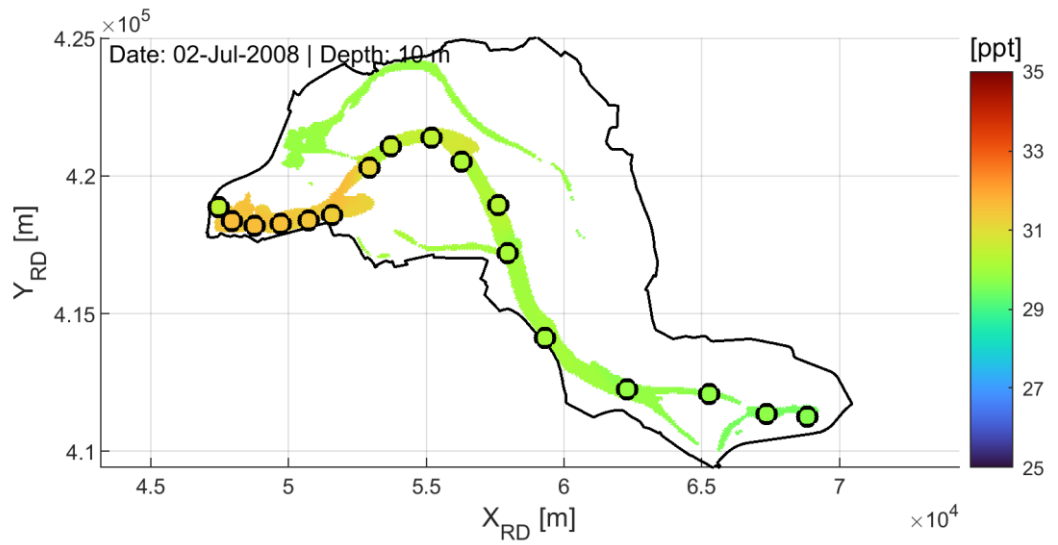
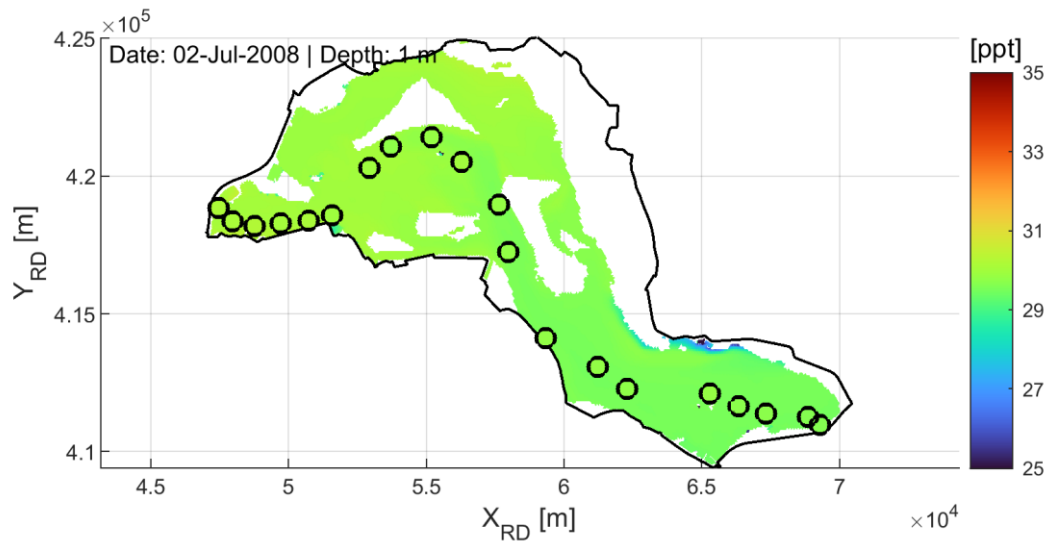




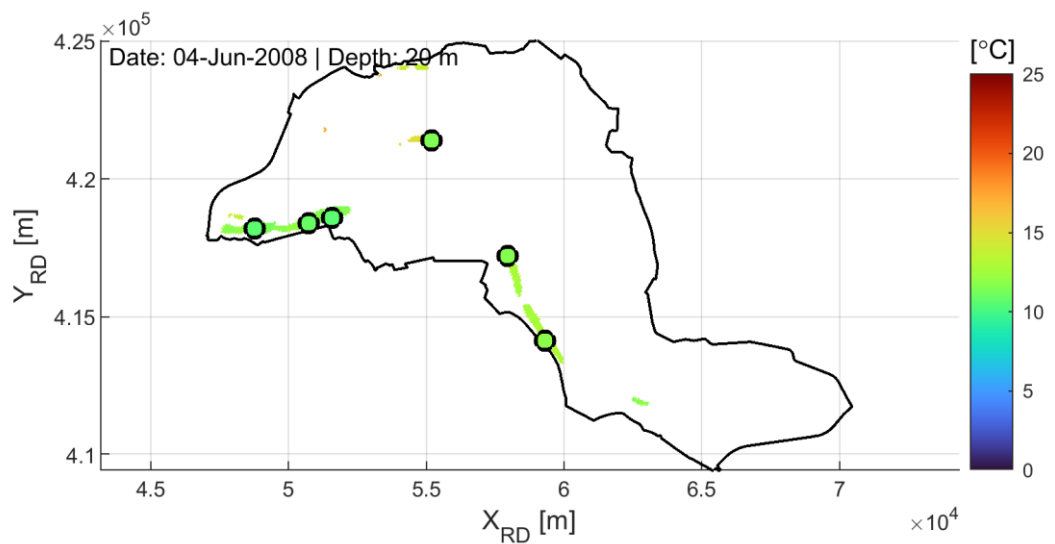
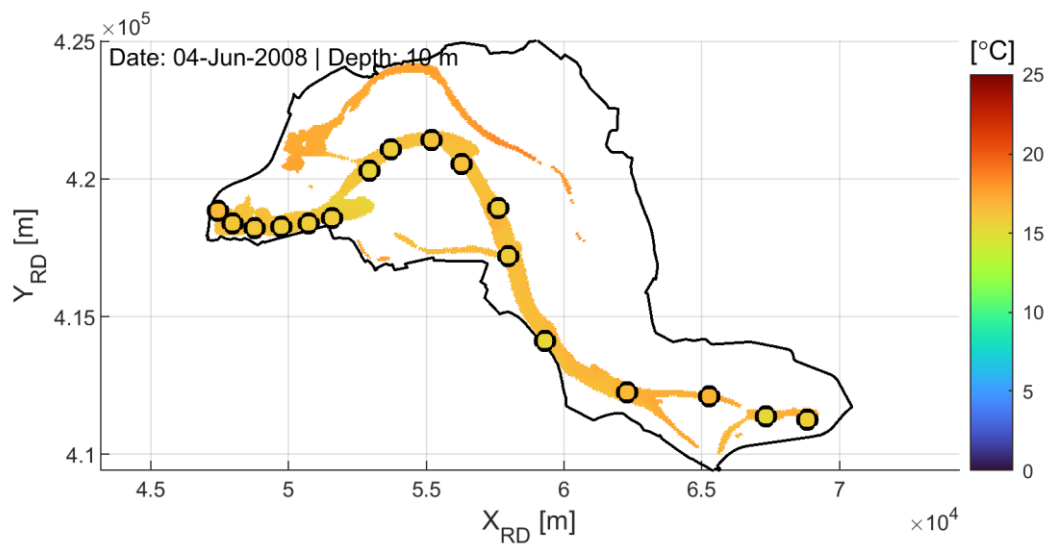
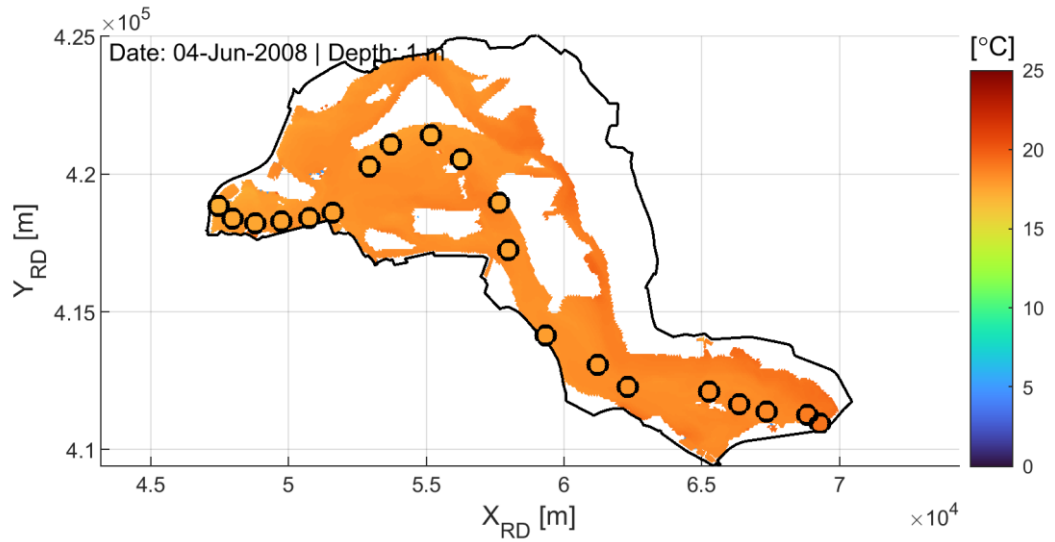
C.4 Modelresultaten – horizontale dwarsdoorsneden – 2008

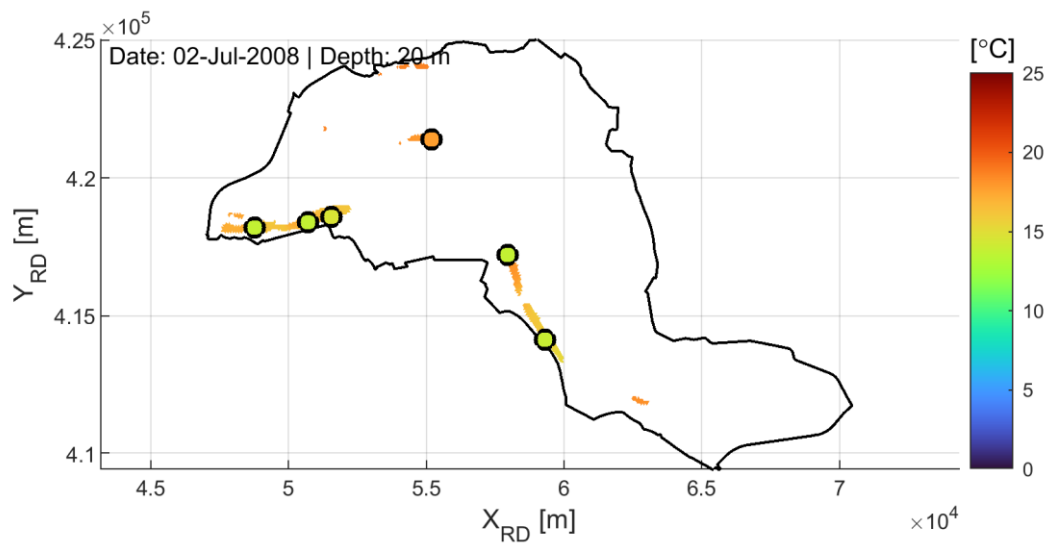
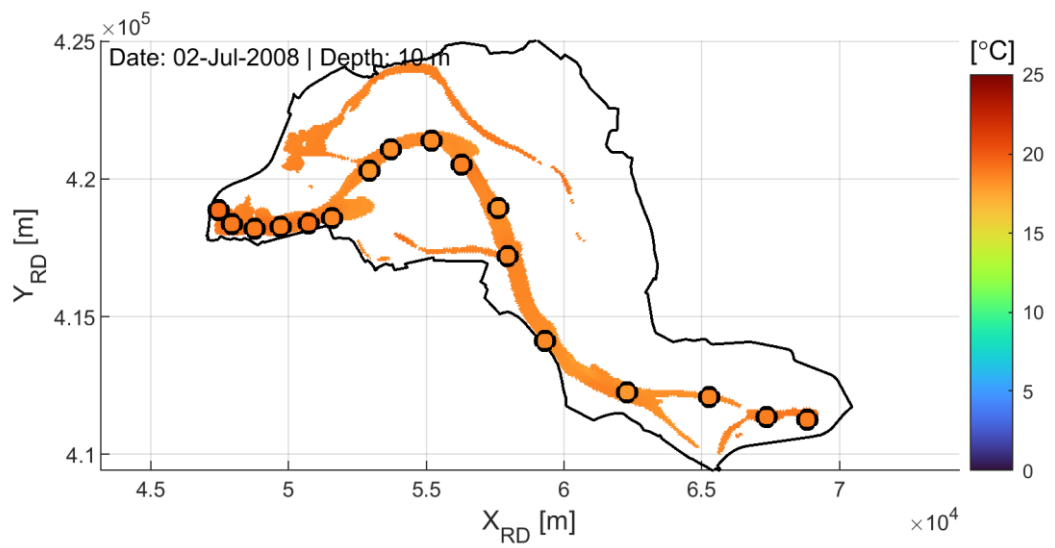
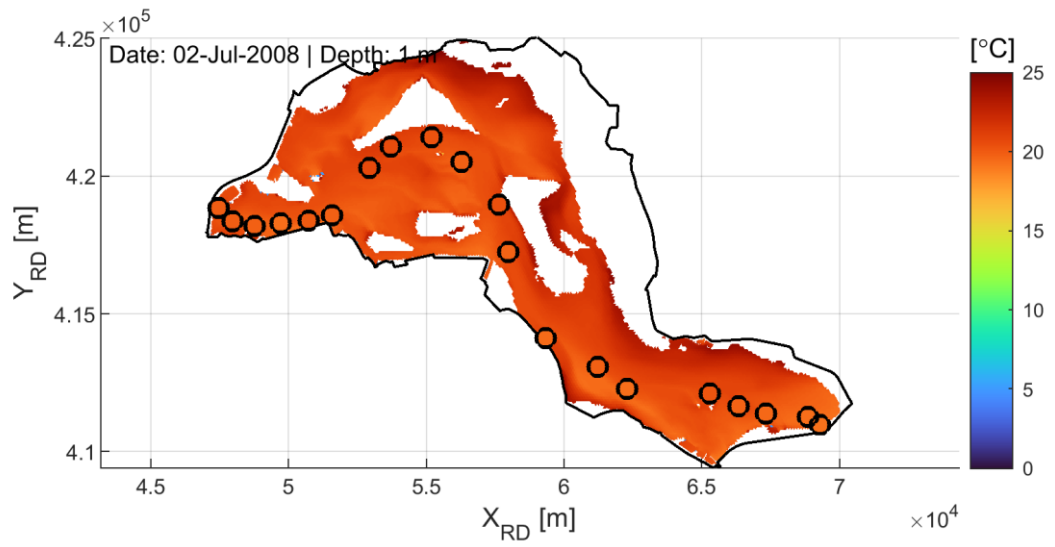
C.4.1 Saliniteit



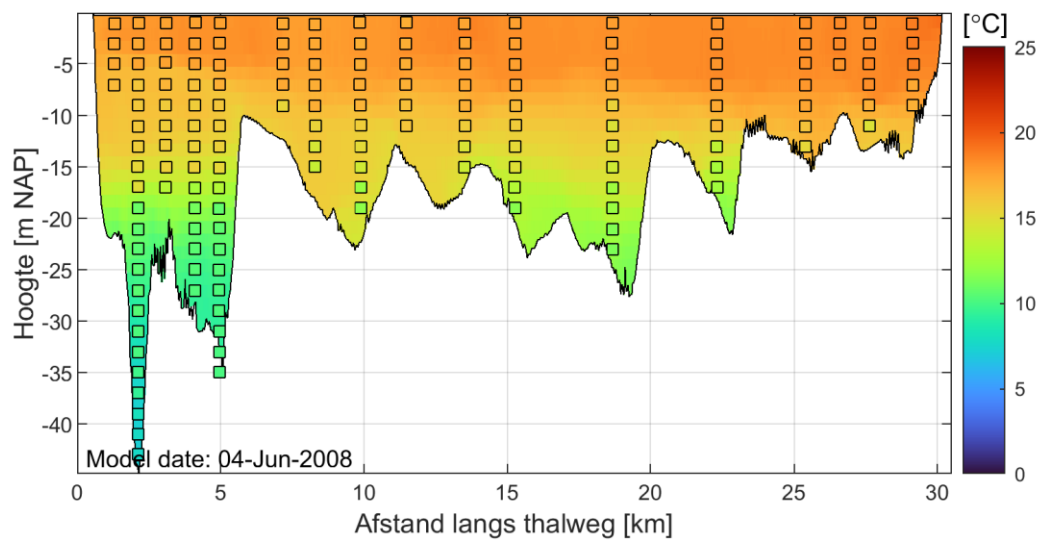
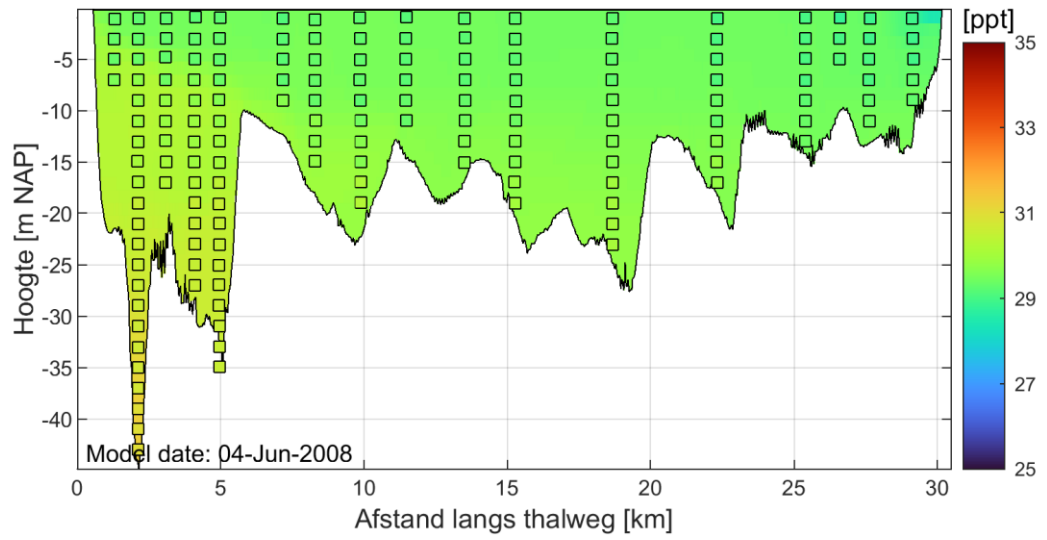


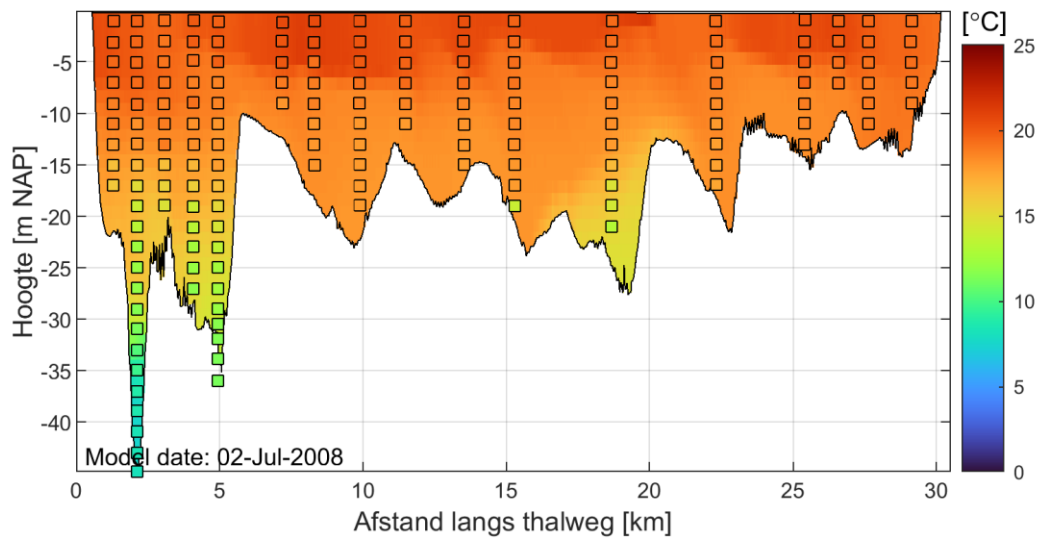
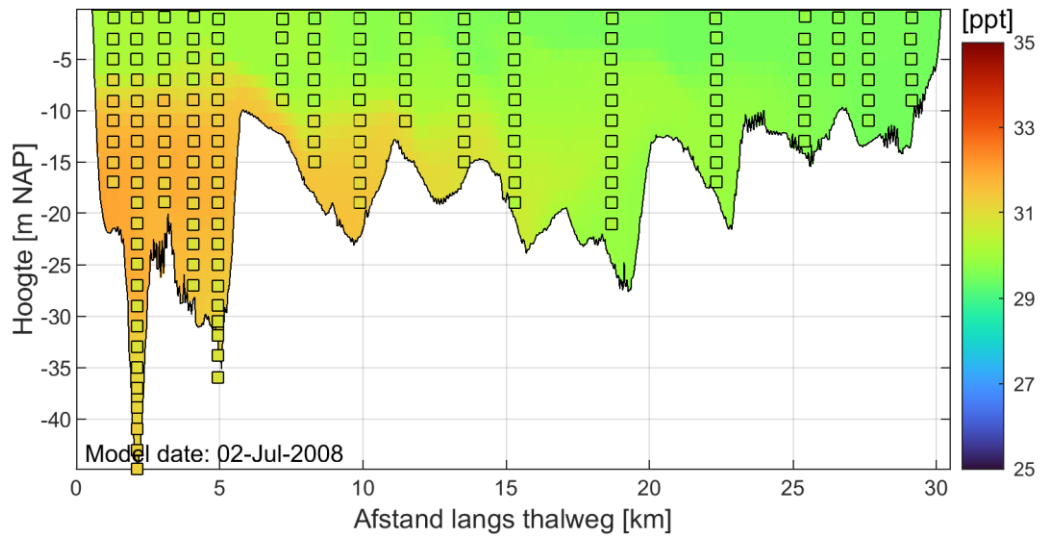
C.4.2 Temperatuur





C.5 Modelresultaten – verticale dwarsdoorsneden – 2008

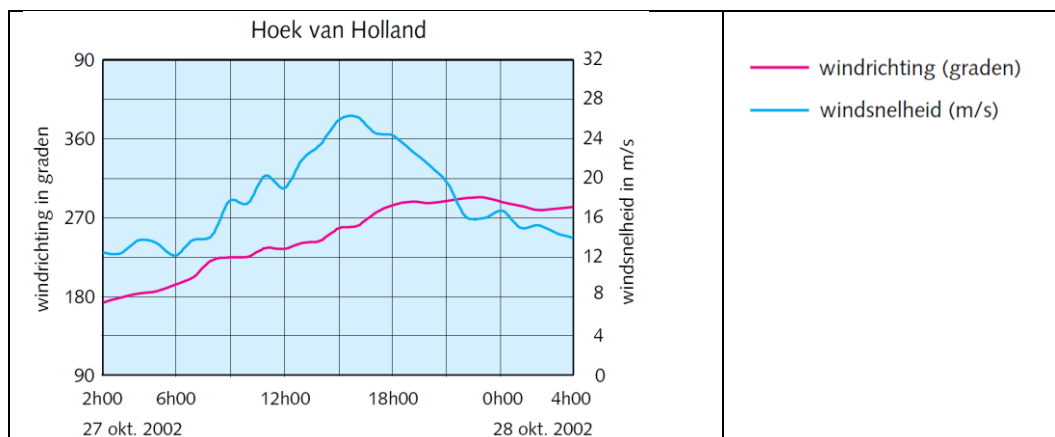




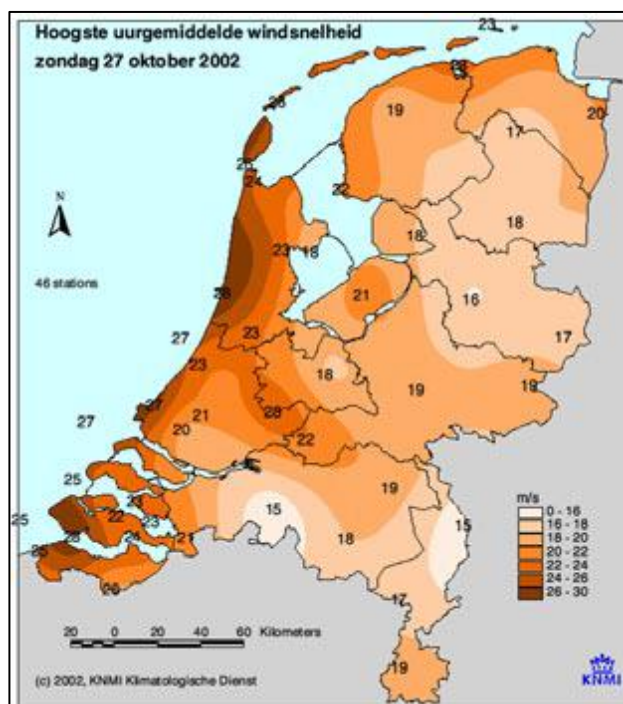
C.6 Beschrijving van gebruikte stormperiodes

C.6.1 Stormachtige periode – oktober 2002

Op 27 oktober 2002 wordt tussen 10 uur 's morgens en 21 uur 's avonds in de westelijke provincies een windkracht van 10-11 Bft. (zeer zware storm) waargenomen. In Zeeland worden zelfs windstoten tot maximaal 41 m/s (148 km/u) waargenomen. De wind ruikt hierbij van Zuidwest naar Westnoordwest, zie Figuur C.1 voor de windsnelheid en –richting te Hoek van Holland. In de loop van de avond neemt de wind af tot 7 Bft. aan de westkust. De hoogste uurgemiddelde windsnelheid op 27 oktober 2002 ruimtelijk verdeeld over Nederland is weergegeven in Figuur C.2. De getijfase tijdens deze storm was die van een gemiddeld tij, waardoor de opgetreden waterstanden niet uitzonderlijk hoog waren.



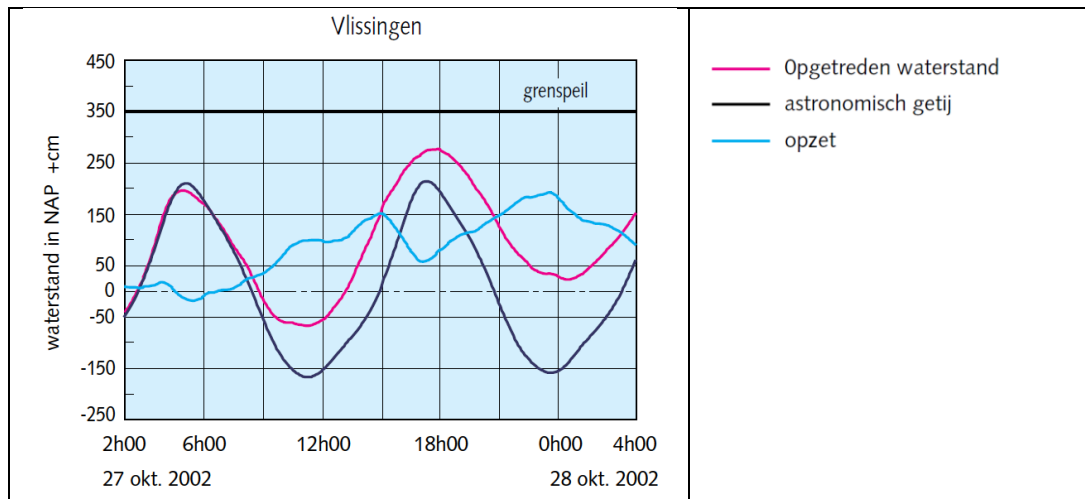
Figuur C.1 Windverloop bij Hoek van Holland op 27 oktober 2002 (SVSD, 2003).



Figuur C.2 Hoogste uurgemiddelde windsnelheid op 27 oktober 2002 (SVSD, 2003).

Tijdens de storm is de scheepvaart door de Maeslantkering en de Hartelkering tijdelijk gestremd geweest en zijn de Oosterscheldekering en de Stormvloedkering in de Hollandsche IJssel gesloten. De waterstand bij Vlissingen bereikte om circa 18:00 uur haar hoogste stand met een waarde van

NAP+278 cm (SVSD, 2003). De maximale rechte opzet (d.i. het grootste verschil tussen de opgetreden en astronomische waterstand op hetzelfde tijdstip) bedroeg 193 cm, zie Figuur C.3. Deze viel praktisch gelijk met laagwater.



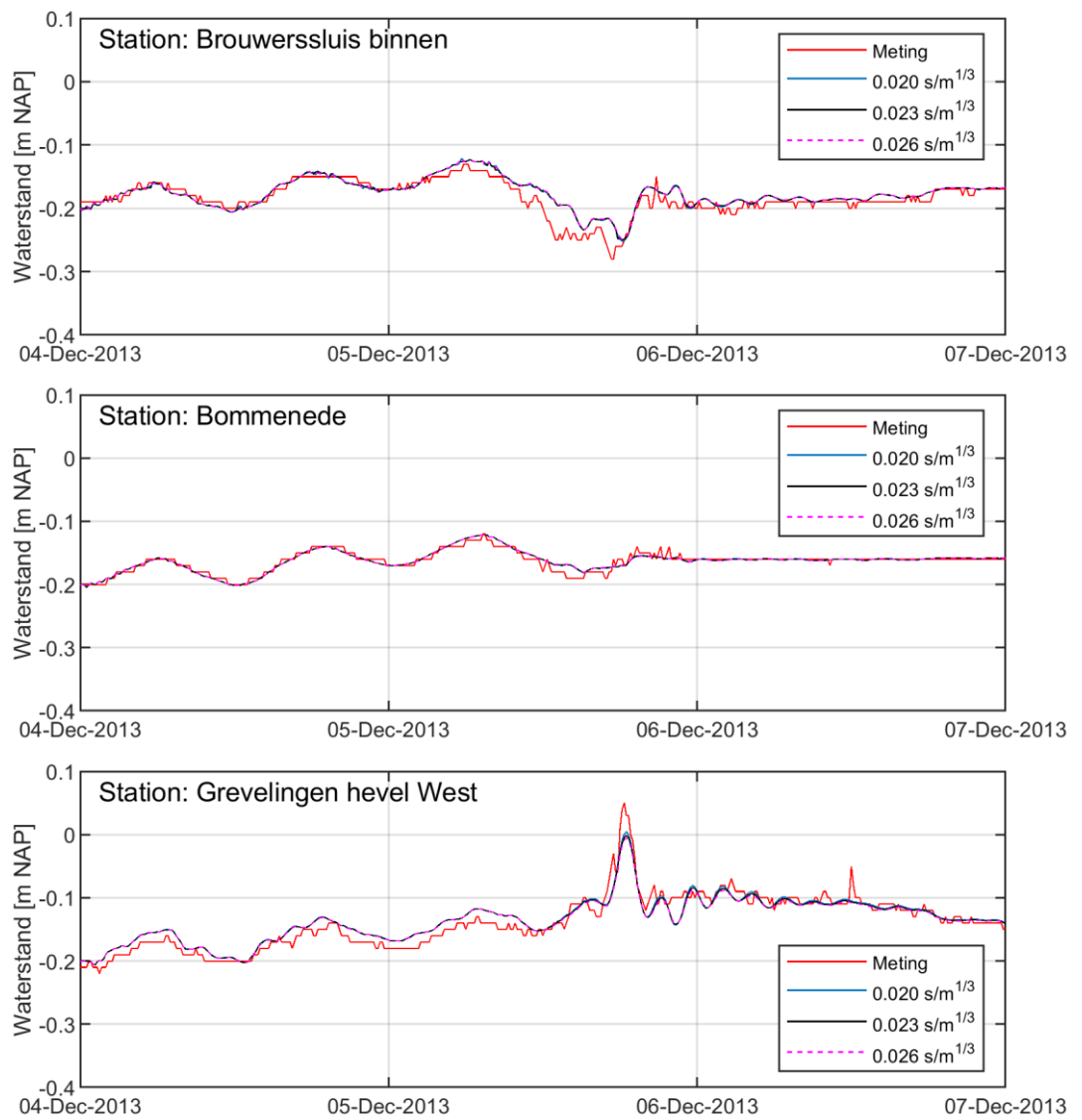
Figuur C.3 Waterstandsverloop bij Vlissingen op 27 oktober 2002 (SVSD, 2003).

C.6.2 Stormachtige periode – december 2013

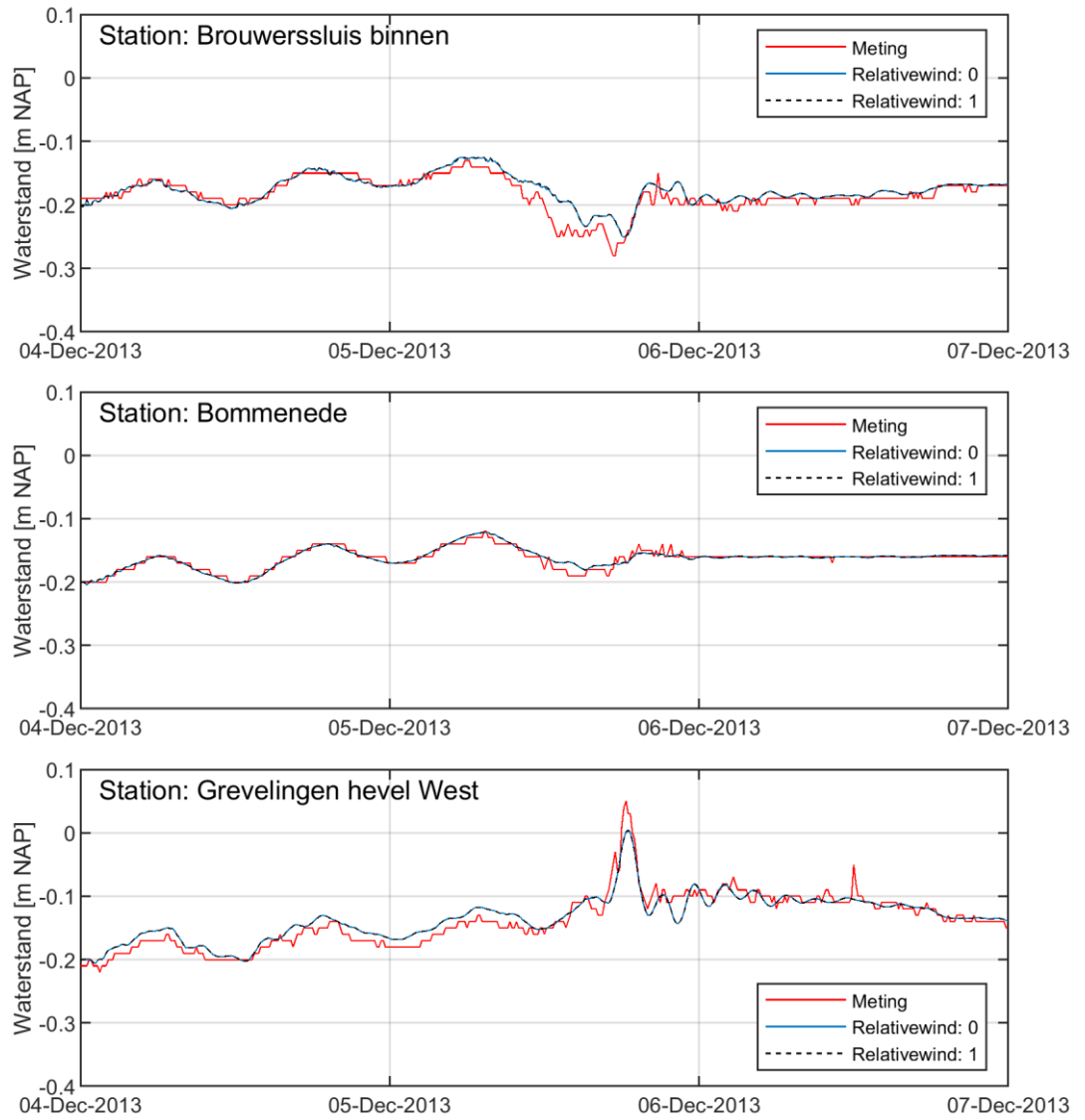
Tijdens de 'Sinterklaasstorm' van 5 december 2013 bereikt de wind een kracht van 10 Bft. (zware storm) afnemend tot Bft. 7 aan de westkust tijdens de daaropvolgende middag. Tijdens de storm werden de Oosterscheldekering en de Stormvloedkering in de Hollandsche IJssel gesloten. De grootste scheve waterstandsopzet (het verschil tussen de opgetreden hoogwaterstand en het astronomische hoogwater) te Vlissingen bedroeg 152 cm. Deze opzet komt gemiddeld één keer per 7 jaar voor (Watermanagementcentrum Nederland). Door de combinatie van hoog springtij en stormopzet werden waterstanden met recordhoogten bereikt. De hoogwaterstand die bij Vlissingen optrad was de hoogste sinds 1 februari 1953; deze waterstand komt gemiddeld eens in de 20 jaar voor. Bij Hoek van Holland trad sinds 1 februari 1953 alleen op 9 november 2007 een hogere waterstand op. Volgens de classificatie van stormvloeden valt deze stormvloed in de categorie 'middelbare stormvloeden'.

C.7 Overige modelresultaten gevoeligheidsonderzoek windforcering

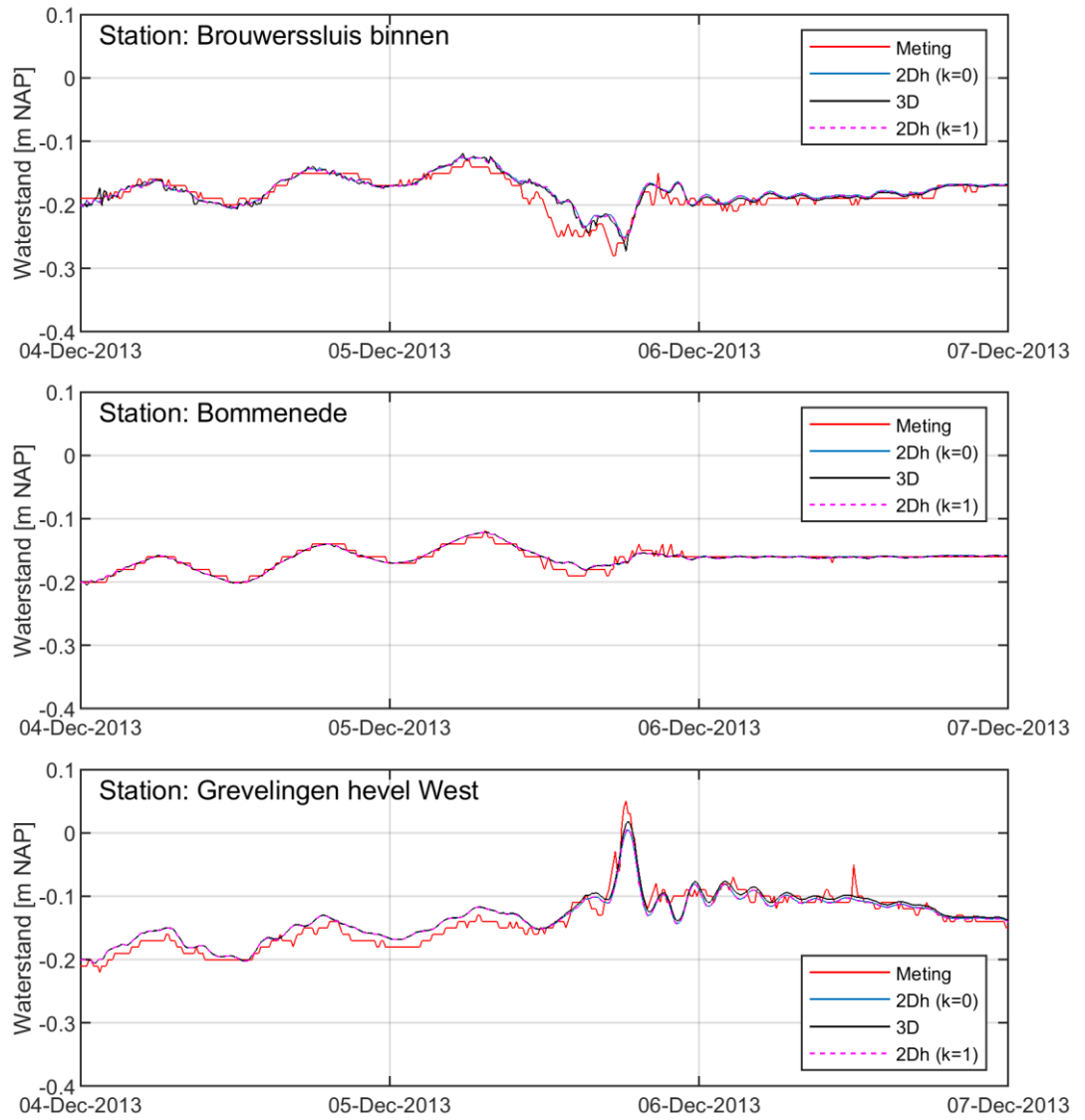
C.7.1 Bodemruwheid (Manning)



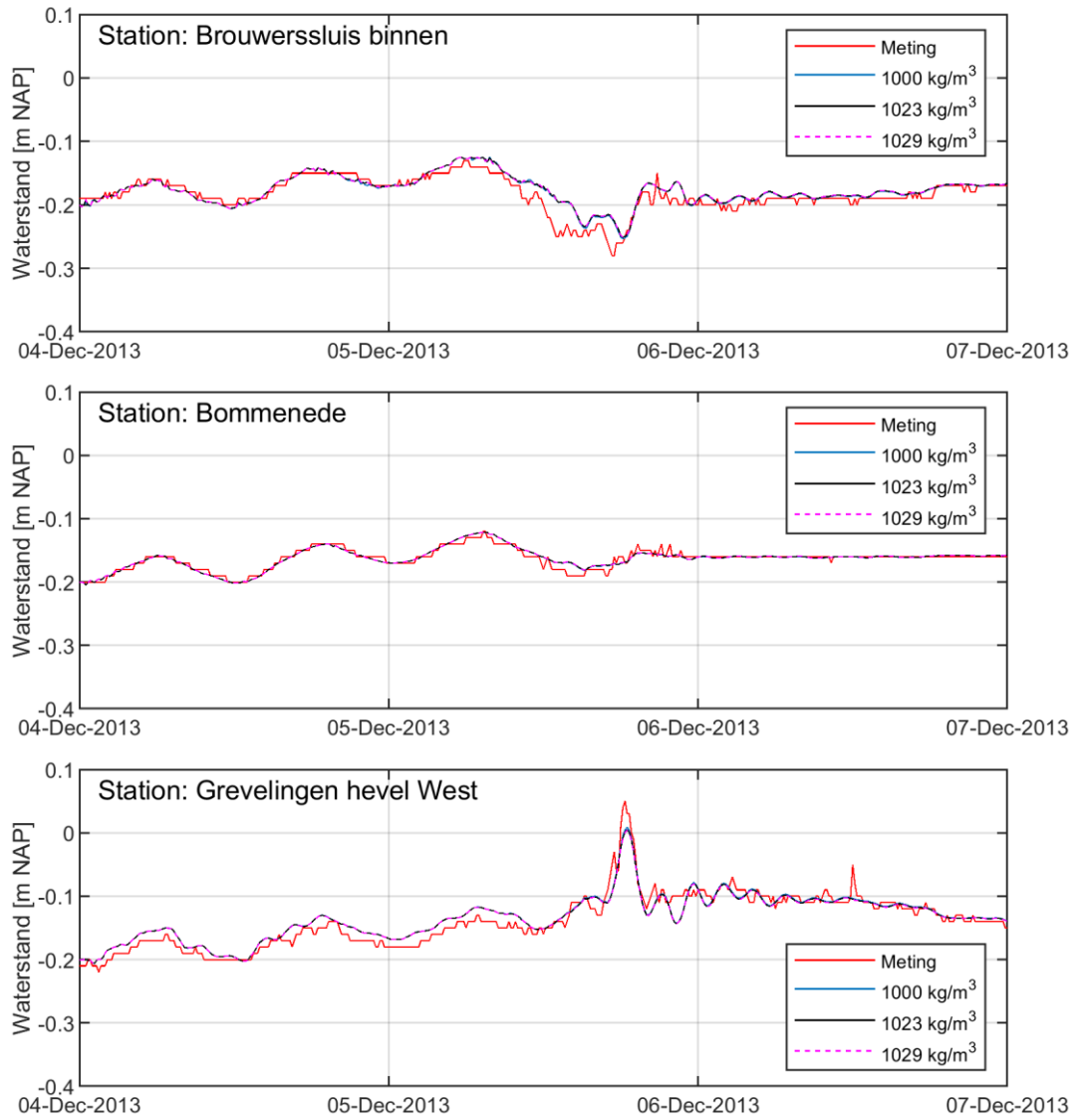
C.7.2 Relativewind



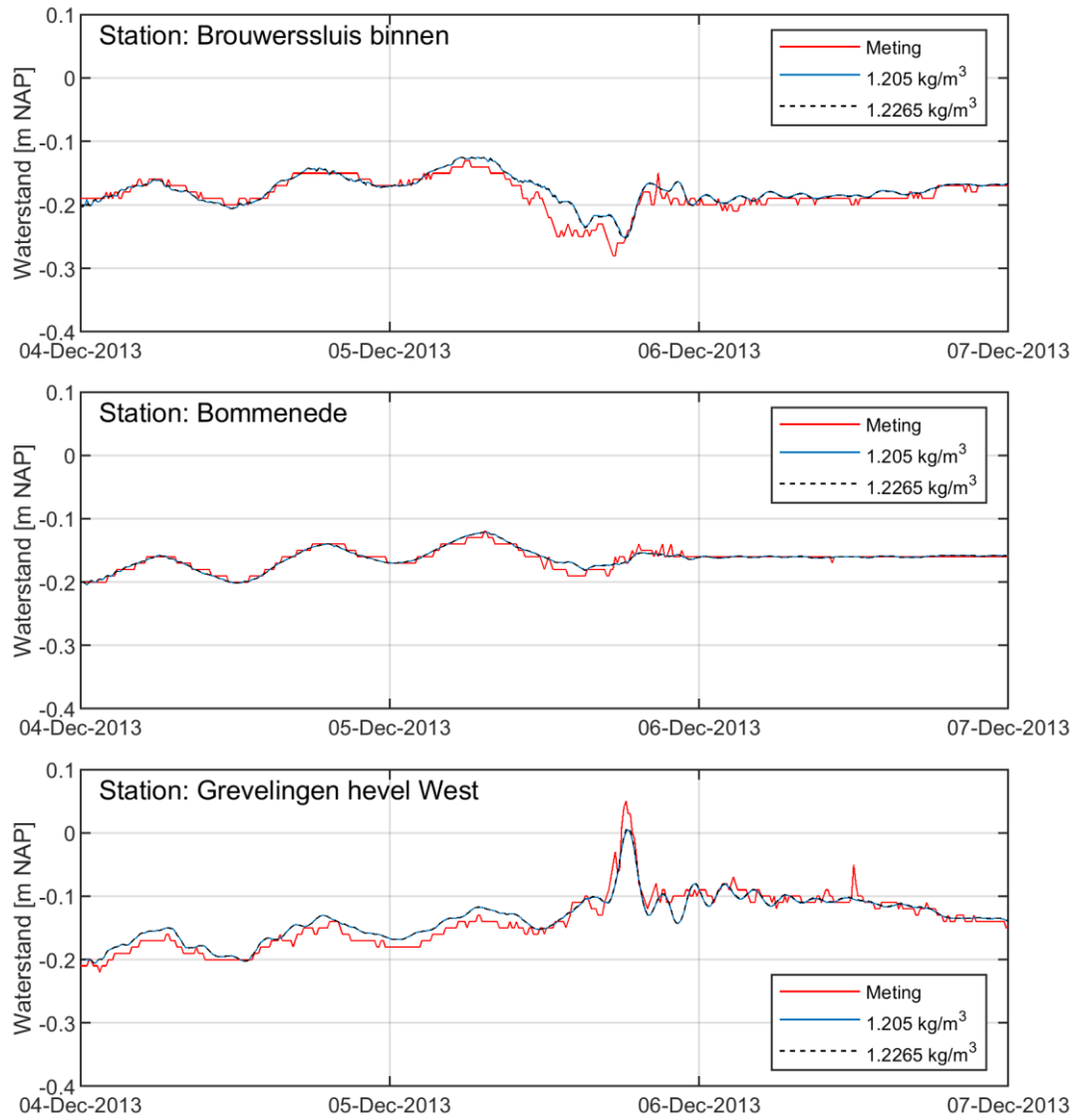
C.7.3 Kmx



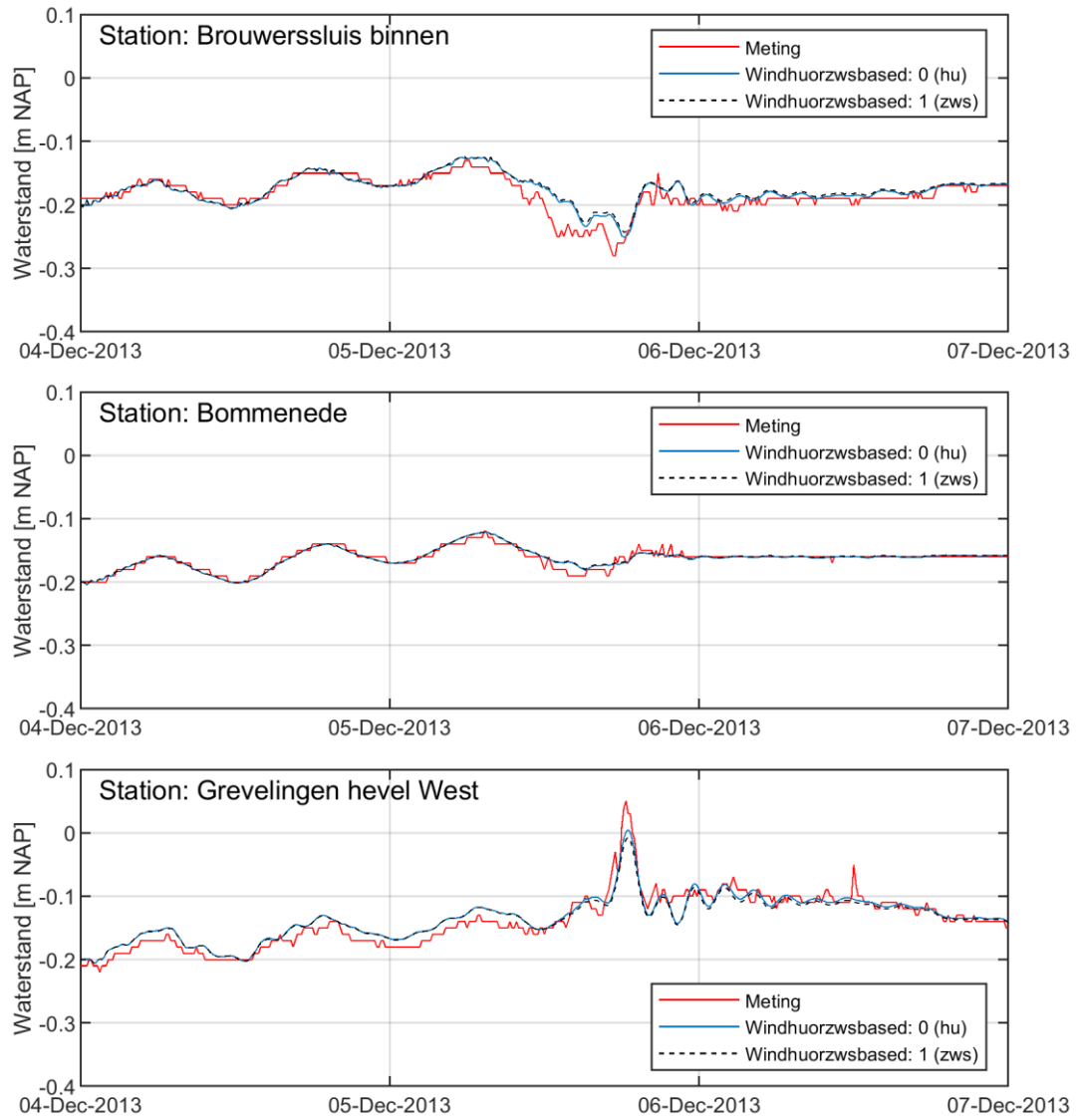
C.7.4 Rhomean



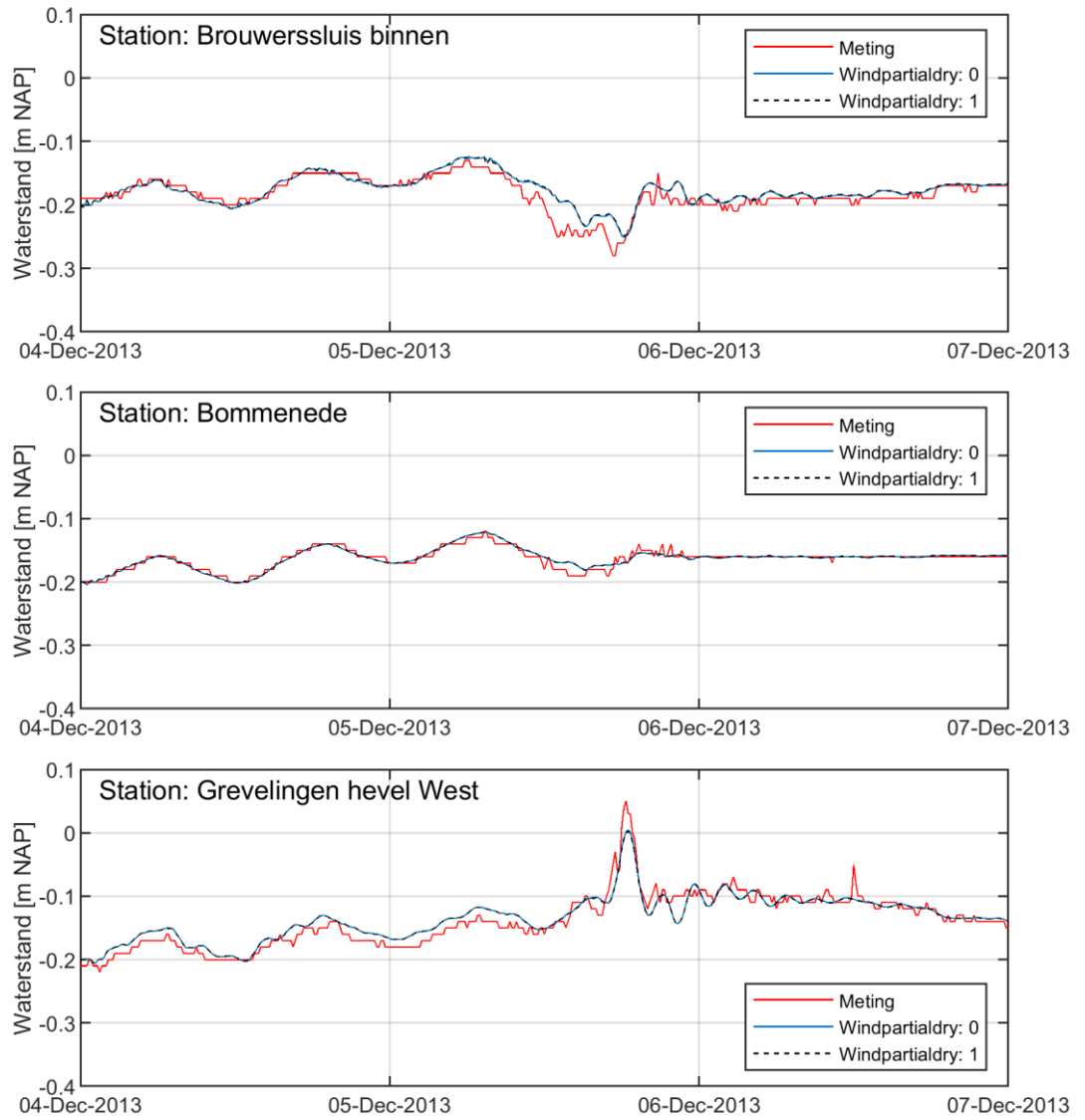
C.7.5 Rhoair



C.7.6 Windhuorzwsbased



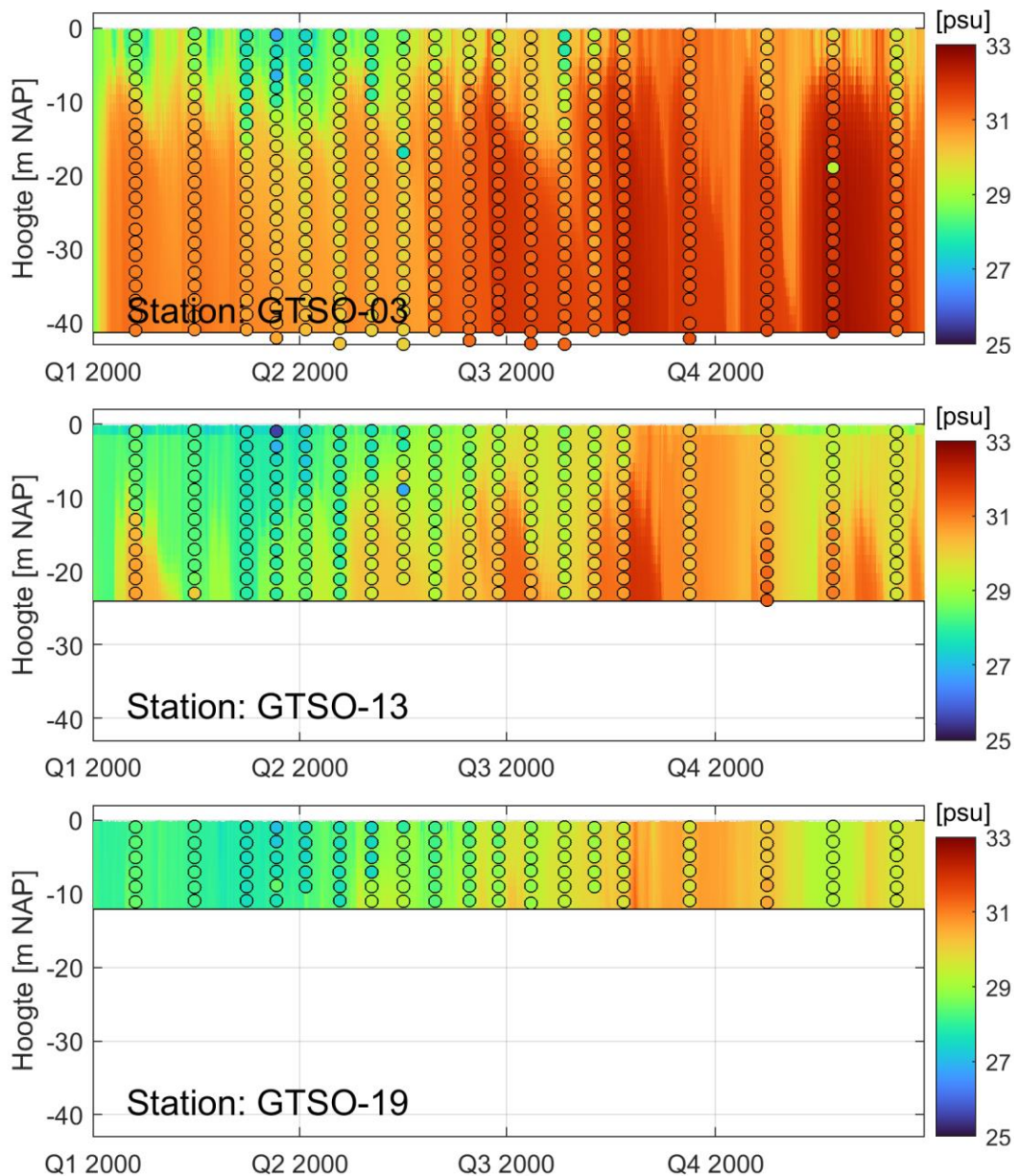
C.7.7 Windpartialdry



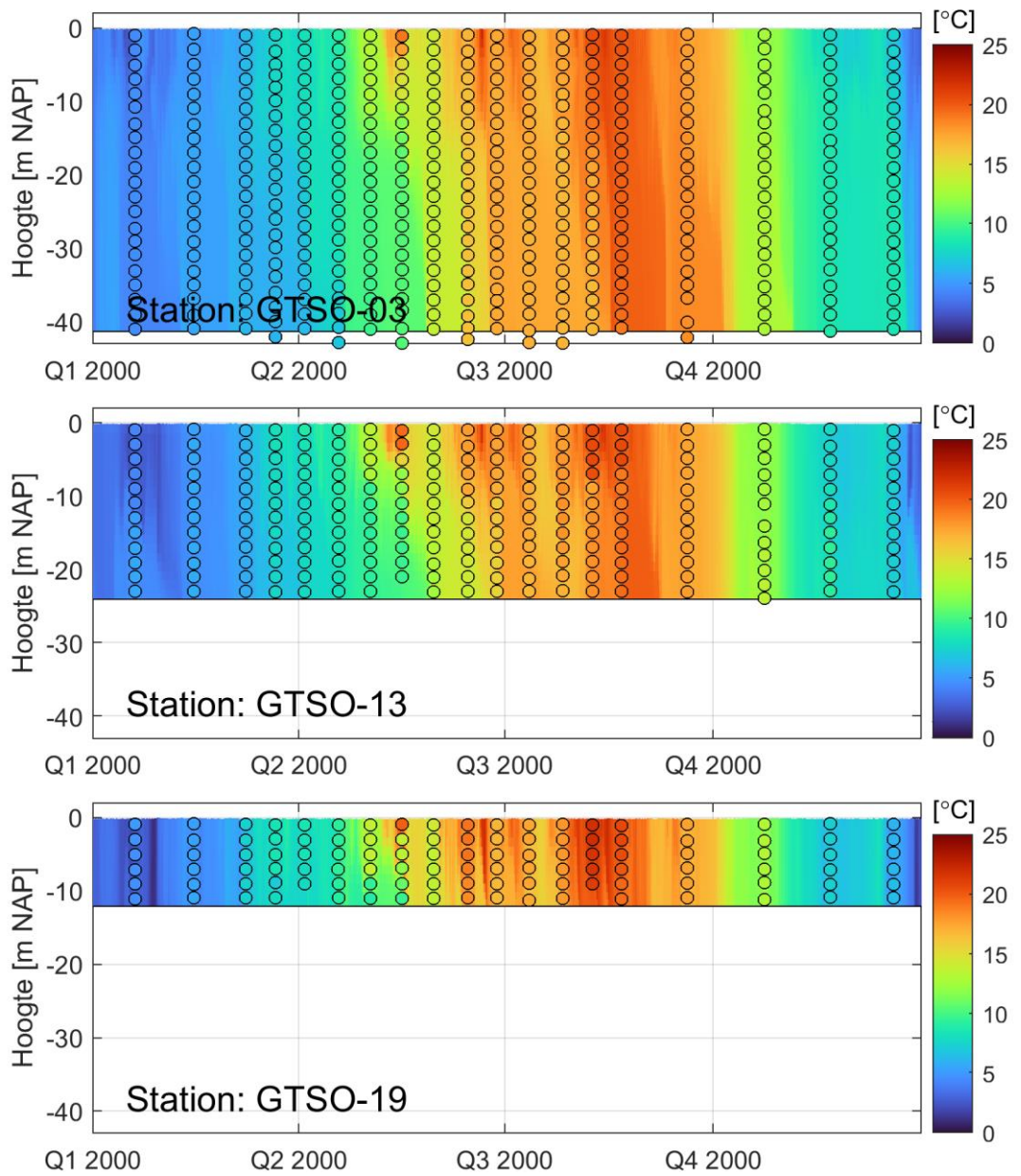
D Bijlage bij hoofdstuk 6 'Validatie'

D.1 Modelresultaten – z,t-diagram – 2000

D.1.1 Saliniteit

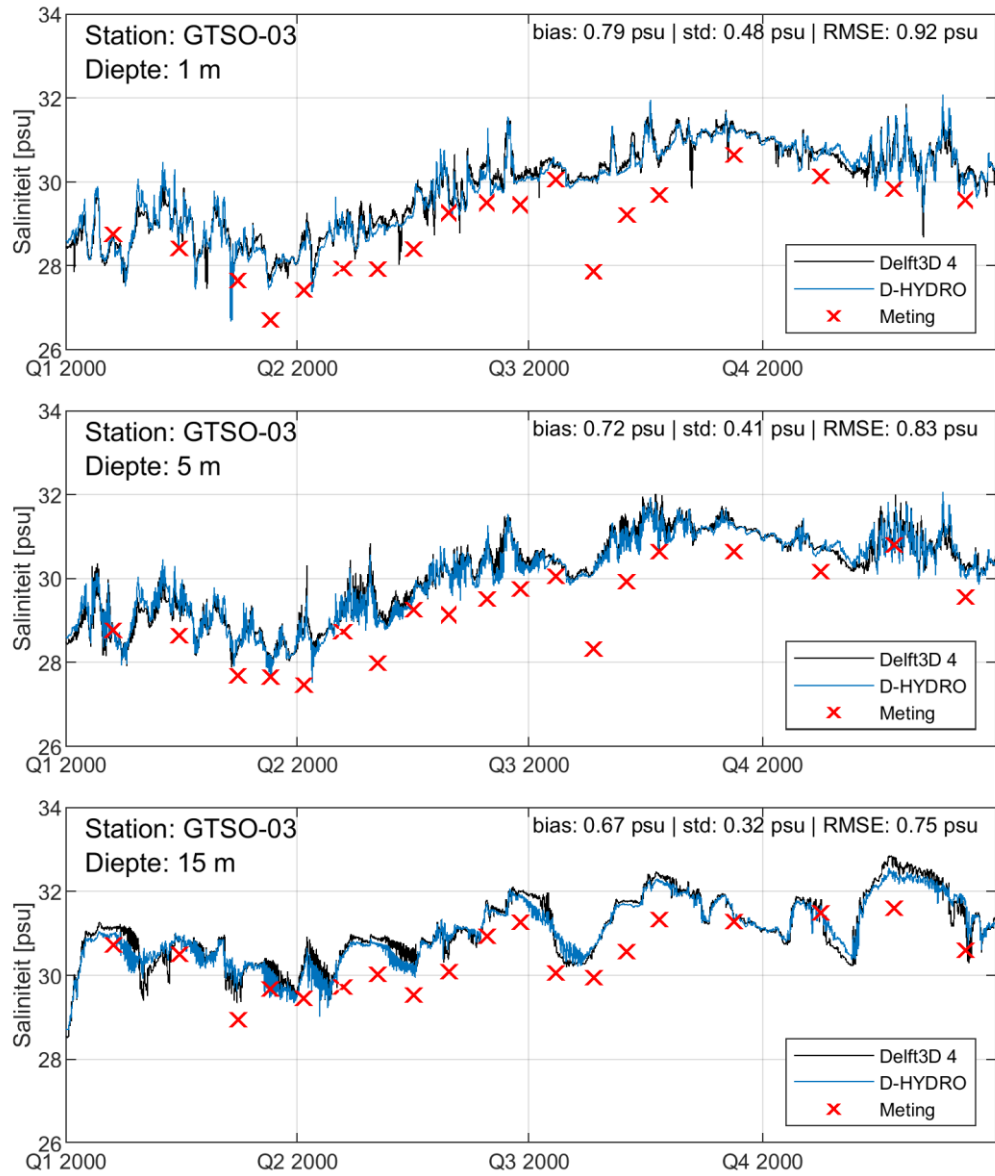


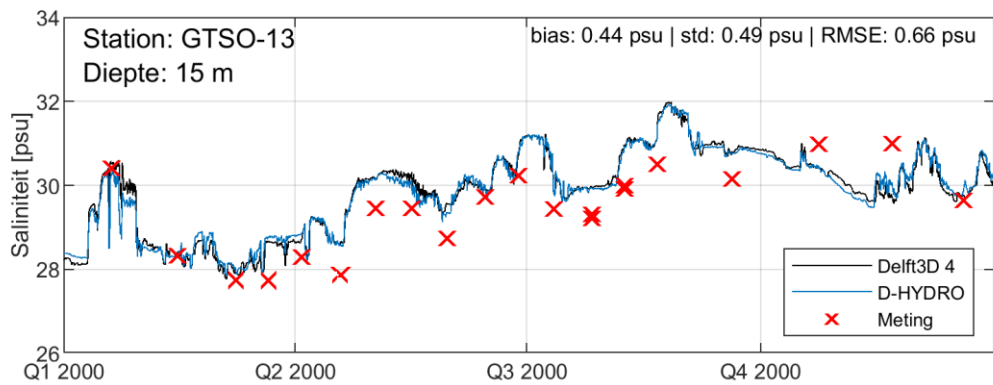
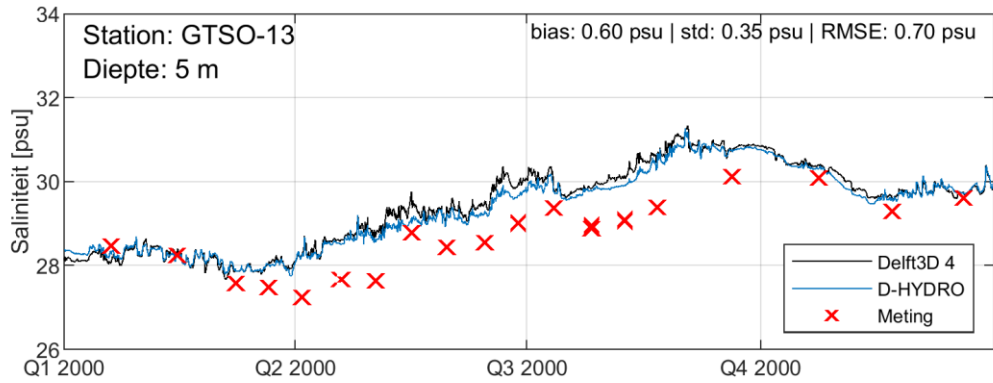
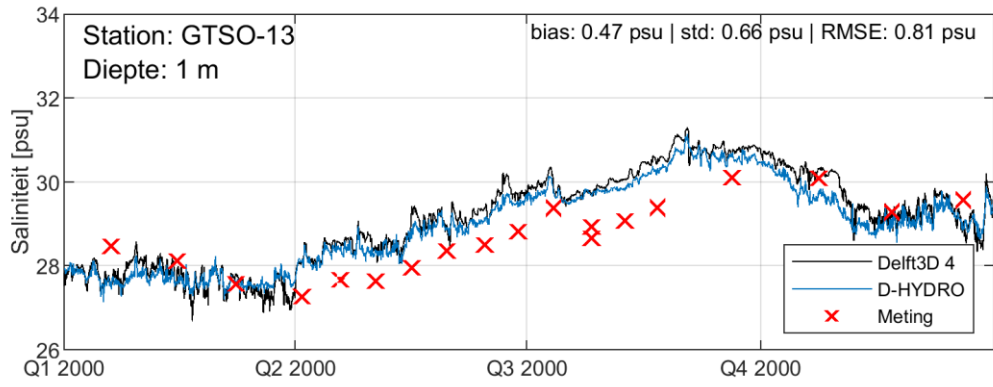
D.1.2 **Temperatuur**

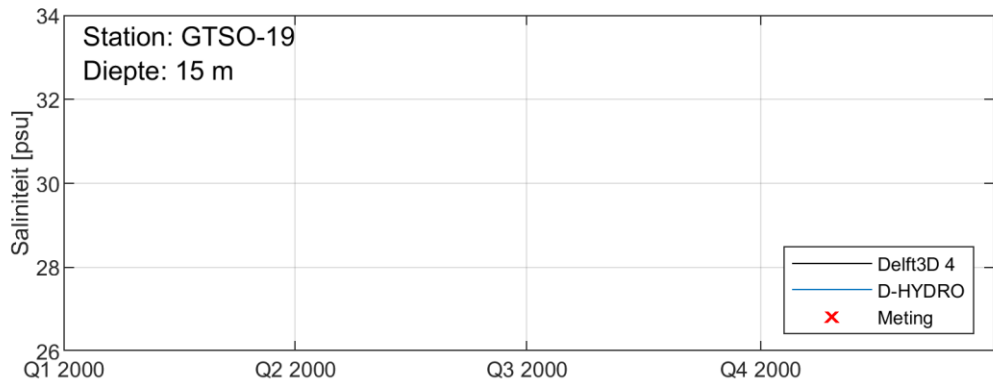
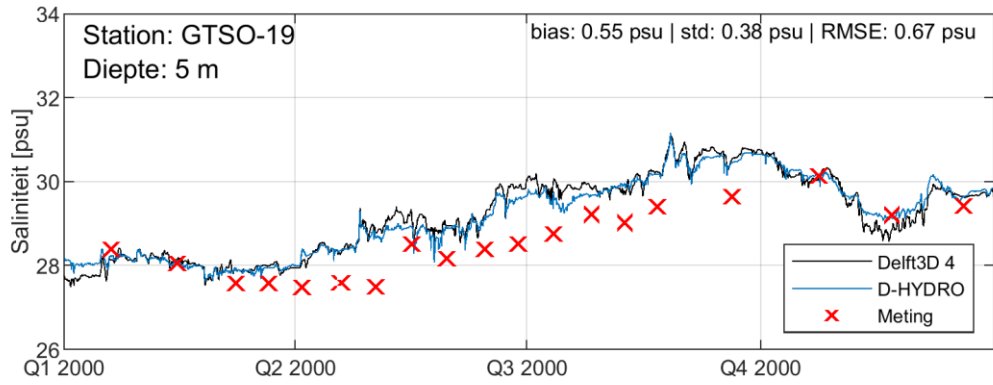
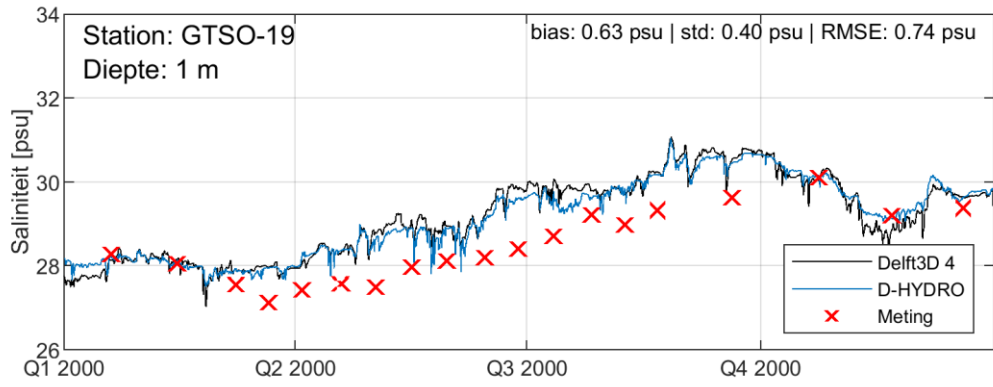


D.2 Modelresultaten – tijdseries – 2000

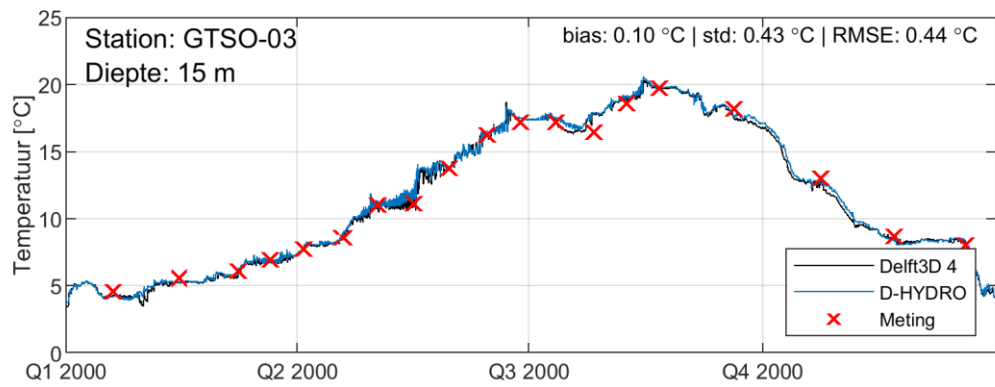
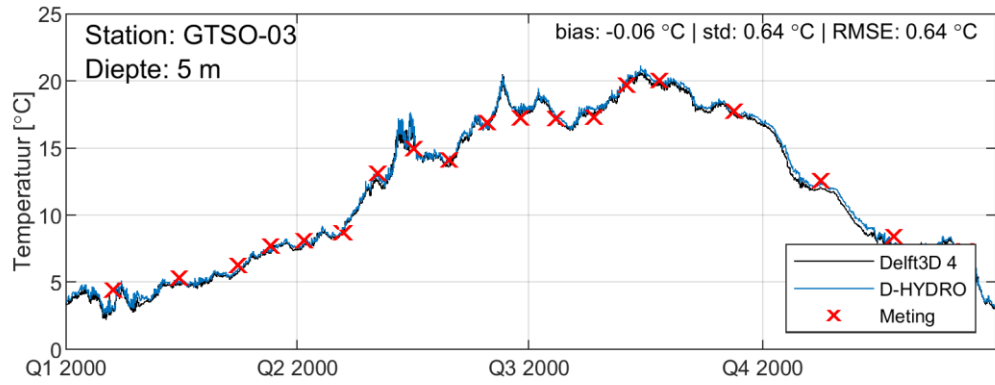
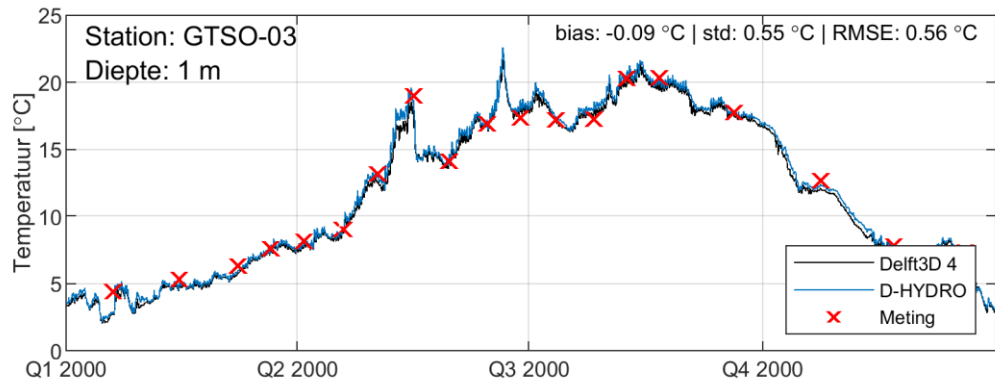
D.2.1 Saliniteit

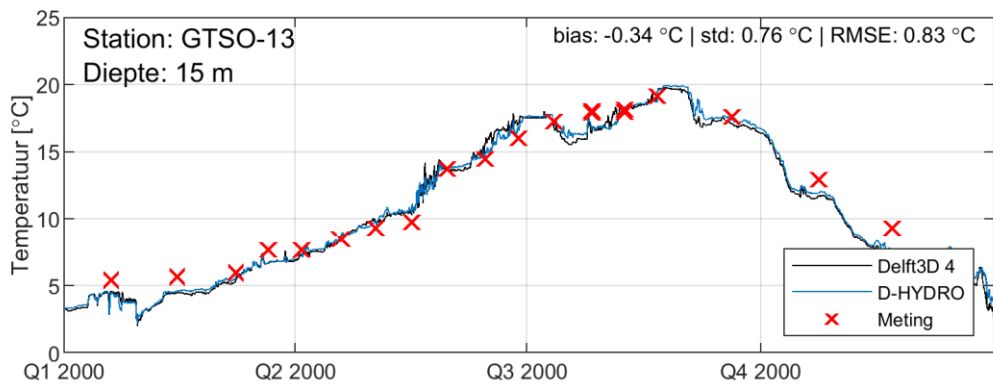
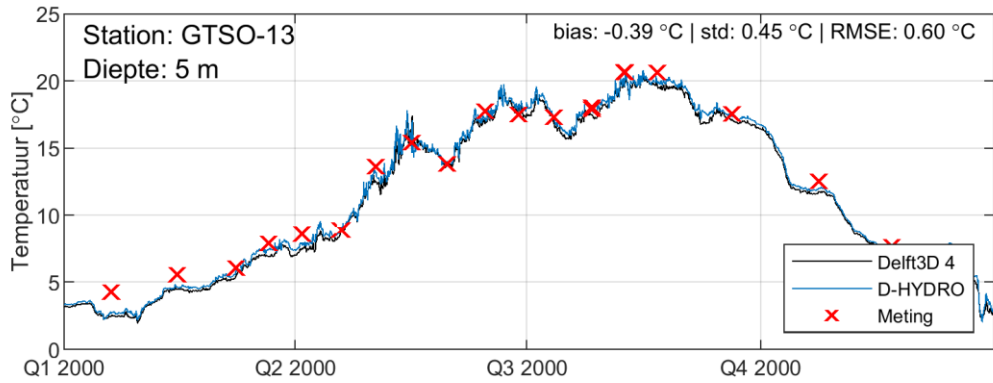
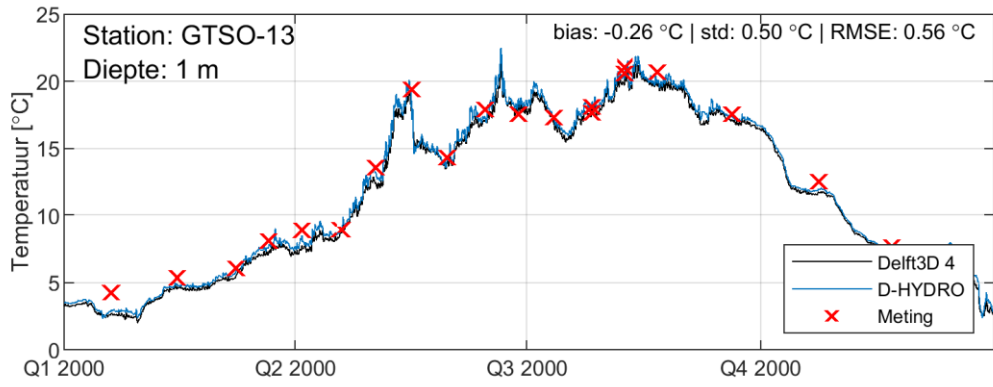


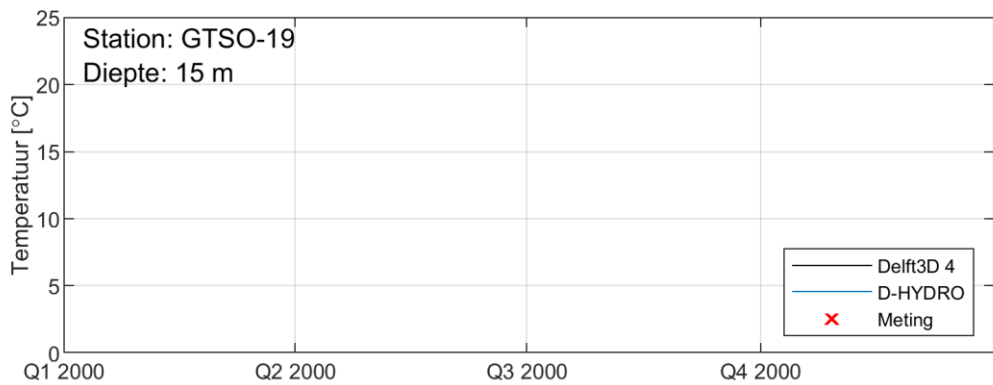
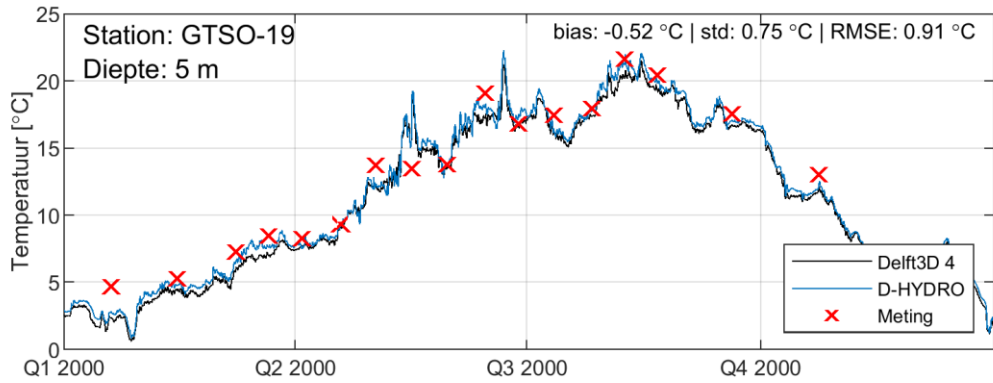
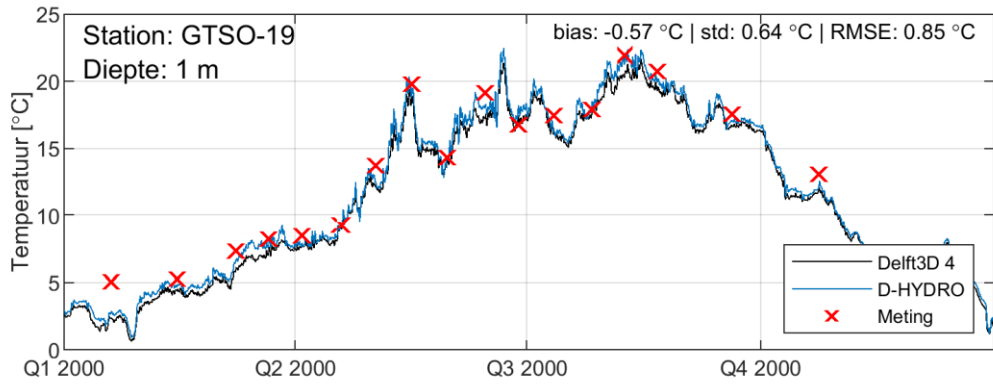




D.2.2 Temperatuur

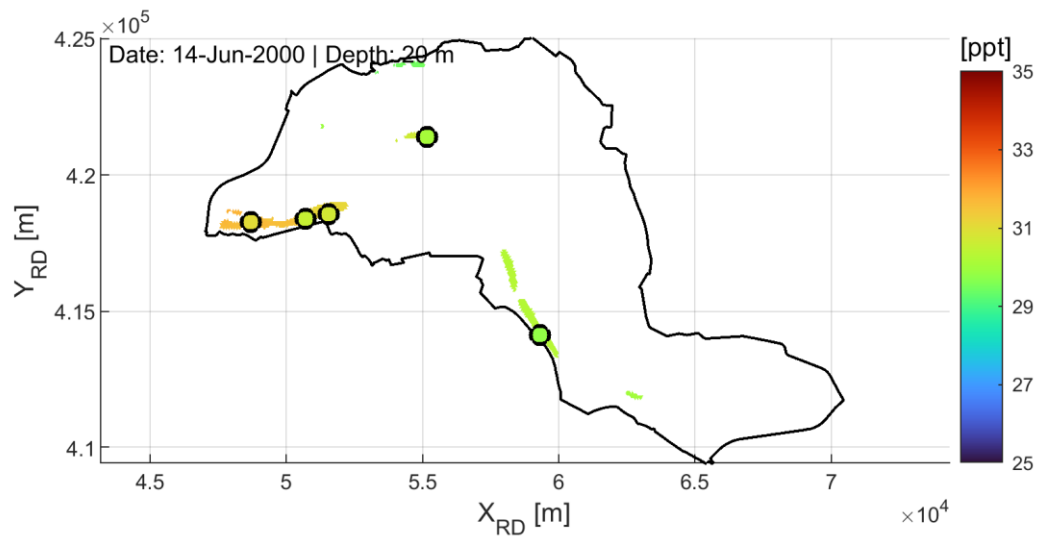
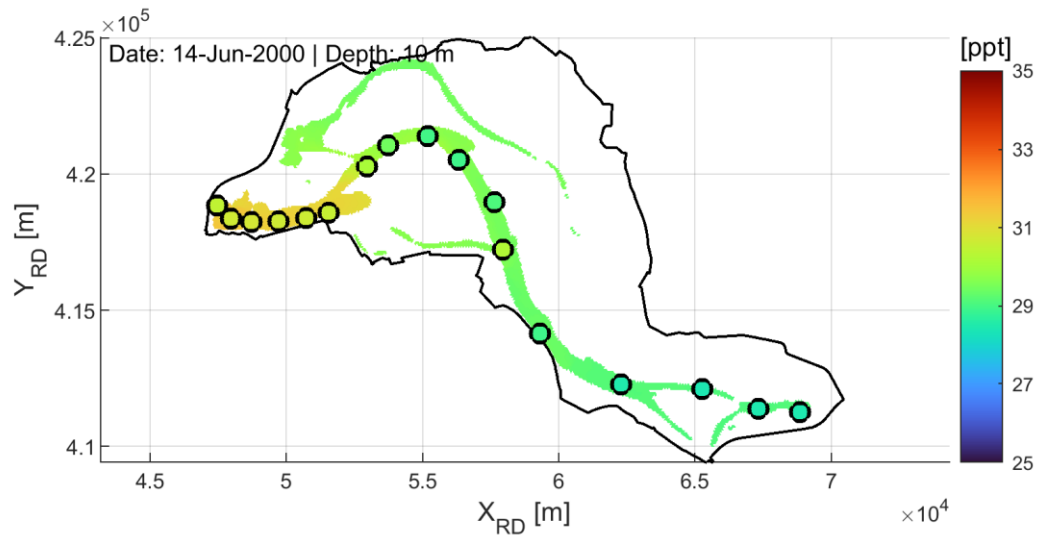
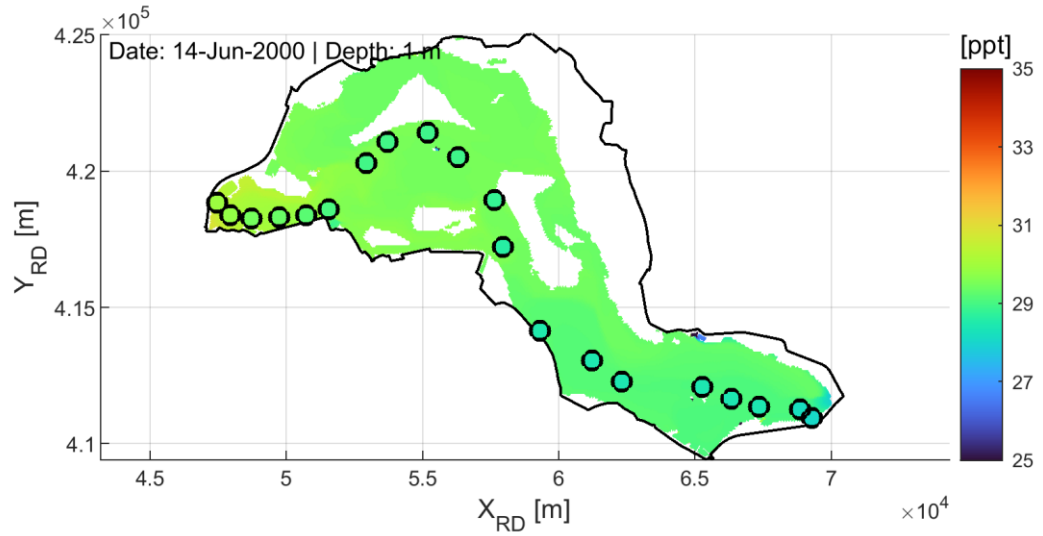


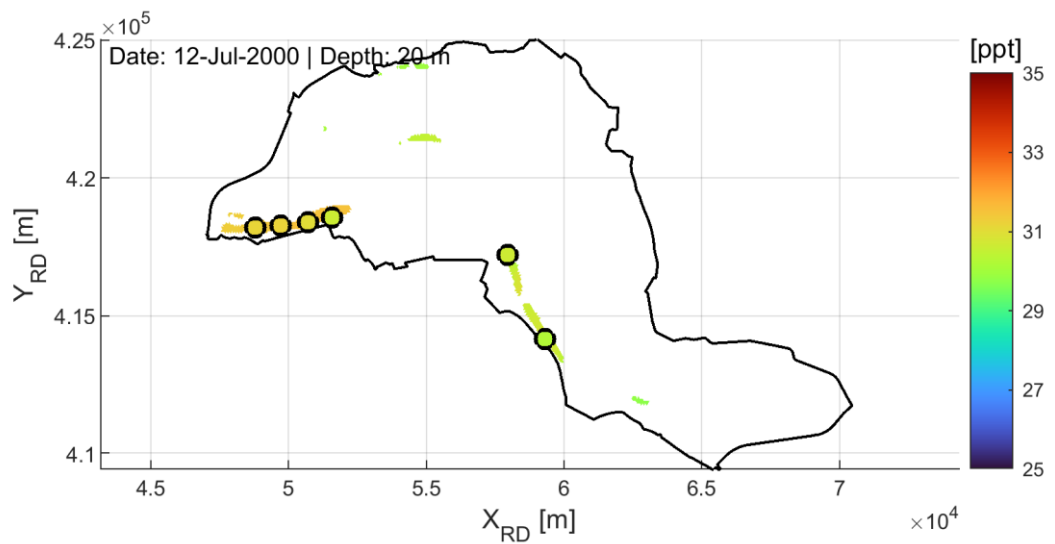
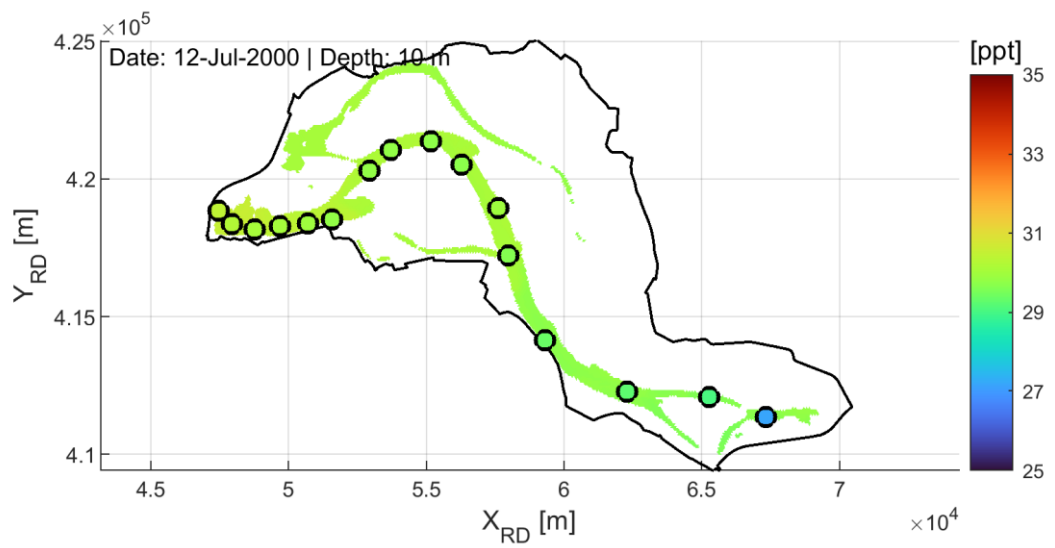
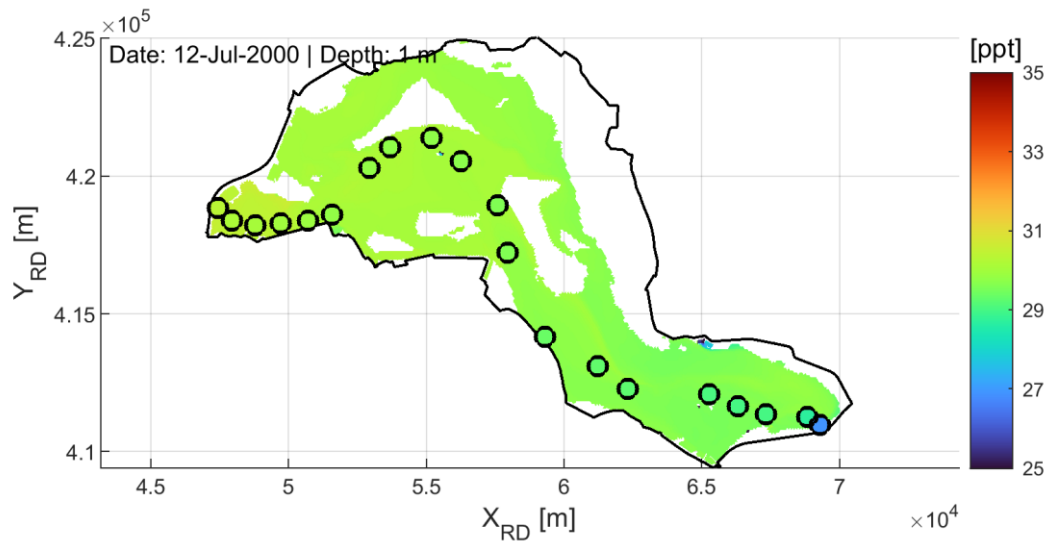




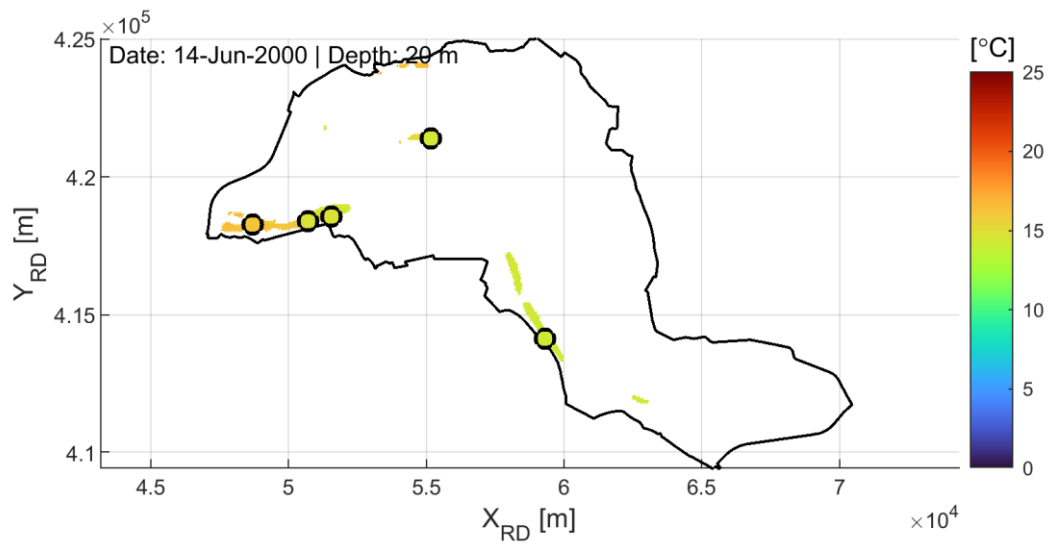
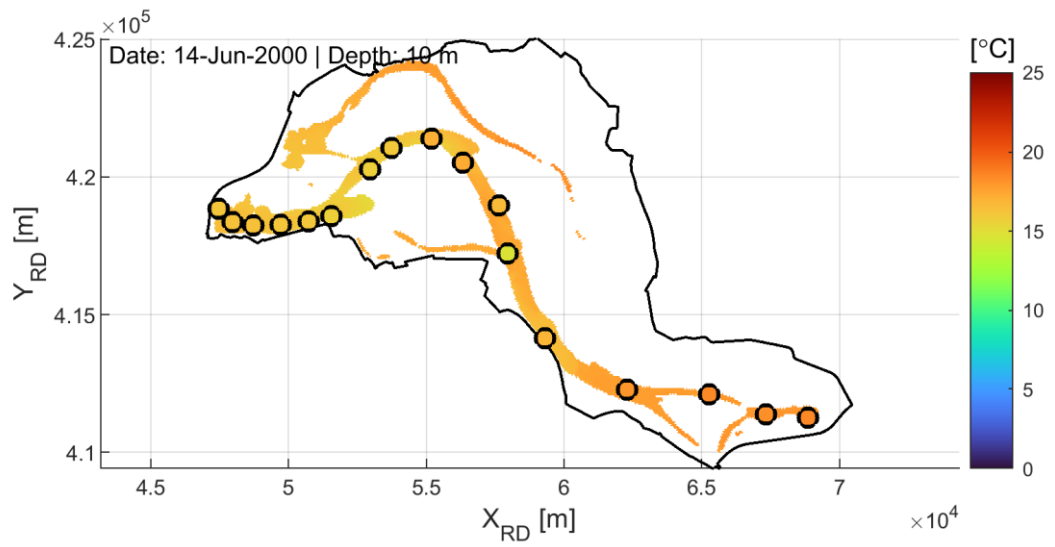
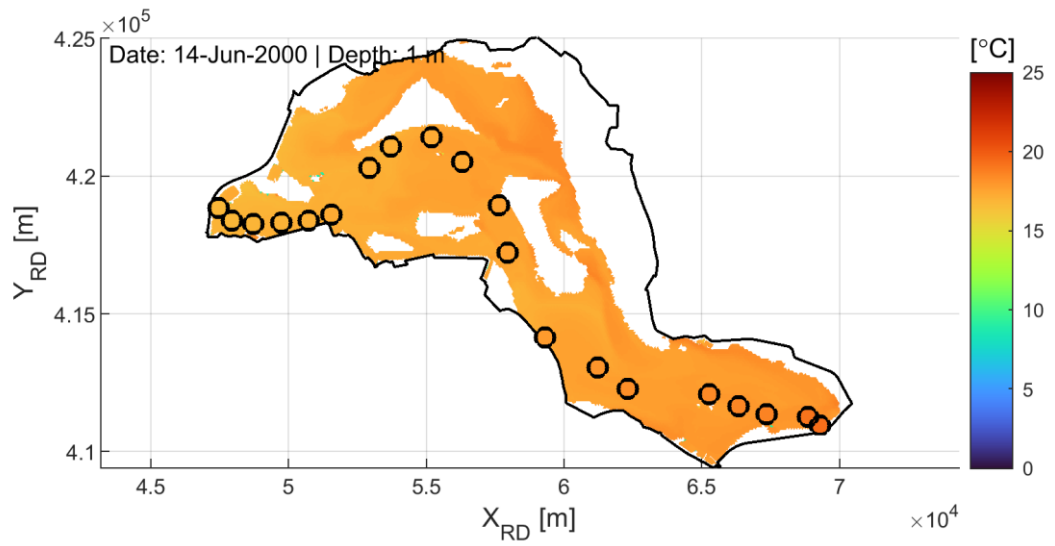
D.3 Modelresultaten – horizontale dwarsdoorsneden – 2000

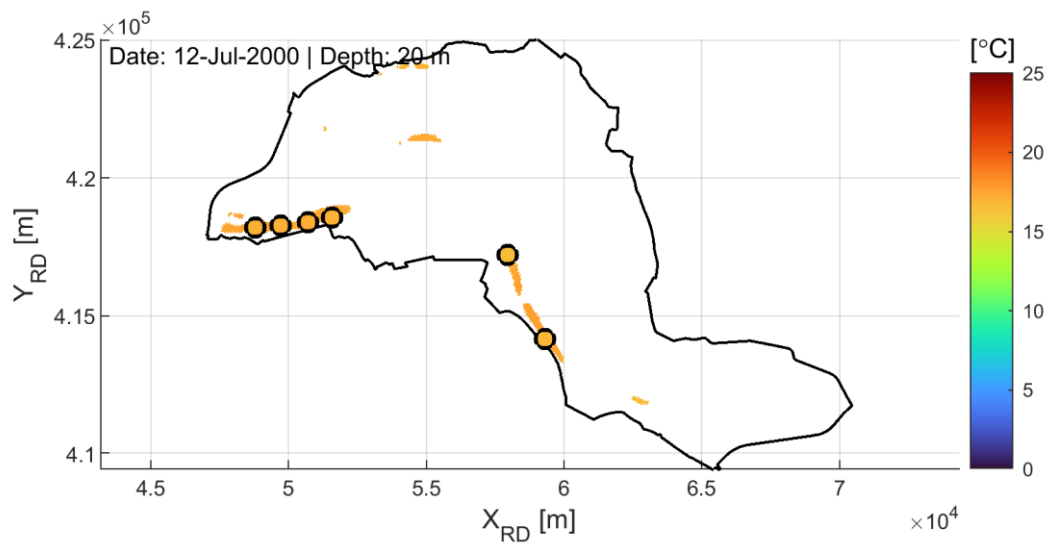
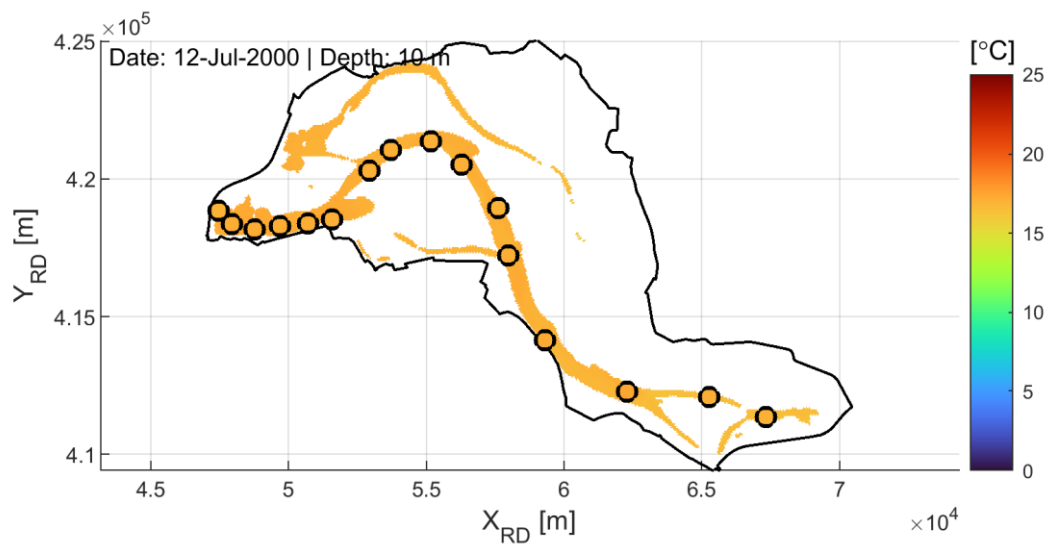
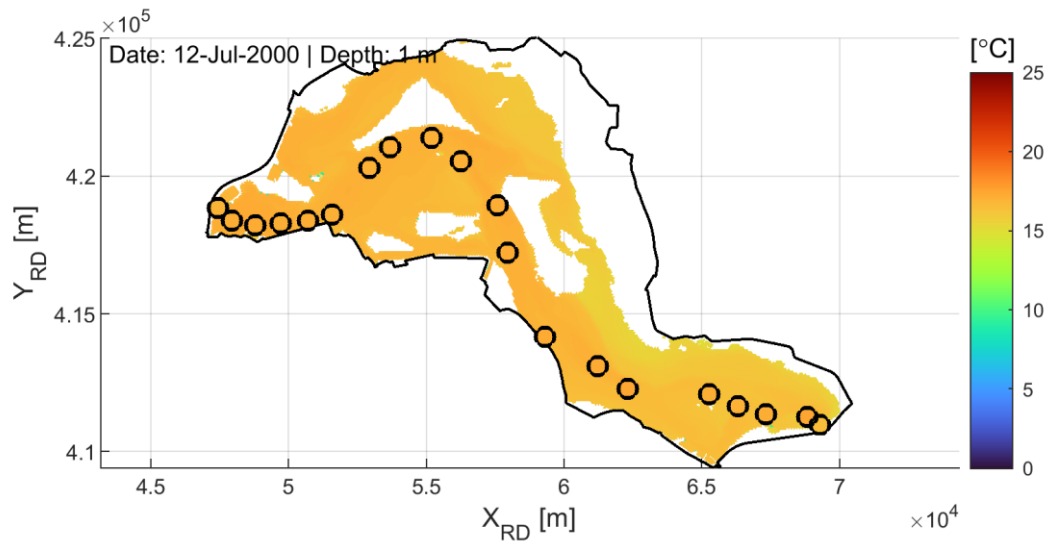
D.3.1 Saliniteit



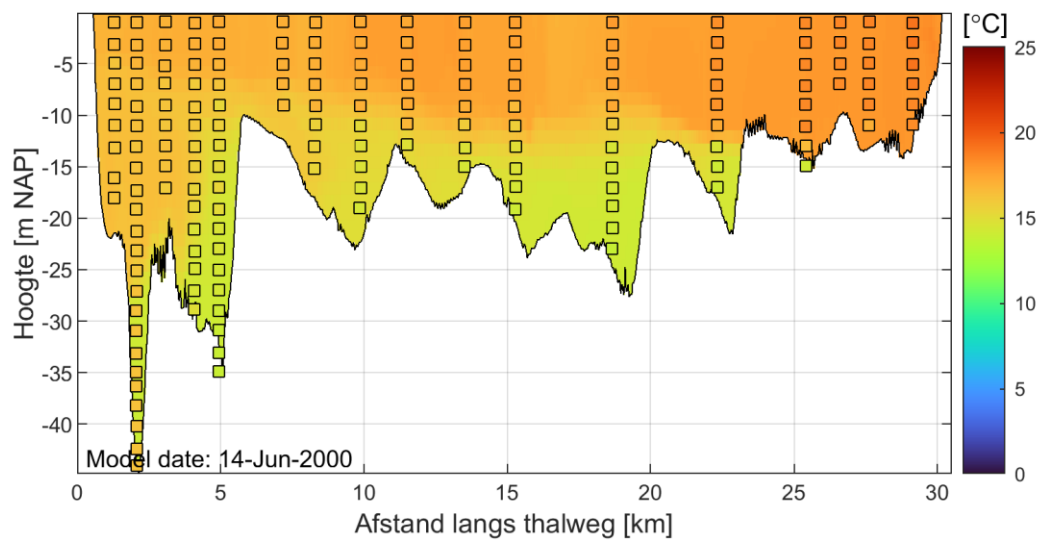
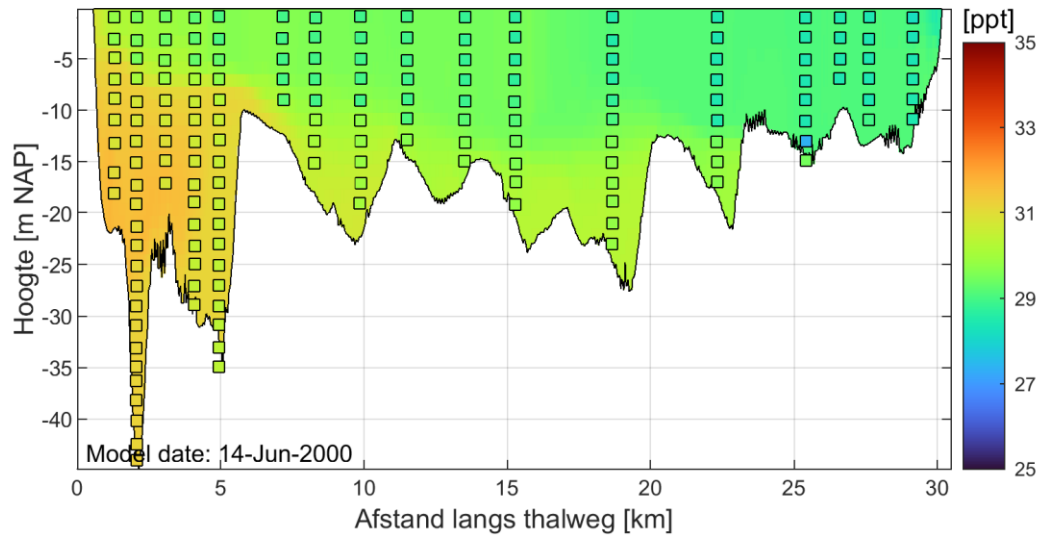


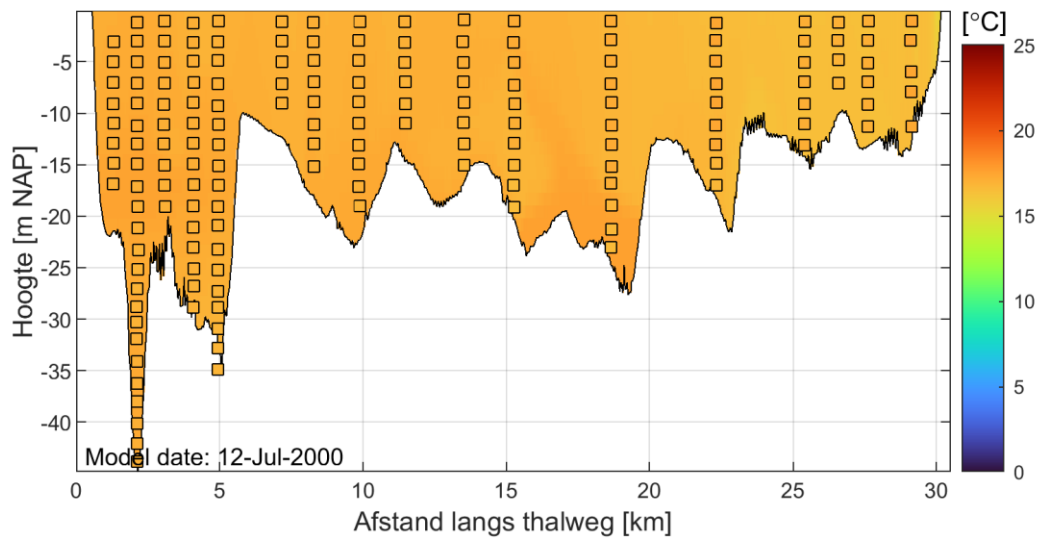
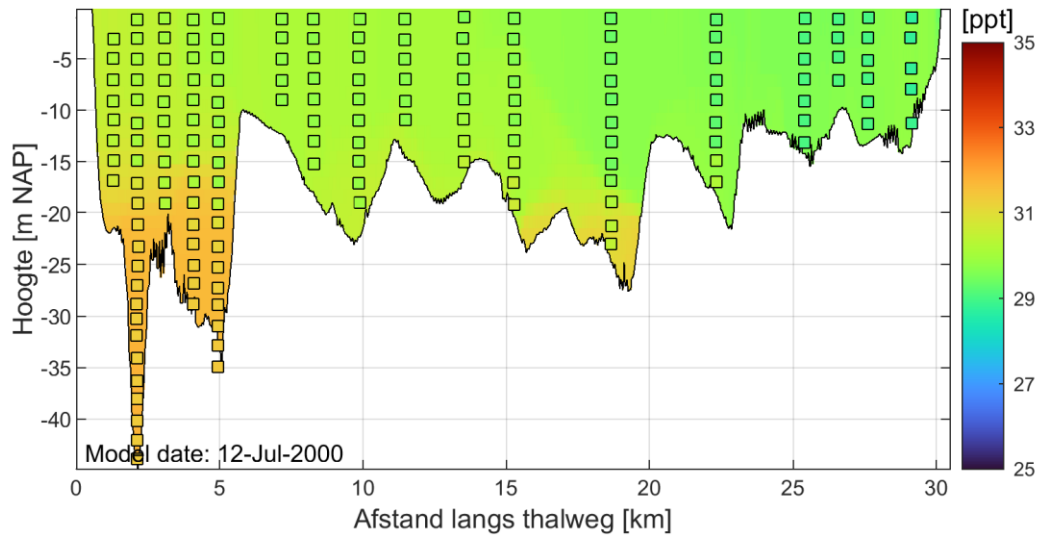
D.3.2 **Temperatuur**





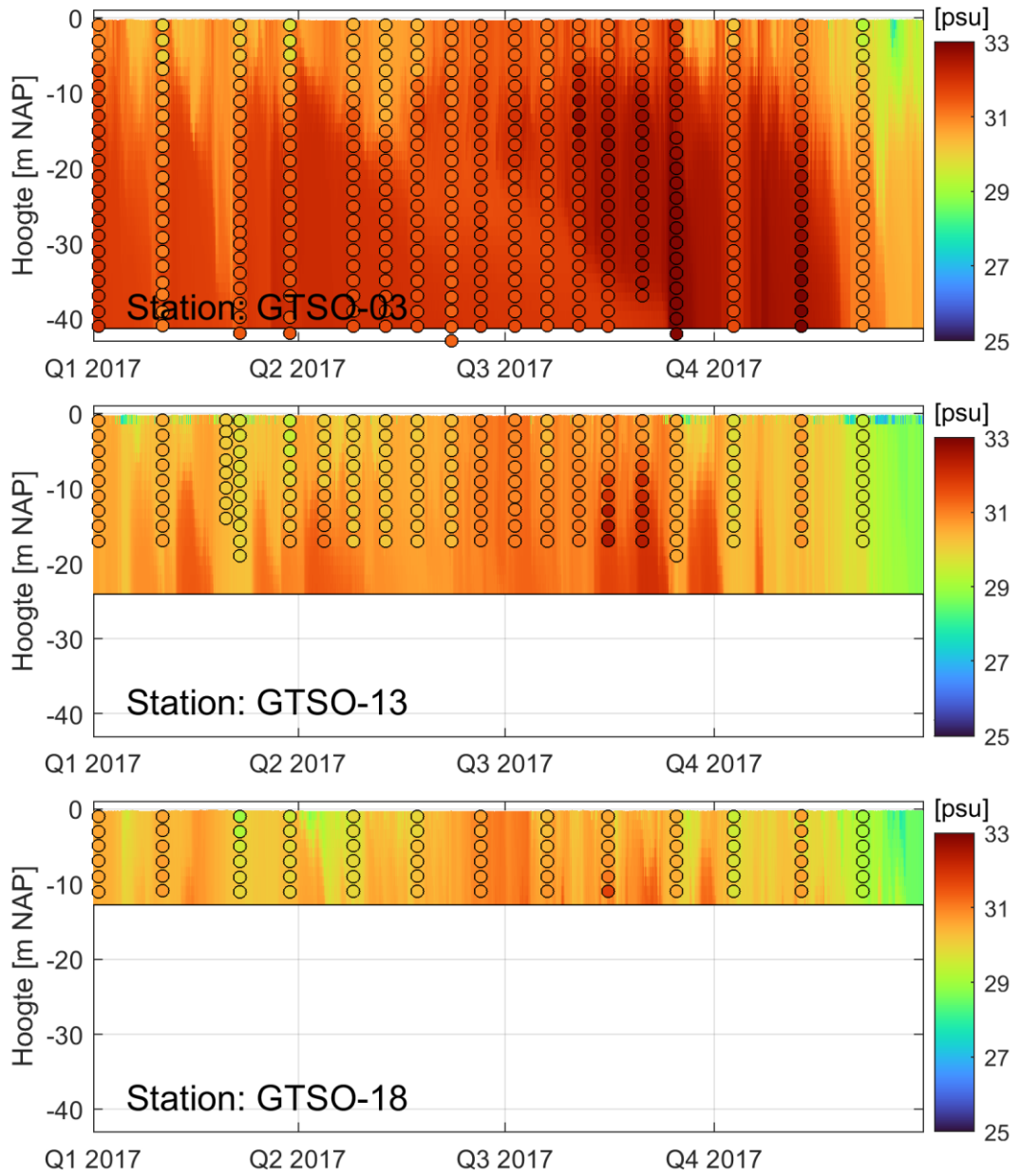
D.4 Modelresultaten – verticale dwarsdoorsneden – 2000



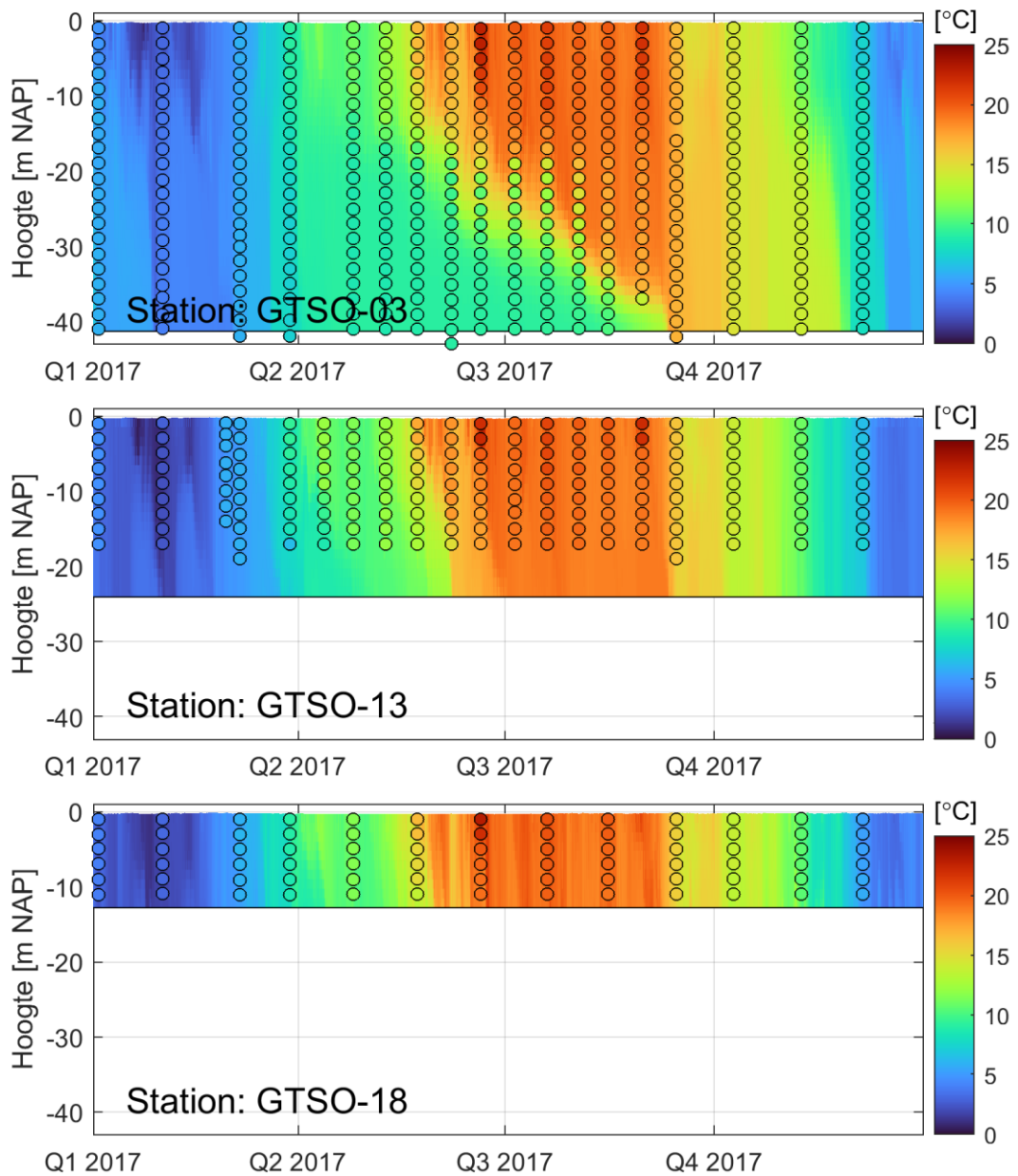


D.5 Modelresultaten – z,t-diagram – 2017

D.5.1 Saliniteit

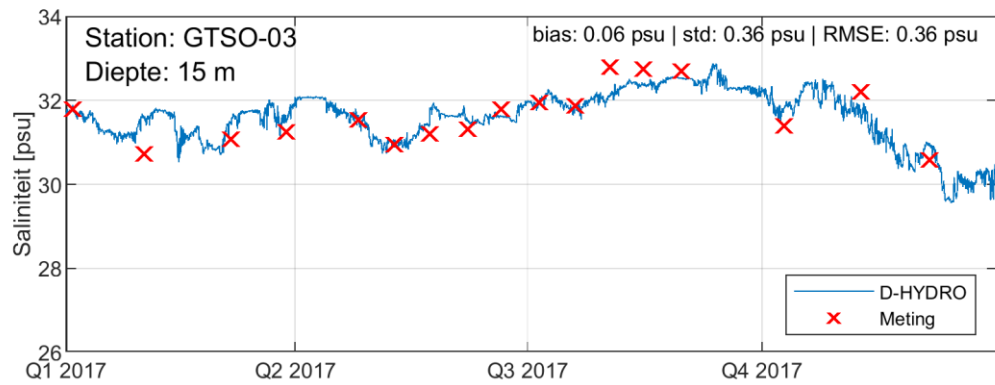
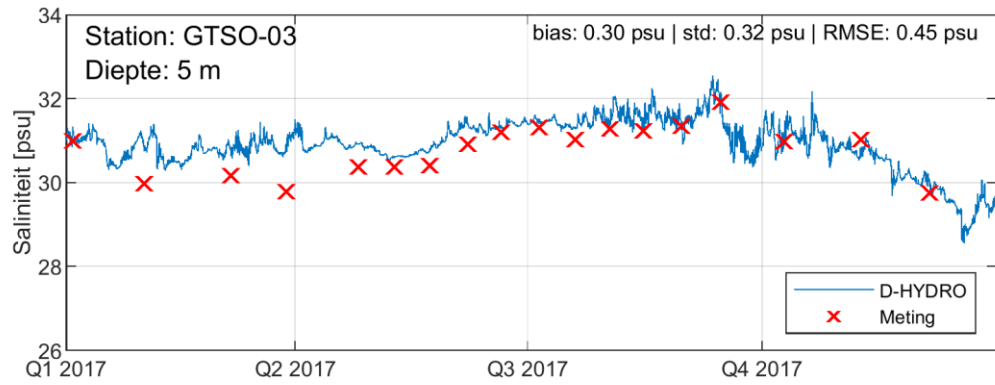
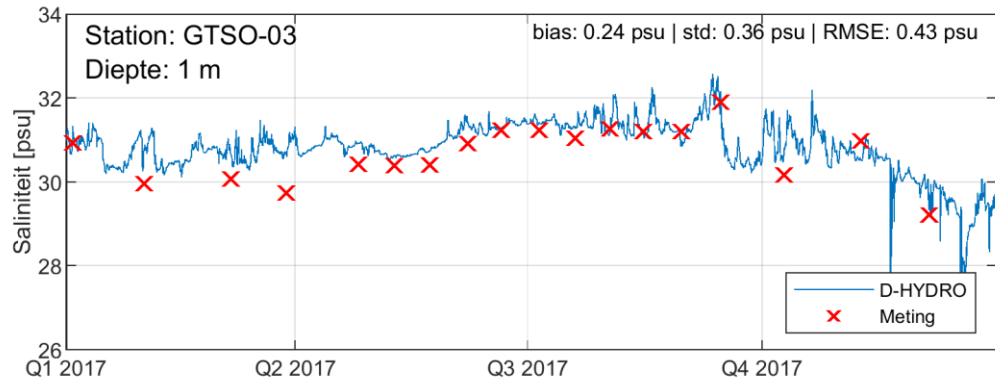


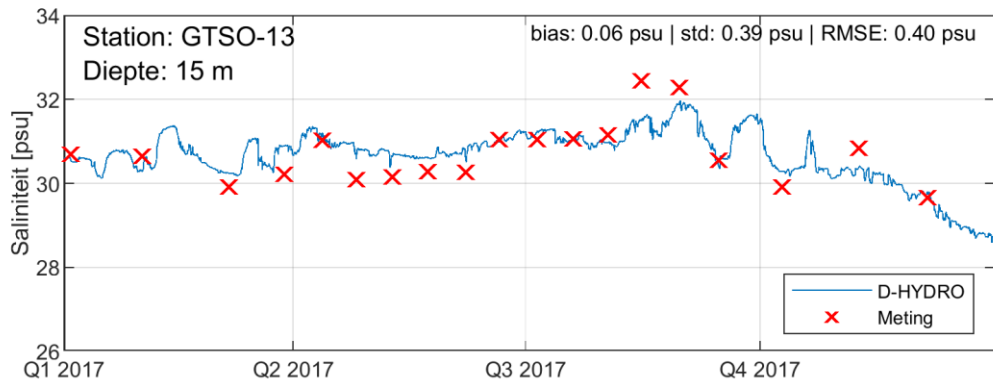
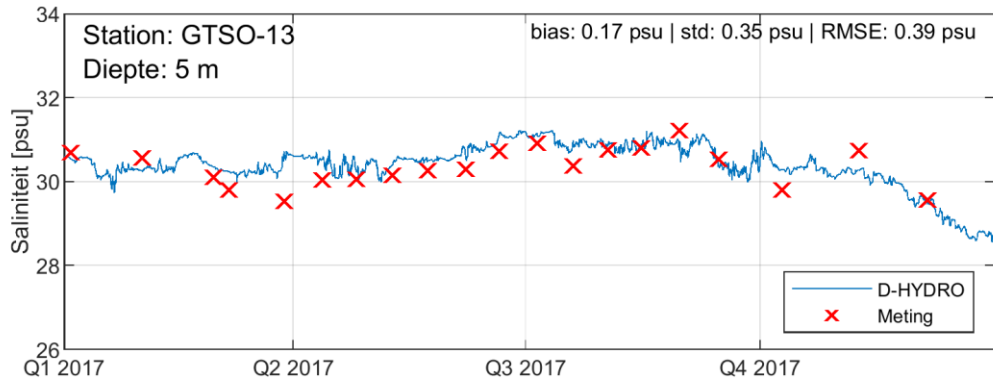
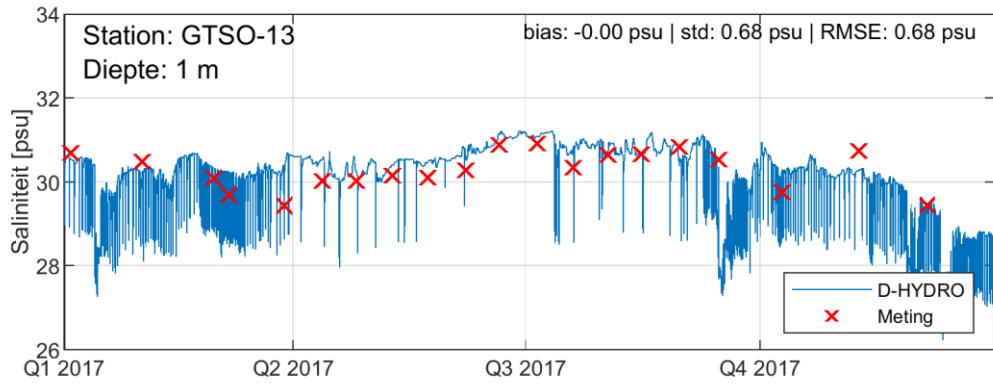
D.5.2 **Temperatuur**

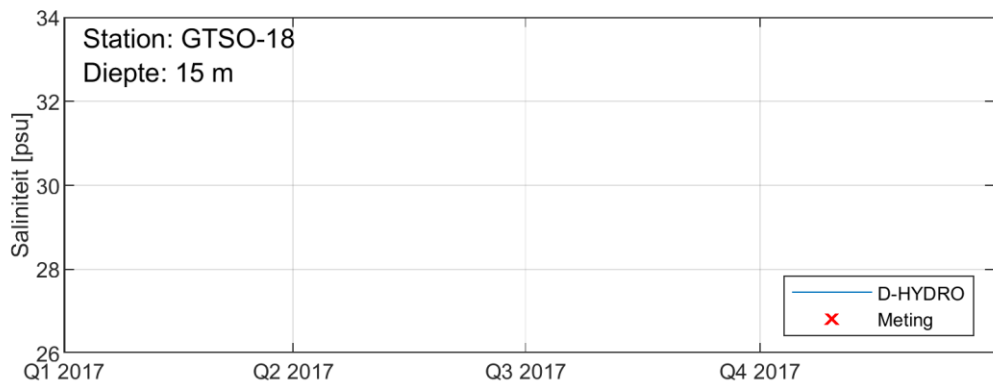
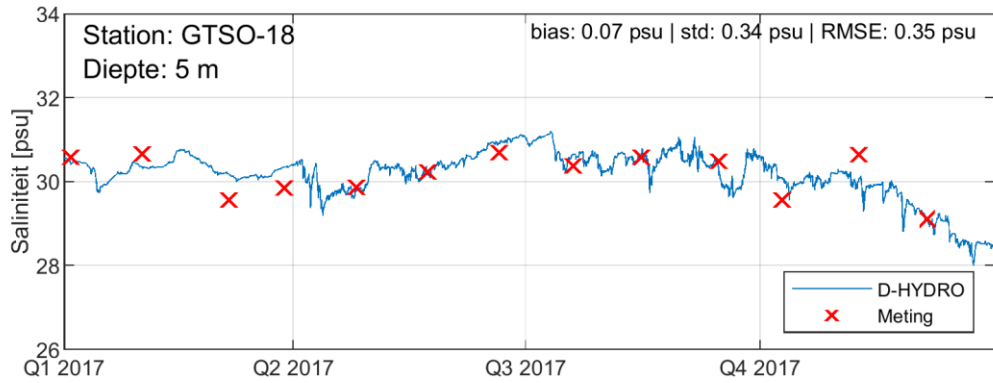
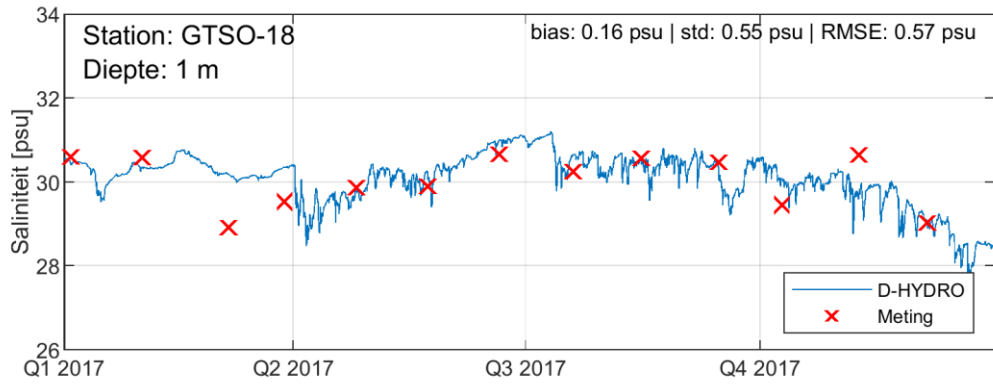


D.6 Modelresultaten – tijdseries – 2017

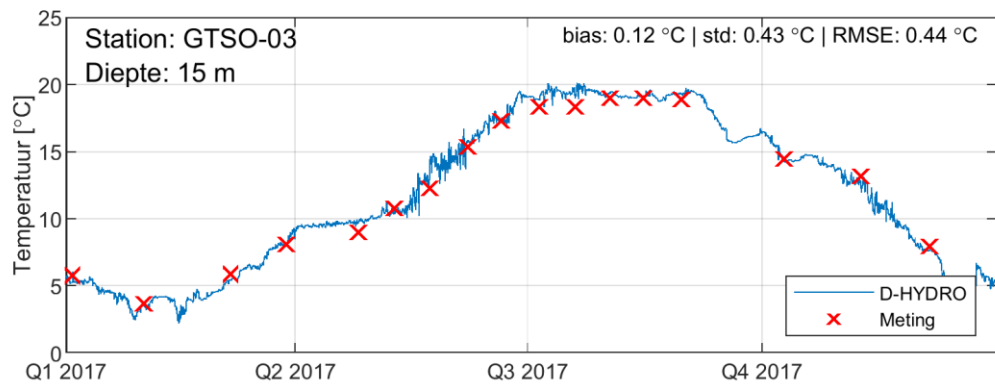
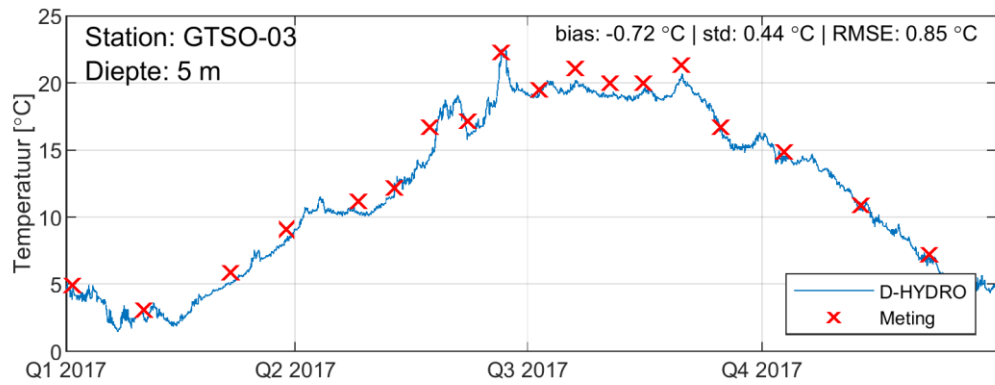
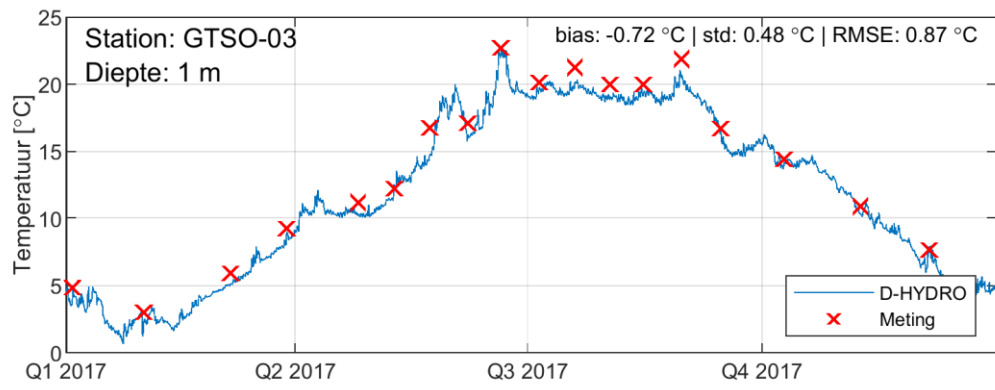
D.6.1 Saliniteit

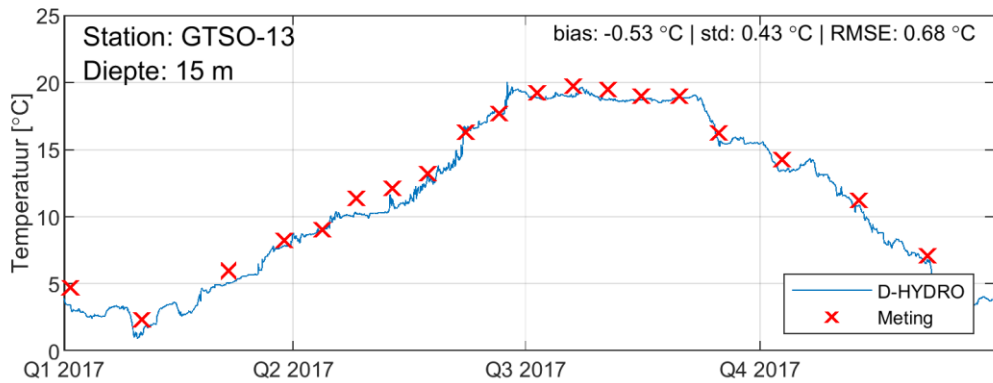
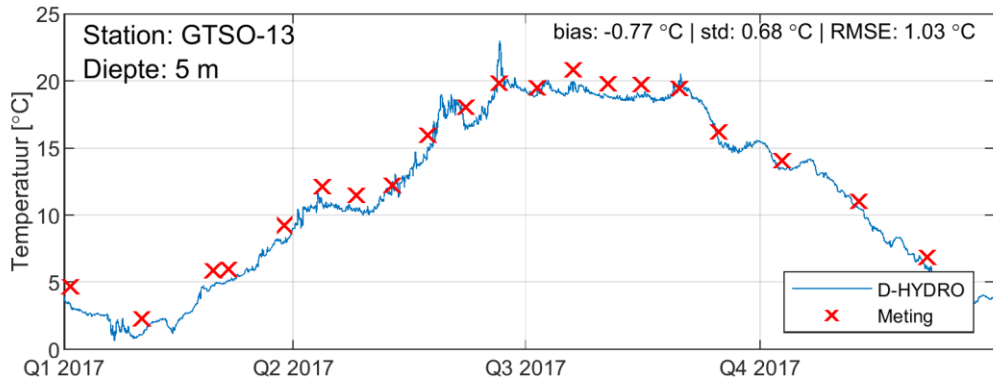
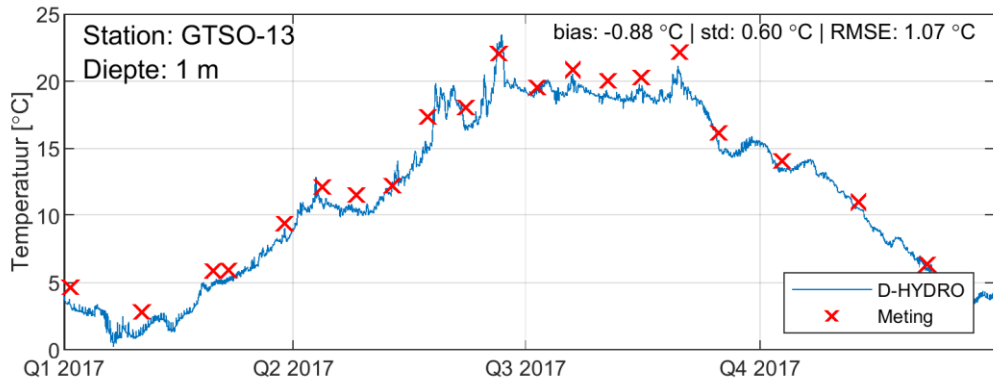


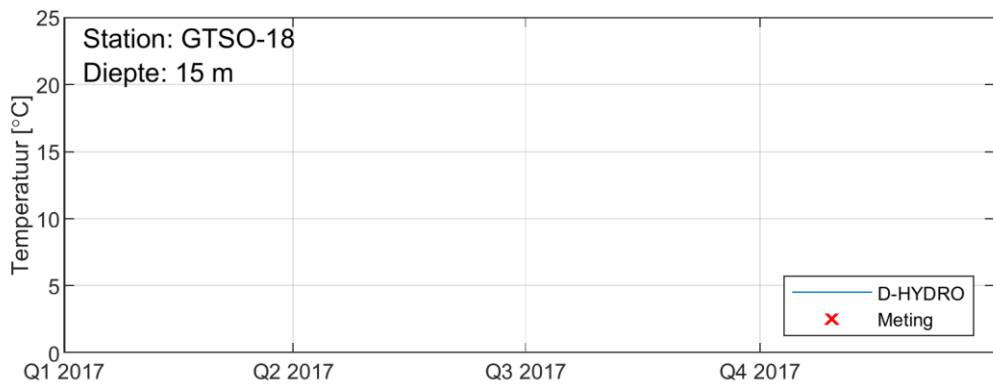
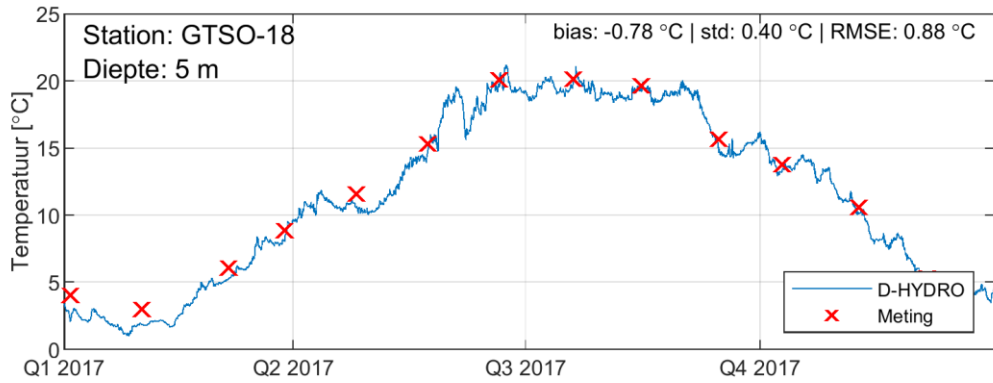
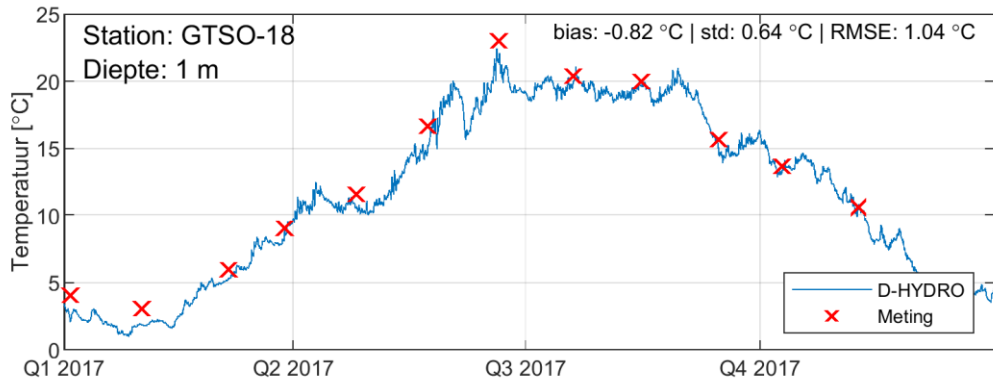




D.6.2 Temperatuur

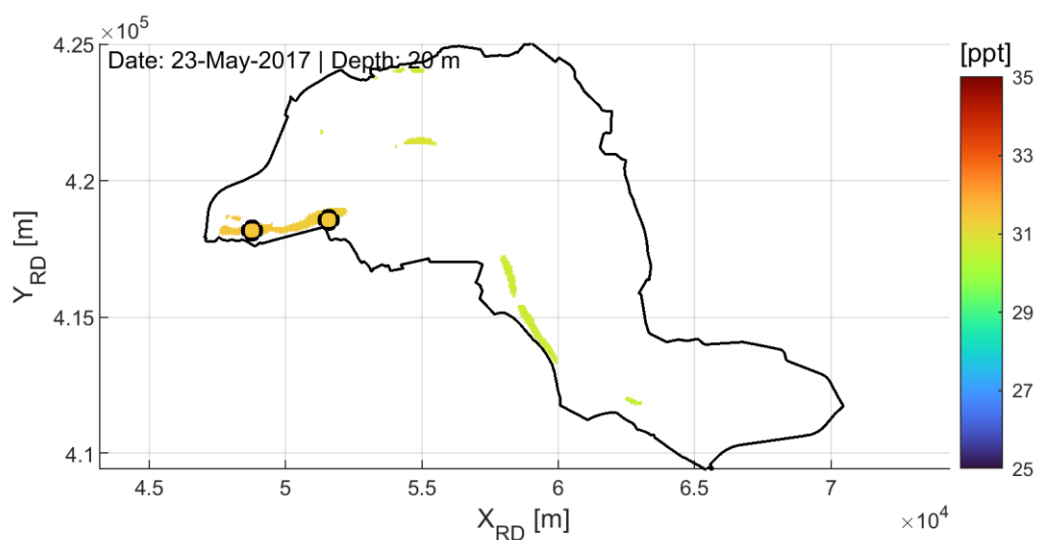
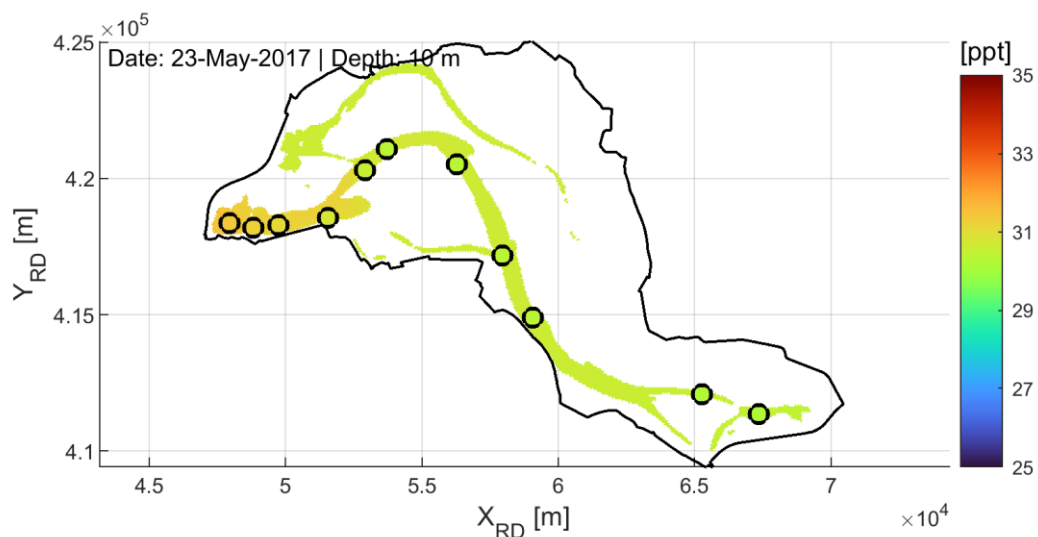
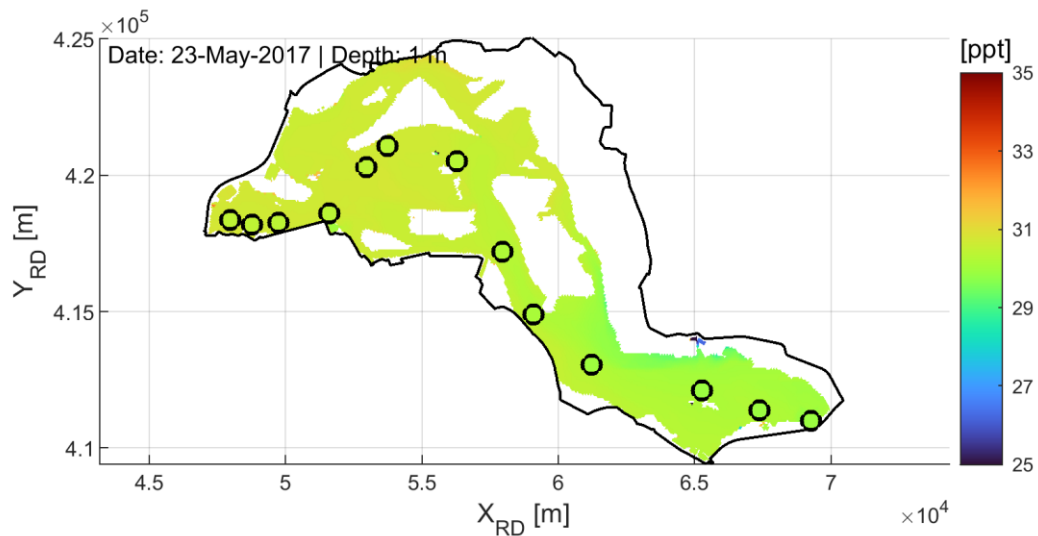


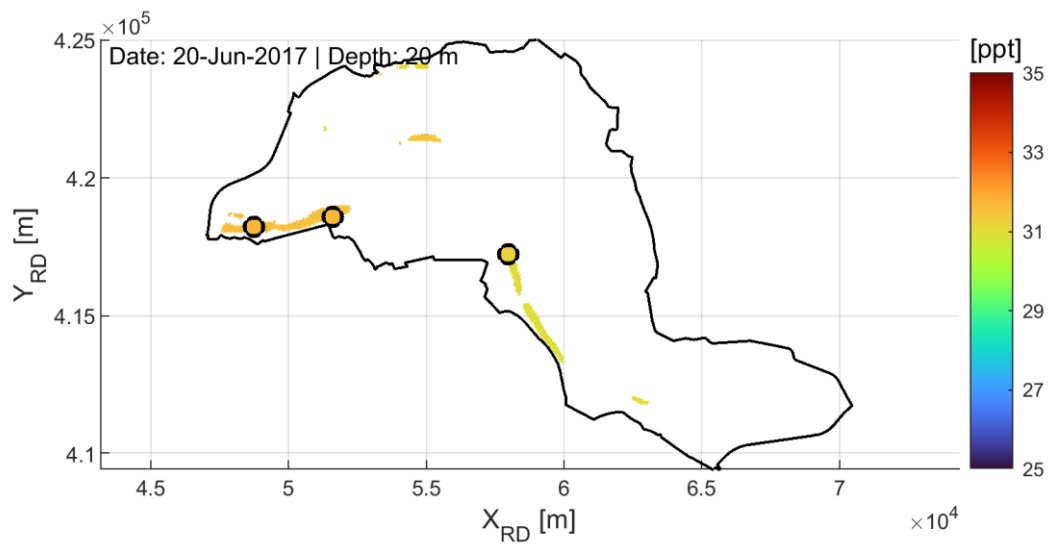
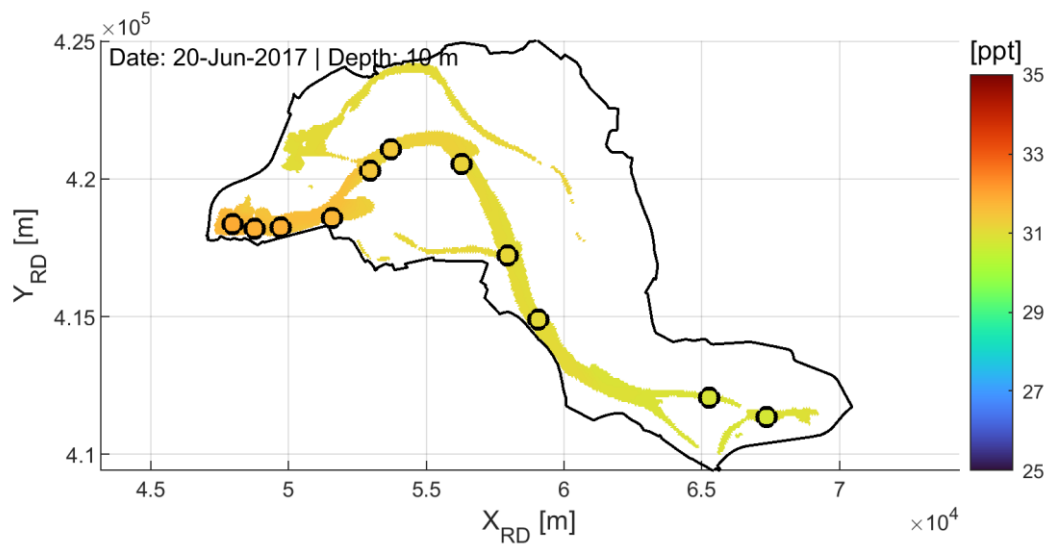
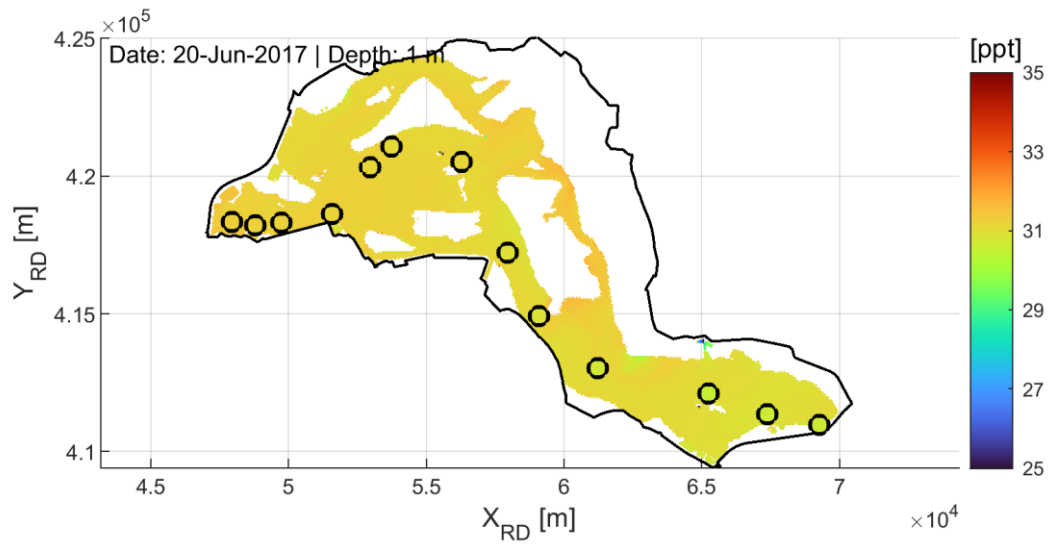




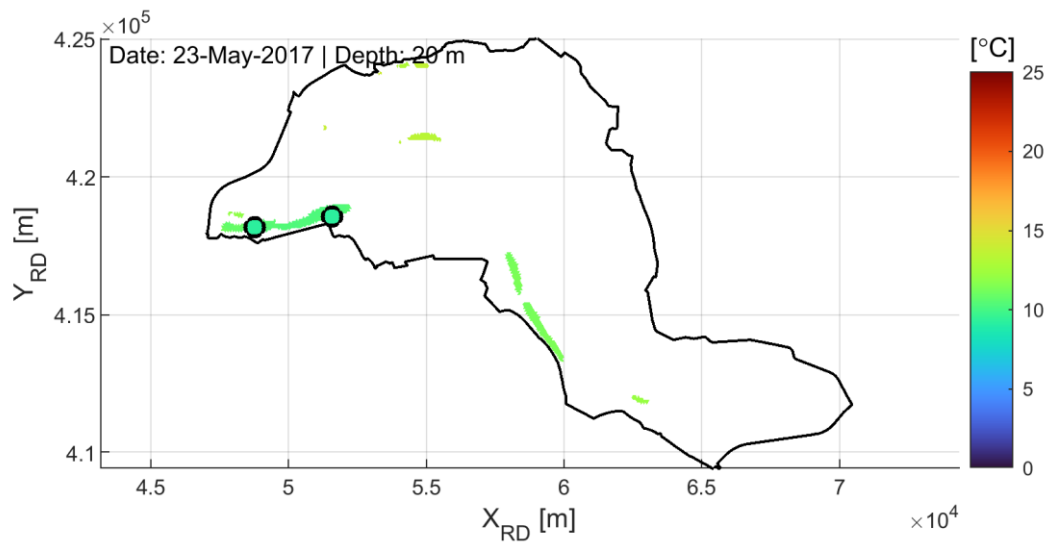
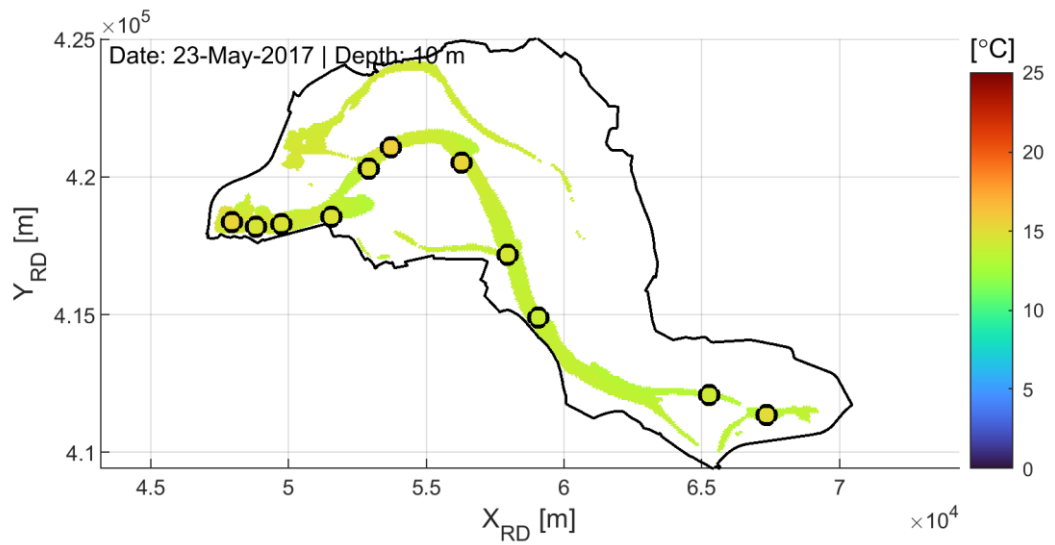
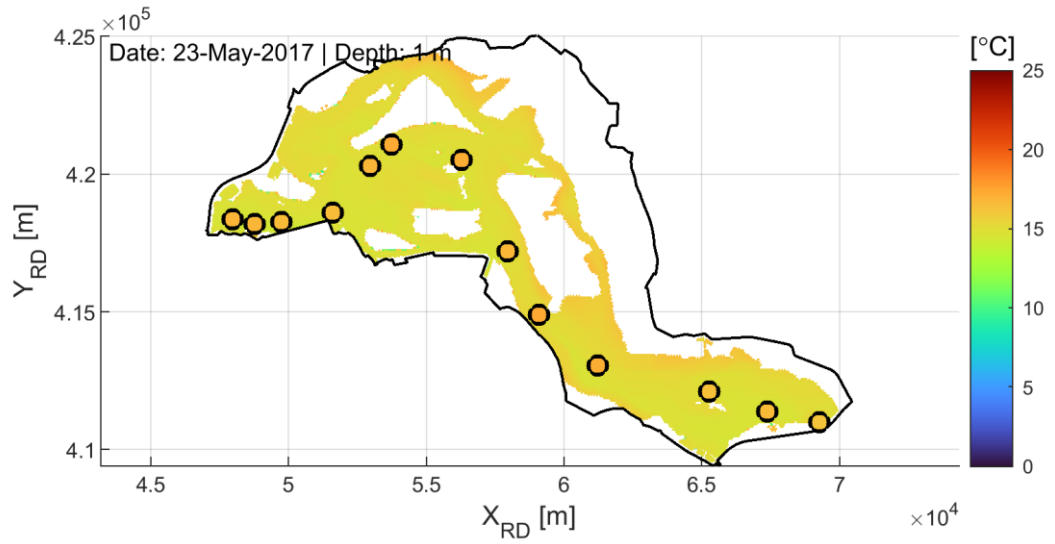
D.7 Modelresultaten – horizontale dwarsdoorsneden – 2017

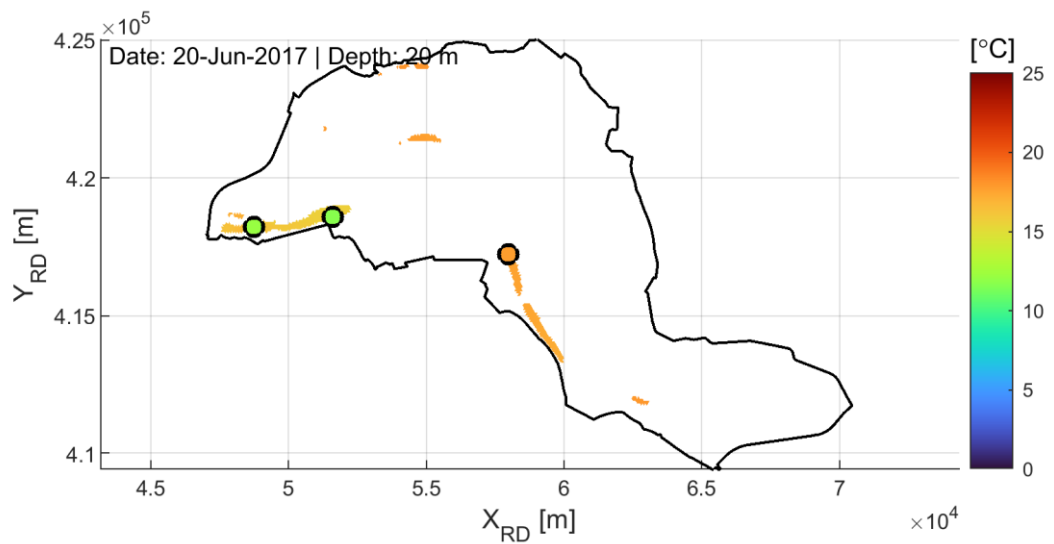
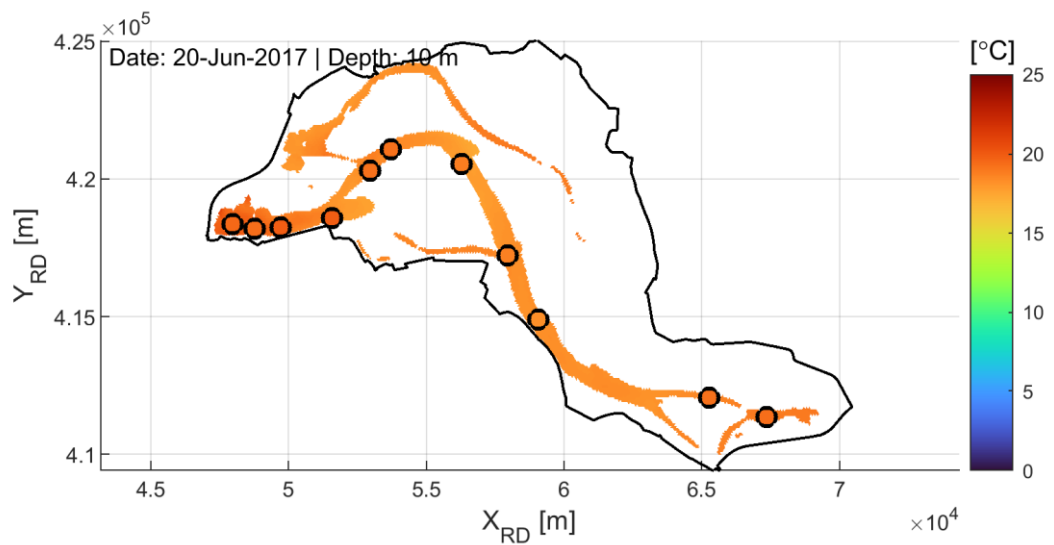
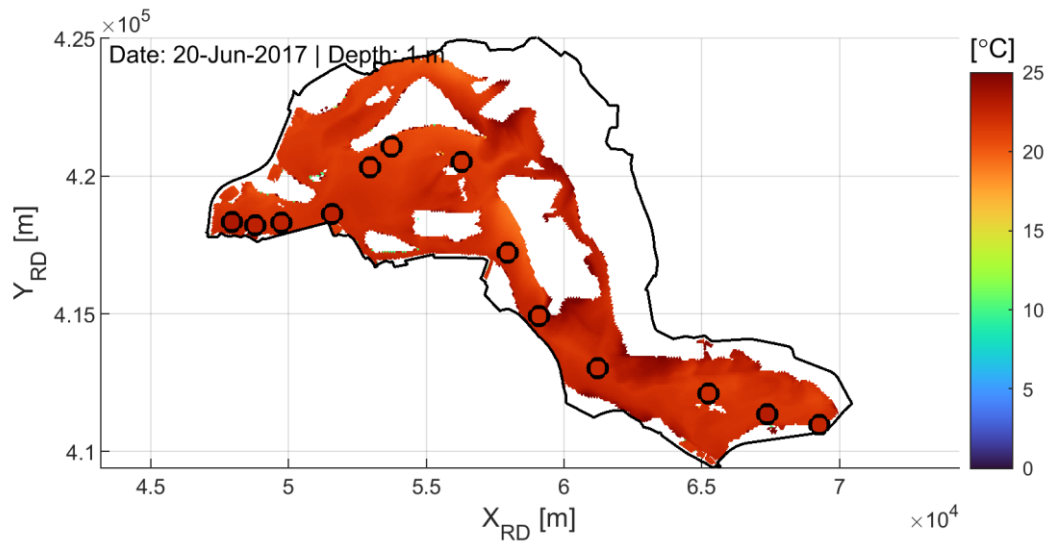
D.7.1 Saliniteit



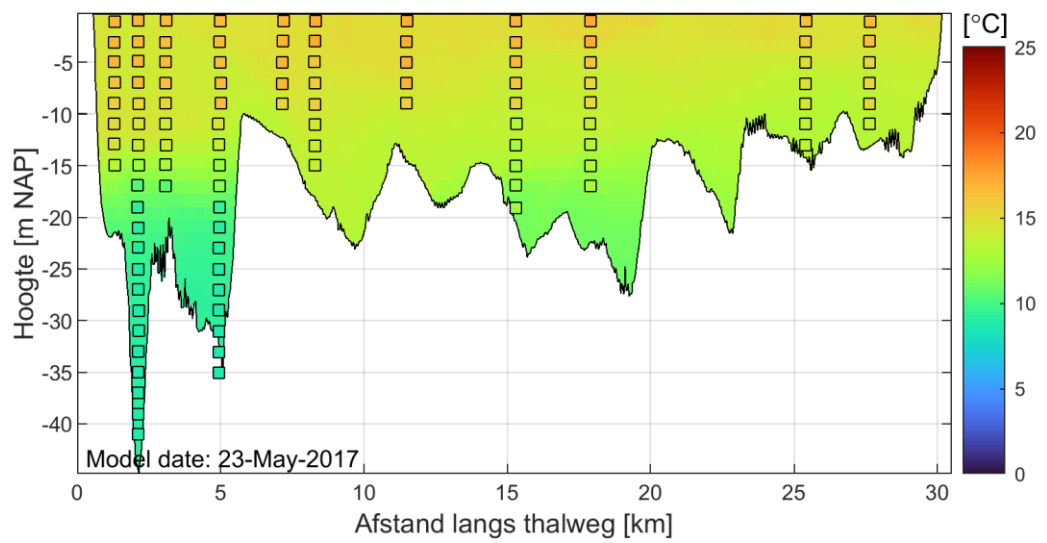
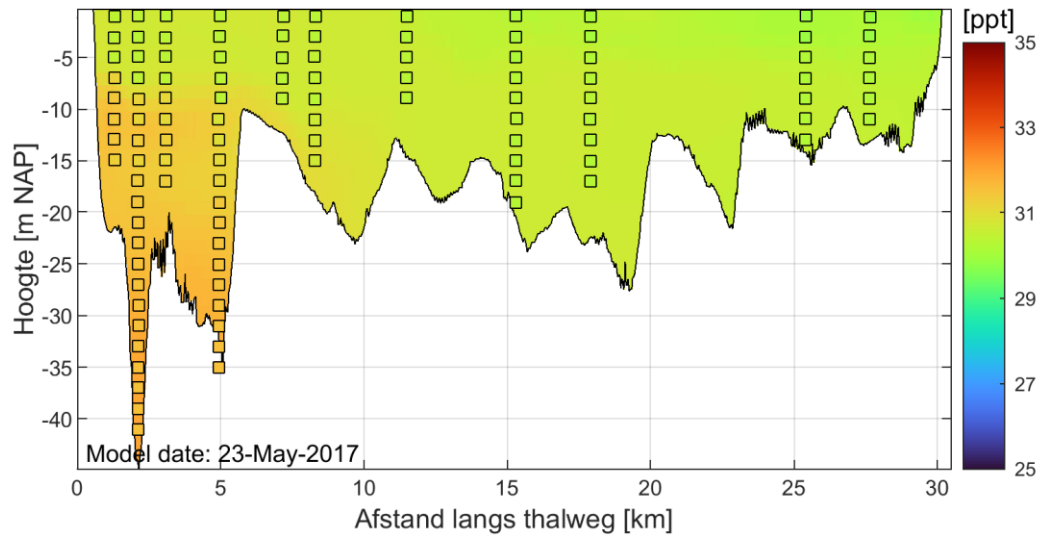


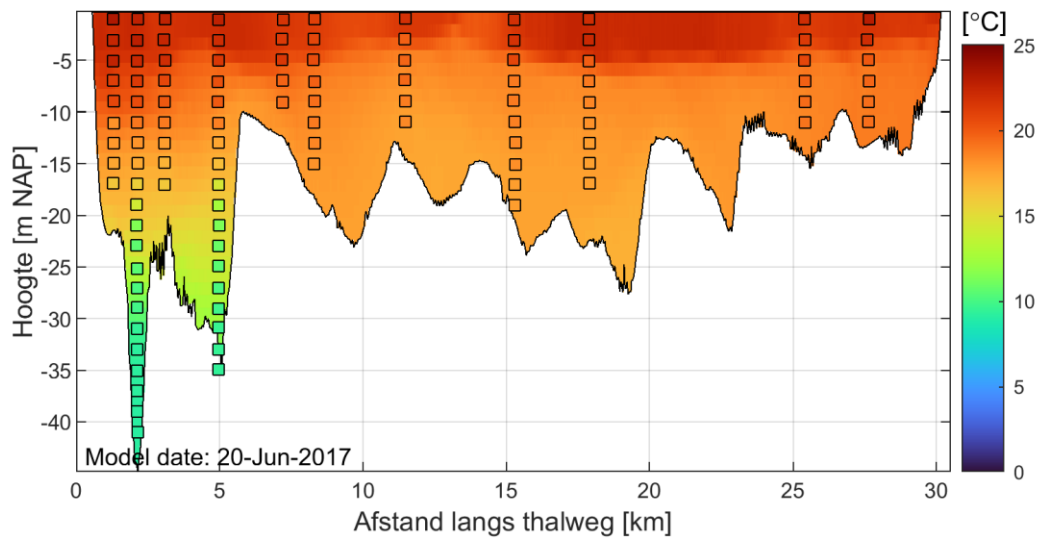
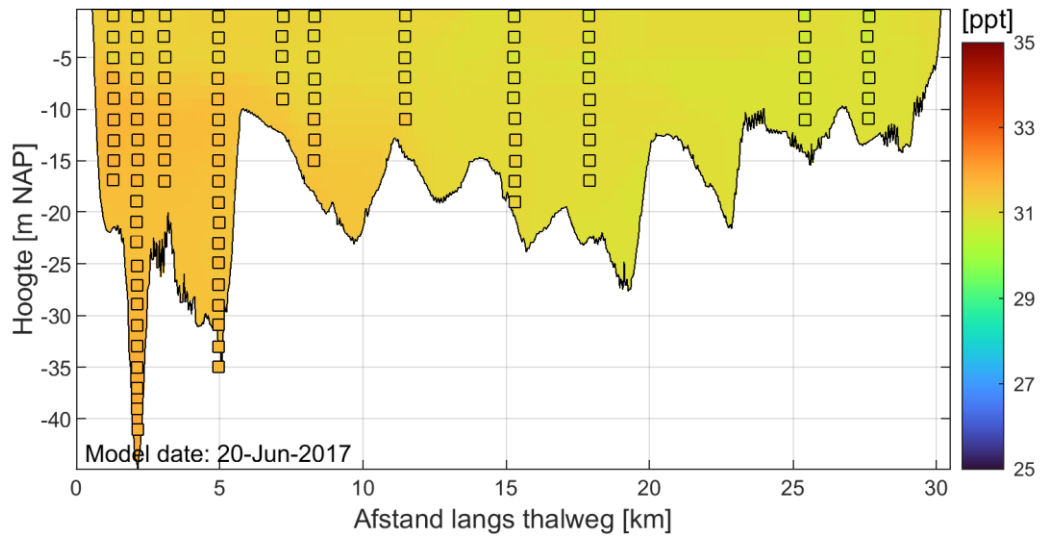
D.7.2 **Temperatuur**





D.8 Modelresultaten – verticale dwarsdoorsneden – 2017





E Bijlage bij hoofdstuk 7 ‘Modeltoepassing’

E.1 Operationeel draaien van het Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta

Op de volgende pagina's is het verslag van de bespreking *Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta (RWS ZD)* opgenomen.

Verlag

Datum verslag 26 juni 2020	Ons kenmerk 11205259-006-ZKS-0005	Project 11205259-006 KPP MA07b 2020 - Hydraulica schematisaties zout Grevelingen D-HYDRO - 6e generatie	Aantal pagina's 1 van 4
Contactpersoon Julien Groenenboom	Doorkiesnummer +31(0)88 335 8546	E-mail Julien.Groenenboom@deltares.nl	
Datum bespreking 23 juni 2020	Vergadering Grevelingenmodel bij Rijkswaterstaat Zee en Delta (RWS ZD)		
Aanwezig Piet Lievense (RWS ZD), Krijn Saman (RWS ZD), Stefan Nieuwenhuis (RWS VWM), David Kerkhoven (Deltares) en Julien Groenenboom (Deltares)			

Achtergrond

Binnen KPP2020 D-HYDRO Grevelingen, onderdeel van het project KPP Hydraulica Schematisaties, zal geïnteriseerd worden of Rijkswaterstaat Zee en Delta operationeel met het nieuwe 3D D-HYDRO-model kan werken, wordt vastgesteld welke stappen nog nodig zouden zijn en wanneer deze stappen verwacht worden. Het uitvoeren van deze vervolgstappen valt buiten de scope van dit project. De vervolgstappen kunnen wel mogelijk als input dienen voor de KPP Programmering van KPP2021.

Verlag

Huidige operationeel model: *Online Grevelingen*

Er wordt op dit moment een 2D WAQUA-model gebruikt om het meerpeil in de Grevelingen te sturen. Dit model draait al vele jaren en naar tevredenheid bij Rijkswaterstaat. In deze operationele toepassing wordt gestuurd op de waterstand in het midden van het meer (meetpaal BOM1) door middel van het aansturen van de Brouwerssluis (en daarmee het debiet door dit kunstwerk te bepalen). Dit model wordt *Online Grevelingen* genoemd en is gebaseerd op een WAQUA-model uit de jaren '90 (vierde-generatie Rijkswaterstaatmodellen). Het rekenrooster is nog een factor twee verdund ten opzichte van het oorspronkelijke en is daarmee relatief grof, maar fijn genoeg voor de huidige toepassing. Het modeldomein beslaat ook een heel klein stukje van de voordelta aan de zeezijde van de Brouwersdam. De hefhogtes van de schuiven worden buitenom het *Online Grevelingenmodel* (door het HMC) in het SCADA-systeem van de sluis ingesteld.

De forecast-waterstand op de open rand (t.h.v. meetlocatie BG8, waar de waterstanden voor de hindcast en de forecast op gebaseerd zijn) is afkomstig uit de RWS-eindverwachting, gebruikmakend van onder andere de RWSOS Noordzeemodellen. Het debiet door de Brouwerssluis wordt door het model berekend o.b.v. het verval over het kunstwerk. Tijdens een westerstorm is er opwaaiing (waterstandsverhoging) aan de zeezijde en een waterstandsverlaging aan de binnenzijde, waardoor een groter verval over het kunstwerk optreedt met een langere tijdsduur (breder inlaatvenster). Bij een zuidoostelijke windstroming treedt het omgekeerde effect op, namelijk een waterstandsverhoging aan de binnenzijde van de Brouwersdam in combinatie met afwaaiing op zee, wat ook leidt tot een groter verval en een

breder spuienster. De hoeveelheid potentieel uit te wisselen water en het resultaat op het meerpeil (hoger/lager) neemt in beide gevallen toe t.o.v. een situatie zonder windopzet/afwaaiing i.c.m. scheefstand op het meer.

In principe loopt de Brouwerssluis bij ieder gelijk water na tijkentering dicht en gaat daarna open. Daarmee zorgt het kunstwerk voor zoveel mogelijk wateruitwisseling tussen de Noordzee en het Grevelingenmeer, binnen de peilgrenzen (NAP -10 cm tot NAP -30 cm, stuurgrenzen NAP -11/-29 cm). Tijdens het broedseizoen vindt er minder wateruitwisseling door het kunstwerk plaats (lager meerpeil, waardoor spuien gemiddeld minder efficiënt is, en kleinere peilmarge tussen stuurgrenzen NAP -23 cm en NAP -29 cm). Ook wordt gedurende drie periodes van één week per jaar gestuurd op een wat hoger stuurpeil (NAP -23/-10 cm) omwille van de zoute vegetatie op de plaatranden.

In de modelberekening wordt gekeken of bij de eerstvolgende getijslag na gelijk water, waarop de doorlaat dichtgaat, een peilgrens in het meer (t.p.v. meetpaal BOM1) overschreven of onderschreden zou worden. Indien dit het geval is, blijven de schuiven in de Brouwerssluis gesloten tijdens de inlaatperiode danwel de uitlaatperiode. Er worden om het half uur korte forecasts gedaan waarbij 1 getijperiode (ca. 12 uur onder normale omstandigheden, of korter of langer: het model rekent tot het eerstvolgende gelijk water en dat kan ook sneller komen of bijvoorbeeld pas 24 uur later bij stormomstandigheden) vooruit wordt gerekend.

De aansturing van de Brouwerssluis wordt op afstand gedaan vanuit het Hydro Meteo Centrum (HMC) op basis van opgelegde stuurpeilen voor inlaten en uitlaten. Het opnieuw openen of gesloten houden van het kunstwerk na gelijk water wordt nu gestuurd doormiddel van het aanpassen van de minimale/maximale stuurpeilen: wanneer het maximum stuurpeil voor inlaten hoger is dan het actuele lokale meerpeil zorgt dit voor het openen van de kokers. Wanneer een peiloverschrijding wordt verwacht door het model, dan wordt een zeer laag maximumstuurpeil voor inlaten meegezonden naar het object, wat zorgt voor het gesloten houden van de Brouwersspuisluis. Voor het al dan niet kunnen spuien geldt het omgekeerde m.b.t. de stuurpeilen voor uitlaten. De daadwerkelijke sluiting wordt niet door het model bepaald, het kunstwerk opent/sluit zelf op basis van de berekende en aan het besturingssysteem toegeleverde stuurpeilen wanneer het verval over de sluis dit toelaat en volgens de op het SCADA-systeem opgegeven waardes (aantal kokers en schuifhoogte). Vanwege de constructie van het kunstwerk kan niet gestuurd worden tijdens een relatief groot verval over het kunstwerk, de schuiven zullen alleen bewogen worden bij een verval kleiner dan 60 cm. Om deze reden rekent het model altijd van gelijk water tot gelijk water.

Het Grevelingenmeer is met de Oosterschelde verbonden via de Flakkeese Spuisluis. In *Online Grevelingen* staat deze hevel normaal gesproken altijd open, danwel op een (door het HMC via het SCADA-systeem) ingesteld aantal kokers voor spuien/inlaten. Momenteel is deze gesloten vanwege de bouw van het Tidal Technology Center Grevelingendam.

Door de gemodelleerde waterstand te vergelijken met de gemeten waterstand ter plaatse van meetstation BOM1, wordt er een correctiedebiet bepaald dat op 2 locaties in het WAQUA-model wordt geloosd/onttrokken zodat de gesimuleerde waterstanden niet uit de pas gaan lopen.

Vervolgstappen operationeel model: RWsOS IWP

Volgens Rijkswaterstaat zou IWP (Instrument voor Waterpeilbeheer) op korte termijn (binnen 1 tot 2 jaar) *Online Grevelingen* moeten vervangen. IWP maakt gebruik van sturing via RTC. IWP genereert wel schuifstanden als advies en hiermee zou dus nauwkeuriger gestuurd kunnen worden op peilbeheer dan via *Online Grevelingen* (op basis hiervan worden de kokers in het kunstwerk alleen geopend of gesloten gehouden, tenzij dit door het HMC op het SCADA-

systeem en in de stuurparameters van *Online Grevelingen* zo wordt ingesteld, dat de sluis niet nodeloos dicht loopt). Op dit moment vinden al aanpassingen plaats in het SCADA-systeem van de Brouwerspuisluis om de opgegeven schuifstanden, die al in Matroos staan, geautomatiseerd op te kunnen halen. Door nauwkeuriger te sturen zal de Brouwerssluis minder vaak gesloten hoeven te worden en zal het totaal volume uitgewisseld water toenemen.

Toekomstig operationeel model

Naast de Brouwerssluis zal ook de Flakkeese Spuisluis op een gegeven moment weer in werking treden. Verder wordt er ook gekeken naar de realisatie van een nieuw doorlaatmiddel in de Brouwersdam om een grotere getijslag te introduceren in het Grevelingenmeer (project Getij Grevelingen) ten behoeve van de verbetering van de waterkwaliteit (mitigeren zuurstofloosheid in de diepere delen).

Het modeldomein van het nieuwe *D-HYDRO Grevelingen* beslaat momenteel alleen het Grevelingenmeer (begrensd door Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis). Om op dezelfde manier als in het huidige systeem het model te kunnen forceren op de zeerand (waterstanden t.h.v. BG8 als randvoorwaarde), zou bijv. een heel klein stukje van het zeedeel van *D-HYDRO Rijn-Maasmonding* aan het rekenrooster toegevoegd moeten worden. Datzelfde geldt aan de Oosterscheldezijde van de Grevelingendam ter plaatse van de Flakkeese spuisluis. Ook daar zou een kleine uitbreiding van de schematisatie nodig zijn om een waterstandsrandvoorwaarde te kunnen opleggen. Dit hoeft echter niet, want de resultaten van het kustmodel en het Oosterscheldemodel kunnen ook gebruikt worden i.c.m. het Grevelingenmodel om het verschil in waterstand aan binnen-/buitenzijde van de doorlaatmiddelen te bekijken. Het kan noodzakelijk zijn om een samenhangend model te hebben met een stuk voordelta met het oog op het effect van het nieuwe doorlaatmiddel in de Brouwersdam op de geomorfologie aan Noordzeezijde (kustdynamiek).

Het 3D *D-HYDRO Grevelingenmodel* (versie zoals opgeleverd in 2019) rekt in ca. 3,5 minuut een simulatie-dag door (op het Deltares h6-cluster met 2 nodes en 4 cores per nodes, oftewel 8 partities). Doordat dit model parallel gedraaid kan worden, is de rekentijd waarschijnlijk voldoende laag voor toepassing in een operationeel systeem. Op dit moment zitten er nog geen kunstwerken in het model – de verwachting is dat implementatie hiervan de rekensnelheid kan verlagen.

Beoogde toekomstige operationele aansturing

In de huidige situatie is het sturen door HMC op scheefstand in de Grevelingen zelf nog niet zo belangrijk, omdat het effect van de scheefstand door de geringe omvang van de doorlaatmiddelen gering is op het totale meerpeil en omdat in het Waterakkoord is vastgelegd dat het meerpeil t.h.v. BOM1 (in het midden van het meer) bepalend is. In de nabije toekomst (bij toepassing van het extra doorlaatmiddel) wordt scheefstand essentieel, omwille van dezelfde redenen: het effect van scheefstand rondom het object (groter verval en bredere spuiensters) zal wel degelijk merkbaar worden in het meerpeil vanwege het veel grotere volume uit te wisselen water, en er worden nieuwe afspraken gemaakt met de omgeving waarin scheefstand een rol gaat spelen in het maximumstuurpeil. Nu wordt er op de waterstand in het midden van het meer gestuurd, maar in de toekomst wordt mogelijk ook gekeken naar de waterstand ter plaatse van verschillende locaties in het Grevelingenmeer (bijv. broedplaatsen voor vogels) en zal ook de aansturing complexer gaan worden door zowel de opgelegde peilen voor getijslag als de additionele sturing van het nieuwe doorlaatmiddel en de Flakkeese Spuisluis.

In het verleden (voor circa 1999) is er naast sturing op het meerpeil ook op verversing/stratificatie gestuurd door bijvoorbeeld meer of minder water in te laten via de Brouwerssluis bij te lage zoutgehalten op de Noordzee, om daarmee te veel stratificatie in de Grevelingen te voorkomen.

Een mogelijke belangrijke doelvariabele voor toekomstige Grevelingenstudies omtrent waterkwaliteit is de zuurstofloosheid in het meer. Deze parameter zal waarschijnlijk eerst vooral binnen bureaustudies onderzocht worden (bijv. welk effect hebben verschillende doorspoelstrategieën op de wateruitwisseling en het zuurstofgehalte?), maar hiervoor kan op termijn mogelijk ook een operationeel 3D model gewenst zijn.

Zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen

Er wordt geconstateerd dat het mooi zou zijn om, waar mogelijk (binnen de HMC-omgeving), over te gaan stappen op de zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen. Dit kan niet van de een op de andere dag, daarom is het goed om niet te wachten tot de realisatie van het doorlaatmiddel maar om te overwegen om al eerste stappen met het toepassen van de D-HYDRO-modellen (in een pilot) te zetten.

Er zijn post-processing scripts beschikbaar voor het verwerken en visualiseren van D-HYDRO netCDF-modeluitvoer. Verder kan de gebruiker eenvoudig de modeluitvoer visualiseren met plotprogramma QuickPlot.

Daarnaast is opgemerkt dat vergelijkbare vragen omtrent operationele modelvoorspellingen spelen bij het Volkerak-Zoommeer (Zoomboom/IWP VZM) en het Veerse Meer (Veersemeerboom/IWP VM).

Welke acties/ontwikkelingen zijn nodig om in de toekomst *D-HYDRO Grevelingen* operationeel in te zetten?

- Allereerst is er consensus nodig over de toekomstige inzet van *D-HYDRO Grevelingen* en de rol die het heeft naast het lopende RWsOS-IWP traject. Naast afstemming tussen Rijkswaterstaat en Deltares, zal er op korte termijn ook Deltares-intern overleg plaatsvinden (bij RWsOS-IWP zijn Olav van Duin en Maarten Smoorenburg betrokken).
- Er moet uitgezocht worden of het functioneel mogelijk is om 3D modellen operationeel te restarten in RWsOS – voorstel is ook om dit snel te gaan testen binnen RWsOS om te kijken of dat ook inhoudelijk goed gaat i.r.t. temperatuur en zout.
- De kunstwerken (*general structures*) moeten ook in 3D binnen de D-HYDRO Suite kunnen werken – dit is niet op korte termijn ingepland. Daarnaast wordt voor de kunstwerken in de Grevelingen voorzien dat deze met een “lange duiker” (een *general structure* tussen niet direct naastgelegen rekencellen) gemodelleerd zullen gaan worden.
- Er zijn kennisvragen die zich richten op de morfologische impact op de Voordelta van het nieuwe doorlaatmiddel. Om deze vragen m.b.v. een modelstudie te beantwoorden, moet uitgezocht worden wanneer 3D-modellering i.c.m. morfologie mogelijk is en of het nieuwe D-HYDRO-model van de Grevelingen daar geschikt voor is.

E.2 Hoekpuntenanalyse D-HYDRO Grevelingen t.b.v. BOI

Op de volgende pagina's is de memo *Hoekpuntenanalyse D-HYDRO Grevelingen t.b.v. BOI* opgenomen.

Memo

Aan

RWS-WVL / Martin Scholten

Datum

25 juni 2020

Contactpersoon

David Kerkhoven

Ons kenmerk

11205259-007-ZKS-0004

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8145

E-mail

David.Kerkhoven@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 6

Onderwerp

Hoekpunten analyse D-HYDRO Grevelingen tbv BOI

1 Inleiding

Dit memo bevat een voorstel om een beperkte hoekpunten analyse uit te voeren met het nieuwe D-HYDRO model van de Grevelingen. Dit als onderdeel van het KPP2020 project voor de ontwikkeling van het D-HYDRO Grevelingen model (11205259-006). Met deze analyse kan een eerste indicatie verkregen worden van de geschiktheid van het model voor toepassing in het kader van het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (WBI2023). Aangezien er momenteel ook aan het ontwerp en de realisatie van een nieuw doorlaatmiddel voor de Grevelingen in de Brouwersdam wordt gewerkt, is bij het opstellen van de uitgangspunten voor de hoekpuntenanalyse ook alvast deels rekening gehouden met de beoogde situatie van gedempt getij na realisatie van het doorlaatmiddel.

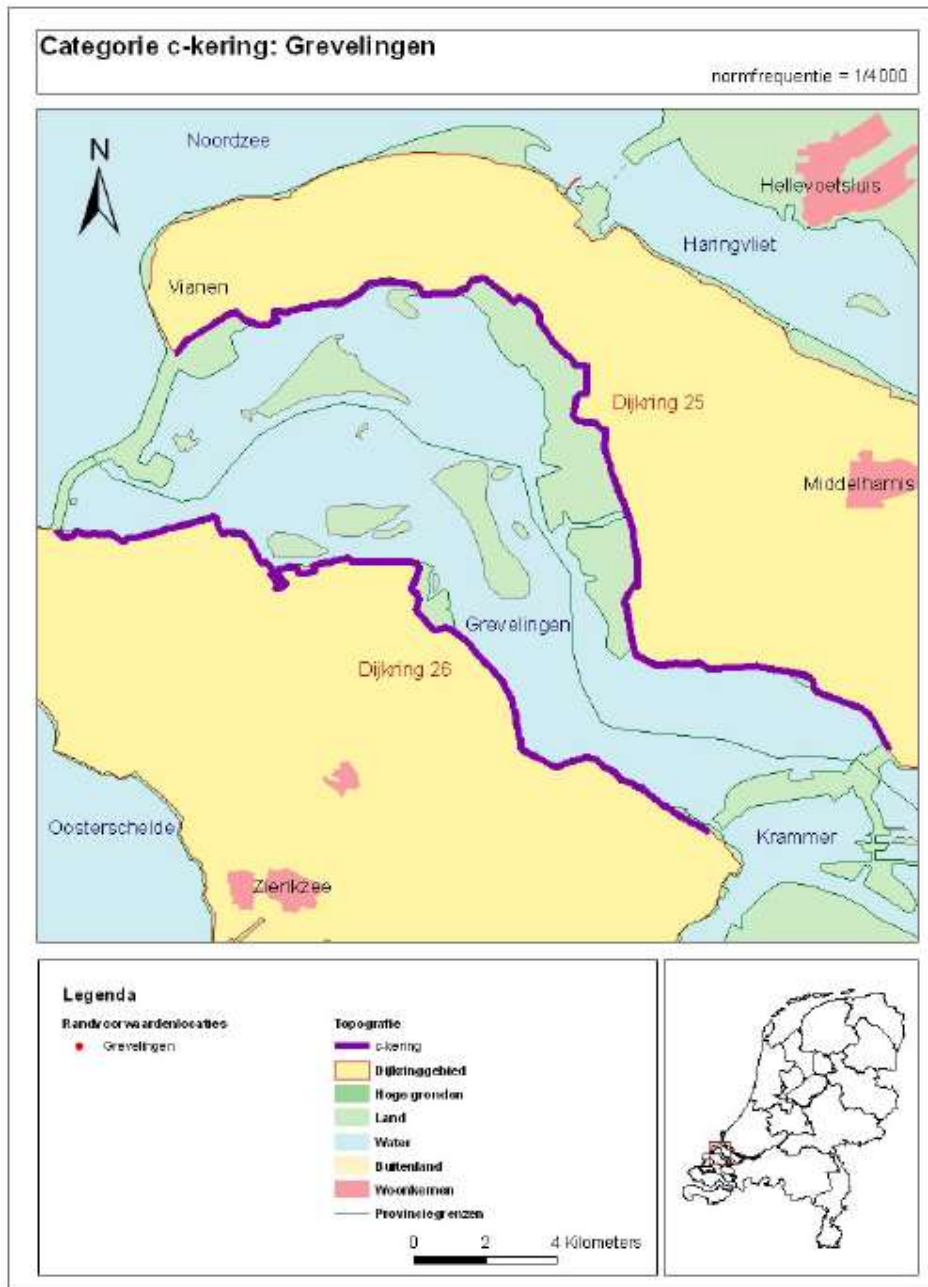
2 Grevelingenmeer

2.1 Keringen

De keringen langs het Grevelingenmeer behoren tot de categorie c-keringen, het betreft delen van dijkkringgebied 25 en dijkkringgebied 26. Er worden verschillende typen categorie c-keringen onderscheiden. De categorie c-keringen kunnen qua verschijningsvorm worden onderverdeeld in twee hoofdtypen:

1. gelegen langs oppervlaktewater dat van het buitenwater is afgesloten door een verbindende waterkering (categorie b);
2. niet langs oppervlaktewater gelegen, maar deel uitmakend van een dijkkring als gemeenschappelijke scheiding tussen twee aangrenzende dijkkringen - dijkkringscheidende c-keringen.

De c-keringen langs het Grevelingenmeer vallen onder de eerste categorie. Ten aanzien van de waterkerende kunstwerken in de verbindende waterkering (van de categorie b) geldt voor de Grevelingen momenteel het uitgangspunt dat de sluisen in de dammen langs de Grevelingen onder dagelijkse omstandigheden gesloten zijn [1] en niet falen.



Figuur 2-1: Overzicht van het gebied met daarbij de c-kering.

2.2 Forceringen

In het Grevelingenmeer wordt de grootste belastingen op de waterkeringen veroorzaakt door hoge meerpeilen of harde wind of een combinatie daarvan. In principe kan elke (grote) belasting op een waterkering worden veroorzaakt door een oneindig aantal combinaties van de bedreigingen meerpeil en wind (bestaande uit windrichting en windsnelheid). In het kader van het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen [1] langs de Grevelingen is in het verleden gebruik gemaakt van waterstanden uit WAQUA-berekeningen bij verschillende combinaties van meerpeilen, windrichtingen en windsnelheden. In totaal zijn 540 berekeningen uitgevoerd: vijf meerpeilen van het Grevelingenmeer zijn belast met 9 verschillende windsnelheden vanuit 12 windrichtingen.

Meerpeil [m NAP]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [graden]
-0.30	14	0
-0.15	19	30
0	22	60
0.15	25	90
0.30	28	120
	31	150
	34	180
	38	210
	42	240
		270
		300
		330

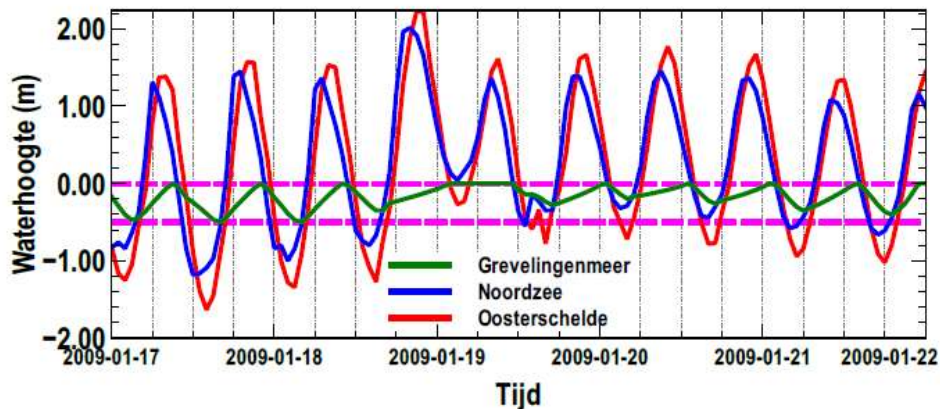
Tabel: Doorgerekende combinaties voor Grevelingenmeer (met als uitgangspunt gesloten dat de voorliggende verbindende waterkering (categorie b) in de normsituatie gesloten is en niet faalt)

2.3 Doorlaatmiddel

Het project Getij Grevelingen is momenteel bezig om de beslissing voor over de herintroductie van getij via een doorlaatmiddel in de Brouwersdam voor te bereiden, met als één van de doelen om de waterkwaliteit te verbeteren. Het terugbrengen van getij is geïntroduceerd als maatregel om de zuurstofproblematiek in het Grevelingenmeer op te lossen. Ook wordt er in het kader van MIRT Planfase Getij Grevelingen verder gekeken naar waterveiligheid van en in de toekomstige setting, bijvoorbeeld ook naar faalkans van het kunstwerk. Er zijn op basis van het ontwerp van het doorlaatmiddel momenteel verschillende ideeën over de wijze waarop een gewenst peilbeheer met introductie van een gedempt getij kan worden gerealiseerd.

Een van de laatste inzichten uit de analyse naar het doorlaatmiddel en peilbeheer [3] gaat uit van een kansrijke peilbeheerscenario van een middenpeil van NAP -30 cm (het huidige streefpeil is NAP -20 cm) en een (tweemaaldaagse) getijslag tot maximaal 40 cm. Daarbij wordt, zoals ook in het huidige peilbeheer, in het broedseizoen het middenpeil verlaagd en in de winter juist verhoogd voor beheerdoeleinden. Dit wordt het scenario 40/-30 genoemd.

Opvallend is dat hierbij ook de sturing van de Flakkeese Spuisluis i.r.t. de waterstanden op de Oosterschelde onderdeel is van het peilbeheer om de gewenste getijslag op het Grevelingenmeer te realiseren [4].



Figuur: Voorbeeld uit [4] van een peilscenario voor gedempt getij Grevelingenmeer met een gemiddelde getijslag 50 cm getijslag tweemaal daags op een middenpeil (gemiddelde waterstand) van NAP -20 cm.

3 Voorstel hoekpunten analyse

Voorgaande in ogenschouw nemende, wordt geadviseerd om bij de hoekpunten analyse niet alleen te kijken naar de forcering zoals deze in 2008 is gebruikt voor de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen, maar ook te kijken naar het effect van de introductie gedempt getij op de resultaten. Hierbij vanuit gaande dat ook het effect van het falen van het nieuwe doorlaatmiddel in de Brouwersdam een van de mogelijke scenario's kan worden die door BOI en/of het project MIRT Planfase Getij Grevelingen met het D-HYDRO model van de Grevelingen doorgerekend zal gaan worden.

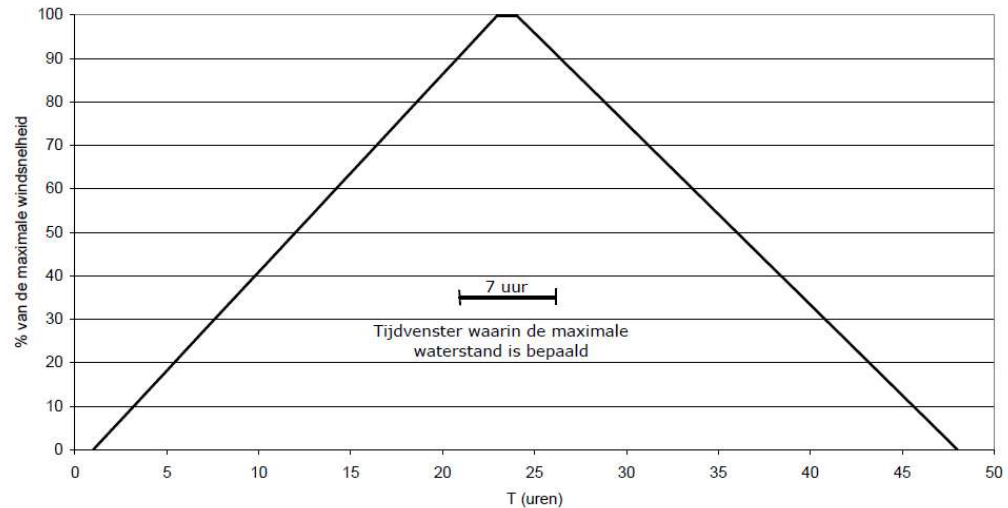
Samengevat stellen wij nu tot de volgende 5 sommen voor:

Sc.	Meerpeil (m)	Windsnelheid (m/s)	Windrichting (graden)	Doorlaatmiddel Getijslag - tweemaaldaags (m)
1	+0,30	42	270	gesloten
2	-0,30	42	270	Tweemaaldaags getijslag 40 cm (1)
3	0	42	270	Gesloten
4	+0,30	42	135	Gesloten
5	-0,30	42	135	Gesloten

(1) De manier waarop een tweemaal daags variërend meerpeil ten gevolge van getijslag wordt opgelegd in BOI kader is geen onderdeel van de hoekpuntenanalyse – Binnen de hoekpunten analyse proberen wij enkel een indruk te krijgen hoe het model zou reageren op een dergelijke variatie in het meerpeil en dan met name in relatie tot droogval en onderlopen voorland en de mogelijke consequenties die dit heeft op de rekentijden – een pragmatische manier waarop dit opgelegd zou kunnen worden is door middel van “lateraal polygoon” welke resulteert in een tweemaaldaags variërend meerpeil .

Er wordt bij de bovenstaande berekeningen uitgegaan van:

- Geen instroom van gemalen in het Grevelingen.
- Verloop van de wind met een trapezium van 48 uur gehanteerd – maximale wind halverwege van 2 uur



Windverloop Grevelingen (bron Achtergrondrapport HR categorie c-keringen Grevelingen)

In de hoekpunten analyse dient vervolgens gekeken te worden naar de volgende aspecten:

1. Rekestijden 2D en 3D
2. Reken stabiliteit (resultaten van waterstanden bekijken op basis van hoogfrequente uitvoer i.v.m. eventuele schommelingen in modelresultaten < 10 minuut uitvoer).
3. Droogval/onderlopen: Nat worden van hoge voorlanden om te controleren of waterstanden aan de teen van de dijk worden berekend.
4. Maximale waterstanden in de 7 uur rond de piek van de storm (verschillen 2D en 3D)

Op basis van de WBI2017 uitvoerlocaties (WBI2017_Grevelingen_25-4_v02.sqlite & WBI2017_Grevelingen_26-4_v02.sqlite, verkregen via Hans de Waal) zullen uitvoerlocaties in het D-HYDRO model worden geprikt voor uitvoer.



Uitvoerlocaties dijkeringen 25 en 26 uit WBI2017

De hoekpuntenanalyse wordt ook uitgevoerd met een WAQUA-model om de resultaten van beide modellen (waterstanden en rekentijden) met elkaar te kunnen vergelijken. Hiervoor zal het vijfde-generatie WAQUA-model *waqua-grevelingen-j12_5-v4* gebruikt worden.

4 Literatuur

[1] Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen categorie c, maart 2009,
<https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132704/hrc2006maart09.pdf>

[2] Hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen Achtergrondrapport keringen langs het Grevelingenmeer (dijkkring 25 en 26), HKV, PR1322 november 2008,
https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/132704/hr-c_dr25-26_achtergrondrapportagegrevelingen.pdf

Kopie aan
Julien Groenenboom

F Bijlage bij hoofdstuk 8 'Waterkwaliteitsmodellering'

Op de volgende pagina's is de memo *Samenvatting aanvullend onderzoek D-HYDRO-model Grevelingen* opgenomen.

Memo

Datum

16 november 2021

Contactpersoon

Arno Nolte
Jos van Gils
Julien Groenenboom

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 8430

E-mail

Arno.Nolte@deltares.nl
Jos.vanGils@deltares.nl
Julien.Groenenboom@deltares.nl

Aantal pagina's

1 van 12

Onderwerp

Samenvatting aanvullend onderzoek D-HYDRO-model Grevelingen

Hoofdconclusies

- A. De afgeregelde Delft3D 4- en D-HYDRO-modellen voor waterbeweging en waterkwaliteit van het Grevelingenmeer vertonen in algemene zin een zeer grote overeenkomst voor de huidige situatie (jaarsom 2008). De gemodelleerde zuurstofconcentraties voor een getij-scenario (TMBW) zijn ook redelijk vergelijkbaar; de verschillen tussen beide modellen zijn groter dan in de berekening voor jaarsom 2008. Ondanks de grote mate van overeenkomst wordt met Delft3D 4 een substantieel groter effect van getij op de specifieke indicator "langdurig zuurstofarm areaal" berekend dan met D-HYDRO (respectievelijk -59% versus -15%).
- B. Van de verschillen die tussen de hydrodynamische Delft3D 4- en D-HYDRO-modelschematisatie bestaan, hebben de (in D-HYDRO lagere) wind-dragcoëfficiënt en de (in D-HYDRO fijnere) horizontale roosterresolutie de grootste impact op de berekende langdurig zuurstofarme arealen. Beiden zorgen voor meer stratificatie. Het D-HYDRO-model berekent, bij een gelijke modelschematisatie (rekenrooster, numerieke instellingen, etc.), minder stratificatie dan Delft3D 4. Deze effecten lijken elkaar te compenseren in de afgeregelde hydrodynamische modellen.
 - o Door het wijzigen van slechts een van deze parameters gaat het model afwijken van de afgeregelde modelinstellingen en -keuzes waardoor de modelkwaliteit verslechtert.
- C. De verschillen die tussen de Delft3D 4- en D-HYDRO-modelresultaten bestaan kunnen, naast bovengenoemde hydrodynamische effecten op de stratificatie die elkaar lijken te compenseren, vermoedelijk voor een groot deel toegedicht worden aan de koppelingmethodiek.
 - o Het Delft3D 4-model wordt offline-gekoppeld. Het D-HYDRO-model maakt gebruik van de nieuwe functionaliteit om online te koppelen.
 - o De keuze voor online- of offline-koppeling houdt onder andere in dat er een andere rekenmethode voor het transport van de waterkwaliteitsstoffen wordt toegepast.
- D. Er wordt aanbevolen om de indicator "langdurig zuurstofarm areaal" niet toe te passen in een enkelvoudige vergelijking tussen het berekeningsresultaat voor de huidige situatie en een getij-scenario. Een gevoeligheidsanalyse met meerdere berekeningen is nodig om een bandbreedte te bepalen. Daarnaast wordt aanbevolen om ook naar andere, nog te bepalen, (minder gevoelige) indicatoren te kijken.
 - o Het verschil in de door het Delft3D 4- en D-HYDRO-model berekende impact (procentuele afname van de indicator) is erg gevoelig gebleken voor de toegepaste drempelwaarden in de indicator (Z aaneengesloten dagen, zuurstofconcentratie kleiner dan 3 mg/L).
- E. Het D-HYDRO Grevelingenmodel is in principe geschikt voor toepassing voor hydrodynamica en waterkwaliteit. Een nieuwe of aanvullende definitie van het doelbereik (set indicatoren) is wel noodzakelijk. Dat doelbereik moet aansluiten bij de wijze van modellering.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en vraagstelling aanvullende diagnose

In 2019 en 2020 is voor de Grevelingen gewerkt aan de modeltransitie (omzetting) van het 3D Delft3D 4-model voor waterkwaliteit naar de D-HYDRO modelsuite. Voor de waterbeweging wordt gebruik gemaakt van het nieuwe 3D D-HYDRO model voor de Grevelingen dat nieuw is opgezet en gekalibreerd en gevalideerd ten opzichte van metingen.

Voor waterkwaliteit is dit het eerste gebiedsmodel waarvoor de transitie van Delft3D 4 naar D-HYDRO is uitgevoerd. Doel van de transitie is in eerste instantie om een model-modelvergelijking uit te voeren en eventuele problemen of obstakels van/met de nieuwe D-HYDRO modelsoftware te identificeren. Voor de waterbeweging zijn al de nodige modellen omgezet van Delft3D 4 naar D-HYDRO, waarbij bij alle modellen een goede overeenkomst in modelresultaten is bereikt. In tweede instantie is het doel om het nieuwe D-HYDRO waterkwaliteitsmodel in beheer en onderhoud (B&O) te nemen en het oude Delft3D 4-model te vervangen. Dit kan uiteraard alleen als er geen blokkerende problemen of obstakels geïdentificeerd zouden worden.

Het Delft3D 4-model voor waterbeweging en waterkwaliteit is in de periode 2006-2010 opgezet en ingezet in de MER Waterkwaliteit Grevelingenmeer. Doel van de modelstudie destijds was om te onderzoeken hoeveel getij nodig is om de zuurstofuitputting in de diepe delen van het Grevelingenmeer te reduceren. Getij wordt gerealiseerd door een doorlaatmiddel in de Brouwersdam. Als kwantitatieve indicator is toentertijd het "langdurig zuurstofarm areaal" geïntroduceerd, gedefinieerd als het bodemoppervlak waarvoor het zuurstofgehalte van het bovenstaande water tenminste 7 aaneengesloten dagen minder dan 3 mg/L is. Het Delft3D 4-model is opgezet en gekalibreerd en gevalideerd voor de jaren 2000 en 2008.

In 2019 is het D-HYDRO waterkwaliteitsmodel voor het jaar 2008 omgezet en zijn de modelresultaten vergeleken met het Delft3D 4-model. Die vergelijking werd op hoofdlijnen als goed beoordeeld. Vanwege het belang van de toepassing voor het effect van getij is in 2020 een getijscenario met D-HYDRO doorgerekend en vergeleken met de Delft3D 4-modelresultaten. Uit de vergelijking bleek dat het nieuwe D-HYDRO-model, in tegenstelling tot het oude Delft3D 4-model, een tegengesteld effect van de introductie van het getij berekende op basis van de gedefinieerde zuurstofindicator. De reden voor het afwijkende resultaat was niet duidelijk. Voor andere modelresultaten zoals nutriënten- en chlorofyl-a-concentratie in de oppervlaktelaag was de overeenkomst overigens wel goed.

Eerste resultaten (dd. september 2020) voor indicator "langdurig zuurstofarm areaal"

	Zuurstofloos areaal (Jaarsom 2008)	Zuurstofloos areaal (na introductie getij (TMBW))	Verschil (ha)	Verschil (%)
Gesimuleerd met Delft3D 4	1305 ha	638 ha	-667	-52%
Gesimuleerd met D-HYDRO	1214 ha	1451 ha	237	+20%

Naar aanleiding hiervan is in de periode oktober 2020-maart 2021 onderzoek gedaan om de volgende twee vragen te beantwoorden:

1. Wat is de oorzaak of zijn de oorzaken van het verschil tussen de modeluitkomsten van Delft3D 4 en D-HYDRO? En kan na vaststelling hiervan een besluit genomen worden over de acceptatie van de 3D modellering Grevelingen in D-HYDRO?

2. Wat zijn de implicaties van de verschillen in uitkomsten voor onze inzichten ten aanzien van het functioneren van het watersysteem Grevelingen in het algemeen en het effect van getij op de zuurstofhuishouding in het bijzonder?

De eerste vraag is een model-technische vraag over (de combinatie van) modelsoftware en modeltoepassing voor de Grevelingen. De modelsoftware omvat de verschillen tussen Delft3D 4 en D-HYDRO. De modeltoepassing omvat de verschillen in concepten, aannames en keuzes voor onder andere het rekenrooster, numerieke oplossingsmethode en parameterwaarden in de modelinvoer. In de uitgevoerde vergelijking staat de modeltoepassing centraal, maar is ook geanalyseerd in hoeverre verschillen in de modelsoftware een rol spelen.

De tweede vraag is een duidings- en adviesvraag over de juistheid en bruikbaarheid van de oorspronkelijke aanname dat de waterkwaliteit van de Grevelingen duurzaam wordt verbeterd wanneer de zuurstofuitputting in de diepe delen wordt gereduceerd door een beperkte getijbeweging op het meer terug te brengen. Het langdurig zuurstofarme areaal is daarbij eerder als indicator voor de waterkwaliteit gekozen. In het lopende project Getij Grevelingen wordt onderzoek gedaan naar een bredere set indicatoren. De duidings- en adviesvraag wordt daarom breder bekeken dan alleen de indicator langdurig zuurstofarm areaal.

1.2 Korte karakterisering gebruikte modellen en software

1.2.1 Modellen

In het 'Getij Grevelingen'-project is gebruik gemaakt van het Delft3D 4-waterkwaliteitsmodel dat in beheer en onderhoud is:

- Opgezet en gekalibreerd/gevalideerd in 2008-2010 (Hydrodynamisch model vanaf 2006)
- Hydrodynamica (Delft3D-FLOW) en waterkwaliteit (Delft3D-WAQ met DELWAQ rekenhart) worden sequentieel gesimuleerd (offline-gekoppeld). Informatie-uitwisseling vindt plaats via koppelingsbestanden, met een tijdsinterval van 1 uur¹.

Het zesde-generatie waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen maakt gebruik van D-HYDRO:

- Omgezet en vergeleken met Delft3D 4 in 2019-2020
- Hydrodynamica en waterkwaliteit worden simultaan gesimuleerd (online-gekoppeld). Het transport van stoffen vindt op iedere hydrodynamische rekentijdstap plaats en ten behoeve van de waterkwaliteitsprocessen vindt er informatie-uitwisseling met de waterkwaliteitsmodule plaats. Dit gebeurt met een tijdsinterval van 1 uur.

Voor de modelontwikkeling van het zesde-generatie hydrodynamische D-Flow FM-model is opnieuw naar de wensen/eisen aan het model gekeken. Daarnaast sluiten de modelinstellingen aan bij de overige zesde-generatie D-HYDRO-modellen en deze kunnen hierdoor bewust afwijken van het voorgaande Delft3D 4-Grevelingenmodel. Het model is geen directe omzetting van het voorgaande Delft3D-FLOW model en er zijn daarom logischerwijs meerdere verschillen tussen beide modellen.

Het waterkwaliteitsmodel is wel een directe omzetting van de oude modelinvoer naar modelinvoer die geschikt is voor de nieuwe software (D-HYDRO). Tijdens het uitzoekwerk bleek de transitie (ten tijde van september 2020) toch nog niet succesvol te zijn uitgevoerd; er zaten nog inconsistenties tussen het D-HYDRO-waterkwaliteitsmodel en het bestaande Delft3D 4-waterkwaliteitsmodel in o.a. de processen, bodeminitialisatie en randvoorwaarden. Een deel

¹ Hierbij worden voor het volume de op dat moment optredende waarden gebruikt en voor de debieten de gemiddelde waarde gedurende het tijdsinterval. Hierdoor is de waterbeweging volumebehoudend. Voor de turbulente grootheden worden de op dat moment optredende waarden gebruikt.

van de in september geconstateerde verschillen in modelresultaten bleek hierdoor te worden veroorzaakt. Voor de in dit document gepresenteerde simulaties is dat gecorrigeerd en gaat het (dus) over de nog resterende verschillen.

1.2.2 Software

De hydrodynamica module van D-HYDRO is ten opzichte van Delft3D-FLOW, vanwege de overgang van een gestructureerd op een ongestructureerd rooster, vrijwel integraal opnieuw geprogrammeerd. Daarbij is vaak gestreefd naar continuïteit en hergebruik, maar is soms ook bewust een andere aanpak gekozen (o.a. vanwege de overstap van gestructureerde rekenroosters (Delft3D 4) naar ongestructureerde roosters (D-HYDRO)).

De waterkwaliteitsmodule van D-HYDRO gebruikt voor de biochemische processen dezelfde code als in Delft3D-WAQ wordt gebruikt. Deze code heeft tussen 2008-2010 en 2019-2020 een substantiële upgrade ondergaan, die in principe backward compatible is. De waterkwaliteitsmodule van D-HYDRO gebruikt bij een online berekening voor het transport van stoffen de code van de hydrodynamica module (ook gebruikt voor zout en temperatuur). De online berekening wordt als de gewenste standaardaanpak voor de zesde-generatie waterkwaliteitsmodellen gezien. Een offline-berekening is overigens technisch nog steeds mogelijk.

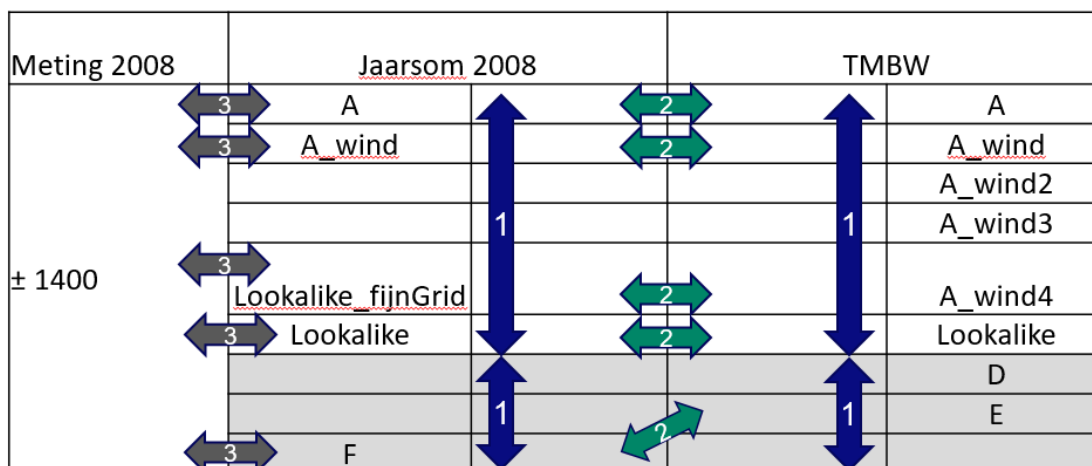
1.3 Aanpak

1.3.1 Inleiding

Tijdens het onderzoek is gewerkt met drie type vergelijkingen:

1. Model-model-vergelijking → Toetsing van combinatie modelsoftware en modeltoepassing
2. Jaarsom-TMBW-vergelijking → Toetsing van effect van “getij”
3. Meting-model-vergelijking → Toetsing van modelperformance, modelkalibratie/validatie

Hieronder is ter illustratie² een figuur opgenomen uit een van de bijeenkomsten waarin deze drie vergelijkingen aangegeven zijn.



1.3.2 Model-model-vergelijking

Doordat het hydrodynamische D-HYDRO-model geen directe omzetting van het voorgaande Delft3D-FLOW model is, zijn er veel verschillen tussen beide modellen. Om de gevoeligheid

² Een verdere beschrijving van de verschillende simulaties en de bijbehorende berekende arealen zijn in dit figuur weggelaten. “1400” geeft het, op metingen gebaseerde, hectare zuurstofarm areaal aan.

van deze verschillende modelinstellingen en -keuzes op de indicator te bepalen, zijn er simulaties gedaan waarbij steeds een enkele parameter of modelkeuze gewijzigd is. Hierdoor is het model stap-voor-stap meer op het Delft3D 4-model gaan lijken (of vice versa). De som die qua modelinstellingen en modelkeuzes het dichtst in de buurt komt van Delft3D 4, maar nog wel in de D-HYDRO-software gemodelleerd wordt, is in deze exercitie *Som Lookalike* genoemd (met een online-koppeling tussen de hydrodynamica en waterkwaliteit).

1.3.3 Jaarsom-TMBW-vergelijking

De tweede vergelijking richt zich op de impact van het getij-scenario. Oftewel, de (procentuele) afname van de indicator wanneer "Jaarsom 2008" wordt vergeleken met het getij-scenario "TMBW".

1.3.4 Meting-model-vergelijking

Op basis van metingen is vastgesteld dat de indicator in 2008 een waarde van ca. 1400 ha. heeft. Naast deze grootte zijn ook de GTSO-metingen (Saliniteit, temperatuur en zuurstofgehalte) beschikbaar. De kwaliteit van de verschillende jaarsommen (zie model-model-vergelijking) kan worden bepaald door de berekende waarden van saliniteit, temperatuur en zuurstofgehalte te vergelijken met de metingen (meting-model-vergelijking). Voor het TMBW-scenario, waarin het toekomstige doorlaatmiddel is gemodelleerd, zijn logischerwijs geen metingen beschikbaar.

2 Bevindingen: hydrodynamisch model

2.1 Model-model-vergelijking (type 1)

Uit het gevoeligheidsonderzoek (de 'afpelactie'), waarbij de modelinstellingen en -keuzes van het D-HYDRO-model stap-voor-stap gewijzigd zijn naar die van het Delft3D 4-model, is gebleken dat (van de instellingen die anders waren in de twee modelschematisaties) de volgende parameters de grootste invloed hadden op de indicator:

- o de toegepaste windforcering (C_d -coëfficiënt);
- o de horizontale resolutie/bodemschematisatie;
- o de parameter *soiltempthick* (parameter die bepaalt of alle zoninstraling op ondiep water in de waterkolom wordt opgenomen en of/hoeveel warmte in de bodem wordt gebufferd).

Uit de model-model-vergelijking is verder gebleken dat *Som Lookalike* minder gestratificeerd is dan het afgeregelde Delft3D 4-model (*Som F*) en het afgeregelde D-HYDRO-model (*Som A*). Dat het afgeregelde D-HYDRO-model meer stratificatie berekent, komt hoogstwaarschijnlijk door de hogere horizontale resolutie, de hogere waarde voor *soiltempthick* en de iets hogere verticale resolutie in de diepere delen.

Op basis van de uitgevoerde analyses is geconcludeerd dat:

- o Er geen substantieel verschil is in saliniteit, temperatuur, dichtheid en de leeftijd van het water tussen het afgeregelde Delft3D 4- en het afgeregelde D-HYDRO hydrodynamisch model. (model-model-vergelijking). Dit is in overeenstemming met de bevindingen in het rapport over de D-HYDRO modelontwikkeling.

2.2 Jaarsom-TMBW-vergelijking (type 2)

Het verschil tussen de Jaarsom 2008- en de TMBW-som kan worden beschreven als "het effect van getij". In de Jaarsom worden gemeten debieten door de Brouwersluis en van de poldergemalen en neerslag en verdamping opgelegd aan het 3D model. De Flakkeese spuisluis was in 2008 nog niet in gebruik. In het TMBW-getijscenario wordt een waterbalans aan het 3D model opgelegd met debieten door de Brouwerssluis, het doorlaatmiddel en de Flakkeese spuisluis. In de TMBW-som zijn geen regenval/verdamping en polderlozingen/gemalen opgenomen. De concentraties in de ingaande debieten zijn voor Jaarsom 2008 en TMBW gelijk.

Door het verschil te berekenen tussen de modelresultaten van het TMBW-scenario en Jaarsom2008, is de "impact van getij TMBW" bepaald. In dit document³ wordt de model-model-vergelijking gepresenteerd voor drie varianten: De afgeregelde/gevalideerde Delft3D 4-som (*Som F*), de afgeregelde/gevalideerde D-HYDRO Som (*Som A*) en de *Som Lookalike*.

De impact van het TMBW-scenario is in vier type figuren (tijdseries, ztplots, horizontale en verticale dwarsdoorsnedes) gevisualiseerd. Daarnaast is voor de 6 simulaties (3 sommen * 2 scenario's (Jaarsom en TMBW)) de leeftijd van het water (verblijftijd) berekend door het toevoegen van twee zogenoemde tracers (waarvan één een afbraakcoëfficiënt heeft) in het hydrodynamisch model.

Op basis de uitgevoerde analyses wordt geconcludeerd dat:

- o Er geen substantieel verschil is in de impact van het getij-scenario op de saliniteit, temperatuur, dichtheid en leeftijd van het water tussen het afgeregelde Delft3D 4- en het afgeregelde D-HYDRO-model. (Jaarsom-TMBW-vergelijking)

³ Er zijn veel meer berekeningen en model-model-vergelijkingen gedaan. Die zijn hier niet gerapporteerd.

2.3 Meting-model-vergelijking (type 3)

Zowel het hydrodynamische Delft3D 4- als het D-HYDRO-model zijn onderworpen aan gevoeligheidstesten tijdens de modelontwikkeling. Vervolgens zijn de modellen afgeregeld/gekalibreerd en gevalideerd door de modelresultaten te vergelijken met de GTSO-metingen. Beide opgeleverde modellen zijn goed in staat om (het transport van) saliniteit en temperatuur te berekenen. Voor de details en kwantitatieve kengetallen wordt verwezen naar de rapportages.

Zoals beschreven in de paragraaf over de model-model-vergelijking, is de *Som Lookalike* minder gestratificeerd dan de afgeregelde Delft3D 4-som (*Som F*) en het afgeregelde D-HYDRO-model (*Som A*). In vergelijking met metingen berekent *Som Lookalike* te weinig stratificatie. Aangezien dit model qua modelinstellingen en -keuzes overeenkomt met het afgeregelde Delft3D 4-model, is deze onderschatting van de stratificatie mogelijk te wijten aan verschillen in de softwarecode van Delft3D 4 en D-HYDRO.

Op basis van de uitgevoerde analyses wordt geconstateerd dat:

- Er geen substantieel verschil is tussen het afgeregelde Delft3D 4- en het afgeregelde D-HYDRO-model. Beide modellen zijn voor hydrodynamica in de huidige situatie even goed.

3 Bevindingen: waterkwaliteitsmodel

3.1 Resultaten indicator zuurstofarm areaal

Met gelijke modelinvoer⁴ en -instellingen geeft onderstaande tabel de resulterende waarden voor de indicator “langdurig zuurstofarm areaal”.

Som	Jaarsom 2008 (ha)	TMBW (ha)	Vershil (ha)	Vershil (%)
A	1764	1504	-260	-15%
Lookalike	1192	777	-415	-35%
F/D	1525	631	-894	-59%

Op basis van deze sommen is het beeld als volgt: Het afgeregeld D-HYDRO-model (*Som A*) berekent nu ook een positieve invloed van het TMBW-scenario (dat wil zeggen een afname) op het zuurstofarme areaal. De impact/het procentuele verschil (in zowel de *Som A* als in *Som Lookalike*) is in D-HYDRO nog wel significant kleiner dan in het Delft3D 4-model. De conclusie dat in D-HYDRO een kleiner effect van getij op het langdurig zuurstofarm areaal wordt berekend dan in Delft3D 4 blijft daarmee overeind.

3.2 Veranderingen in het systeem als gevolg van de herintroductie van getij

De uitgevoerde analyse draait om de impact van de herintroductie van het getij in de Grevelingen. De herintroductie van getij leidt tot twee grote veranderingen in het systeem.

Ten eerste neemt de aanvoer van nutriënten toe. Dat leidt tot een grotere primaire productie, een grotere productie van detritus, een grotere neerwaartse flux van sedimenterend detritus en een grotere zuurstofvraag in en bij de bodem. Ook de import van organisch materiaal en dus zuurstofvraag vanuit de Voordelta neemt toe. Ten tweede veranderen de stoftransporten in het systeem. Dat leidt tot een hoger transport van zuurstof naar de diepere delen.

Beide veranderingen worden door Delft3D 4 en D-HYDRO op een zeer vergelijkbare manier gesimuleerd. De balans tussen beide veranderingen bepaalt uiteindelijk het netto effect op de zuurstofloosheid bij de bodem. Bij het kwantificeren van de impact in de indicator zuurstofarm areaal pakt dit zichtbaar in het D-HYDRO-model anders uit dan in het Delft3D 4-model.

3.3 Online- versus offline-koppeling

Op basis van het uitgevoerde onderzoek is ondubbelzinnig vast komen te staan dat gebruik van een offline-gekoppeld waterkwaliteitsmodel (zoals in Delft3D 4) leidt tot een groter positief effect van herintroductie van getij dan een online-gekoppeld model (zoals in D-HYDRO). Dit blijkt uit het herhalen van de D-HYDRO-berekening met een offline-gekoppeld waterkwaliteitsmodel (deze functionaliteit is nog steeds beschikbaar).

⁴ Een van de laatste wijzigingen in de uitgevoerde simulaties is het corrigeren van inconsistenties in de randvoorwaarden van de waterkwaliteitsmodellering. De belangrijkste wijziging zit in de concentratie van organisch detritus (DetC en DetN). In het “Getij Grevelingen”-project zijn de concentraties die deze gehalten op de Noordzee representeren (en dus gebruikt worden als concentratie t.p.v. de Brouwerssluis en het doorlaatmiddel) aangepast. Dit was een onbedoeld verschil tussen de Jaarsom en de TMBW-som.

Vergelijking online- en offline-koppeling in D-HYDRO

Som	Jaarsom 2008 (ha)	TMBW (ha)	Verschil (ha)	Verschil (%)
A (online) [D-HYDRO]	1764	1504	-260	-15%
A (offline) [D-HYDRO]	1271	607	-664	-52%
F/D (offline) [Delft3D 4]	1525	631	-894	-59%

De mogelijkheid om online te rekenen is nieuw, dus deze vaststelling kan pas nu gemaakt worden. Dat was niet mogelijk in 2008-2010.

Vergelijkende online- en offline-waterkwaliteitsberekeningen hebben tot dusverre alleen voor een 2Dv-testmodel plaatsgevonden, en leidden daar tot verwaarloosbare verschillen. Het is nog niet bekend of het grote verschil tussen online- en offline-koppeling specifiek is voor de zwak-dynamische situatie in de Grevelingen, al dan niet in combinatie met de gevoelige indicator.

De oorzaak van de verschillen ligt enerzijds aan het tijdsinterval van gegevensoverdracht (per uur offline, per tijdstap online) en anderzijds aan de verschillende numerieke methoden (DELWAQ-offline versus D-HYDRO-online).

Het is op theoretische gronden waarschijnlijk dat het online resultaat betrouwbaarder is dan het offline resultaat. Een hogere frequentie van uitwisseling van informatie is altijd beter. Daarnaast geldt dat hoe dynamischer het systeem is, hoe hoger de frequentie van informatie-uitwisseling moet zijn. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor het grotere verschil in berekend zuurstofarm areaal in het dynamische TMBW-scenario ten opzichte van de jaarsom 2008.

In het online-gekoppelde model gebruikt het waterkwaliteitsmodel hetzelfde transportschema als dat voor temperatuur en zout, parameters die veel eenduidiger te kalibreren en valideren zijn dan de waterkwaliteitsvariabelen. Voor waterkwaliteitsvariabelen spelen biochemische fluxen een rol die relatief onzeker zijn. In de offline-berekening zijn de transportschema's verschillend, wat tot inconsistenties leidt waarvan de gevolgen niet objectief vast te stellen zijn.

3.4 Gevoeligheid van de gesimuleerde waterkwaliteit

Tijdens de testberekeningen is duidelijk geworden dat de gesimuleerde indicator "langdurig zuurstofarm areaal" gevoelig reageert op veranderingen in de invoer van het model en op het gebruik van andere software (D-HYDRO versus Delft3D 4, oudere versus nieuwere versies van Delft3D 4).

Die gevoeligheid is steeds geconstateerd op basis van de indicator "langdurig zuurstofarm areaal", omdat besluitvorming rondom het doorlaatmiddel in belangrijke mate op deze indicator is gebaseerd. Incidenteel is gekeken of een andere indicator deze gevoeligheid ook vertoont. Er is bijvoorbeeld gekeken naar een andere drempelwaarde dan 3 mg/L, een andere drempelwaarde dan 7 aaneengesloten dagen en het zuurstofloos volume in plaats van het areaal. Hoewel deze tests zeker geen waterdicht bewijs leveren, bestaat de indruk dat de geconstateerde gevoeligheid niet slechts aan de eerstgenoemde indicator kleeft. De gevoeligheid lijkt betrekking te hebben op de zuurstofhuishouding van de diepere delen van de Grevelingen in algemene zin.

Het waterkwaliteitsmodel is tot op heden niet opnieuw gekalibreerd. Het uitgangspunt was de oude opzet uit Delft3D 4, 1-op-1 over te nemen in D-HYDRO. Gezien de software-technische overeenkomst tussen beide rekensystemen is dat voor de biochemische processen logisch. Er

is echter een verschil in de modellering van transport. Herkalibratie zou daarom nodig kunnen zijn. Dit lijkt echter voor het omgezette D-HYDRO-waterkwaliteitsmodel niet direct nodig; over het algemeen komen de modelresultaten goed overeen met de metingen.

De geconstateerde gevoeligheid roept de vraag op of de zuurstofhuishouding van de diepere delen van de Grevelingen überhaupt te voorspellen is met dit type modellen. Het is bekend dat waterkwaliteitsmodellen “over-geparameteriseerd” zijn. Dat wil zeggen dat er meerdere sets modelparameters zijn, die allemaal een vergelijkbare mate van overeenkomst met metingen laten zien.⁵ Als deze verschillende parameter sets gebruikt worden om een scenario door te rekenen, dan bestaat de kans dat ze een ander resultaat geven.

Als bovenstaande op de Grevelingen van toepassing is, dan is het dus mogelijk dat de Delft3D 4- en D-HYDRO-modellen allebei (even) goed in staat zijn de gemeten zuurstofgehalten in de Grevelingen te reproduceren, en toch een verschillende respons op de herintroductie van getij laten zien.

Het is echter nog te vroeg om deze conclusie te trekken (zie ook de opmerking over herkalibratie). De vergelijking tussen modelresultaten en metingen heeft (voor beide waterkwaliteitsmodellen) tot op heden met name plaatsgevonden op basis van visuele vergelijking van tijdseries. Daarnaast is vanuit de profielmetingen op 20 GTSO stations een “gemeten areaal zuurstofloos” voor het hele bekken afgeleid en vergeleken met het gesimuleerde areaal. Gezien de gevoeligheid van het systeem kunnen we niet vaststellen dat of D-HYDRO of Delft3D 4 net iets beter aansluit op de metingen, en dat dat de verschillende respons op herintroductie van getij (deels) verklaart.

Tenslotte stellen we vast dat in de Grevelingen-simulaties (D-HYDRO en Delft3D 4) op uitgebreide schaal zuurstofloosheid (concentratie <0 mg/L) optreedt. De gebruikte biochemische procesformuleringen zijn daar eigenlijk niet voor bedoeld. Ze impliceren een sterke vereenvoudiging van de biochemie, wat waarschijnlijk leidt tot extra onzekerheid in de uitkomsten.

Op basis van de analyses wordt het volgende geconcludeerd:

- Het toepassen van iets andere hydrodynamische modelinstellingen (consistent in de jaarsom en in de getij-som) beïnvloedt de berekende arealen en daarmee de impact van het TMBW-getij-scenario. Echter, het wijzigen van deze modelinstellingen zorgt ook voor een mindere modelkwaliteit (gebaseerd op de vergelijking van de jaarsom met de metingen). Ondanks het wijzigen van de modelinstellingen blijft het “effect van getij” in D-HYDRO substantieel kleiner dan in Delft3D 4.
- De indicator “langdurig zuurstofarm areaal” is gevoelig voor keuzes in de modelopzet en modelinstellingen. Omdat er te veel vrijheidsgraden zijn (overparameterisatie) in relatie tot de beschikbare metingen is er te weinig informatie om te zeggen welk model “beter” is of “waar”. Het omgaan met dergelijke onzekerheden vraagt een andere manier van modelinzet dan een enkelvoudige vergelijking tussen Jaarsom en getij-scenario. Voor relevante parameters of modelinstelling zou met een bandbreedte gerekend moeten worden, waarna ook van de indicator een bandbreedte bepaald kan worden.

⁵ Eén reden hiervoor is dat waterkwaliteitsmetingen vaak maar enkele van de parameters betreffen die tezamen de waterkwaliteit beschrijven.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Begrip watersysteem Grevelingen

- De zuurstofhuishouding in de diepe delen van het Grevelingenmeer gedefinieerd als “langdurig zuurstofarm areaal” en met name het effect van getij daarop is niet met voldoende zekerheid (kwantitatief) voorspelbaar gezien 1) de hoeveelheid vrijheidsgraden in het model, en 2) het logischerwijs ontbreken van metingen om de (nog niet bestaande) getijsituatie mee te vergelijken.
- Met gebruik van begrippen als de Potential Energy Anomaly en het in deelgebieden analyseren en onderling vergelijken van modelresultaten is veel geleerd en te leren over het systeemgedrag.

4.2 Gebruik en doorontwikkeling D-HYDRO-model Grevelingen

- Er is meer aandacht nodig voor (de ontwikkeling van) een aanpak waarin de fundamentele onzekerheid van dit type modellering een plek krijgt: Gevoeligheds- en onzekerheidsanalyse.
- Er is in het vervolg een veel rigoureuze controle van invoer nodig. Vanwege het zwak-dynamische systeem kunnen soms kleine wijzigingen in modelinstellingen tot substantieel andere modelresultaten leiden. Dit komt doordat eenmaal geïntroduceerde verschillen kunnen ‘accumuleren’, dit is minder het geval in bijv. getijgedomineerde systemen. Bij zuurstofmodellering zijn events, waarbij zuurstofconcentraties in korte tijd fors kunnen veranderen, belangrijk. Dit maakt zuurstof zeer gevoelig voor veranderingen in bijvoorbeeld de watertemperatuur/stratificatie.
- Er wordt aanbevolen om uitgebreidere biochemische procesformuleringen, die ook geschikt zijn voor zuurstofloze condities, te implementeren.

4.3 Software-ontwikkeling D-HYDRO

- In vergelijking met metingen berekent *Som Lookalike* te weinig stratificatie. Aangezien dit model qua modelinstellingen en -keuzes overeenkomt met het afgeregelde Delft3D 4-model, is deze onderschatting van de stratificatie mogelijk te wijten aan verschillen in de softwarecode van Delft3D 4 en D-HYDRO. Zo is bijvoorbeeld voor z-lagen de discretisatie van de horizontale advection en de turbulentiegrootheden in de transportvergelijking sterk verschillend in beide softwaresystemen. Aanbevolen wordt om verder uit te zoeken waarom D-HYDRO, bij een gelijke modelschematisatie, minder menging berekent dan Delft3D 4.
- Er zijn nog geen gedocumenteerde vergelijkingen beschikbaar tussen online- en offline-gekoppelde simulaties in D-HYDRO. Het wordt aanbevolen om naast schematische testcases, ook tests uit te voeren met bijv. het D-HYDRO Grevelingenmodel (eerste tests zijn in dit project uitgevoerd) en een D-HYDRO-model dat juist een dynamischer systeem beschrijft.
- Tijdens de uitvoering van dit project zijn verschillende software-issues aan de Deltares software-afdeling gerapporteerd. Een overzicht is te vinden in bijlage A.

A Gerapporteerde software-issues

In dit project zijn verschillende software-issues aan de Deltares software-afdeling gerapporteerd. In onderstaand overzicht is een onderscheid gemaakt tussen issues gerelateerd aan hydrodynamica en waterkwaliteit:

Hydrodynamica

- UNST-4825 [Refinement] Confusion on source-sink terms in D-Flow FM
- UNST-4870 Improve turbulence quantities on the output history file

Waterkwaliteit

- UNST-2981 DFM-WAQ: rainfall/evaporation, external discharges, laterals and seepage/welling of groundwater are not accounted for in the water balances of the mass balance areas
- UNST-4810 Second attribute in iknmrk array not dynamically set for top/middle/bottom segment indicator
- UNST-4813 Check if second attribute in iknmrk array is dynamically set for top/middle/bottom segment indicator in Delwaq
- UNST-4926 Properly document scheme 24 in D-Water Quality

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