

Extra validatie zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen

Ingebruikname Flakkeese spuisluis in 2017



Extra validatie zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen
Ingebruikname Flakkeese spuisluis in 2017

Extra validatie zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen

Ingebruikname Flakkeese spuisluis in 2017

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving & Rijkswaterstaat – Zee & Delta
Contactpersoon	Nina Sandfort
Referenties	
Trefwoorden	D-HYDRO Suite, zesde-generatie, modelschematisaties, KPP, D-Flow Flexible Mesh, Grevelingen, waterkwaliteit

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	01-07-2022
Projectnummer	11208051-002
Document ID	11208051-002-ZKS-0003
Pagina's	44
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Luuk van der Heijden		
Arno Nolte		

Gebruik van onderstaande tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Luuk van der Heijden Arno Nolte	Arjen Markus	Myra van der Meulen	

Samenvatting

Algemeen

Dit rapport beschrijft, in navolging van de periodes 2000 en 2008 en voor een getijscenario, de uitbreiding van het nieuwe 3D hydrodynamische model met het waterkwaliteitsmodel voor het jaar 2017. De voornaamste reden voor de extra validatie voor het jaar 2017 is dat in een deel van het jaar de Flakkeese spuisluis in gebruik is geweest. In het licht van scenarioberekeningen waarin de inzet van de Flakkeese spuisluis een onderdeel is, is de extra validatie – dat wil zeggen vergelijking tussen metingen en modelresultaat – uitgevoerd om een inschatting te maken van de mate waarin de inzet van de Flakkeese spuisluis goed gereproduceerd wordt door het model.

Gevoeligheidsanalyse

Naast de validatie voor het jaar 2017 is er ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de gevolgen van laagdiktes op de model-meting vergelijking. Hieruit is geconcludeerd dat het model met 0,5 m laagdikte een betere vergelijking tussen metingen en modelresultaat oplevert dan de vergelijking tussen modelvariant met laagdikte 1,25 m en metingen. Voornamelijk in de diepere waterlagen geeft de 0,5 m laagdikte modelsom een betere benadering van metingen. Een laagdikte van 0,5 m komt overeen met de keuzes in het 3D model van het Veerse Meer. Aanbevolen wordt daarom om het model met 0,5 m laagdikte in beheer en onderhoud te nemen.

D-HYDRO Grevelingen

Voor de validatie van het model Grevelingen is een aantal doelen opgesteld die aansluiten bij kenmerkende omstandigheden/waarnemingen/processen binnen het Grevelingenmeer. Deze doelen worden grotendeels behaald zo blijkt uit de data-model-vergelijking. Het D-HYDRO model is over het algemeen goed in staat om de geobserveerde saliniteit, temperatuur en zuurstof-, chlorofyl- en nutriëntenconcentraties te reproduceren.

De door het D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentraties komen grotendeels overeen met de geobserveerde waarden in verschillende waterlagen, ook in de diepere lagen. Hetzelfde geldt voor de benadering van metingen door berekende saliniteit. Voor temperatuur is er sprake van onderschatting van $\sim 0,8$ °C, al lijkt deze geen grote gevolgen te hebben voor de bepaling van stratificatie door het model. De berekende chlorofylconcentraties komen voor beide jaarsommen naar behoren overeen met de gemeten waardes, al lijkt de voorjaarsbloei in het model iets later plaats te vinden. Ook benadert het model de limitatie van nutriënten, die optreedt in verschillende periodes van het jaar (voorjaar voor fosfor en silicaat; zomer voor stikstof), over het algemeen goed.

Aanbeveling scenario-onderzoek

Het 3D model kan worden toegepast voor vergelijkend scenario-onderzoek. Ingeschat wordt dat het effect van maatregelen – in het bijzonder waterbeheer – in onderlinge vergelijking in relatieve termen van ‘beter/slechter’ of ‘meer/minder’ goed door het 3D model aangegeven zal worden. Voor scenariovergelijking in absolute termen worden waterstanden, stroomsnelheden en concentraties in de ondiepere delen als voldoende zeker ingeschat (binnen het toepassingsbereik van het model) en de concentraties in de diepe delen van het Grevelingenmeer als onzekerder, hoewel de mate van (on)zekerheid niet kwantitatief aangegeven kan worden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie, doelstelling en aanpak waterkwaliteitsmodellering	6
2	Opzet waterkwaliteitsmodel Grevelingenmeer	7
2.1	Beschrijving waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen	7
2.1.1	Invoer waterkwaliteitsmodel 2017	7
2.2	Gevoeligheidsonderzoek laagdiktes	8
2.2.1	Resultaten gevoeligheidsonderzoek 2017	9
2.3	Rekentijd	12
3	Resultaten validatie 2017: waterkwaliteit	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Resultaten voor het jaar 2017	14
3.2.1	Opgeloste zuurstofconcentratie	14
3.2.2	Saliniteit	18
3.2.3	Temperatuur	20
3.2.4	Chlorofyl-a	22
3.2.5	Nutriënten: stikstofconcentratie	22
3.2.6	Nutriënten: fosfaatconcentratie	23
3.2.7	Nutriënten: silicaatconcentratie	24
4	Conclusie en aanbevelingen	25
4.1	Jaarsom 2017	25
4.2	Gevolgen van wijziging laagdiktes voor validatie jaarsom 2008	25
4.3	Conclusies en aanbevelingen	26
5	Literatuur	27
A	Doorwerking aanpassing voor situatie 2008	28
A.1	Gevoeligheidsonderzoek laagdiktes jaarsom 2008	28
A.1.1	Saliniteit	28
A.1.2	Temperatuur	29
A.1.3	Opgeloste zuurstofconcentraties	31
A.2	Gevoeligheidsonderzoek laagdiktes getij-scenario 2008	35
A.2.1	Saliniteit	35
A.2.2	Temperatuur	38
A.2.3	Opgeloste zuurstofconcentraties	40
B	Statistische kengetallen	43

1 Introductie, doelstelling en aanpak waterkwaliteitsmodellering

In het kader van de modelontwikkeling van de zesde-generatie Rijkswaterstaatmodellen is een nieuw 3D hydrodynamisch D-HYDRO model voor de Grevelingen ontwikkeld (Groeneboom et al., 2020). In navolging van de periodes 2000 en 2008 en voor een getijscenario, is voor het jaar 2017 het nieuwe 3D hydrodynamische model uitgebreid met het waterkwaliteitsmodel. Voor eerdere jaren, 2000 en 2008, zijn de modelinvoer en modelparameters overgenomen uit het eerder ontwikkelde Delft3D-4 model, en is dit 3D D-Water Quality model beschreven in Groeneboom et al. (2020).

De voornaamste reden voor een extra validatie voor het jaar 2017 is dat in een deel van het jaar de Flakkeese spuisluis in gebruik is geweest. In het licht van scenarioberekeningen waarin de inzet van de Flakkeese spuisluis een onderdeel is, is de extra validatie – dat wil zeggen vergelijking tussen metingen en modelresultaat – uitgevoerd om een inschatting te maken van de mate waarin de inzet van de Flakkeese spuisluis goed gereproduceerd wordt door het model.

Voor de simulatieperiode november 2016 t/m december 2017, waarvan eerder de hydrodynamica gesimuleerd is, is een model-meting-vergelijking worden gemaakt ter validatie. Uiteindelijk zal de jaarsom 2017 worden gebruikt om meerdere scenario's in het project "Getij Grevelingen" (Maarse et al., 2019) door te rekenen.

Voor de validatie van het model Grevelingen is een aantal doelen opgesteld die aansluiten bij kenmerkende omstandigheden/waarnemingen/processen binnen het Grevelingenmeer. De doelen zijn:

1. voor het model om zo goed mogelijk de gemeten zuurstofgehalten te benaderen in verschillende waterlagen. Dit vanwege de problemen m.b.t. zuurstofarme/loze condities in diepere gedeeltes van het Grevelingenmeer die al langer spelen.
2. voor het model om zo goed mogelijk de stratificatie, temperatuur- en/of zoutgedreven, te benaderen. Deze stratificatie speelt een belangrijke rol bij het optreden van zuurstofarme/loze condities in de diepere waterlagen. Een goede benadering hiervan is daarom cruciaal om doelstelling 1 te behalen.
3. voor het model om zo goed mogelijk de limitatie van nutriënten te benaderen. Deze limitatie van nutriënten treedt vaak op in verschillende periodes van het jaar, afhankelijk van de soort nutriënten is dit in het voorjaar (fosfor en silicaat) of de zomer (stikstof).
4. voor het model om de algenbloei, die vaak in het voorjaar en najaar voorkomt in het Grevelingenmeer, zo goed mogelijk te benaderen.

Met behulp van deze doelstellingen zal gekeken worden naar de overeenkomsten tussen model en meting. Na een gevoeligheidsanalyse (zie §2.2.1) is geconcludeerd dat de modelsom met laagdiktes van 0,5 m resulteerde in een verbetering in de benadering van metingen in zuurstofconcentraties en temperatuur (zie doelstelling 1 en 2). De modelsom 2017 met een laagdikte van 0,5 m wordt daarom vanaf nu als uitgangspunt genomen in de presentatie, discussie en conclusie van de extra validatie.

2 Opzet waterkwaliteitsmodel Grevelingenmeer

2.1 Beschrijving waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen

Hieronder is een beknopte beschrijving van het waterkwaliteitsmodel van de Grevelingen opgenomen. Aangezien het model een omzetting is van het hydrodynamische model en de toevoegingen van waterkwaliteitsprocessen overgenomen is van het waterkwaliteitsmodel 2008 wordt voor meer details verwezen naar Spiteri & Nolte (2010), Nolte (2017) en Groeneboom et al. (2020).

In het waterkwaliteitsmodel worden de volgende processen gesimuleerd:

- fytoplanktonprocessen: 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, silicaat), 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/m^2), maar 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 (Groeneboom et al., 2020). Het transport van de opgeloste en particuliere stoffen gebeurt op de (hydrodynamische) transport-tijdstapbasis. De waterkwaliteitsprocessen worden met een tijdstap van 1 uur berekend. Het model start vanuit ingespeelde condities conform het 2008 waterkwaliteitsmodel en er wordt een inspeelperiode van twee maanden (voorafgaand aan de jaarsom) toegepast.

2.1.1 Invoer waterkwaliteitsmodel 2017

Voor het waterkwaliteitsmodel is de invoer van gemalen en sluzen (Figuur 2.1 en Tabel 2.1) overgenomen van het hydrodynamische model (Groeneboom et al., 2020). Ook de saliniteit en temperatuur van het inkomende water zijn afkomstig van het hydrodynamische model. Waterkwaliteitsgegevens, zoals nutriëntenconcentraties, zuurstofconcentratie en hoeveelheden van detritus en algen, zijn toegevoegd aan deze tijdreeksen. Deze gegevens zijn waar mogelijk gedownload van de geoserver van Rijkswaterstaat (RWS). Data niet beschikbaar op de geoserver zijn opgevraagd bij Rijkswaterstaat en waterschappen.

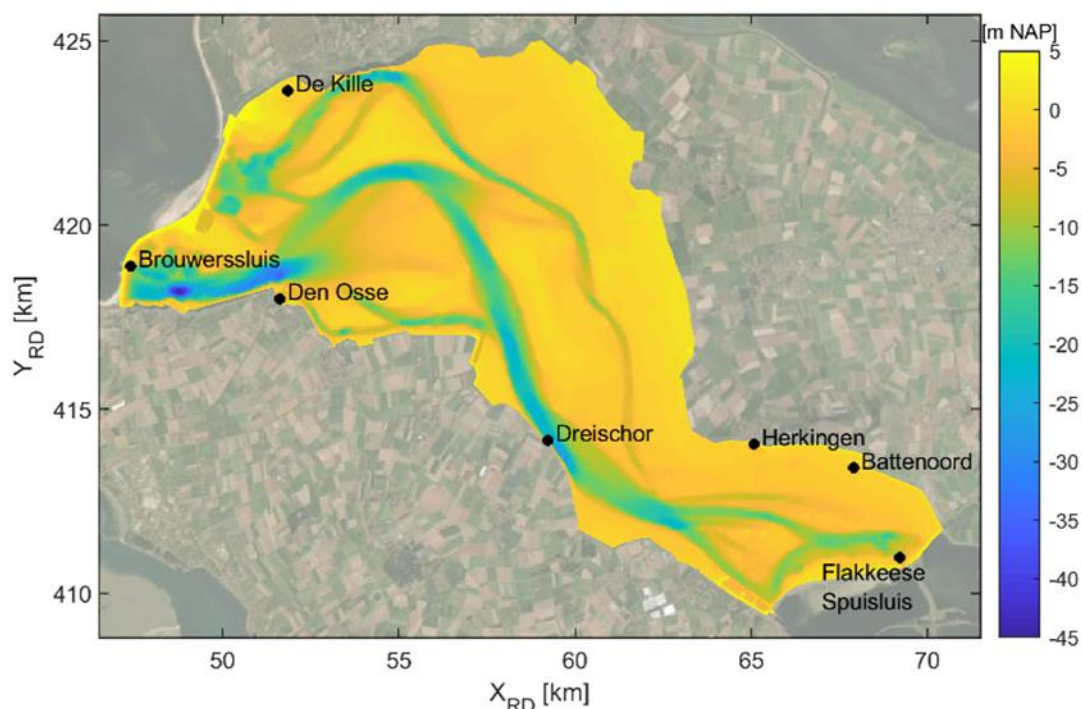
Voor de gemalen zijn er maandelijkse metingen van ammonium-, nitraat-, ortho-fosfaat- en zuurstofconcentraties. Voor silicaatconcentraties wordt een constante waarde van 2,5 mg/L gebruikt, zoals ook voor jaarsom 2008 werd gedaan (Tabel 2.1). Voor de Brouwerssluis worden metingen van MWTL meetstations Schouwen (10 km uit de kust) en Goeree (6 km uit de kust) gebruikt, voor de Flakkeese Spuisluis worden metingen van station Zijpe gebruikt. Voor deze stations zijn variabele waardes beschikbaar voor organisch koolstof, organisch stikstof, organisch fosfor, ammonium-, nitraat-, ortho-fosfaat-, silicaat-, zuurstofconcentraties. Voor de invoer bij Brouwerssluis worden constante waardes gebruikt voor mariene

dinoflagellaten (fosfaat limiterend; 0,01 mg/L), mariene kiezelwieren (fosfor limiterend; 0,03 mg/L) en *Phaeocystis* algen (fosfor limiterend; 0,005 mg/L) conform de aanname voor de kalibratie en validatie (Spiteri & Nolte, 2010).

Meteorologische data, voor de berekening van neerslag en verdamping, zijn afkomstig van het KNMI (Groeneboom et al., 2020).

Tabel 2.1 Overzicht van kunstwerken en de databron en informatie over metingen.

Locatie	Bron	Data afkomstig van meting bij
Brouwerssluis	Geoserver RWS	MWTL meetstations Schouwen (10 km uit de kust) en Goeree (6 km uit de kust)
Flakkeese Spuisluis	Geoserver RWS	MWTL meetstation Zijpe in de Oosterschelde
Gemaal Battenoord	Waterschap Hollandsche Delta	Poldergemaal
Gemaal Den Osse	Waterschap Scheldestromen	Poldergemaal
Gemaal Dreischor	Waterschap Scheldestromen	Poldergemaal
Gemaal De Kille	Waterschap Hollandsche Delta	Poldergemaal
Gemaal Herkingen	Waterschap Hollandsche Delta	Poldergemaal



Figuur 2.1 Overzicht van sluizen (Brouwerssluis en Flakkeese Spuisluis) en polderlozingen (gemalen Battenoord, Den Osse, Dreischor, De Kille en Herkingen).

2.2 Gevoeligheidsonderzoek laagdiktes

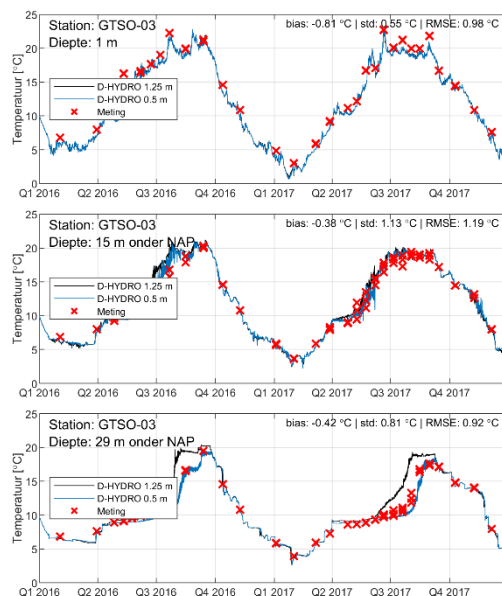
Voor de jaarsom 2017 is ook een gevoeligheidsonderzoek gedaan naar de keuze voor laagdiktes in de modelsom. In eerdere modelsommen voor het jaar 2000 en 2008 werd gebruik gemaakt van een laagdikte van 1,25 meter. In eerste instantie werd deze laagdikte ook gebruikt voor het jaar 2017, echter is, door afwijkingen in o.a. de temperatuur en zuurstofconcentraties, besloten om een test te doen naar laagdiktes van 0,5 meter. De resultaten hiervan toonden aan dat een laagdikte van 0,5 m een verbetering oplevert van de

benadering van model t.o.v. meting, voornamelijk voor de zuurstofconcentratie en temperatuur. Een mogelijke verklaring voor de verbetering is de meer gedetailleerde beschrijving van verticale uitwisseling tussen de lagen. Bij meerdere lagen en een laagdikte van 0,5 m, t.o.v. 1,25 m, kan dit resulteren in een betere benadering van de stratificatie die vaak ontstaat op een korte termijn. Hierna is dezelfde test ook uitgevoerd voor de jaarsom 2008 en het getij-scenario voor het jaar 2008. Voor jaarsom 2008 resulteert de keuze voor een laagdikte van 0,5 m ook in een verbetering van benaderde zuurstofconcentraties, al is deze verbetering minder uitgesproken dan in 2017. Voor jaarsom 2008 met getij is geen sprake van een model-meting vergelijking en dus geen waardeoordeel. Wel toont dit model ook een verandering van zuurstofconcentraties in de diepere lagen bij een keuze voor laagdikte van 0,5 m t.o.v. 1,25 m. Resultaten (Figuur A.1 t/m Figuur A.12) hiervan worden in de bijlage weergegeven.

2.2.1 Resultaten gevoeligheidsonderzoek 2017

Temperatuur

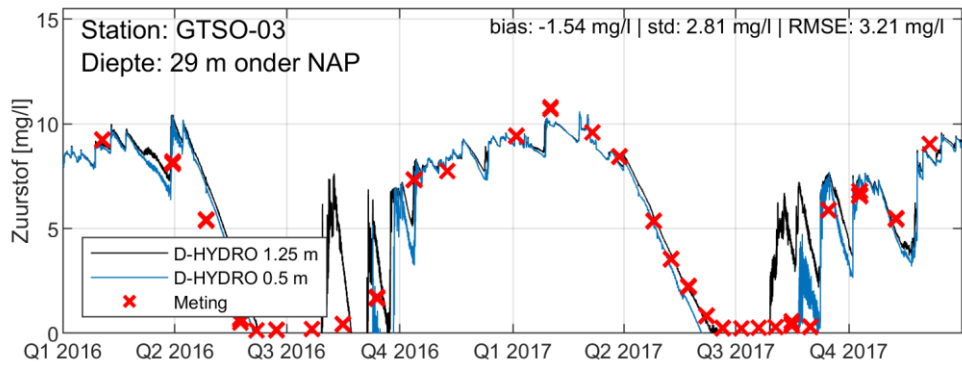
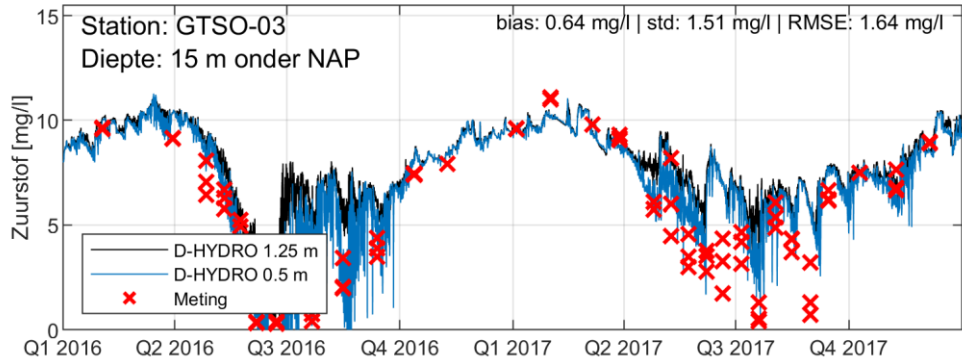
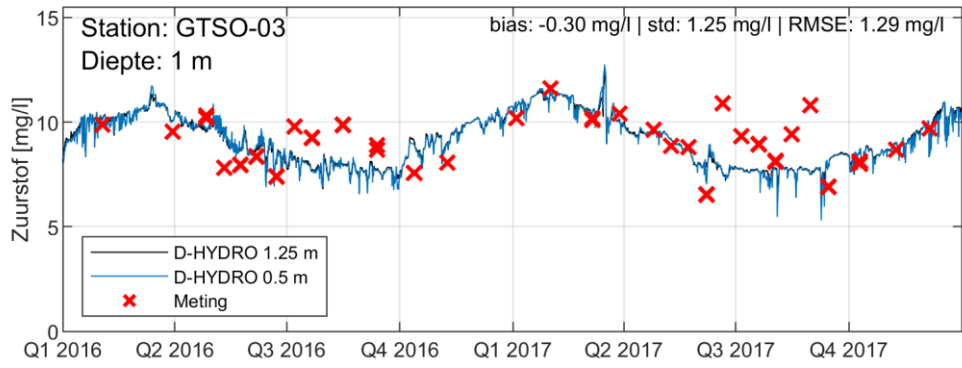
Het verkleinen van de uniforme laagdiktes in het model, van 1,25 m naar 0,5 m, zorgt voor een verbetering in de benadering van temperatuur in de diepere lagen, zoals weergegeven in 2 voor station GTSO-03. In de diepere waterlagen, zoals op 15 m en 29 m diepte, zijn deze verschillen duidelijk zichtbaar.

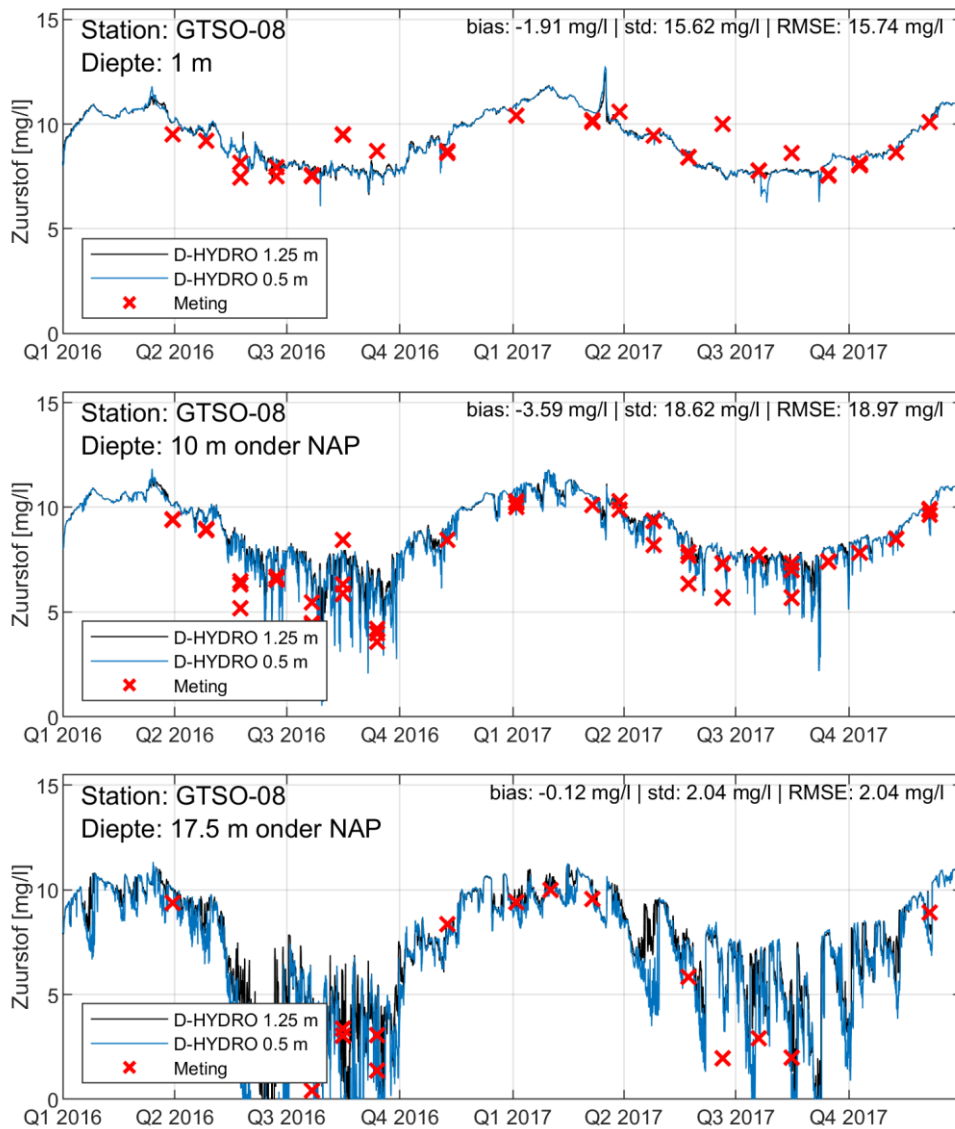


Figuur 2.2 Vergelijking van berekende temperatuur (in °C) voor verschillende laagdiktes (lijnen; D-HYDRO sommen met laagdikte 1,25 m en laagdikte 0,5 m) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) in de jaren 2016-2017 voor meetstation GTSO-03. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: voor het oppervlakte (1 m onder oppervlakte); voor de middelste waterlaag (15 m diepte) en net boven de bodemlaag (29,3 m diepte). Statistische kengetallen zijn voor de D-HYDRO som met 0,5 m laagdiktes.

Zuurstofconcentraties

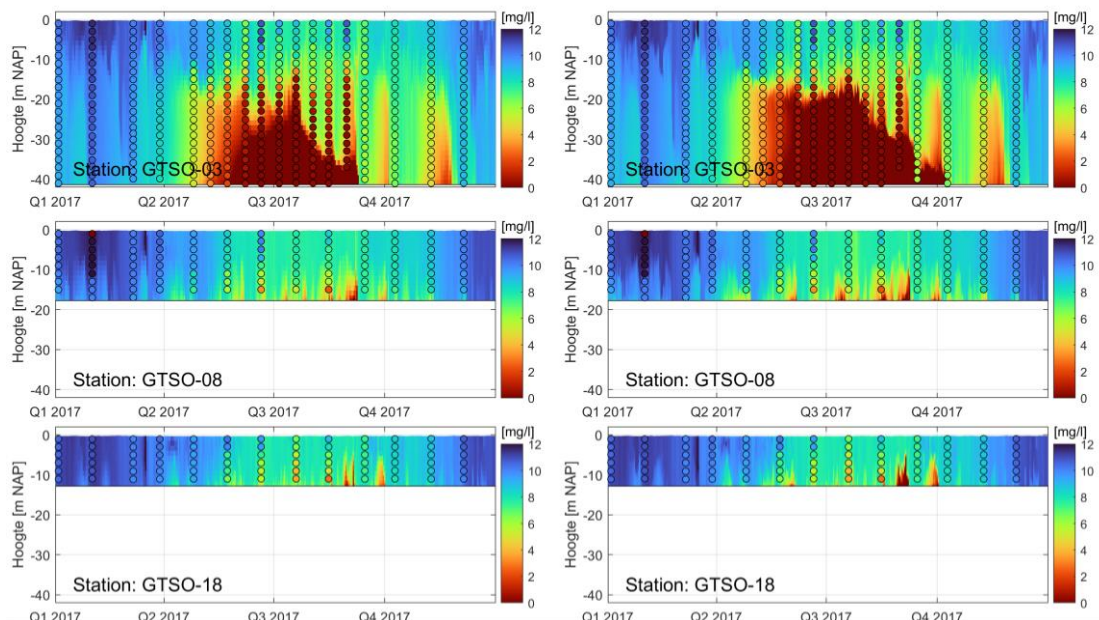
Een verandering van laagdiktes resulteert ook in een verbeterde benadering van zuurstofconcentraties door het model (3). Ook hier geldt dat deze verbetering voornamelijk plaatsvindt in de diepere waterlagen. In het jaar 2017 is dit voor GTSO-03 zichtbaar op dieptes van 15 m en 29,3 m, voor GTSO-08 met name net boven de bodemlaag (17,5 m diep).





Figuur 2.3 Vergelijking van berekende zuurstofconcentraties (mg/L) voor verschillende laagdiktes (lijnen; D-HYDRO sommen met laagdikte 1,25 m en laagdikte 0,5 m) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) in de jaren 2016-2017 voor meetstations GTSO-03 en GTSO-08. Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: voor het oppervlak (1 m onder oppervlakte); voor de middelste waterlaag (10-15 m diepte) en net boven de bodemlaag (17,5-29,3 m diepte). Statistische kengetallen zijn voor de D-HYDRO som met 0,5 m laagdiktes.

Voor de vergelijking van zuurstofconcentraties van de twee D-HYDRO-sommen is ook gekeken naar het verticale zuurstofprofiel over het jaar (Figuur 2.44). Hiervoor zijn drie locaties gekozen verdeeld over het Grevelingen: een locatie vlakbij Brouwerssluis aan de westzijde (GTSO-03), twee locaties in het midden van het meer (GTSO-08) en een locatie bij de Flakkeese Spuisluis aan de oostzijde (GTSO-18). De zuurstofprofielen van de D-HYDRO som met 1,25 m laagdikte laten zien dat de zuurstofconcentraties tijdens de zomerperiode geregeld overschat worden door het model, voornamelijk vanaf 10-15 m diepte bij GTSO-03.



Figuur 2.4 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van zuurstofconcentraties voor de D-HYDRO som met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2017 voor verschillende meetstations. Gekozen locaties liggen verdeeld over het Grevelingenmeer: in het westen (GTSO-03), midden (GTSO-08) en oosten (GTSO-18).

Saliniteit en overige waterkwaliteitsparameters

Een verandering in laagdiktes levert weinig tot geen verschil op in de gemodelleerde zoutgehalten en overige waterkwaliteitsparameters (zoals chlorofyl-A, ammonium, nitraat, fosfaat en silicaat). Ook zijn er geen duidelijke verschillen zichtbaar in de benadering van model t.o.v. meting bij een verandering van de laagdiktes.

Conclusie gevoeligheidsonderzoek

Een modelsom met laagdiktes van 0,5 m resulteerde in een verbetering in de benadering van metingen in zuurstofconcentraties en temperatuur.

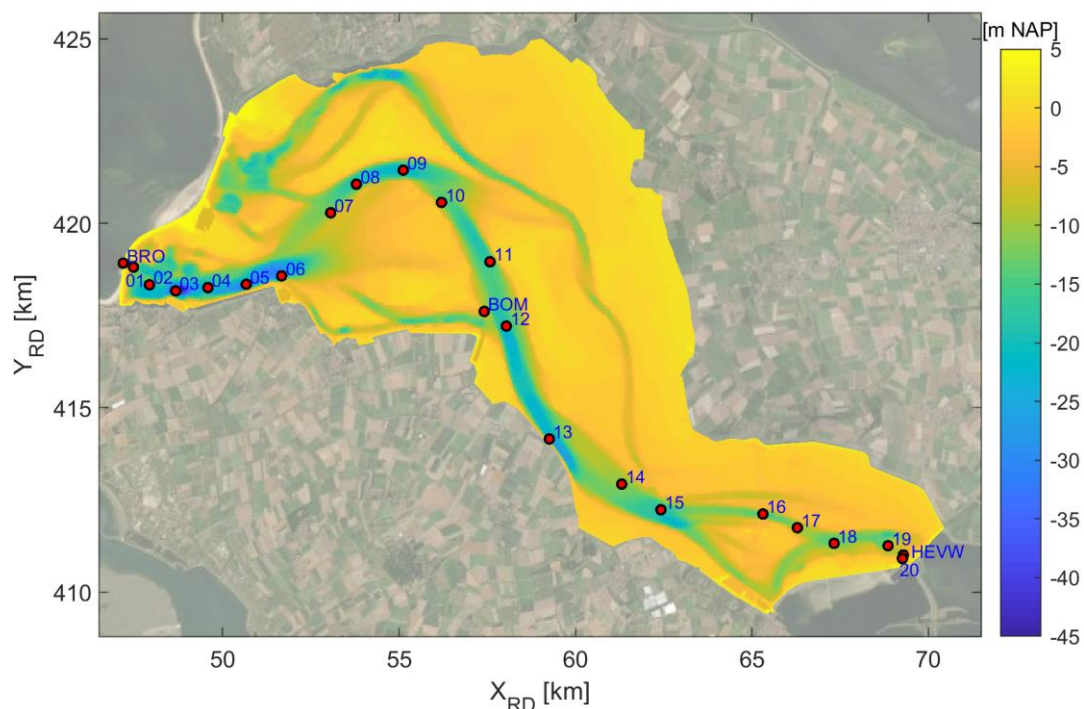
2.3 Rekeningtijd

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 2017 (0,5 m laagdikte) bedraagt ~21 minuten per simulatiedag (oftewel ~ 5,5 dagen per simulatiejaar). Voor de modelsom met laagdikte van 1,25 m was dit ~10 minuten per simulatiedag (oftewel ~ 2,5 dagen per simulatiejaar).

3 Resultaten validatie 2017: waterkwaliteit

3.1 Inleiding

Voor het jaar 2017 worden de belangrijkste waterkwaliteitsparameters uit het online-gekoppelde D-HYDRO-model vergeleken met de gemeten waarden. Voor de vergelijking van saliniteit, temperatuur en zuurstof worden GTSO-metingen gebruikt (Figuur 3.1; stations hier gebruikt voor presentatie zijn GTSO-03, GTSO-08, GTSO-12 en GTSO-18).



Figuur 3.1 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.

Bij de GTSO-metingen wordt gekeken naar verschillende lagen: een laag gelegen aan het oppervlakte, een laag in het midden van de waterkolom en een laag net boven de bodem. Voor de vergelijking van nutriënten- en chlorofylconcentraties zijn metingen beschikbaar voor de locatie Dreischor (zelfde locatie als GTSO-13) op de volgende dieptes; oppervlakte (1 m diep), midden van de waterkolom en net boven de bodem (1 m boven bodem). Dit is de reden waarom het verticale referentieniveau van verschillende stations en waterkwaliteitsparameters verschilt. In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de dieptes waarop de verschillende waterkwaliteitsparameters beschikbaar zijn.

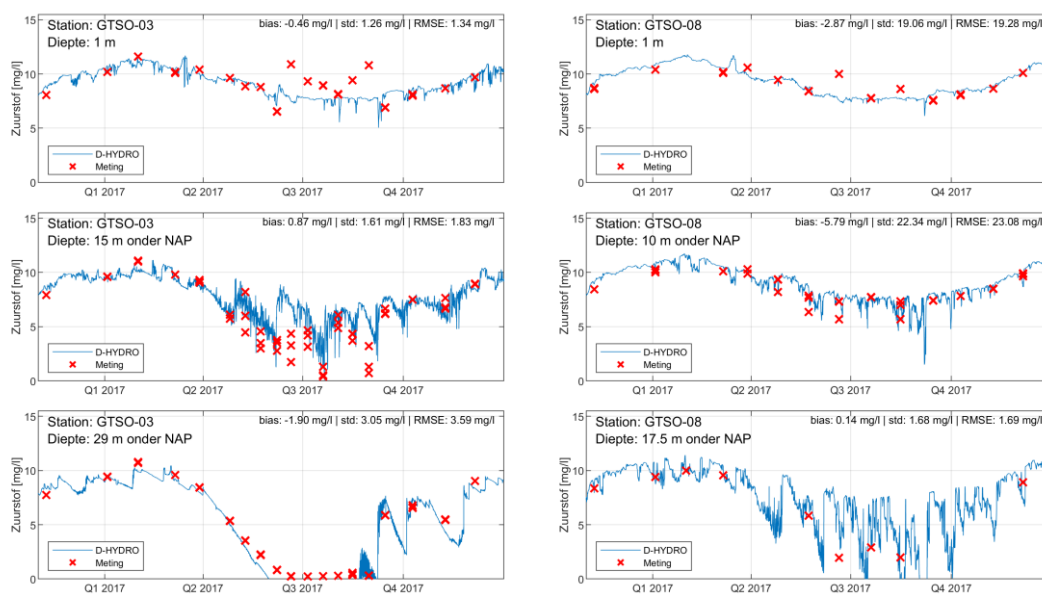
Tabel 3.1 Dieptes van beschikbare metingen gebruikt voor vergelijking model-meting van verschillende parameters (nutriënten zijn concentraties voor totaal stikstof, totaal fosfaat, orthofosfaat, nitraat, ammonium en silicaat).

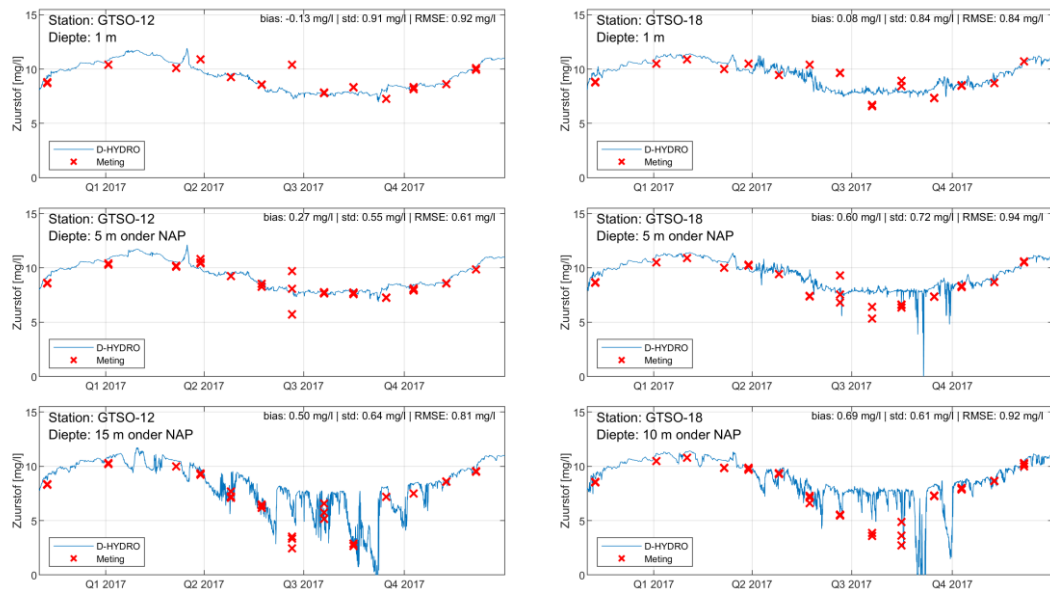
Parameters	Bron	Station	Dieptes		
Zuurstof, temperatuur, saliniteit	GTSO	03	1 m	15 m	29 m
		08	1 m	10 m	17,5 m
		13	1 m	5 m	15 m
		18	1 m	5 m	10 m
Nutriënten en chlorofyl	Waterbase / Waterinfo	Dreischor	Nabij het wateroppervlak	Midden van waterkolom	Nabij de bodem

3.2 Resultaten voor het jaar 2017

3.2.1 Opgeloste zuurstofconcentratie

Zuurstofconcentraties berekend door het D-HYDRO-model benaderen grotendeels de geobserveerde waarden in de Grevelingen, weergegeven in Figuur 3.2 en Tabel 3.2 (formules voor berekening van statistische kengetallen zijn beschreven in bijlage 5B). De gemeten zuurstofstratificatie in het tweede en derde kwartaal is duidelijk terug te zien in het berekende zuurstofgehalte.





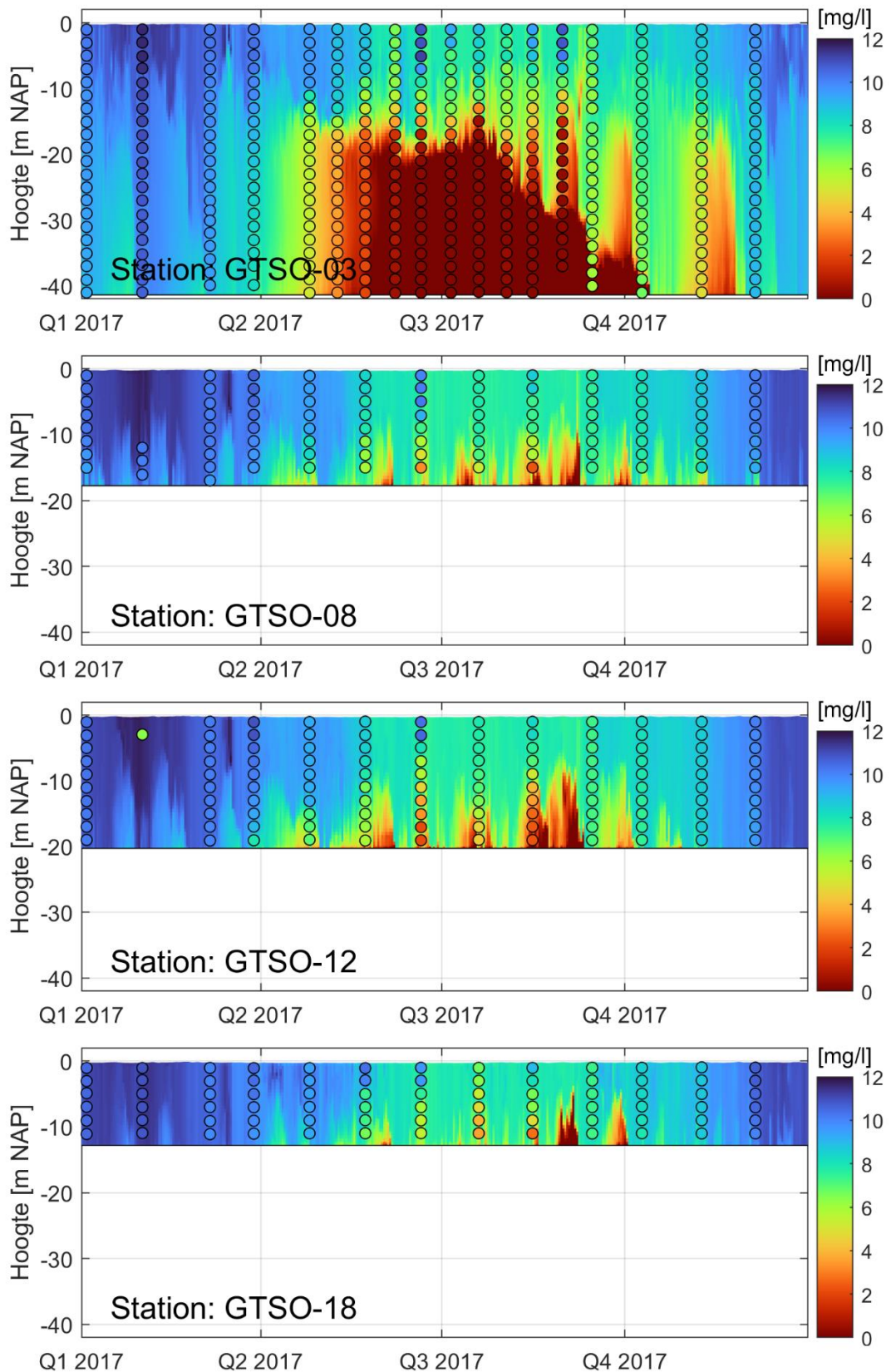
Figuur 3.2 Berekende (D-HYDRO: blauwe lijn) en gemeten (rode kruizen) zuurstofconcentraties (mg/L) voor het jaar 2017 voor verschillende GTSO-meetstations: GTSO-03 (figuur linksboven), GTSO-08 (figuur rechtsboven), GTSO-12 (figuur linksonder), GTSO-19 (figuur rechtsonder). Zuurstofconcentraties zijn weergegeven voor verschillende dieptes: voor het oppervlakte (1 m onder het wateroppervlak), halverwege de waterkolom (afhankelijk van de lokale waterdiepte) en net boven de bodem.

Tabel 3.2 Statistische kengetallen voor de verschillen tussen meet- en modelwaarden van opgeloste zuurstofconcentraties voor jaarsom 2017 met D-HYDRO Grevelingen. De bias geeft een indicatie van het gemiddeld verschil tussen model en meting, de standaarddeviatie (std) is een maat voor de spreiding van het verschil rondom het gemiddeld verschil en bij de root mean square error (RMSE) wordt het kwadraat van het verschil genomen waardoor elke afwijking meegenomen wordt en grotere afwijkingen zwaarder wegen.

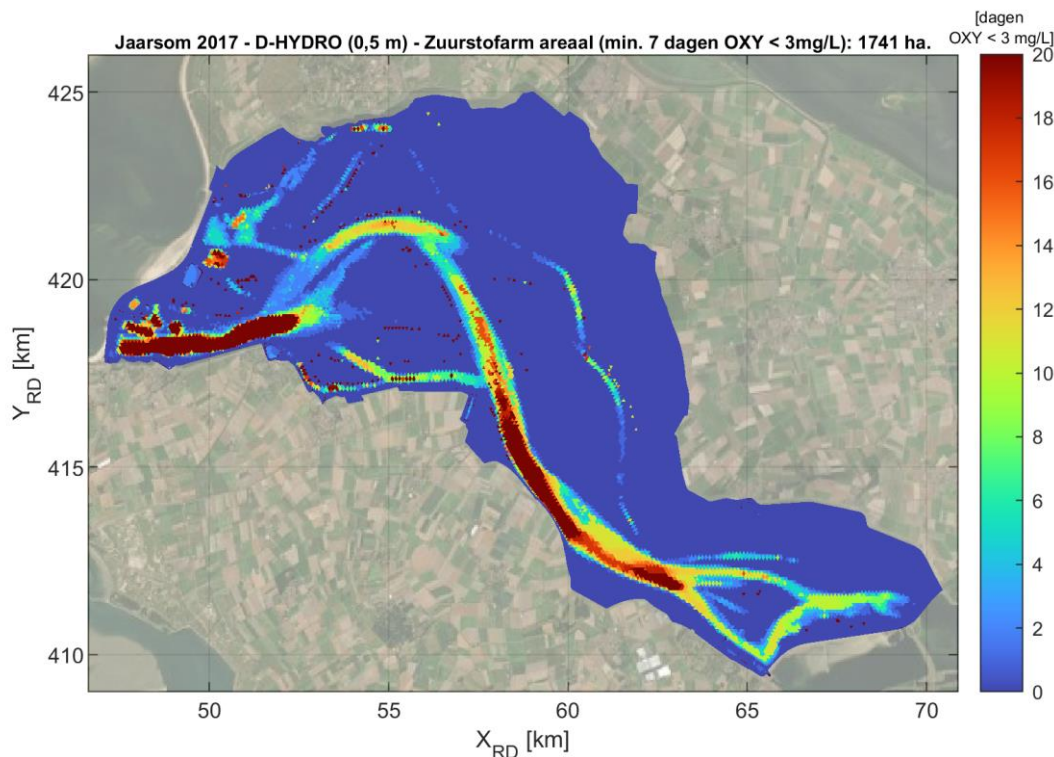
Zuurstof (mg/L)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP			
	Station	bias	std	RMSE	bias	Std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-02		-0,46	1,12	1,21	-0,24	1,05	1,08	0,31	1,39	1,42
GTSO-03		-0,46	1,26	1,34	-0,21	1,05	1,07	0,87	1,61	1,83
GTSO-04		-0,31	0,89	0,94	-0,20	1,04	1,06	0,43	1,36	1,43
GTSO-06		-0,21	0,67	0,70	-0,18	1,02	1,04	0,01	1,89	1,89
GTSO-07		-0,14	0,99	1,01	-0,01	0,84	0,84			
GTSO-08		-0,14	0,78	0,79	0,05	0,76	0,76	0,43	1,70	1,75
GTSO-10		0,04	0,58	0,58	0,21	0,39	0,44			
GTSO-12		-0,12	0,91	0,92	0,27	0,55	0,61	0,50	0,64	0,81
GTSO-14		-0,08	0,85	0,86	0,33	0,81	0,88			
GTSO-16		-0,05	0,97	0,97	0,54	0,83	0,99			
GTSO-18		0,08	0,84	0,84	0,60	0,72	0,94			
GTSO-20		0,65	0,87	1,09	0,87	0,98	1,31			
Gemiddelde		-0,10	0,89	0,93	0,16	0,84	0,92	0,43	1,43	1,52

Naast het verloop van zuurstofconcentraties over de tijd op een aantal vaste dieptes is voor beide modellen ook gekeken naar het zuurstofprofiel over de tijd (Figuur 3.3). In dit figuur zijn dezelfde vier representatieve GTSO-locaties gekozen.

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 D-HYDRO-model met laagdiktes van 0,5 m (Figuur 3.4). Het D-HYDRO-model berekent een zuurstofarm areaal van 1741 ha voor jaarsom 2017. Hierbij moet een kanttekening worden gemaakt dat deze indicator relatief gevoelig is voor de 'harde' grenzen van 7 aaneengesloten dagen en 3 mg/L.



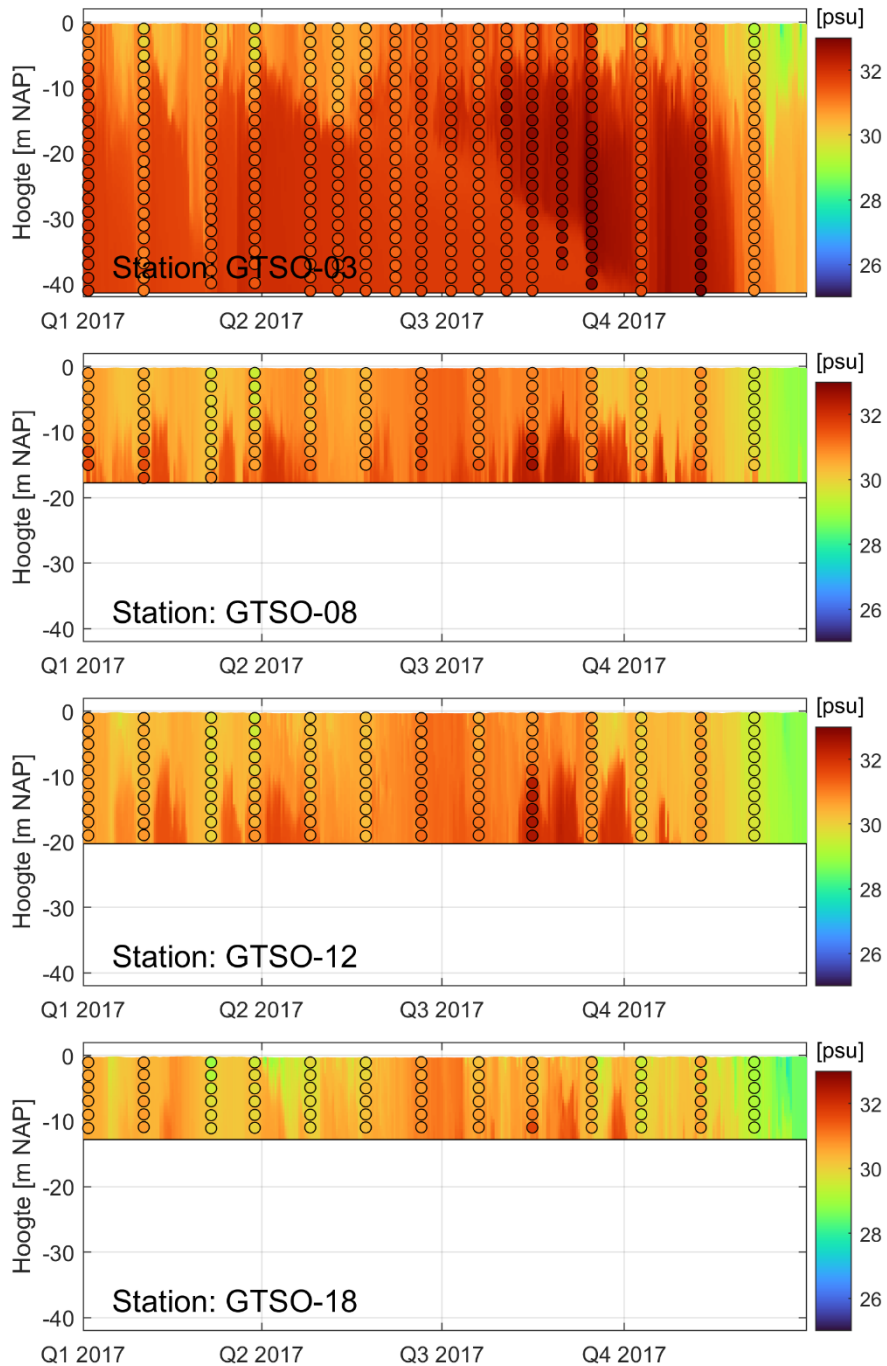
Figuur 3.3 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende opgeloste zuurstofconcentraties in GTSO-03, GTSO-08, GTSO-12 en GTSO-18 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels).



Figuur 3.4 Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het D-HYDRO-model (jaarsom 2017; 0,5 m laagdikte). Het zuurstofarme areaal wordt berekend op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (in ha.; zie waarde in titel).

3.2.2 Saliniteit

Het z,t-diagram van de berekende saliniteit in GTSO-03, GTSO-08, GTSO-12 en GTSO-18 (weergegeven als achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels) geeft vooral nabij de Brouwerssluis (GTSO-03) zoutstratificatie weer (Figuur 3.5). Rond september 2017 is deze stratificatie ook zichtbaar in het midden van het meer (GTSO-08 en GTSO-12). Dit verschil in saliniteit over de waterkolom en de variatie van de saliniteit in de tijd worden goed door het model gemodelleerd, wat ook blijkt uit de statistische kengetallen voor saliniteitsmetingen (Tabel 3.3) met een gemiddelde bias van 0,16–0,17 psu en een gemiddelde standaard deviatie van 0,35-0,41 psu voor dieptes van 1 m, 5 m en 15 m. Vergelijkbare kengetallen werden voor de modelsom in Groeneboom et al. (2020) bepaald.



Figuur 3.5 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende saliniteit in GTSO-03, GTSO-08, GTSO-12 en GTSO-18 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels).

Tabel 3.3 Statistische kengetallen voor de verschillen tussen meet- en modelwaarden van saliniteit voor jaarsom 2017 met D-HYDRO Grevelingen.

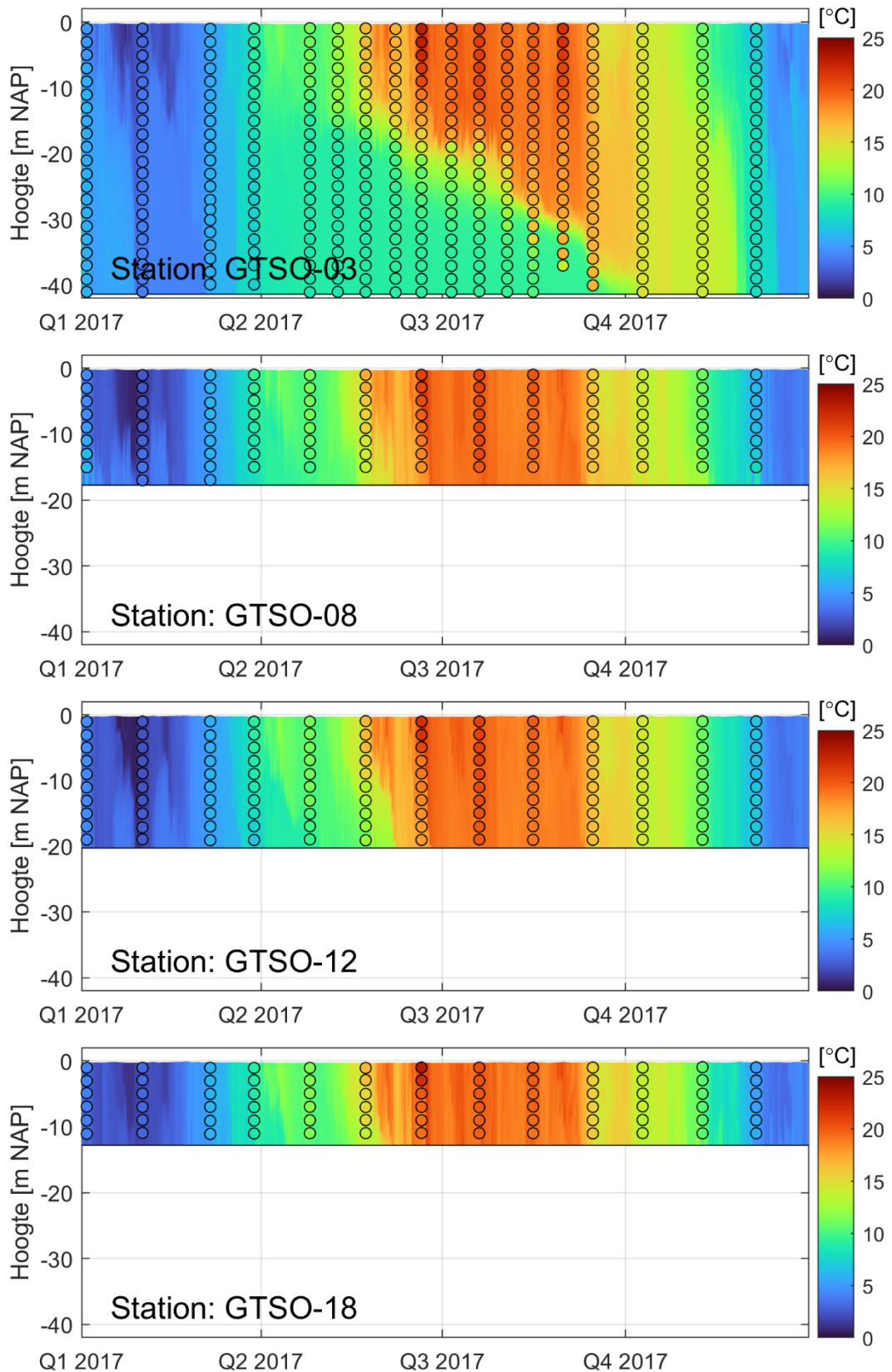
Saliniteit (psu)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP			
	Station	bias	std	RMSE	bias	std	RMSE	Bias	std	RMSE
GTSO-02		0,27	0,38	0,47	0,27	0,39	0,46	0,19	0,31	0,36
GTSO-03		0,23	0,38	0,44	0,27	0,35	0,44	0,11	0,35	0,36
GTSO-04		0,26	0,37	0,46	0,24	0,42	0,49	0,21	0,30	0,36
GTSO-06		0,20	0,35	0,40	0,20	0,38	0,43	0,31	0,45	0,55
GTSO-07		0,17	0,36	0,40	0,15	0,36	0,39			
GTSO-08		0,19	0,38	0,43	0,16	0,37	0,41	0,13	0,37	0,39
GTSO-10		0,15	0,36	0,39	0,14	0,35	0,38			
GTSO-12		0,12	0,35	0,37	0,14	0,32	0,35	0,06	0,34	0,34
GTSO-13		0,18	0,33	0,37	0,17	0,31	0,35	0,12	0,34	0,37
GTSO-14		0,09	0,45	0,46	0,10	0,33	0,35			
GTSO-16		0,14	0,47	0,49	0,09	0,29	0,31			
GTSO-18		0,16	0,50	0,52	0,11	0,33	0,35			
GTSO-20		0,10	0,68	0,68	0,25	0,59	0,64			
Gemiddelde		0,17	0,41	0,45	0,17	0,37	0,41	0,16	0,35	0,39

3.2.3 Temperatuur

Verschillen tussen berekende en gemeten temperatuur in de Grevelingen geven een onderschatting van het model weer van $\sim 0,8$ °C in de oppervlaktelaag (Tabel 3.4; negatieve bias). Deze onderschatting van de temperatuur, en daarmee ook de mate van stratificatie, vindt voornamelijk plaats in de zomer van 2017 (Figuur 3.6). Echter laat het gehele beeld van de temperatuur in 2017 (Figuur 3.6) een goede overeenkomst zien tussen de berekende temperatuur en de metingen. Als verklaring voor deze onderschatting werd door Groeneboom et al. (2020) het ontbreken van saliniteitsgegevens bij meetstation *Brouwershavensche Gat 08* (en dus in de randvoorwaarden voor de Brouwerssluis) gegeven. Een korte periode van verandering in lokale hydrodynamica wordt gesuggereerd als mogelijke verklaring. Daarnaast wordt een alternatieve verklaring geopperd waarbij de thermocline te laag in het model zit waardoor de warmteflux vanuit de atmosfeer over een groter volume verdeeld wordt.

Tabel 3.4 Statistische kengetallen van temperatuur voor jaarsom 2017 met D-HYDRO Grevelingen.

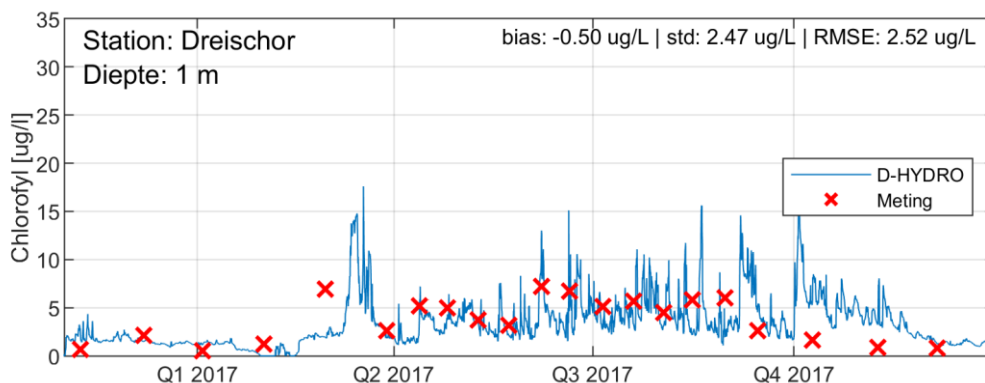
Temperatuur (°C)	-1 m NAP			-5 m NAP			-15 m NAP			
	Station	bias	std	RMSE	Bias	Std	RMSE	bias	std	RMSE
GTSO-02		-0,79	0,51	0,94	-0,74	0,52	0,91	-0,14	0,52	0,54
GTSO-03		-0,76	0,51	0,91	-0,83	0,46	0,95	-0,08	0,56	0,56
GTSO-04		-0,77	0,46	0,90	-0,86	0,46	0,98	-0,16	0,58	0,60
GTSO-06		-0,84	0,48	0,96	-0,91	0,45	1,01	-0,14	0,72	0,73
GTSO-07		-0,79	0,49	0,93	-0,93	0,44	1,03			
GTSO-08		-0,82	0,56	0,99	-0,80	0,56	0,98	-0,16	0,45	0,73
GTSO-10		-0,88	0,51	1,01	-0,94	0,49	1,06			
GTSO-12		-0,80	0,56	0,98	-0,99	0,46	1,09	-0,75	0,37	0,83
GTSO-13		-0,85	0,57	1,02	-0,88	0,47	0,99	-0,58	0,45	0,73
GTSO-14		-0,91	0,65	1,11	-0,89	0,50	1,02			
GTSO-16		-0,79	0,53	0,95	-0,88	0,47	0,99			
GTSO-18		-0,85	0,58	1,03	-0,82	0,42	0,92			
GTSO-20		-0,59	0,59	0,83	-0,58	0,62	0,84			
Gemiddelde		-0,80	0,54	0,97	-0,85	0,49	0,98	-0,29	0,52	0,64



Figuur 3.6 Z,t-diagram van de door het D-HYDRO-model berekende temperatuur in GTSO-03, GTSO-08, GTSO-12 en GTSO-18 (achtergrond) en de gemeten waarden (in cirkels).

3.2.4 Chlorofyl-a

De berekende chlorofylconcentraties voor 2017 benaderen de gemeten concentraties goed (Figuur 3.7), met enkel een geringe onderschatting (*bias*: -0,50 µg/l; *RMSE*: 2,52 µg/l; Tabel 3.5). Periodes waarin de benadering wat minder is zijn tijdens de lentebloei, waar de timing en piek in gemeten waarden niet geheel overeen komt, en in het najaar, wanneer er sprake is van een overschatting van de chlorofylconcentraties.



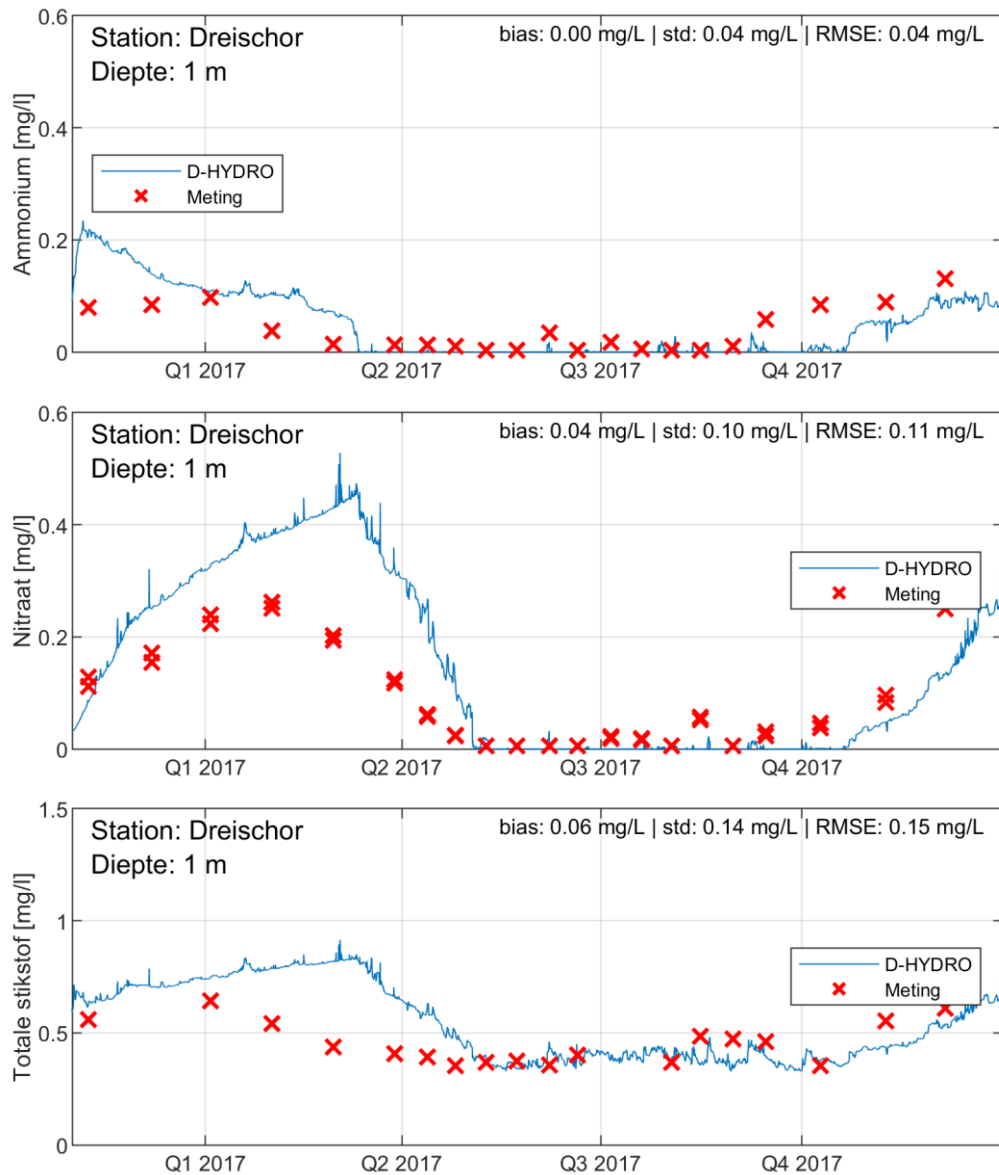
Figuur 3.7 Vergelijking van berekende en gemeten chlorofylconcentraties (µg/l) in het oppervlaktewater bij meetlocatie Dreischor.

Tabel 3.5 Statistische kengetallen (*bias*, *std.* en *RMSE*) voor berekende waarden van waterkwaliteitsparameters vergeleken met metingen voor het station Dreischor in het jaar 2017. Waterkwaliteitsparameters hier weergegeven zijn chlorofyl-, ammonium-, nitraat-, zuurstof-, fosfaat- en silicaat-, totale stikstof- en totale fosforconcentraties.

Station	Parameter	Unit	Bias	STDEV	RMSE
Dreischor	Chlorofyl	µg/L	-0,50	2,47	2,52
	Ammonium	mg/L	0,00	0,04	0,04
	Nitraat	mg/L	0,04	0,10	0,11
	Zuurstof	mg/L	0,04	0,82	0,82
	Fosfaat	mg/L	-0,01	0,02	0,02
	Silicaat	mg/L	-0,13	0,22	0,25
	Totale stikstof	mg/L	0,06	0,14	0,15
	Totale fosfaat	mg/L	-0,03	0,02	0,04

3.2.5 Nutriënten: stikstofconcentratie

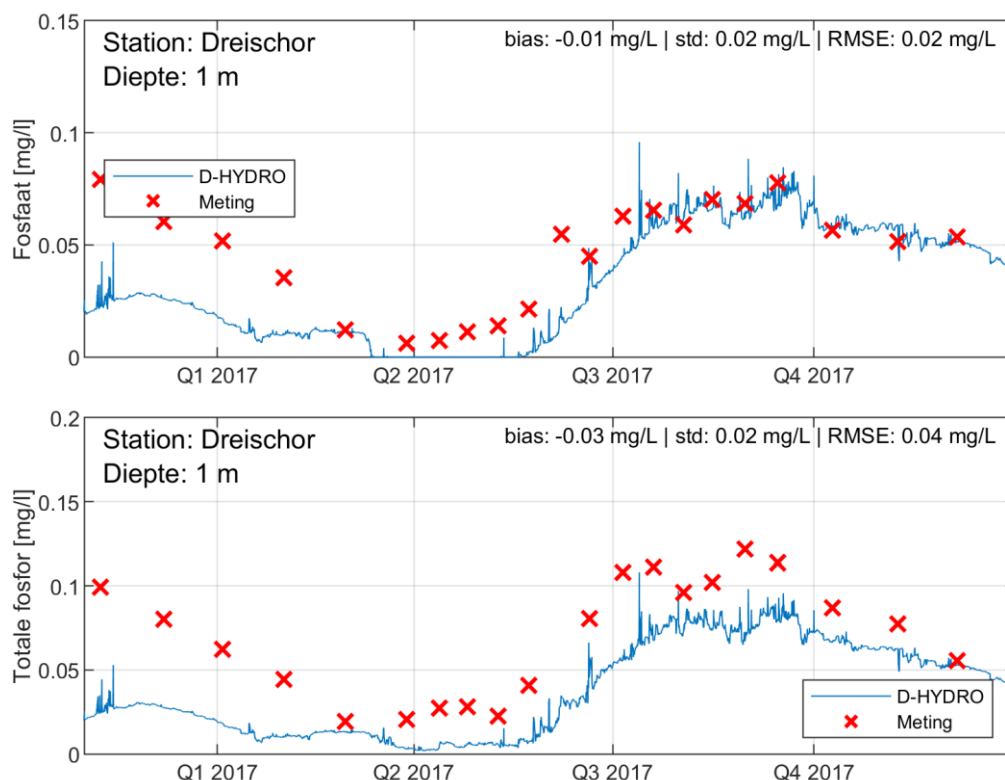
Berekende ammonium- en nitraatconcentraties voor de oppervlaktelaag benaderen de gemeten waarden redelijk bij Dreischor (Figuur 3.8 en Tabel 3.5). Dit leidt tot een *bias* van 0,00 mg/L en een *RMSE* van 0,04 mg/L voor ammonium en een *bias* van 0,04 mg/L en een *RMSE* van 0,11 mg/L voor nitraat. De stikstoflimitatie die duidelijk waargenomen wordt in de oppervlaktelagen wordt ook berekend in alle modelsommen. Een overschatting van ammonium en nitraat in de eerste maanden van 2017 resulteert ook in een overschatting van het totaal stikstof in deze periode (Figuur 3.8). Echter benadert het model de gemeten totale stikstof redelijk goed met een *bias* van 0,06 mg/L en een *RMSE* van 0,15 mg/L (Tabel 3.5).



Figuur 3.8 Vergelijking van berekende en gemeten ammonium (bovenste figuur), nitraat (middelste figuur) en totaal stikstof (onderste figuur) in het oppervlaktewater bij meetlocatie Dreischor.

3.2.6 Nutriënten: fosfaatconcentratie

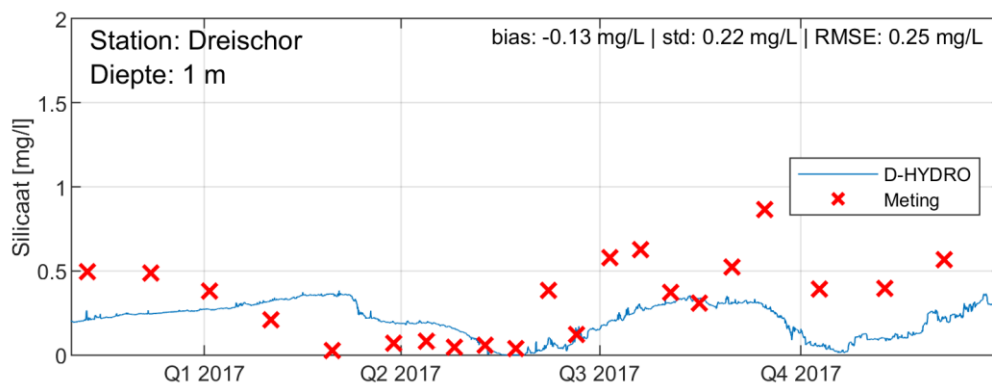
Berekende ortho-fosfaatconcentraties, en in iets mindere mate totaal fosfaat concentraties, komen vanaf het begin van 2^e kwartaal grotendeels overeen met de gemeten waarden (Figuur 3.9). In het eerste kwartaal van 2017 is er echter sprake van een onderschatting van berekende waarden t.o.v. de gemeten waarden. Dit leidt tot een *bias* van -0,01 en -0,03 mg/L en een RMSE van 0,02 en 0,04 mg/L voor respectievelijk ortho-fosfaat en totaal fosfaat (Tabel 3.5). De limitatie van fosfaat, gemeten aan het begin van het tweede kwartaal, wordt door het model echter zeer goed benaderd.



Figuur 3.9 Vergelijking van berekende en gemeten orthofosfaat (bovenste figuur) en totaal fosfor (onderste figuur) in het oppervlaktewater bij meetlocatie Dreischor.

3.2.7 Nutriënten: silicaatconcentratie

De berekende silicaatconcentraties tonen een redelijke overeenkomst met de gemeten waarden tijdens jaarsom 2017 (Figuur 3.10 en Tabel 3.5). De gemeten waarden tonen een iets ander patroon dan de berekende waarden, voornamelijk de berekende overschatting van silicaat aan het begin van het tweede kwartaal, waar een limitatie gemeten wordt, is een kwestie waar verder onderzoek naar nodig is.



Figuur 3.10 Vergelijking van berekende en gemeten silicaat in het oppervlaktewater bij meetlocatie Dreischor.

4 Conclusie en aanbevelingen

4.1 Jaarsom 2017

De doelstellingen van dit project voor de extra validatie van het model, genoemd in hoofdstuk 1, zijn behaald voor het jaar 2017. Uit de data-model-vergelijking blijkt dat het D HYDRO model over het algemeen goed in staat is om de geobserveerde saliniteit, temperatuur en zuurstof-, chlorofyl- en nutriëntenconcentraties te reproduceren.

De door het D-HYDRO-model berekende zuurstofconcentraties komen grotendeels overeen met de geobserveerde waarden in verschillende waterlagen, ook in de diepere lagen (doelstelling 1). Ook de berekende saliniteit benadert de metingen goed, voor temperatuur is er sprake van onderschatting van ~ 0,8 °C. Toch lijkt deze onderschatting geen grote gevolgen te hebben voor de bepaling van stratificatie door het model, en als gevolg daarvan de benadering van zuurstofarme/loze condities (doelstelling 2). De berekende chlorofylconcentraties komen voor beide jaarsommen grotendeels overeen met de gemeten waardes, al lijkt de voorjaarsbloei in het model iets later plaats te vinden. Dit is echter door de timing van meting moeilijk te concluderen (deels doelstelling 4 behaald).

Het model benadert de limitatie van nutriënten, die optreedt in verschillende periodes van het jaar (voorjaar voor fosfor en silicaat; zomer voor stikstof), over het algemeen goed (doelstelling 3). Berekende ammonium- en nitraatconcentraties tonen vanaf het 2^e kwartaal vergelijkbare waardes als de gemeten waardes en belangrijk daarbij is dat het model de gemeten stikstofflimitatie in de zomerperiode zeer goed benadert. De overschatting van berekende waardes in het eerste kwartaal is minimaal en de trend van waardes is vergelijkbaar tussen model en meting. De totale stikstofconcentraties komen grotendeels overeen met de metingen en volgen een vergelijkbaar patroon als ammonium en nitraat met een kleine overschatting in de eerste maanden van 2017. Voor ortho-fosfaat- en totale fosfaatconcentraties geldt een vergelijkbaar iets waarbij er in het eerste kwartaal sprake is van een onderschatting van het model t.o.v. meting waarna de fosfaatlimitatie in het voorjaar zeer goed benaderd wordt. Berekende silicaatconcentraties komen redelijk overeen met de gemeten waardes al varieert het patroon tussen beide wel. Wel kan gesteld worden dat de silicaatlimitatie in het voorjaar redelijk berekend wordt.

Na deze eerste stap waarin het bestaande waterkwaliteitsmodel is opgezet en de hierbij ontstane verschillen zijn geïdentificeerd, kan het waterkwaliteitsmodel in een vervolgstudie verder ontwikkeld/verbeterd worden.

4.2 Gevolgen van wijziging laagdiktes voor validatie jaarsom 2008

De wijziging in laagdiktes voor jaarsom 2017 die uit de gevoeligheidsanalyse kwam is ook toegepast voor jaarsom 2008. Hiervoor is gekeken naar de gevolgen van deze wijziging op de validatie die eerder is gepresenteerd (Groeneboom et al., 2021).

Zoals voor jaarsom 2017 resulteert een verandering in laagdiktes, van 1,25 m naar 0,5 m, in weinig tot geen verschil in de gemodelleerde zoutgehaltes van jaarsom 2008 en de benadering van model t.o.v. meting (zie Figuur A.1 en Figuur A.2 in bijlage A). Een verandering in laagdiktes resulteert wel in een latere en langzamere stijging van temperatuur in de diepere lagen in de zomerperiode (zie Figuur A.3 en Figuur A.4 in bijlage A). Ook zijn er in de zomerperiode verschillen zichtbaar in de benadering van model t.o.v. meting bij een verandering van laagdiktes. Een laagdikte van 0,5 m lijkt te resulteren in een verbetering van benadering van gemeten temperatuur bij GTSO-13 en GTSO-19. Bij meetstations GTSO 03

en GTSO-09 resulteert de nieuwe laagindeling niet in een duidelijk betere benadering heeft t.o.v. meetwaardes. Voor berekeningen van opgeloste zuurstofconcentraties in 2008 geldt eenzelfde als voor temperatuur met enige verbeteringen in de diepere lagen wanneer laagdiktes afnemen.

De gevolgen voor berekend langdurig zuurstofarm areaal zijn relatief groot met een toename van areaal van 1764 naar 2805 ha. bij een verandering van laagdiktes van 1,25 m naar 0,5 m (zie Figuur A.8 en Figuur A.9). In de modelopzet voor 2008 is gebruik gemaakt van een kortdurende verhoging ten opzichte van metingen van het instromende zoutgehalte om voldoende stratificatie in het model te genereren. Wellicht is deze aanpassing niet meer nodig met 0,5 m laagdikte en zou zonder de aanpassing het langdurig zuurstofarm areaal een kleiner verschil laten zien.

4.3 Conclusies en aanbevelingen

Geconcludeerd wordt dat het model met 0,5 m laagdikte een betere vergelijking tussen metingen en modelresultaat oplevert. Een laagdikte van 0,5 m komt overeen met de keuzes in het 3D model van het Veerse Meer. Aanbevolen wordt daarom om het model met 0,5 m laagdikte in beheer en onderhoud te nemen.

Het gevoeligheidsonderzoek met 0,5 m laagdikte voor het jaar 2008 heeft een relatief groot effect laten zien op het langdurig zuurstofarm areaal. Geconcludeerd wordt dat het gevoeligheids- en convergentieonderzoek van het 3D model voor de zuurstofhuishouding in de diepe delen nog niet volledig afgerond is. Omdat de overeenkomst in de ondiepere delen (boven NAP -8 m) groot is, is daarvoor het gevoeligheids- en convergentieonderzoek wel afgerond. Aanbevolen wordt daarom om de modelresultaten in de diepe delen met enige voorzichtigheid te interpreteren en om het gevoeligheids- en convergentieonderzoek voort te zetten.

Tenslotte wordt ingeschat dat het 3D model voor vergelijkend scenario-onderzoek toegepast kan worden. Ingeschat wordt dat het effect van maatregelen – in het bijzonder waterbeheer – in onderlinge vergelijking in relatieve termen van ‘beter/slechter’ of ‘meer/minder’ goed door het 3D model aangegeven zal worden. Voor scenariovergelijking in absolute termen worden waterstanden, stroomsnelheden en concentraties in de ondiepere delen als betrekkelijk zeker ingeschat (binnen het toepassingsbereik van het model) en de concentraties in de diepe delen van het Grevelingenmeer als onzekerder, hoewel die mate van (on)zekerheid niet kwantitatief aangegeven kan worden.

5 Literatuur

Groenenboom, J., Heijden, L. van der, Markus, A.A., Laan, S.C. (2020). *Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen; Modelbouw, kalibratie en validatie*. Deltares, rapport 11205259-006-ZKS-0007.

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.

Nolte, A.J. (2017). *Expertsessies Slib- en zuurstofhuishouding Grevelingenmeer*. Deltares, memo 1230426-000-ZKS-0004.

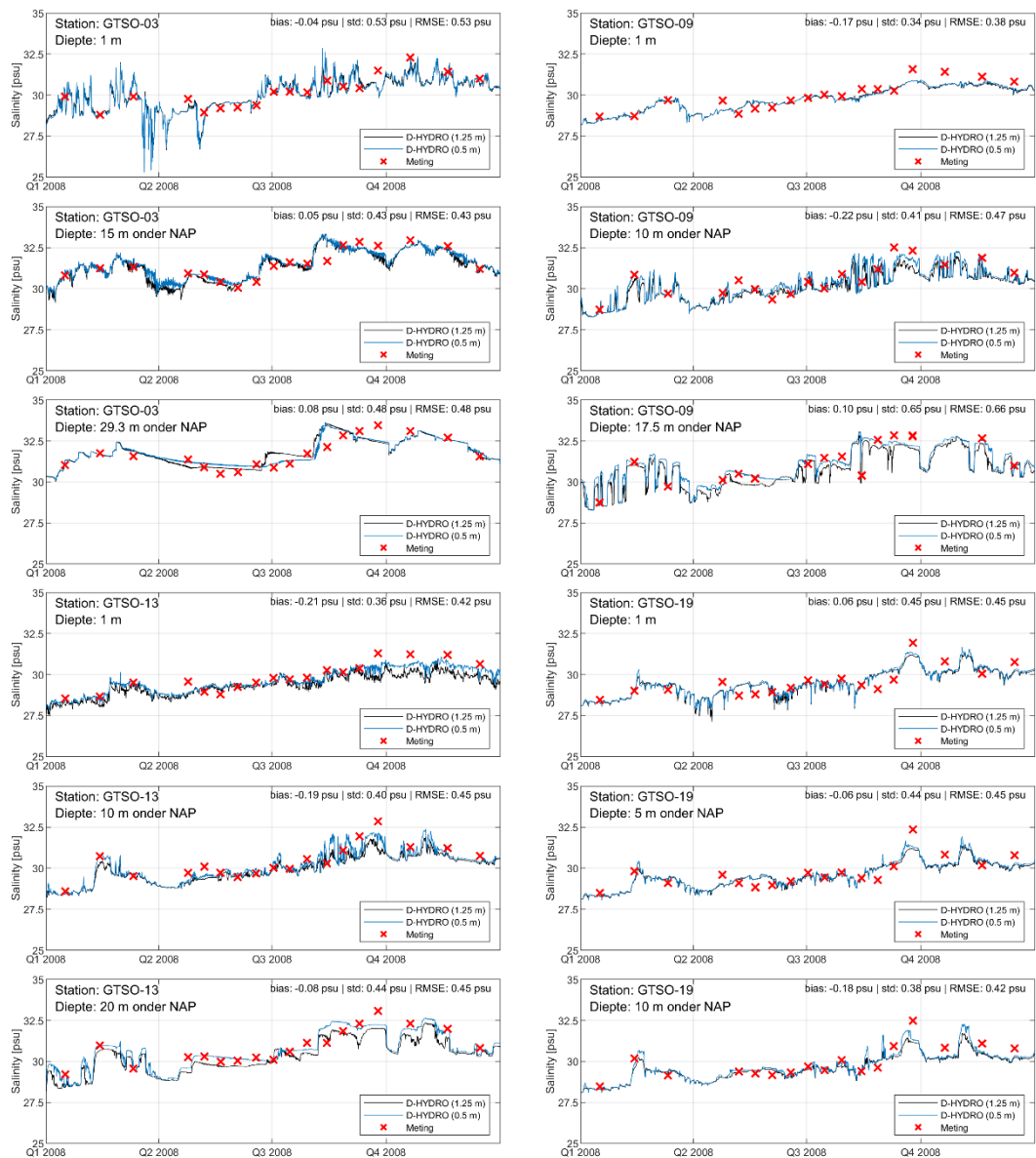
Spiteri, C., Nolte, A.J. (2010). *3D model van het Grevelingenmeer voor hydrodynamica, waterkwaliteit en primaire productie : kalibratie- en validatiedocument*. Deltares, rapport 1201650-000-ZKS-0016.

A Doorwerking aanpassing voor situatie 2008

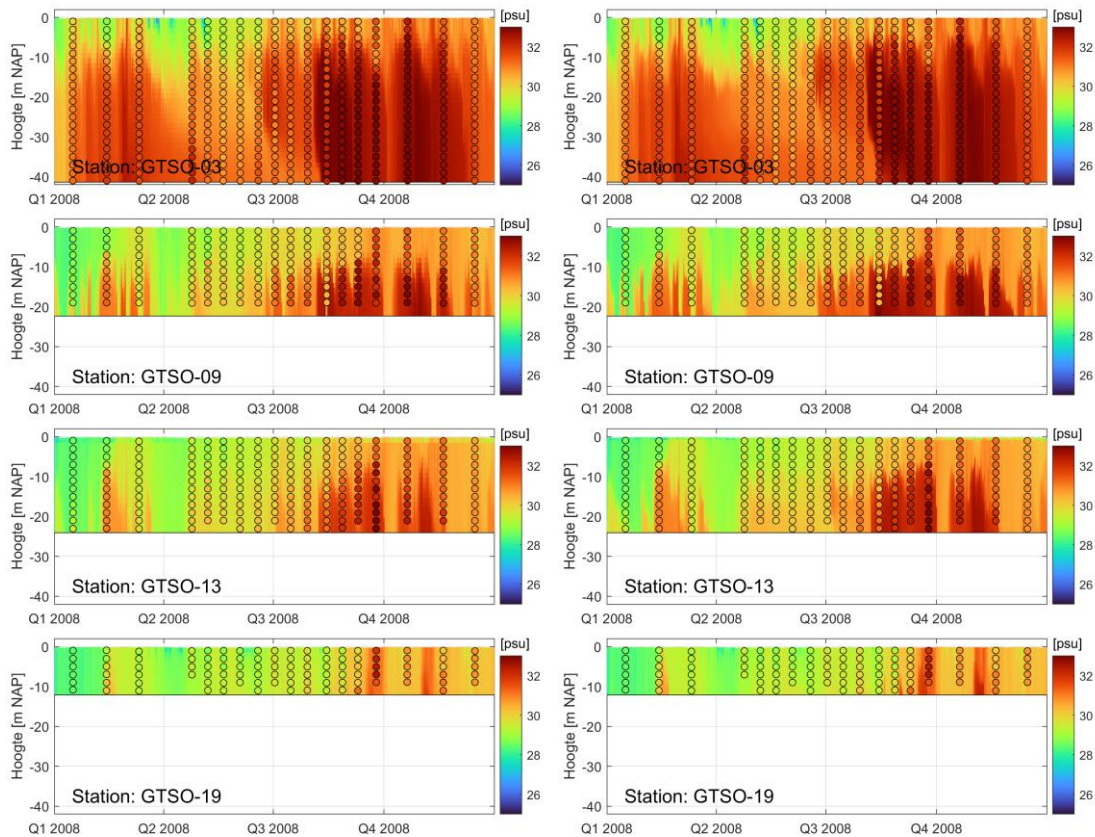
Voor de jaarsom 2008 en het getij-scenario voor jaarsom 2008 is ook gevoeligheidsonderzoek gedaan naar de laagdiktes (0,5 m t.o.v. 1,25 m). De resultaten hiervan laten een vergelijkbaar trend zien als voor jaarsom 2017 en zijn in deze bijlage beschreven en weergegeven.

A.1 Gevoeligheidsonderzoek laagdiktes jaarsom 2008

A.1.1 Saliniteit

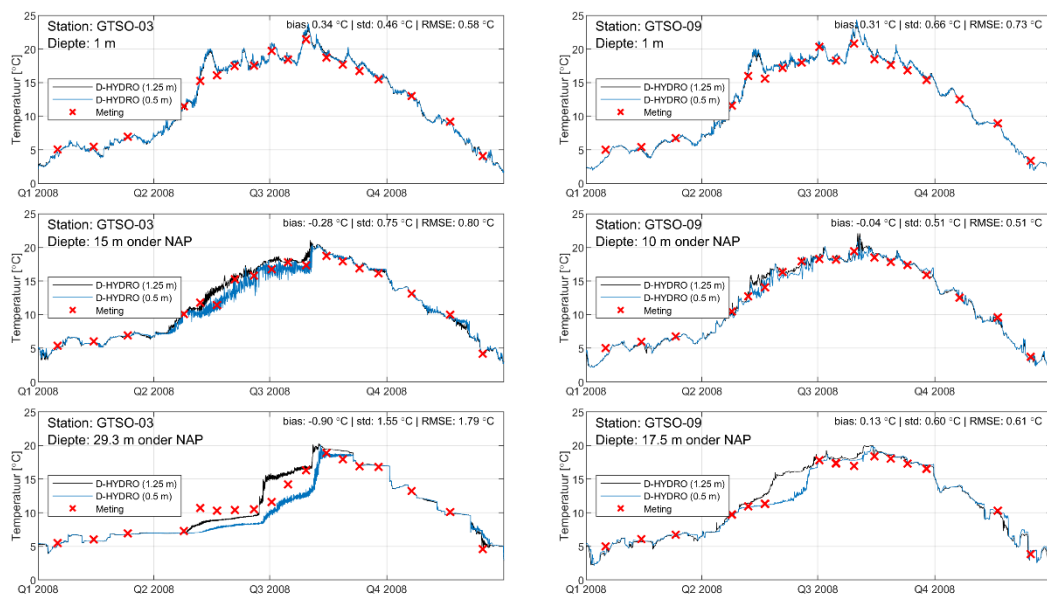


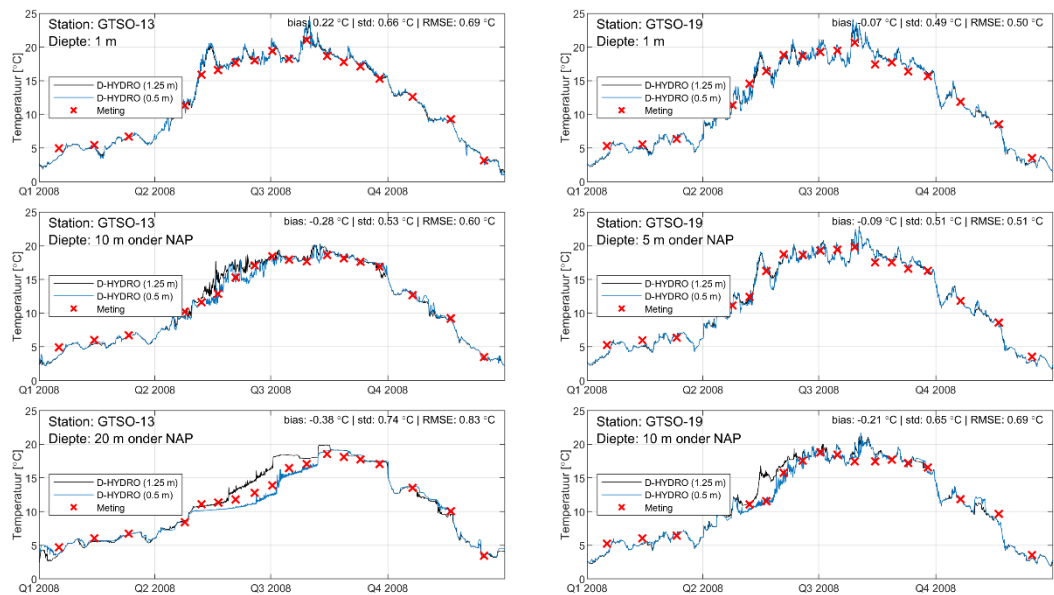
Figuur A.1 Vergelijking van berekende saliniteit (psu) voor verschillende laagdiktes (lijnen; D-HYDRO sommen met laagdikte 1,25 m en laagdikte 0,5 m) en de correlatie met de metingen (rode kruisen) in de periode 2008 voor verschillende GTSO- meetstations (GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19). Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: voor het oppervlakte (1 m onder oppervlakte); voor de middelste waterlaag (5 tot 15 m diepte) en net boven de bodemlaag (10 tot 29,3 m diepte).



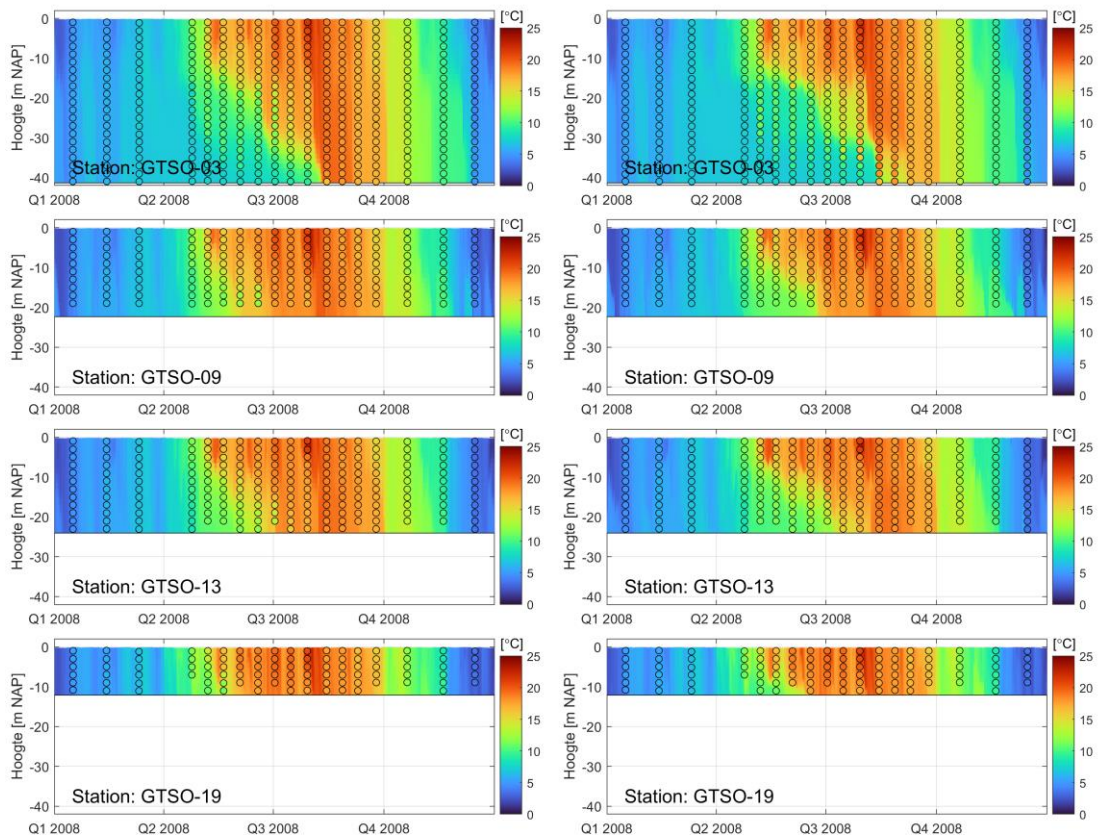
Figuur A.2 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van saliniteit voor de D-HYDRO som met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2008 voor verschillende meetstations. Gekozen locaties liggen verdeeld over het Grevelingenmeer: in het westen (GTSO-03), midden (GTSO-09 en GTSO-13) en oosten (GTSO-19).

A.1.2 Temperatuur



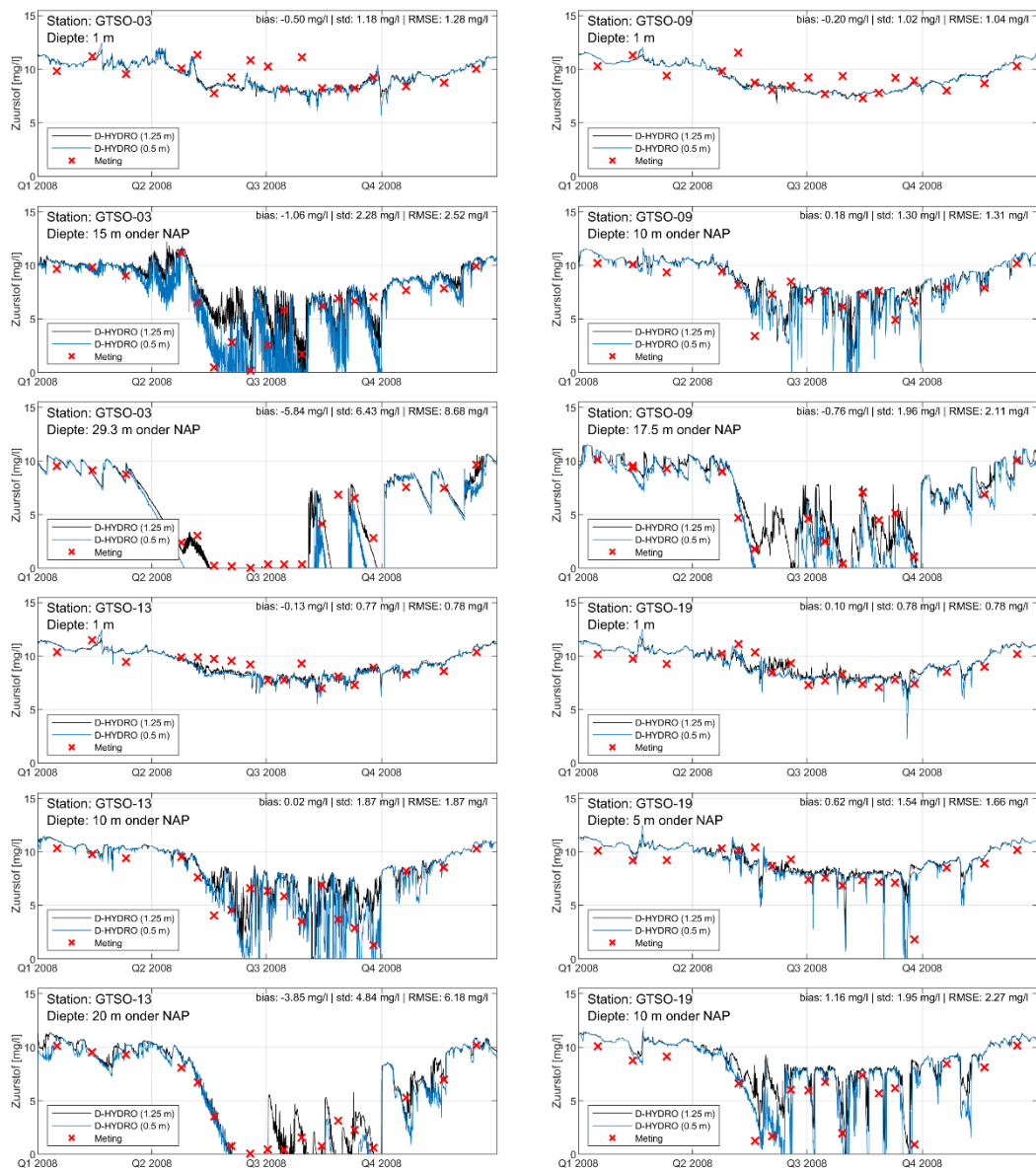


Figuur A.3 Vergelijking van berekende temperatuur (°C) voor verschillende laagdiktes (lijnen; D-HYDRO sommen met laagdikte 1,25 m en laagdikte 0,5 m) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) in de periode 2008 voor verschillende GTSO- meetstations (GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19). Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: voor het oppervlakte (1 m onder oppervlakte); voor de middelste waterlaag (5 tot 15 m diepte) en net boven de bodemlaag (10 tot 29,3 m diepte).

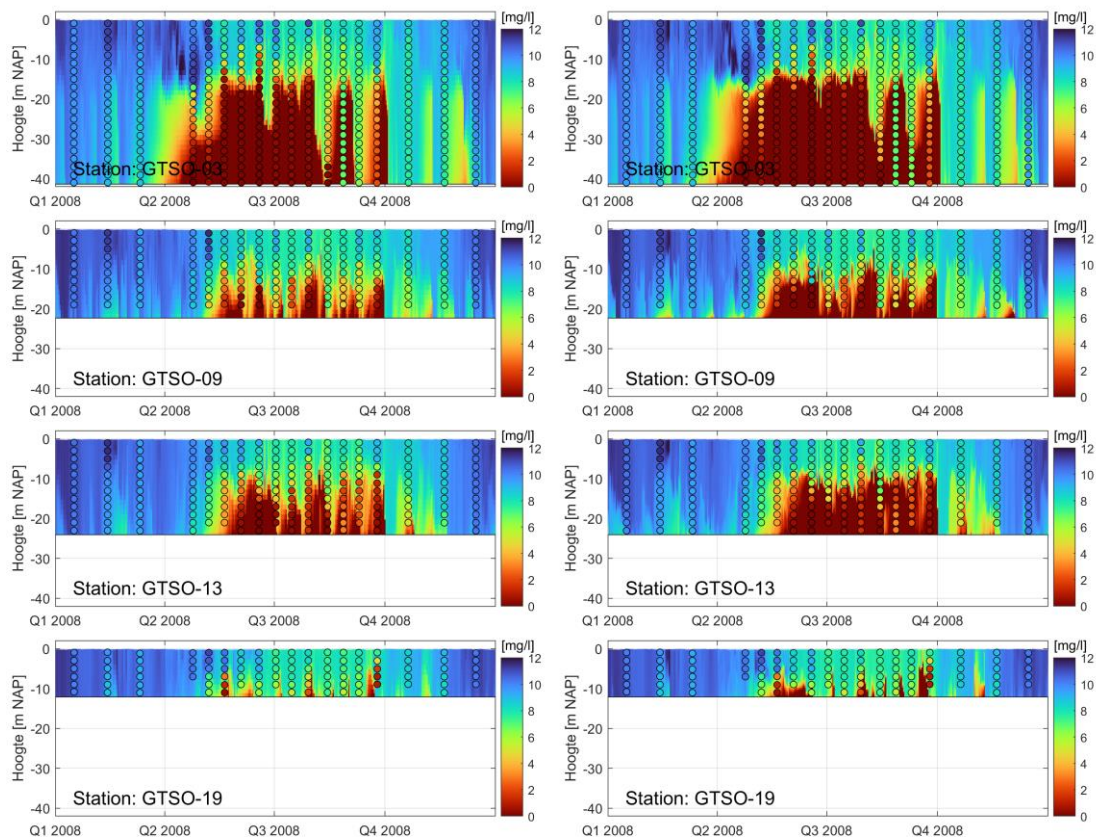


Figuur A.4 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van temperatuur voor de D-HYDRO som met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2008 voor verschillende meetstations. Gekozen locaties liggen verdeeld over het Grevelingenmeer: in het westen (GTSO-03), midden (GTSO-09 en GTSO-13) en oosten (GTSO-19).

A.1.3 Opgeloste zuurstofconcentraties

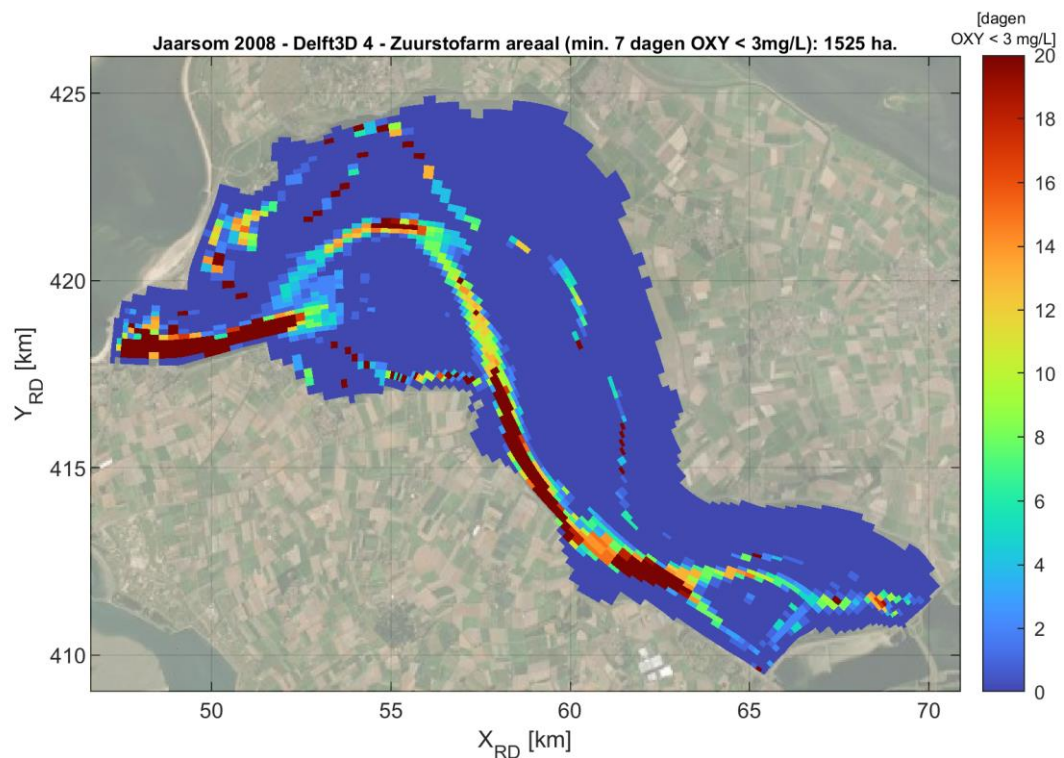


Figuur A.5 Vergelijking van berekende opgeloste zuurstofconcentraties (mg/L) voor verschillende laagdiktes (lijnen; D HYDRO sommen met laagdikte 1,25 m en laagdikte 0,5 m) en de correlatie met de metingen (rode kruizen) in de periode 2008 voor verschillende GTSO- meetstations (GTSO-03, GTSO-09, GTSO-13 en GTSO-19). Metingen en berekende waarden zijn weergegeven voor verschillende dieptes: voor het oppervlakte (1 m onder oppervlakte); voor de middelste waterlaag (5 tot 15 m diepte) en net boven de bodemlaag (10 tot 29,3 m diepte).

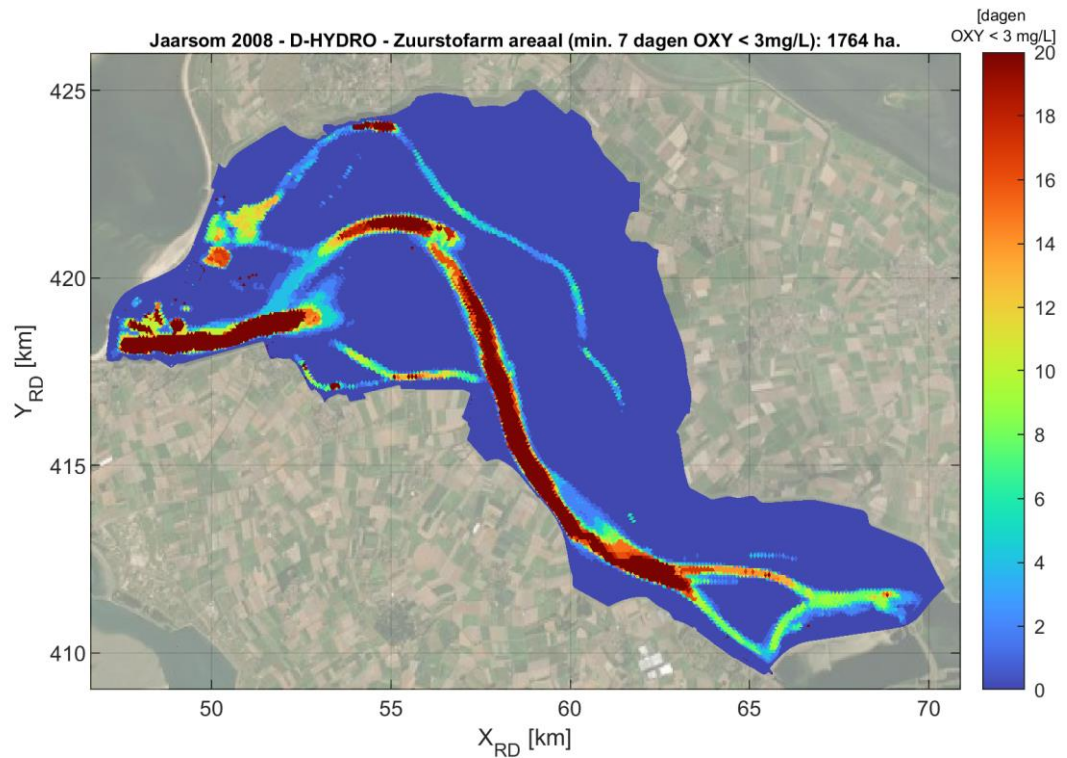


Figuur A.6 Vergelijking van gemeten (cirkels) en berekende verticale profielen (achtergrond) van opgeloste zuurstofconcentraties voor de D-HYDRO som met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2008 voor verschillende meetstations. Gekozen locaties liggen verdeeld over het Grevelingenmeer: in het westen (GTSO-03), midden (GTSO-09 en GTSO-13) en oosten (GTSO-19).

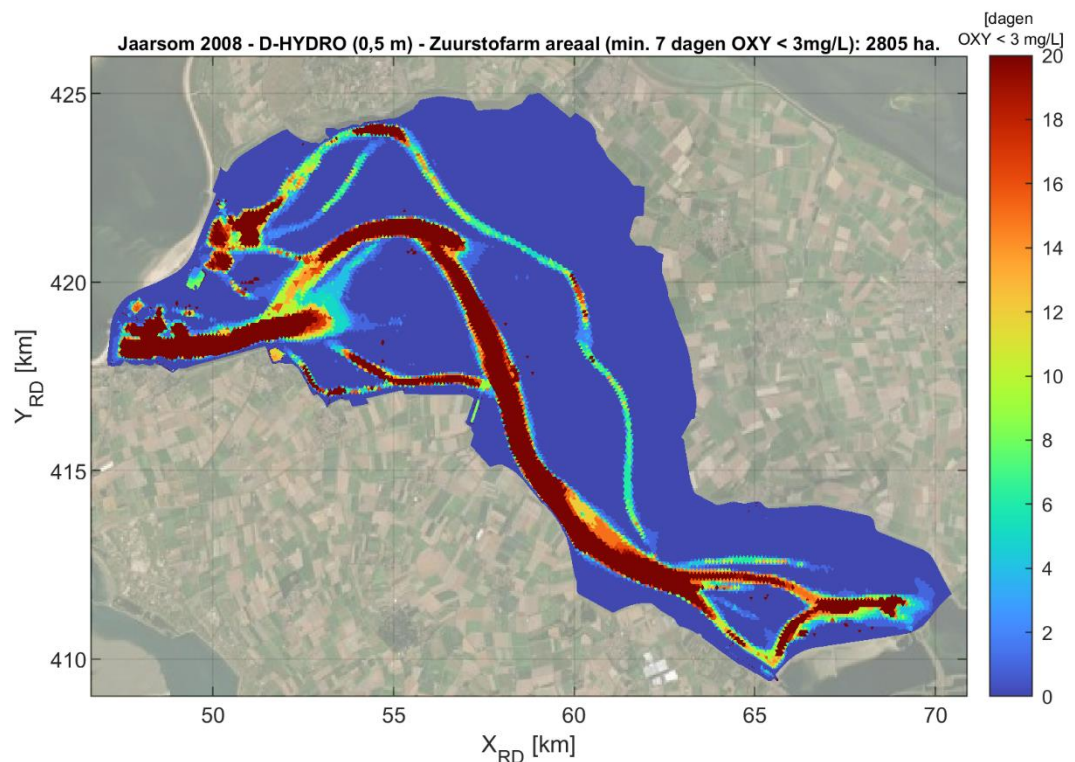
Een parameter die in voorgaande Grevelingenstudies is gebruikt om de zuurstofloosheid in kaart te brengen is het zogenoemde zuurstofarme areaal; deze indicator is gedefinieerd als het oppervlak (in hectare) waarvan de zuurstofconcentratie aan de bodem voor minimaal 7 aaneengesloten dagen lager is dan 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-model met laagdiktes van 1,25 m (Figuur A.7), het D-HYDRO-model met laagdiktes van 1,25 m (Figuur A.8) en het D-HYDRO-model met laagdiktes van 0,5 m (Figuur A.9). De patronen van zuurstofarme gebieden komen in het Delft3D 4- en D-HYDRO-model kwalitatief gezien goed overeen bij dezelfde laagdiktes. Het Delft3D 4-model berekent een zuurstofarm areaal van 1525 ha, voor het D-HYDRO-model wordt een waarde van 1764 ha gevonden. Echter resulteert een verandering in laagdiktes wel in grote gevolgen voor het zuurstofloze areaal. Bij een D-HYDRO model met laagdiktes van 0,5 m wordt namelijk een zuurstofarm areaal berekend van 2805 ha, dit is een stijging van ~60%. Wel is het goed om hierbij de gevoeligheid van de indicator (met 'harde' grenzen 7 aaneengesloten dagen en 3 mg/L) in het achterhoofd te houden. Een gevoeligheidsanalyse met meerdere berekeningen wordt aan aangeraden om een bandbreedte te bepalen (Groeneboom et al., 2020).



Figuur A.7 Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het Delft3D-4 model en laagdiktes van 1,25 m. Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.



Figuur A.8 Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het D-HYDRO model en laagdiktes van 1,25 m. Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.

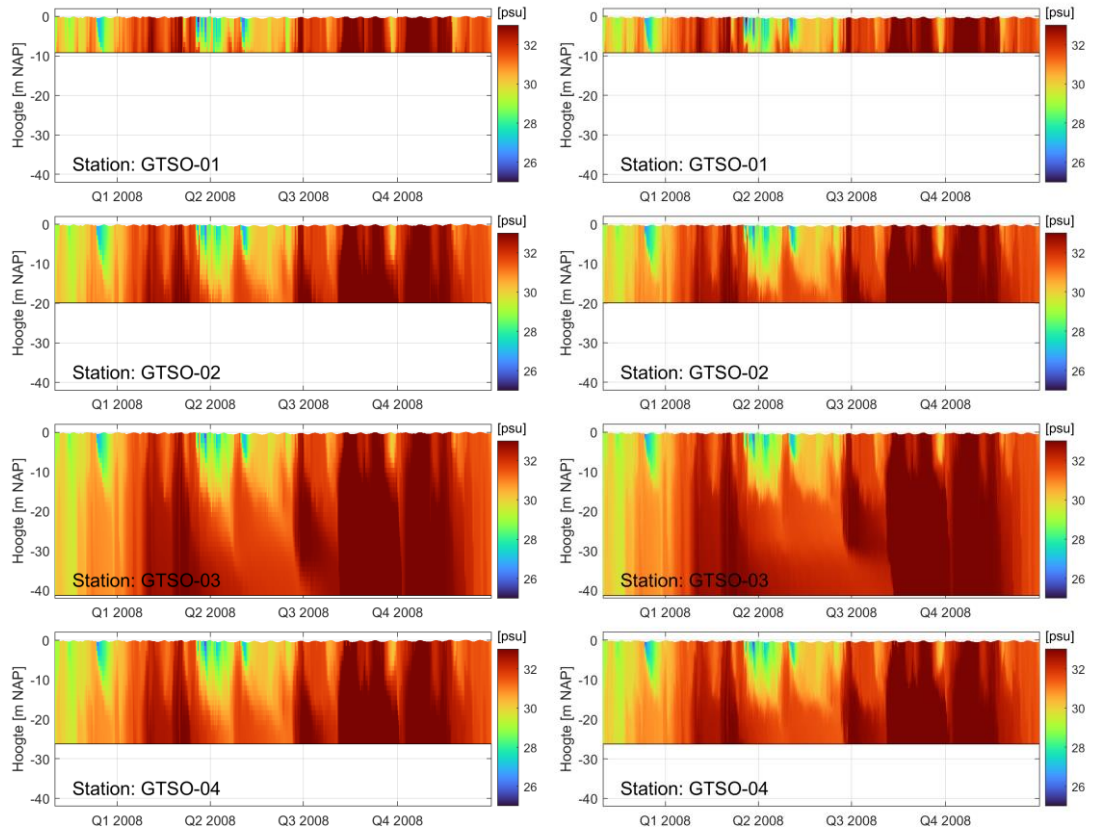


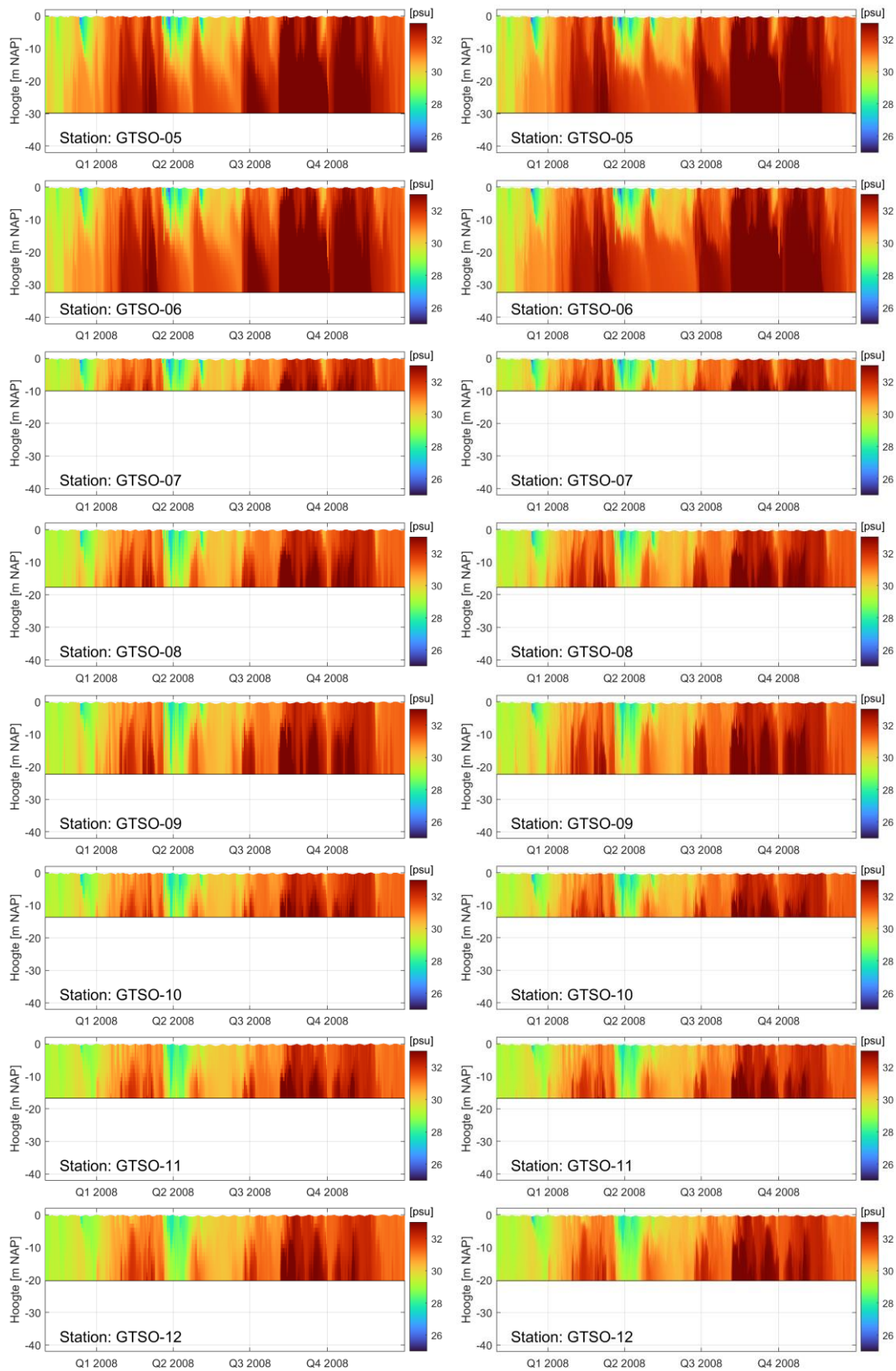
Figuur A.9 Maximaal aantal aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities (concentratie < 3 mg/L) voor het Grevelingenmeer berekend met het Delft3D-4 model en laagdiktes van 0,5 m. Het zuurstofarme areaal (in ha.) wordt berekend (zie waarde in titel) op basis van tenminste 7 aaneengesloten dagen van zuurstofarme condities.

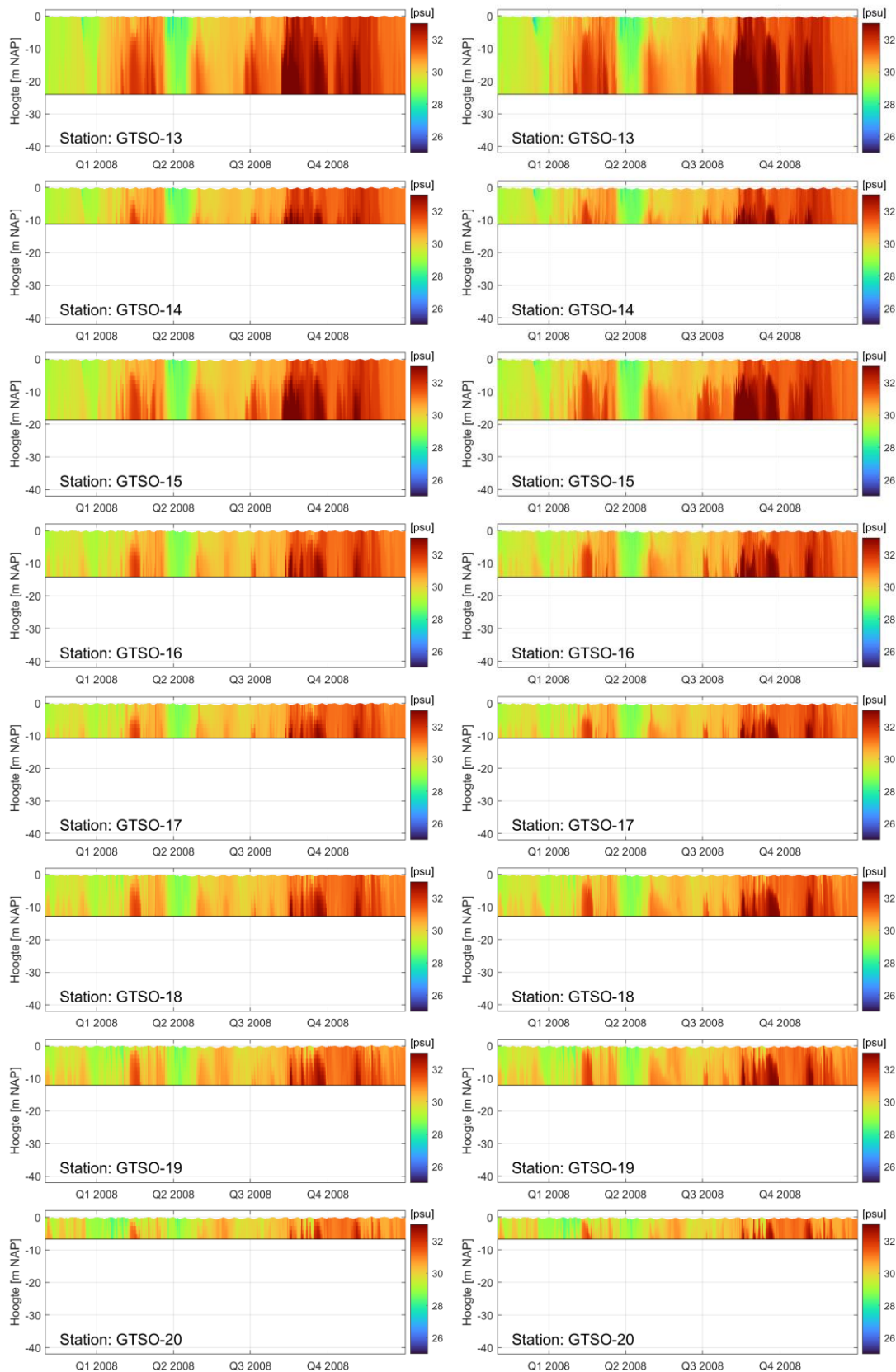
A.2 Gevoeligheidsonderzoek laagdiktes getij-scenario 2008

A.2.1

Saliniteit



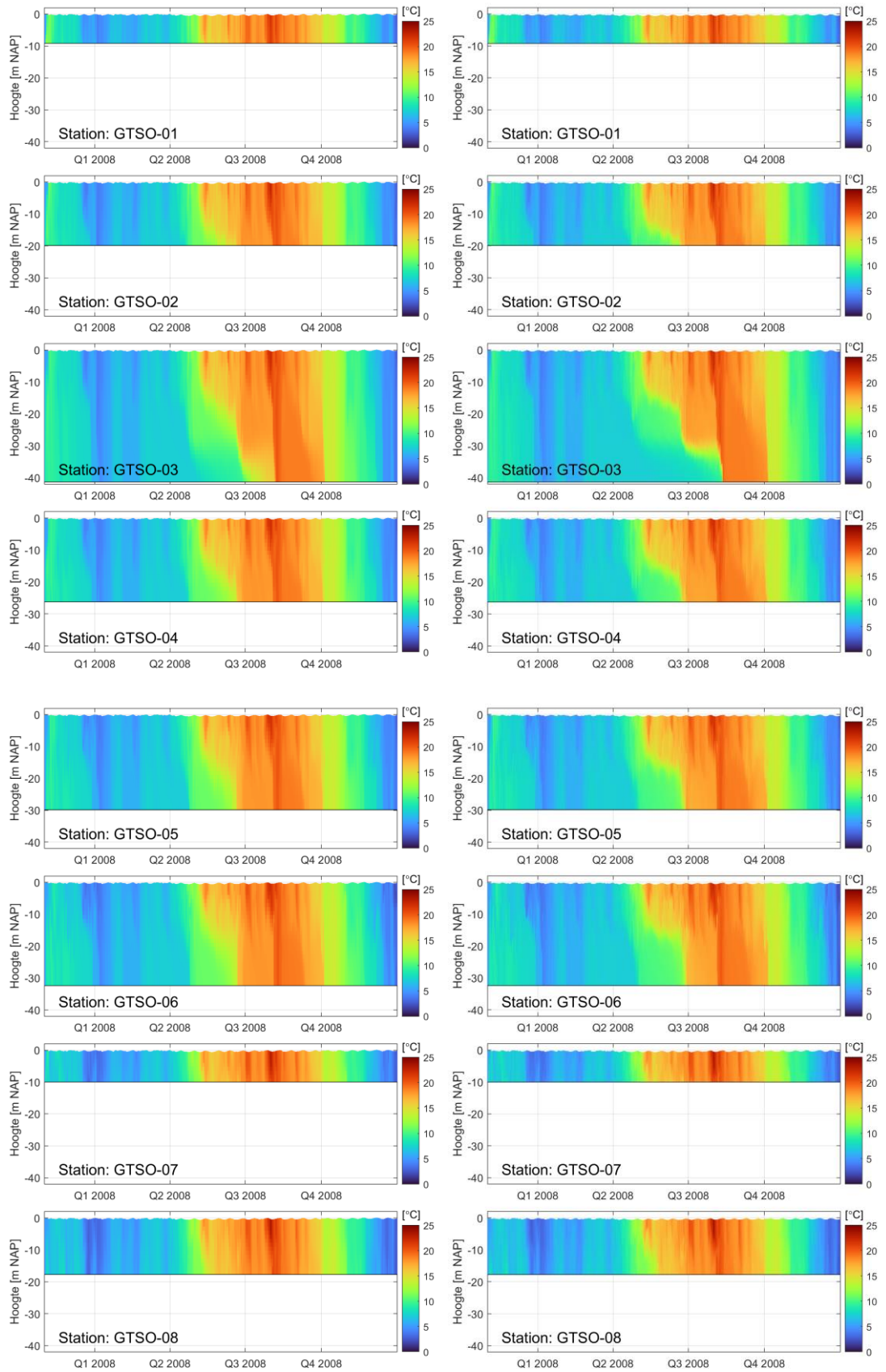


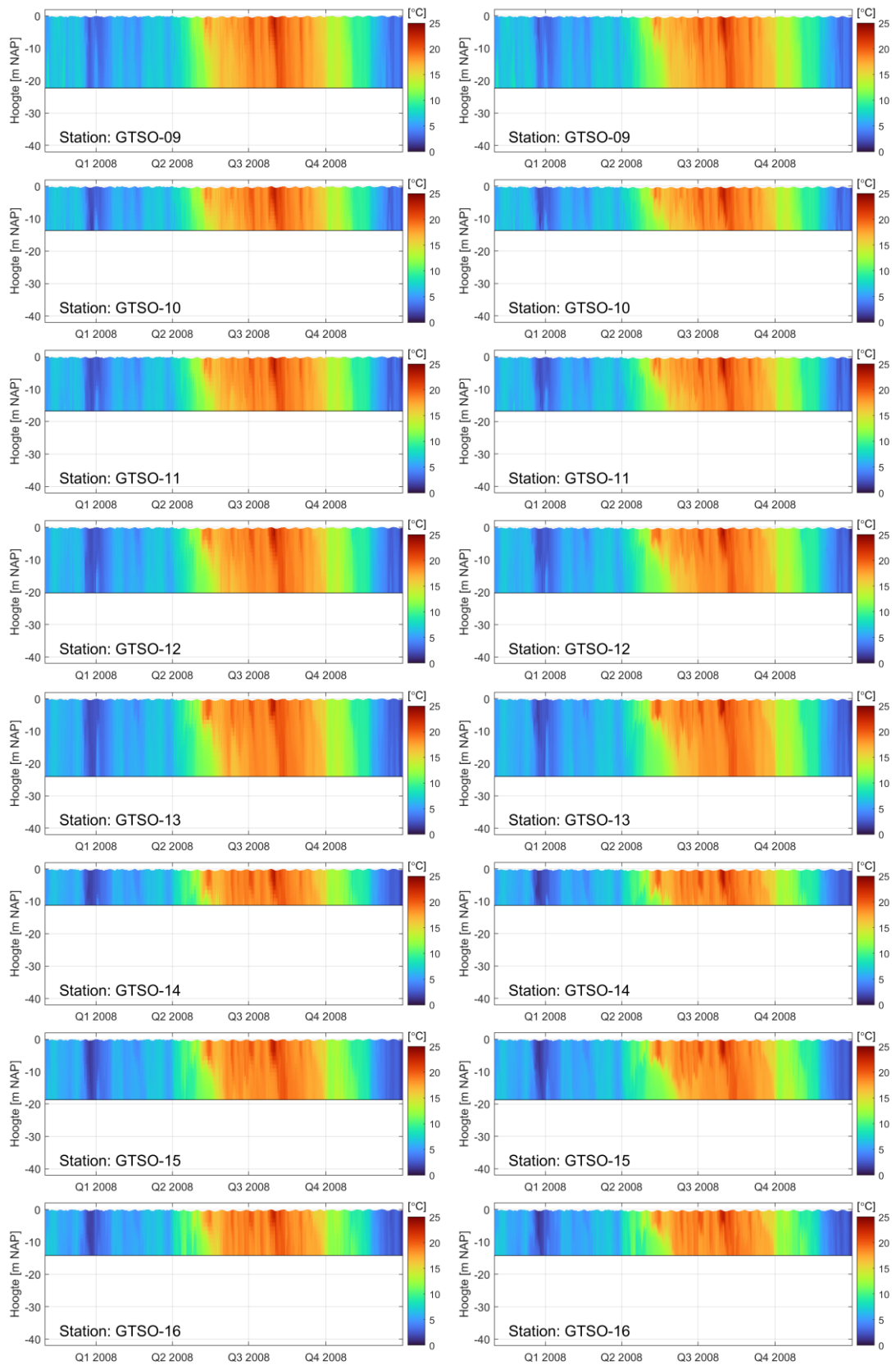


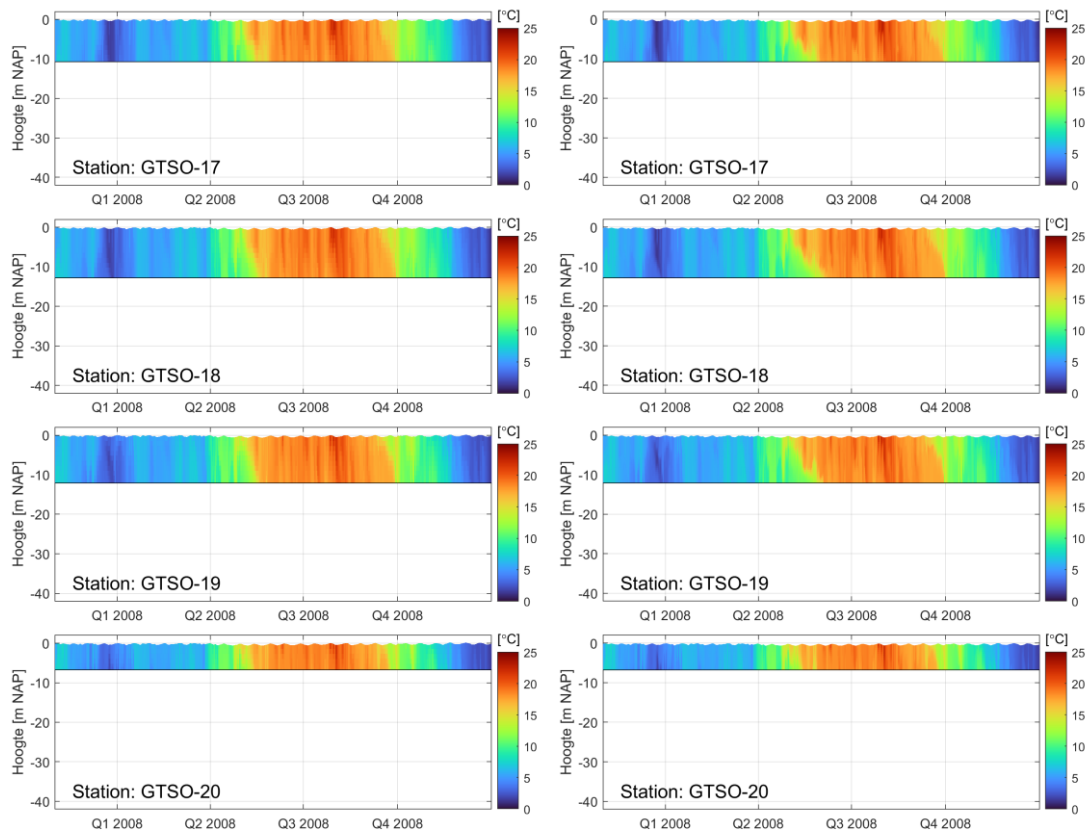
Figuur A.10 Vergelijking van berekende verticale profielen van zoutgehaltes voor de D-HYDRO som getij-scenario met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2008 voor GTSO meetstations.

A.2.2

Temperatuur



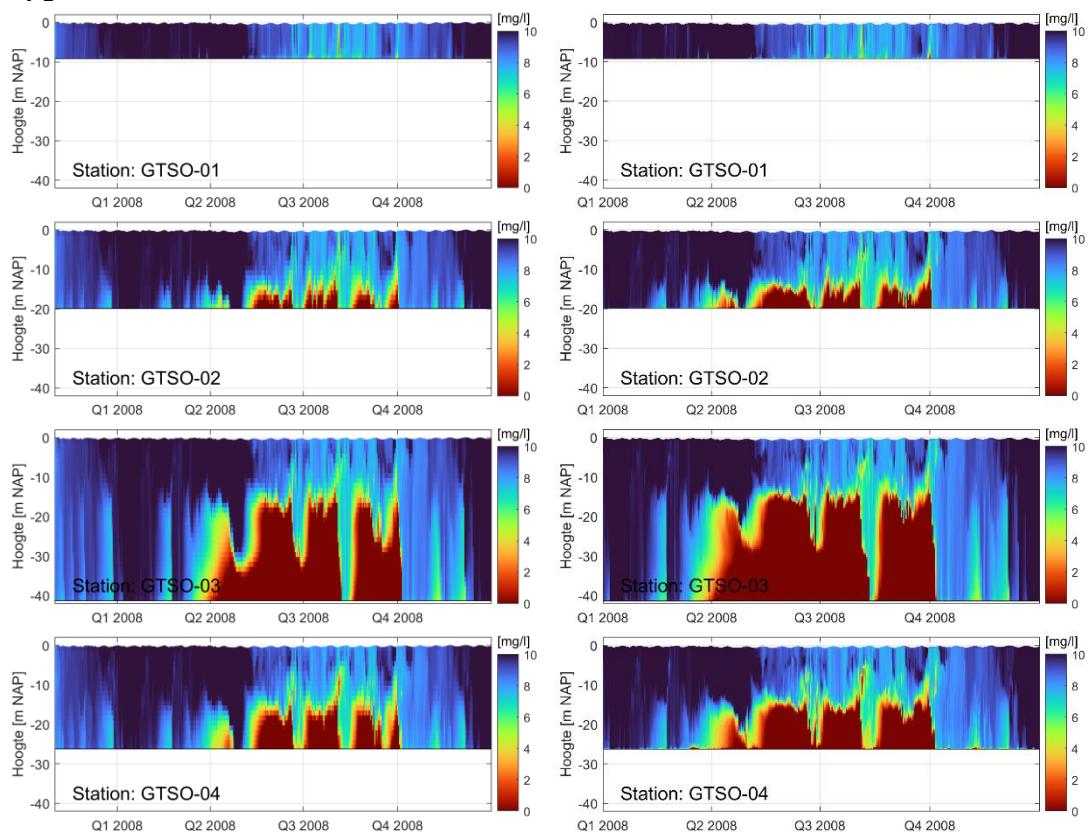


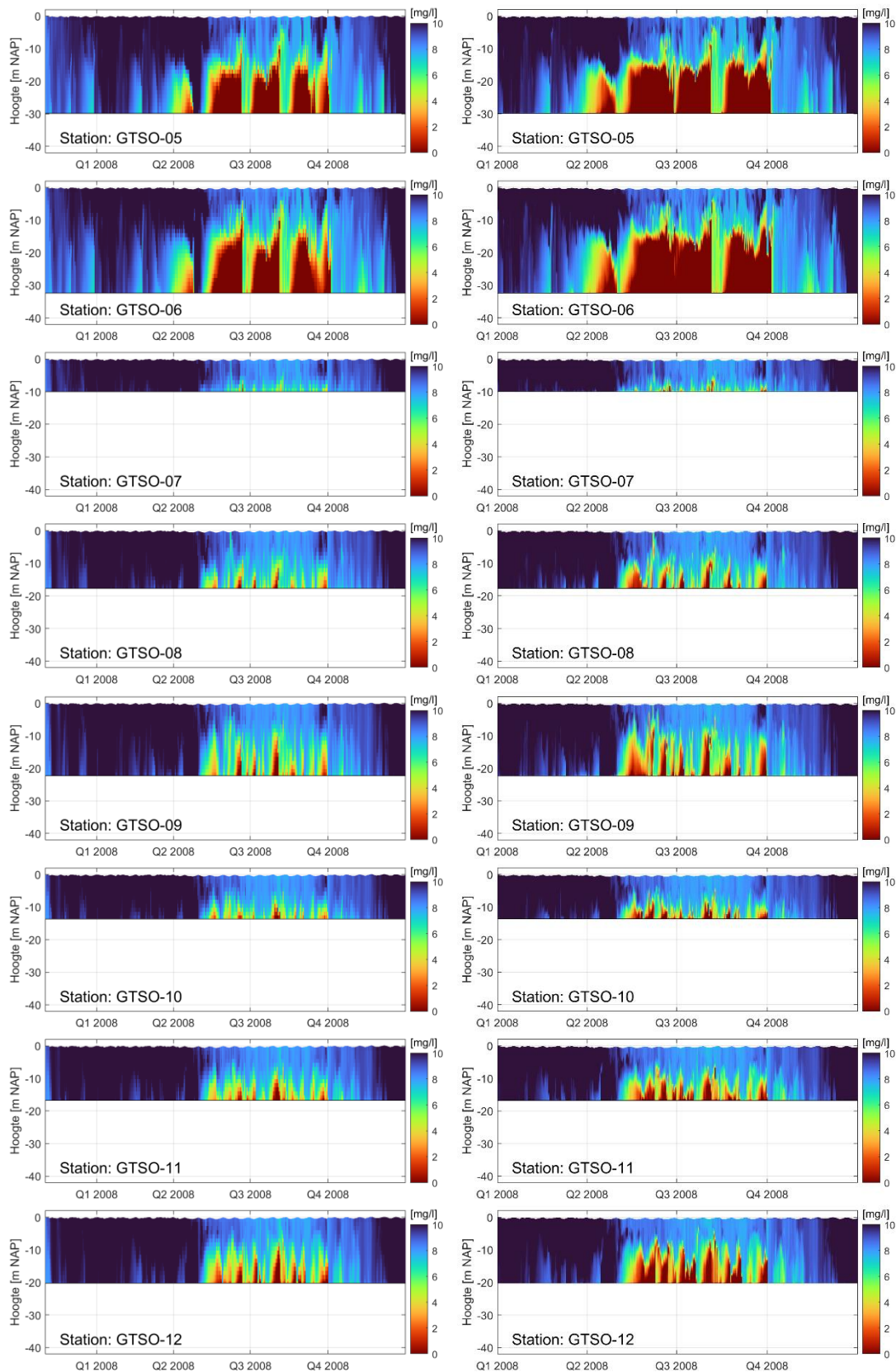


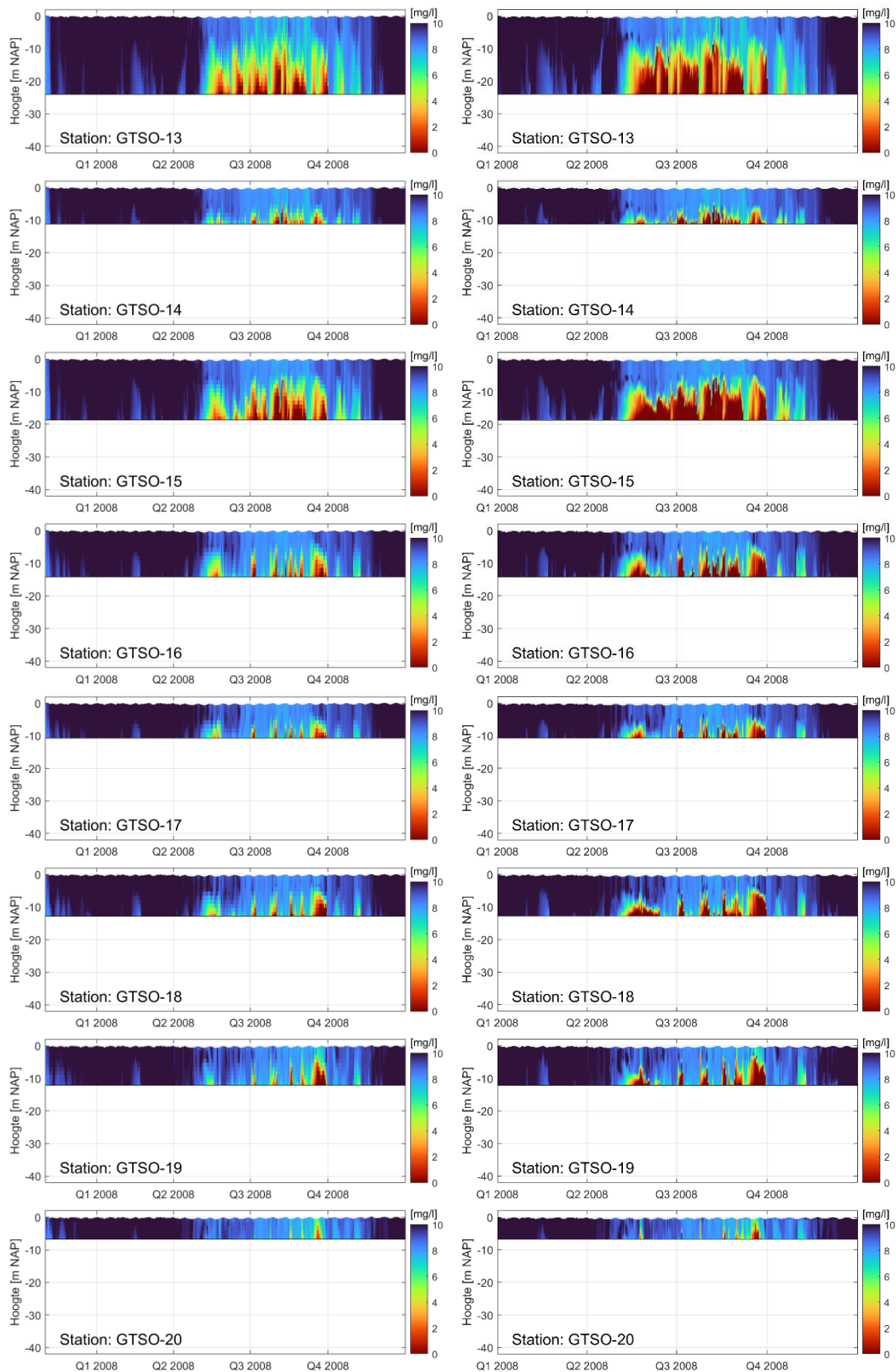
Figuur A.11 Vergelijking van berekende verticale profielen van temperatuur voor de D-HYDRO som getijscenario met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2008 voor GTSO meetstations.

A.2.3

Opgeloste zuurstofconcentraties







Figuur A.12 Vergelijking van berekende verticale profielen van opgeloste zuurstofconcentraties voor de D-HYDRO som getij-scenario met laagdiktes van 1,25 m (linker figuur) en 0,5 m (rechter figuur) in het jaar 2008 voor GTSO meetstations.

B 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 waarde en ζ_{obs} de geobserveerde waarde. 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 waarde en ζ_{obs} de geobserveerde waarde. Bij het gemiddeld verschil kan een te hoog berekende waarde een te laag berekende waarde 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 bepaalde periode, ζ_{sim} de gesimuleerde waarde, ζ_{obs} de geobserveerde waarde en *GV* het gemiddeld verschil zoals hierboven gedefinieerd. De standaarddeviatie is een maat voor de spreiding van het verschil rondom het gemiddeld verschil.

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