

## Systemanalyse Veerse Meer

1,



## Systeemanalyse Veerse Meer

### **Auteur(s)**

Theo Prins

Arno Nolte

Lora Buckman

Willem Stolte

## Systeemanalyse Veerse Meer

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Gerben Dekker, Jan Willem Slager
<b>Referenties</b>	KPP WR08 BOA ZW Delta – Veerse Meer
<b>Trefwoorden</b>	Veerse Meer, waterkwaliteit, zuurstof, watersysteem

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	21-04-2023
<b>Projectnummer</b>	11208079-000
<b>Document ID</b>	11208079-000-ZKS-0009
<b>Pagina's</b>	53
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Theo Prins	
	Arno Nolte	
	Lora Buckman	
	Willem Stolte	

# Samenvatting

Dit rapport beschrijft de problemen rond waterkwaliteit en ecologie die de laatste jaren zijn opgetreden in het Veerse Meer en geeft een eerste analyse van mogelijke oorzaken. De nadruk ligt in dit rapport op de zuurstofproblematiek in het meer. Andere aspecten, zoals het niet halen van Natura2000 doelen en overlast voor gebruikers door groei van wieren en het optreden van kwallenplagen, zijn in deze fase geen onderdeel van de analyse.

De analyse, gebaseerd op nu beschikbare gegevens uit monitoring, onderzoek en modellering, geeft meer inzicht in de relevante processen in het Veerse Meer. In het Veerse Meer treedt in de zomer een temperatuurstratificatie op, vooral in het deel vanaf de Middelplassen en verder naar het westen. Dit wordt veroorzaakt door opwarming van de bovenlaag van het water. Door die stratificatie is er weinig uitwisseling tussen de oppervlaktelaag en de diepere waterlaag onder de spronglaag. De instroom van water uit de Oosterschelde via de Katse Heule zorgt voor voldoende verversing van de diepere waterlaag in het oostelijk deel van het Veerse Meer, maar dat effect wordt minder in westelijke richting. Gecombineerd met een hoge zuurstofvraag van de bodem leidt dit tot sterk verlaagde zuurstofconcentraties in de diepe waterlaag in de westelijke helft van het Veerse Meer. Die lage zuurstofconcentraties in de diepe delen zijn een gevolg van de fysische omstandigheden in het meer.

Uit de analyse blijkt dat de stratificatie en de diepte van de spronglaag gedurende de zomer kan variëren. Met name in de waterlaag tussen 2-8 m diepte kunnen ook de zuurstofconcentraties sterk wisselen en soms zo laag worden dat dit potentieel een negatief effect heeft op bodemdieren. Er zijn ook veranderingen in de bodemdiergemeenschap en waarnemingen van bacteriematten op de bodem, die mogelijk verband houden met de zuurstofconcentraties, maar dit vraagt nog om verdere analyse.

Er is een aantal maatregelen dat wordt overwogen om waterkwaliteit en ecologie van het Veerse Meer te verbeteren, zoals vergroten van de uitwisseling met de Oosterschelde, verbeteren van het horizontaal transport in het meer door het verwijderen van ondieptes, of het verminderen van de belasting met voedingsstoffen via de afvoer van polderwater. Vervolgstudies in 2023, onder andere door modelberekeningen, moeten meer inzicht geven in de effectiviteit van de maatregelen en zullen ook gebruikt worden voor een actualisering van de huidige analyse.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Achtergrond	6
1.2	Doel van dit rapport	6
1.3	Gebruikte gegevens	6
<b>2</b>	<b>Huidige staat</b>	<b>8</b>
2.1	Inleiding	8
2.2	Wat zijn de problemen?	8
2.2.1	Zuurstofconcentraties	8
2.2.2	Bodemdieren	13
2.2.3	Vissen	14
2.2.4	Wieren en macrofyten	15
2.2.5	Kwallen	15
2.2.6	Vogels	15
2.3	Prioritering en effectketen	16
<b>3</b>	<b>Wat zijn mogelijke oorzaken?</b>	<b>18</b>
3.1	De belangrijkste processen voor de zuurstofhuishouding	18
3.1.1	Primaire productie	19
3.1.1.1	Fytoplankton	19
3.1.1.2	Wieren	20
3.1.1.3	Conclusies	21
3.1.2	Nutriëntenbelasting	21
3.1.3	Verversing	25
3.1.4	Stratificatie	27
3.1.4.1	Gemiddelde patroon in de zomer	27
3.1.4.2	Korte termijn variatie in stratificatie en zuurstofconcentraties	29
3.1.5	Zuurstofverbruik in waterkolom en sediment	31
3.1.6	Import van organisch materiaal	34
3.1.7	Watertemperatuur	35
3.2	Model resultaten	36
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Referenties</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Appendix 1</b>	<b>41</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In 2004 is de uitwisseling van water tussen Veerse Meer en Oosterschelde sterk verbeterd door de aanleg van het doorlaatmiddel in de Zandkreekdam (de 'Katse Heule'). In het laatste bekkenrapport met een beschrijving van de periode 2000-2014 is geconcludeerd dat het doorlaatmiddel heeft geresulteerd in wezenlijke veranderingen van de waterkwaliteit en de ecologie van het meer (Prins en Vergouwen 2015). De waterkwaliteit is verbeterd door daling van de nutriëntenconcentraties en sterke afname van de fytoplankton- en zeeslabloeiën. Door de toename van de saliniteit na de ingebruikname van het doorlaatmiddel heeft het Veerse Meer een meer marien karakter gekregen, wat terug te zien is in de soortensamenstelling van wieren, bodemdieren, vissen en vogels.

De laatste jaren is duidelijk geworden dat er problemen optreden in het Veerse Meer rond waterkwaliteit, waterbodem en ecologie, ondanks de opgetreden verbeteringen als gevolg van het doorlaatmiddel en het aangepaste peilbeheer. Voorbeelden hiervan zijn het optreden van vissterfte in 2019 en 2020, aanwijzingen voor een verandering in soortensamenstelling en afname in biomassa van de bodemdierengemeenschap, het voorkomen van bacteriematten op de bodem, overlast door grote dichtheden van kwalen en hoge biomassa wieren (Houtekamer & van Kleef 2021).

In dit rapport wordt een systeemanalyse van het Veerse Meer beschreven. Op basis van een conceptueel model van het Veerse Meer en een analyse van beschikbare meetgegevens en modelresultaten wordt een analyse gemaakt van de problemen rond waterkwaliteit en ecologie en de oorzaken van deze problemen.

## 1.2 Doel van dit rapport

Dit rapport heeft als doel om, op basis van de nu beschikbare informatie uit onderzoek en monitoring, te identificeren wat de meest waarschijnlijke oorzaken zijn van de optredende problemen rond waterkwaliteit en ecologie, en daarmee richting te geven aan een verder uitwerken van mogelijke maatregelen om die problemen op te lossen of te mitigeren.

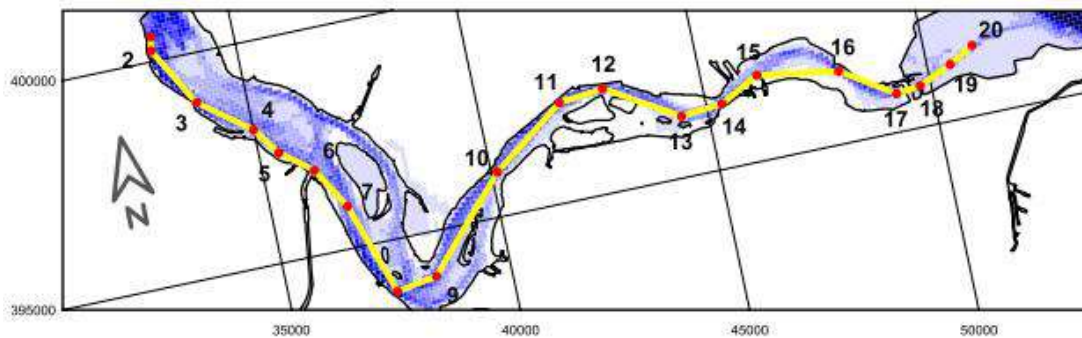
## 1.3 Gebruikte gegevens

Deze analyse richt zich hoofdzakelijk op de periode na de ingebruikname van de Katse Heule.

Voor de analyse van trends is gebruik gemaakt van de meest recente, beschikbare gegevens uit het routine monitoringprogramma MWTL voor het meetpunt Soelekerkepolder.

Daarnaast zijn de gegevens gebruikt van de TSO metingen waarmee verticale profielen van een aantal parameters, waaronder temperatuur, zoutgehalte, zuurstof, is gemeten. Deze metingen waren voor de jaren t/m 2011 beschikbaar voor een transect van 17 meetpunten tussen de Veerse Gatdam en de Zandkreekdam (Figuur 1-1). Van 2012 t/m 2019 zijn de verticale profielen alleen op Soelekerkepolder gemeten (meetpunt 10). Vanaf 2020 zijn weer metingen over het gehele transect beschikbaar.

Aanvullend is gebruik gemaakt van gerapporteerde meetgegevens en bevindingen, zoals de resultaten van onderzoek door Universiteit Utrecht, Bureau Waardenburg en de metingen met meetboeien door RWS. Tabel 1-1 geeft een overzicht van de gebruikte gegevens.



Figuur 1-1 Kaart van TSO locaties in het Veerse Meer – Vanaf april 2012 – januari 2020 is alleen locatie 10 Soelekerkepolder Oost gemeten.

Tabel 1-1 Overzicht van de nu beschikbare meetgegevens vanaf 2005

Monitoring/ onderzoek	Parameters	Meetperiode	Locaties	Uitgevoerd door
<b>MWTL</b>	Oppervlak saliniteit, temperatuur, zuurstof, nutriënten, chlorofyl	2005-2021	Soelekerkepolder	RWS
	Bodemdieren Sedimentsamenstelling	2005-2010, 2013, 2016, 2019, 2020	Hele meer	Grontmij/Bureau Waardenburg/Eurofins
	Vis	2016-2020	Hele meer	WMR
<b>TSO</b>	Verticale profielen saliniteit, temperatuur, zuurstof	2005-2011 2012-2019 2020-2022	hele meer Soelekerkepolder hele meer	RWS
<b>meetboeien</b>	Meetboei op twee dieptes saliniteit, temperatuur, zuurstof, chlorofyl	2021, 2022	1 locatie	RWS
<b>Overig</b>	wieren	2006-2014 2021, 2022	Hele meer	NIOZ Bureau Waardenburg
	kwallen	2010-2014	Hele meer	NIOZ
	Zuurstofprofielen en zuurstofopname sediment	2022	4 locaties	Universiteit Utrecht

## 2 Huidige staat

### 2.1 Inleiding

In 2015 is het laatste bekkenrapport verschenen met een beschrijving van de toestand van het Veerse Meer in de periode 2000-2014 (Prins & Vergouwen 2015). De belangrijkste conclusie was dat, door de ingebruikname van het doorlaatmiddel Katse Heule, de uitwisseling van water tussen Veerse Meer en Oosterschelde sterk toegenomen is met positieve effecten op de waterkwaliteit ten opzichte van de periode vóór 2004. Er is een daling van de nutriëntenconcentraties en een sterke afname van de fytoplankton- en zeeslabloeien opgetreden. Daarnaast was er een vermindering van de zoutstratificatie waardoor het optreden van zuurstofloosheid in het oostelijke deel van het Veerse Meer sterk verminderd was. In het westelijk deel komen door gebrek aan menging in de zomer nog steeds tijdelijk zuurstofarme condities in de diepere waterlaag voor.

De laatste jaren zijn er verschillende aanwijzingen dat er een achteruitgang is in de ecologie en waterkwaliteit van het Veerse Meer. Het meest in het oog springende fenomeen was het optreden van vissterfte in het westelijk deel van het Veerse Meer in de zomers van 2019 en 2020. Hieronder worden de belangrijkste recente trends samengevat.

De belangrijkste vragen daarbij zijn:

- *Is er sprake van een achteruitgang in het Veerse Meer in de recente jaren?*
- *Is er sprake van een te verwachten doorgaande trend?*
- *Wat zijn mogelijke oorzaken en oplossingsrichtingen?*
- *Zijn er oorzaken aan te wijzen voor de incidenten van 2019, 2020?*

### 2.2 Wat zijn de problemen?

#### 2.2.1 Zuurstofconcentraties

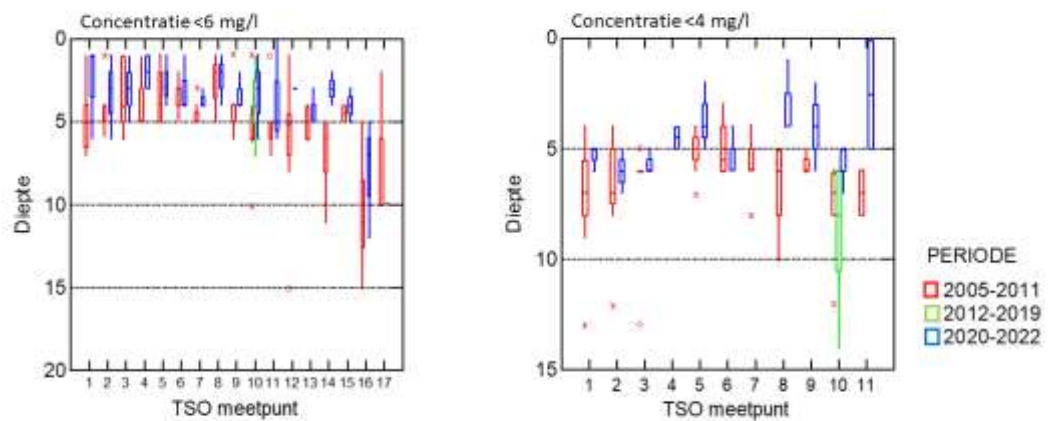
In het bekkenrapport van 2015 werd geconcludeerd dat de minimale diepte waarop verlaagde zuurstofconcentraties werden waargenomen, vanaf 2005 was verbeterd in het middendeel en oostelijk deel van het Veerse Meer. In het westelijk deel was er geen verandering.

Een vergelijkbare analyse is uitgevoerd met de TSO metingen sinds 2005. De minimale diepte waarop zuurstofconcentraties <6 mg/l en <4 mg/l voorkomen zijn afgebeeld in Figuur 2-1. Uit de resultaten blijkt dat concentraties <6 mg/l in het westelijk en middendeel van het Veerse Meer (TSO meetpunten 1-14) voorkomen tussen 0-5 m diepte. In het oostelijk deel van het Veerse Meer (TSO meetpunten 15-17) komen deze concentraties in het algemeen wat dieper voor. Concentraties <4 mg/l worden in het westelijk en middendeel jaarlijks waargenomen op vrijwel alle meetpunten (1-12), zelden dieper dan 10 m. In het oostelijk deel komen concentraties <4 mg/l incidenteel voor.

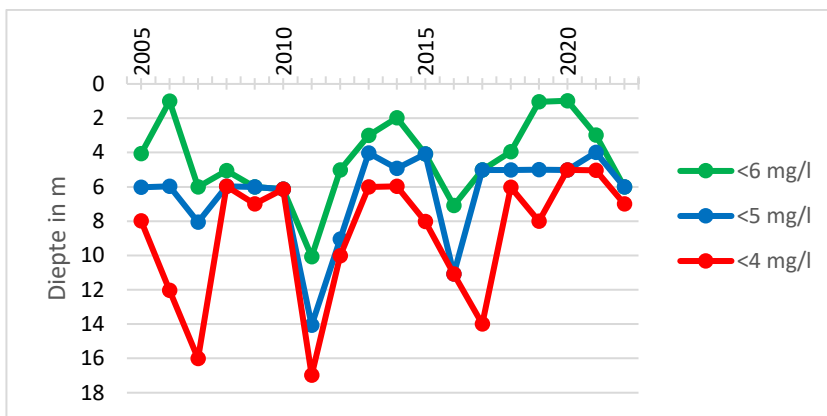
Voor een nadere analyse is onderscheid gemaakt tussen de diepere TSO meetpunten in het westelijk deel van het Veerse Meer (meetpunten 1, 2, 3, 5; transect Vrouwenpolder-Veere), het middendeel van het meer (meetpunten 8, 10, 12, 14; transect Veere-Kortgene) en het oostelijk deel (meetpunt 16, transect Kortgene-Zandkreekdam). In het westelijk en oostelijk deel is er geen significant verschil tussen de periodes 2005-2011 en 2020-2022, in de diepte waarop concentraties <6 mg/l of <4 mg/l voorkomen. In het middendeel komen in de periode 2020-2022 zowel concentraties <6 mg/l ( $p < 0.05$ ) als concentraties <4 mg/l ( $p < 0.010$ ) ondieper voor dan in de jaren 2005-2011 (ANOVA met station en periode als factor). Alleen voor het meetpunt Soelekerkepolder (meetpunt 10) zijn ook voor de jaren 2012-2019 metingen beschikbaar. Daaruit blijkt dat de variatie over de jaren behoorlijk groot is. Trends voor het, over de jaren, ondieper voorkomen van concentraties lager dan 6, 5 of 4 mg/l zijn niet significant (Mann-Kendall test,  $p > 0.05$ ; Figuur 2-2).



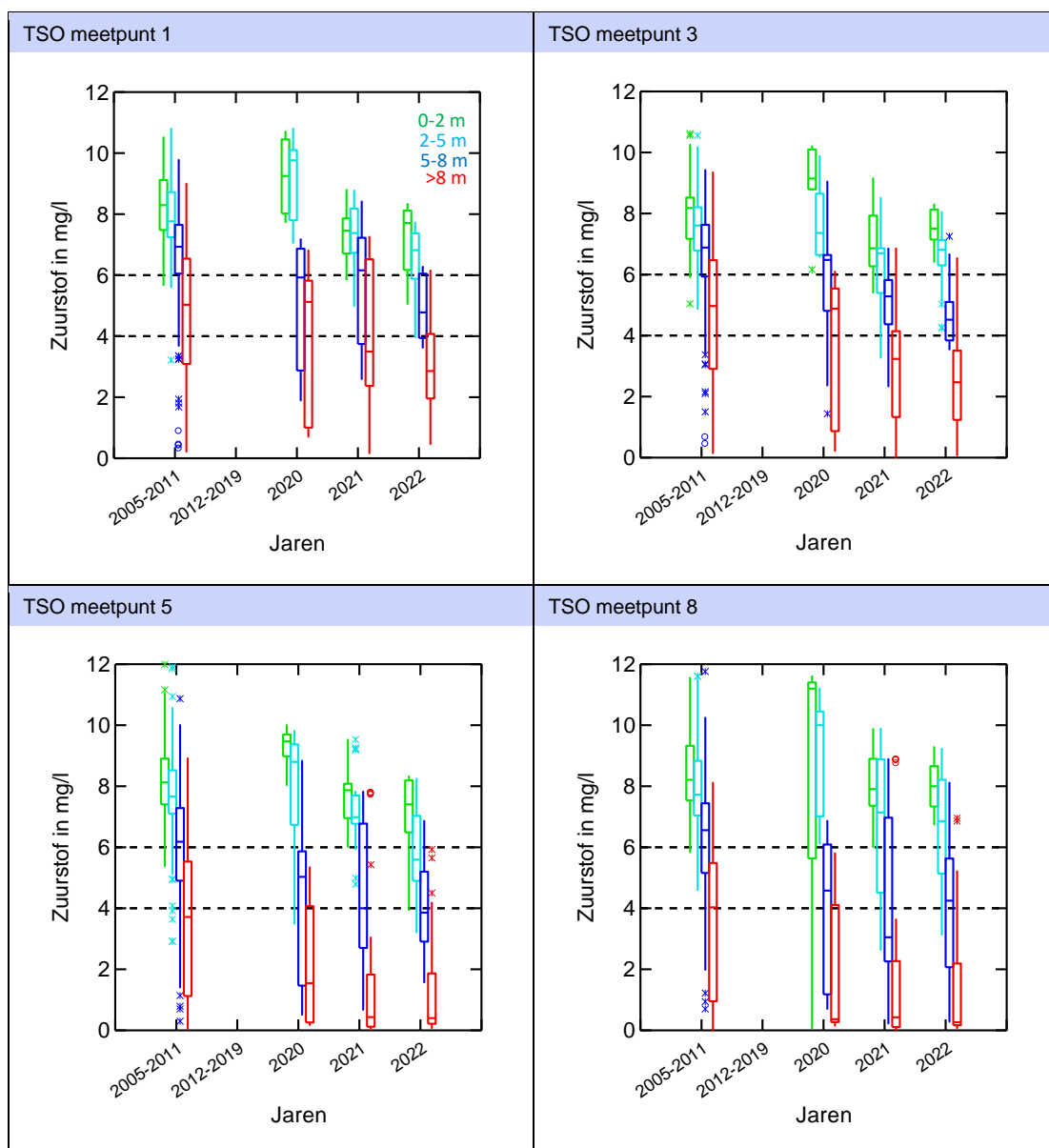
Geconcludeerd kan worden dat lage zuurstofconcentraties (<4 mg/l) in het westelijk en middendeel van het Veerse Meer in de meeste jaren al betrekkelijk ondiep (minder dan 10 m) optreden en in het middendeel in de laatste jaren ondieper voorkomen. De zuurstofconcentraties zijn het laagst in de zomermaanden juni-augustus. Voor die periode zijn in Figuur 2-3 voor vier dieptestrata de zuurstofconcentraties in de maanden juni-augustus weergegeven, voor de jaren 2005-2011, 2012-2019 (alleen TSO meetpunt 10 Soelekerkepolder), en de jaren 2020, 2021, 2022. Bij de keuze van de dieptestrata is aangesloten op de diepteverdeling die in de bodemdierbemonstering wordt gebruikt, met aanvullend een onderscheid bij een diepte van 5 m. De figuur laat duidelijk zien dat in het midden en westelijk deel van het Veerse Meer (meetpunten 1, 3, 5, 8) ook op een waterdiepte van 5-8 m veelvuldig sterk verlaagde zuurstofconcentraties (<4 mg/l) optreden. Dieper dan 8 m is dat in het grootste deel van de waarnemingen het geval. De figuren laten ook zien dat de concentraties in de waterlaag van 5-8 m diepte in de laatste drie jaar veelal lager zijn dan in de periode 2005-2011. Verder oostelijk in het Veerse Meer (vanaf meetpunt 12) zijn de verticale verschillen in zuurstofconcentratie kleiner en op meetpunten 14 en 16 zijn ook op een diepte >8 m de zuurstofconcentraties zelden lager dan 4 mg/l.



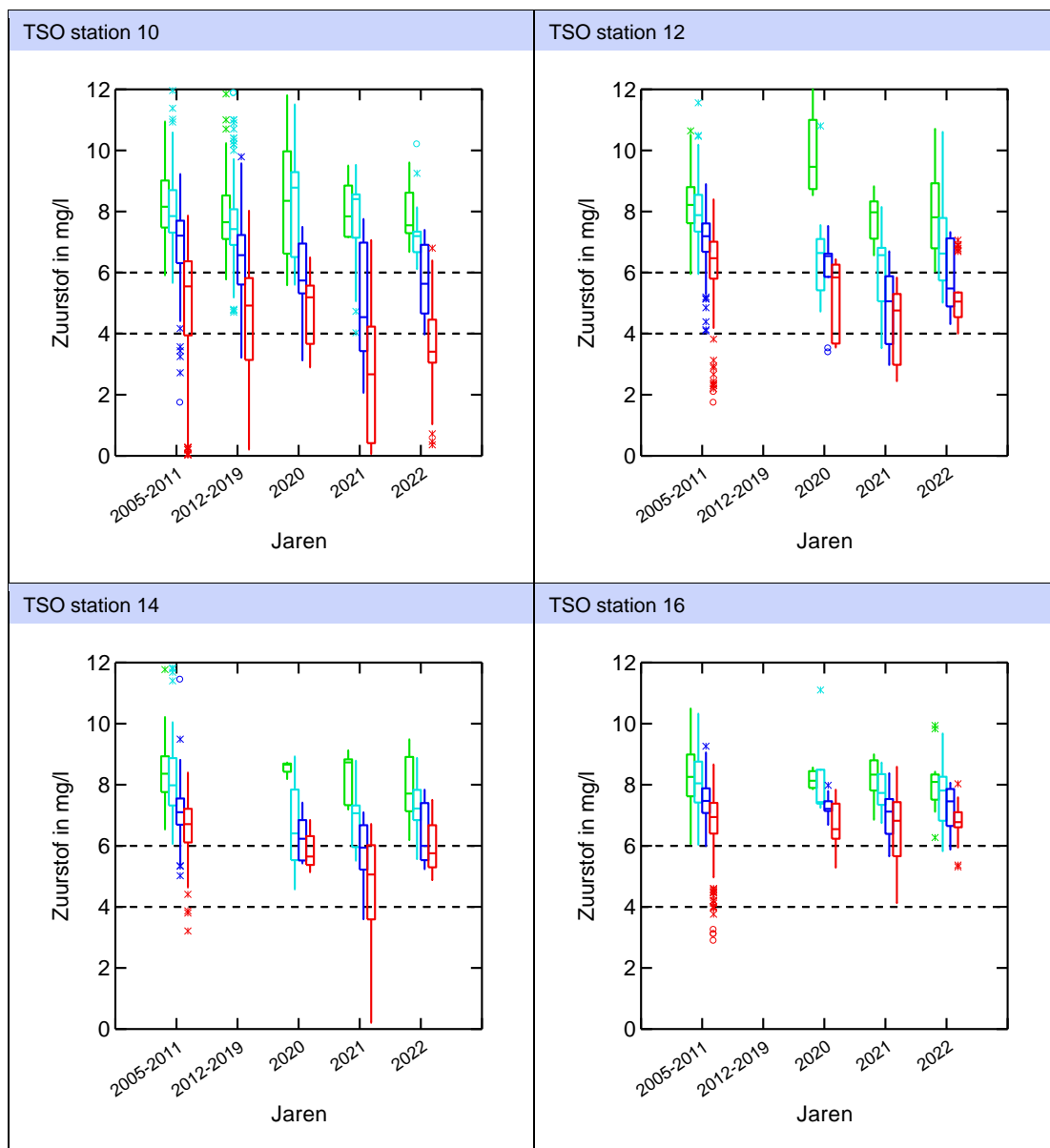
Figuur 2-1 Minimale diepte van zuurstofconcentraties <6 mg/l (links) en <4 mg/l (rechts). Gemiddelde voor de periodes 2005-2011, 2011-2019 en 2020-2022 voor TSO meetpunten 1-17. In de periode 2011-2019 is alleen op TSO meetpunt 10 (Soelekerkepolder) gemeten. Concentraties <4 mg/l komen in het oostelijk deel van het Veerse Meer (meetpunten 12-17) slechts incidenteel voor, deze punten zijn daarom in de rechterfiguur buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2-2 Jaarlijkse minimale diepte van zuurstofconcentraties <6 mg/l (groen), <5 mg/l (blauw) en <4 mg/l (rood) op Soelekerkewpolder (TSO meetpunt 10).



Figuur 2-3a Box-plots van de zuurstofconcentratie in juni-augustus in de waterlaag van 0-2 m diepte (groen), >2-5 m diepte (lichtblauw), >5-8 m diepte (donkerblauw) en >8 m diepte (rood) op TSO meetpunten 1, 3, 5 en 8. De onderbroken lijnen geven een zuurstofconcentratie van 4 en 6 mg/l aan.

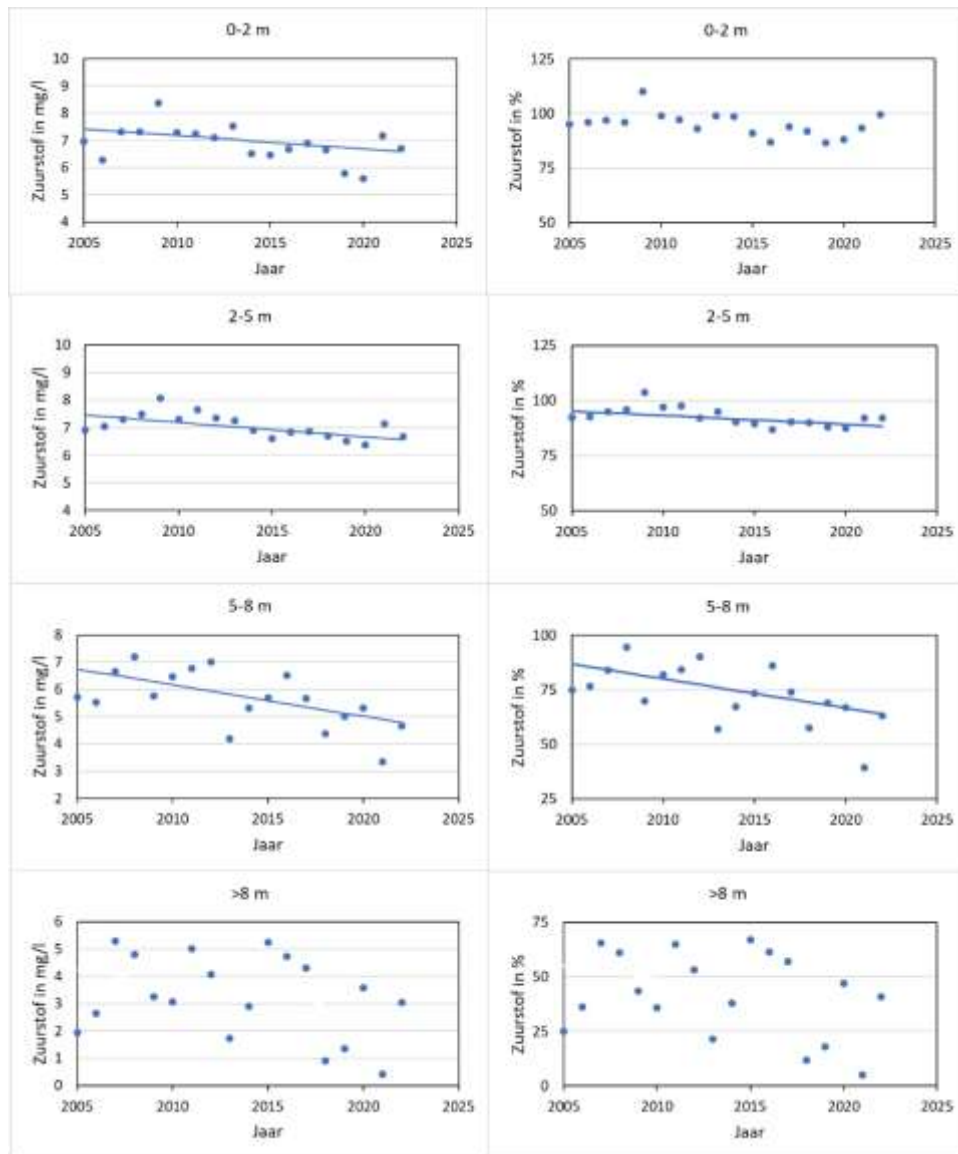


Figuur 2-3b Box-plots van de zuurstofconcentratie in juni-augustus in de waterlaag van 0-2 m diepte (groen), >2-5 m diepte (lichtblauw), >5-8 m diepte (donkerblauw) en >8 m diepte (rood) op TSO meetpunten 10, 12, 14 en 16. De onderbroken lijnen geven een zuurstofconcentratie van 4 en 6 mg/l aan.

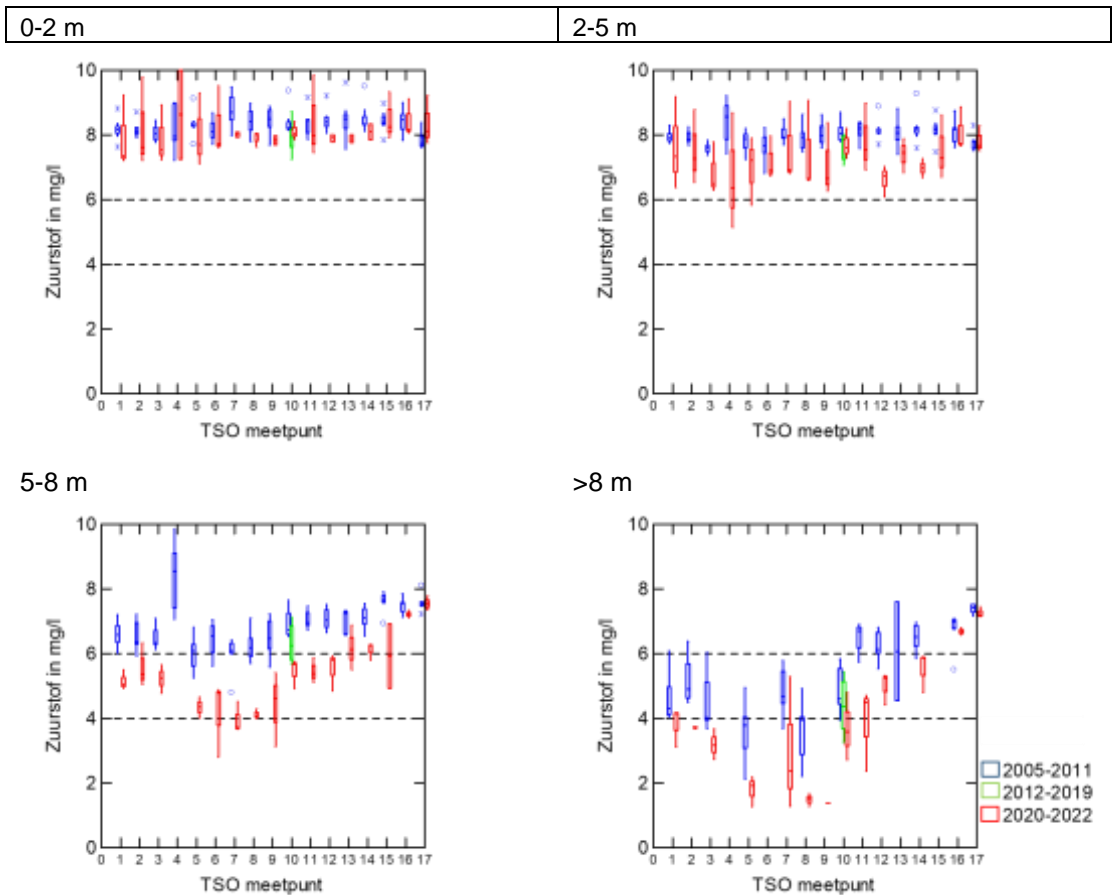
Zoals te zien is in Figuur 2-3, vertonen de gemeten zuurstofconcentraties in de verschillende dieptelagen een grote variatie. Vooral het optreden van lage zuurstofconcentraties is van belang. Daarom is, voor meetpunt Soelekerkepolder (TSO meetpunt 10), gekeken naar de verandering in de 25-percentiel van de zuurstofconcentraties en de zuurstofverzadiging in de vier dieptestrata over de periode 2005-2022 (Figuur 2-4). In de meest ondiepe laag (0-2 m) is er geen trend in zuurstofverzadiging. De zuurstofconcentratie daalt wel wat mede een gevolg is van toename in saliniteit en watertemperatuur. In de waterlagen 2-5 m en 5-8 m daalt zowel de zuurstofconcentratie als de zuurstofverzadiging. In de diepste waterlaag (>8 m) zijn de concentraties laag en sterk variabel, zonder een significante trend.

Wanneer we de data uit Figuur 2-3 anders rangschikken (Figuur 2-5), wordt ook duidelijker dat boven de spronglaag de zuurstofconcentraties in het hele meer vergelijkbaar zijn. Met name in het middendeel van het Veerse Meer komen in de diepere waterlagen de laagste zuurstofconcentraties voor en daar is ook de grootste verlaging in concentraties opgetreden tussen 2005-2011 en 2020-2022. In het oostelijk deel is de verversing en menging voldoende

om lage zuurstofconcentraties te voorkomen. In het westelijk deel (TSO meetpunt 1-4) vindt nog enige verversing van de diepere waterlagen plaats, waardoor de zuurstofconcentraties daar minder laag zijn dan in het middendeel. Het is waarschijnlijk dat dit meer open deel van het Veerse Meer sterker beïnvloed wordt door wind die tot enige verticale menging leidt. In het middengebied is de onbalans tussen zuurstofaanvoer en zuurstofvraag het grootst en is de zuurstofvraag toegenomen in 2020-2022 ten opzichte van 2005-2011 zoals blijkt uit de daling in zuurstofconcentraties dieper dan 5 m.



Figuur 2-4. 25-percentiel van de zuurstofconcentratie (links) en zuurstofverzadiging (rechts) in de maanden juni-augustus in de dieptestrata 0-2 m, 2-5 m, 5-8 m en >8 m op meetpunt Soelekerkepolder. Trendlijnen geven aan wanneer er sprake is van een significante trend. De schaal van de verticale assen verschilt voor de verschillende dieptestrata.



Figuur 2-5. 3b Box-plots van de zuurstofconcentratie in juni-augustus in de vier waterlagen (zie Figuur 2.3) per meetpunt voor de de jaren 2005-2011, 2012-2019 en 2020-2022. De onderbroken lijnen geven een zuurstofconcentratie van 4 en 6 mg/l aan.

## 2.2.2 Bodemdieren

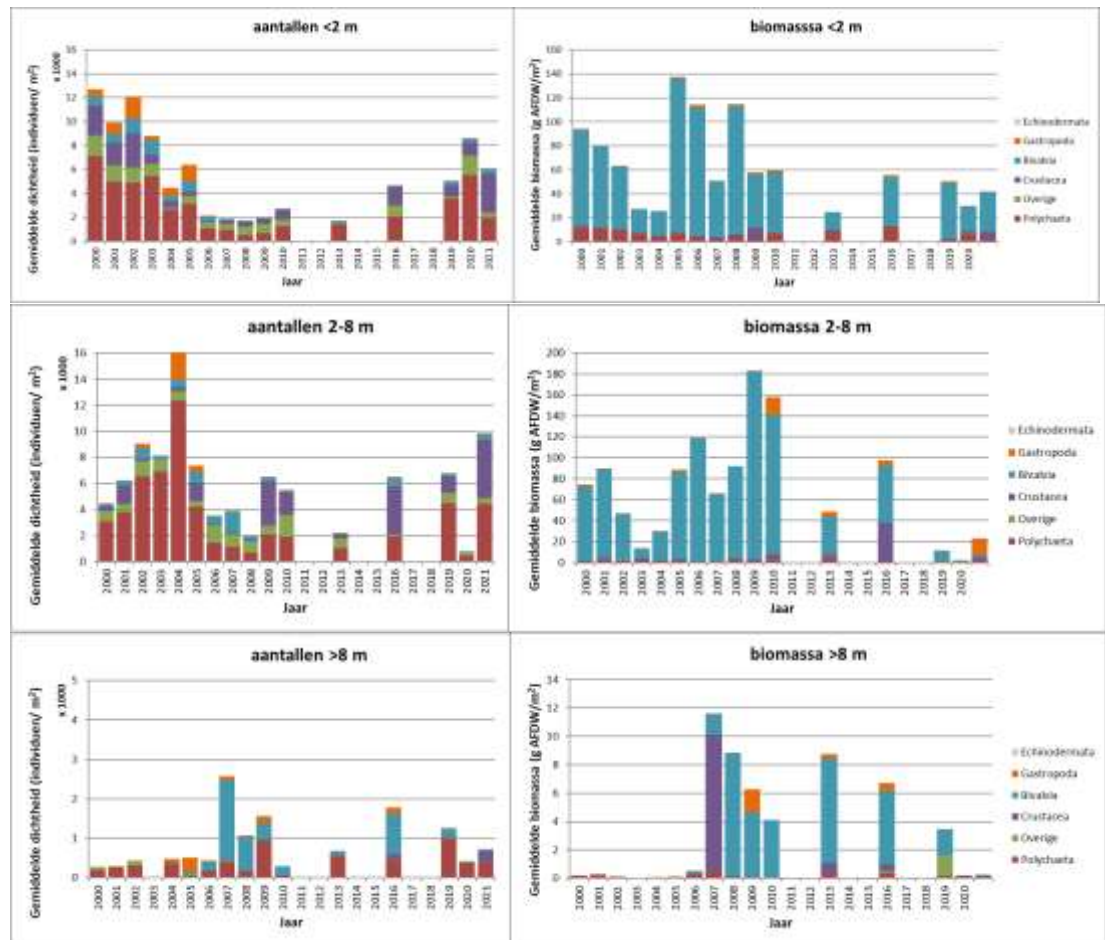
Na de ingebruikname van de Katse Heule was er in de eerste jaren een toename van schelpdierbiomassa in de ondiepe zone (0-2 m) te zien in de MWTL bestandsopnames (Figuur 2-6). Na 2008 is de biomassa weer lager. Er is geen duidelijke trend maar er zijn veel jaren zonder waarnemingen waardoor een trend niet vast te stellen is. In biomassa zijn schelpdieren de belangrijkste groep. Sinds 2019 is dichtheid van borstelwormen sterk toegenomen.

In de diepere zones (2-8 m, >8 m) is in 2019 en vooral in 2020 is een grote afname in de biomassa van schelpdieren opgetreden. Door de ontbrekende jaren en de (van nature) grote variatie is een trendmatige verandering over de periode 2008-2020 niet vast te stellen. Data voor 2021 laten zien dat er enig herstel is in dichtheid en biomassa in de dieptelaag 2-8 m en er dus niet consequent sprake is van een doorgaande afnemende trend van der Jagt *et al.* (2022a). Wel kan geconcludeerd worden dat de afname in biomassa in 2019-2020 ongekend groot was. Ook is er >8 m geen herstel in dichtheid en biomassa van schelpdieren.

Naast de MWTL metingen worden opnames van commercieel interessante schelpdierbestanden (tapijtschelp, oester, kokkel, mossel) uitgevoerd sinds 2017, in de zone van 0-10 m diepte. De Japanse oester wordt sinds 2018 bemonsterd en domineert de biomassa van deze soorten (>80%) in de schelpdier survey (Troost *et al.* 2022).

Uit visuele waarnemingen door duikers komen aanwijzingen voor een toename in het areaal *Beggiatoa*-matten, een bacterie die veel voorkomt in een omgeving met veel waterstofsulfide.

De beoordeling van de ecologische toestand in de KRW voor bodemdieren wisselt tussen 'Goed' (2015), 'Matig' in 2021 en 'Goed' in 2022<sup>1</sup>. De maatlatscore wordt vooral bepaald door de lage diversiteit. De methodiek van aggregeren van soorten is ook van invloed (van der Jagt *et al.* 2022a). Dit leidt er toe dat de relatie tussen de KRW beoordeling en de omstandigheden in het Veerse Meer lastig te leggen is.



Figuur 2-6 Aantallen (links) en biomassa (rechts) van bodemdieren in de dieptestrata 0-2 m, 2-8 m en >8 m, in het najaar. De verticale as voor de diepte >8 m heeft een afwijkende schaal Data: van Son & Verduin 2021

### 2.2.3 Vissen

Er zijn onvoldoende gegevens uit de monitoring van vis beschikbaar om conclusies over trends te kunnen trekken. Alleen over 2016-2020 zijn data beschikbaar (van Rijssel *et al.* 2021). Registratie van vangsten door aalvissers sinds 2012 geven geen duidelijke trends te zien.

In de warme zomers van 2019 en 2020 is vissterfte waargenomen, die waarschijnlijk samenhangt met plotseling opgetreden zuurstofloosheid of het vrijkomen van waterstofsulfide uit de waterbodem.

De KRW beoordeling voor vis was 'Matig' in 2015, en 'Goed' in 2021 en 2022<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>

[https://waterkwaliteitsportaal.overheidsbestanden.nl/factsheets/Factsheets%202022%20December/Oppervlaktewater/factsheet\\_OW\\_80\\_Ministerie\\_van\\_Infrastructuur\\_en\\_Waterstaat\\_Rijkswaterstaat\\_2023-02-23.pdf](https://waterkwaliteitsportaal.overheidsbestanden.nl/factsheets/Factsheets%202022%20December/Oppervlaktewater/factsheet_OW_80_Ministerie_van_Infrastructuur_en_Waterstaat_Rijkswaterstaat_2023-02-23.pdf)

#### 2.2.4 Wieren en macrofyten

Na ingebruikname van de Katse Heule zijn er veel veranderingen in soortensamenstelling opgetreden (afname van zeesla, toename van roodwieren en Japans bessenwier). In 2021 is een sterke toename van Japans bessenwier, visdraadwier en viltwier waargenomen in vergelijking met de daarvoor uitgevoerde opname uit 2014 (van der Jagt *et al.* 2021b). In 2022 is er juist weer weinig Japans bessenwier (van der Jagt *et al.* 2022b).

Doordat er maar voor een beperkt aantal jaren monitoringgegevens beschikbaar zijn is het niet mogelijk uitspraken te doen over trends. De omvang van het bestand wieren verschilt sterk tussen jaren. De grote beschikbaarheid van nutriënten bevordert de groei van wieren, maar de verschillen in biomassa tussen recente jaren wijzen er op dat ook andere factoren zoals weersomstandigheden een rol spelen (van der Jagt *et al.* 2021b, van der Jagt *et al.* 2022b).

Zeegras komt niet meer voor in het Veerse Meer. De ecologische toestand in de KRW voor macrofyten is beoordeeld als 'Slecht'<sup>1</sup> en voldoet dus niet aan de norm, door de afwezigheid van zeegras. Bij het geleidelijk verdwijnen van zeegras uit het Veerse Meer hebben meerdere factoren een rol gespeeld, zoals verdringing door zeesla en wisselingen in zoutgehalte (Wolfstein 2004).

#### 2.2.5 Kwallen

Japanse kruiskwallen veroorzaken overlast voor zwemmers en komen met name in het oostelijk deel van het Veerse Meer voor, vooral in velden Japans bessenwier. Daarnaast zijn de Amerikaanse ribkwal en de oorkwal veel voorkomend. Er zijn anekdotische aanwijzingen voor een toename van de aantallen, maar onvoldoende meetgegevens voor een harde onderbouwing.

Wierenvelden vormen een habitat voor kruiskwallen, daarnaast bevorderen ook factoren als verhoogde watertemperatuur en eutrofiëring het voorkomen van kwallen (van der Jagt *et al.* 2021a). Kwallen zijn predatoren van o.a. zoöplankton, viseieren en -larven, en de soms hoge dichtheden van kwallen hebben potentieel een effect op het voedselweb, maar door de beperkt beschikbare monitoringgegevens is het niet mogelijk een uitspraak te doen over ecosysteem-effecten.

#### 2.2.6 Vogels

Van de vogelsoorten die zijn aangewezen in het kader van de Vogelrichtlijn, voldoen 14 van de 18 soorten niet aan de instandhoudingsdoelen van Natura2000 (Hoekstein *et al.* 2022). Effecten van ingebruikname Katse Heule zijn niet goed vast te stellen door gebrek aan gegevens over (veranderingen in) het voedselaanbod. Planteneters komen in grootste aantallen voor. De achteruitgang in het seizoensgemiddelde aantal vogels wordt vooral veroorzaakt door achteruitgang in de aantallen planteneters. Predatie door vossen en verstoring door recreatie worden genoemd als potentieel belangrijke factoren voor het niet behalen van de instandhoudingsdoelen voor broedvogels.



## 2.3 Prioritering en effectketen

Uit het bovenstaande komt naar voren dat er diverse problemen zijn rond de waterkwaliteit en ecologie in het Veerse Meer. Ook worden verschillende wettelijk vastgelegde doelen (KRW, Natura2000) niet gehaald. Er is niet noodzakelijkerwijs samenhang tussen deze problemen. Zo is het bijvoorbeeld de vraag of het niet behalen van de instandhoudingsdoelen voor vogels samenhangt met de problemen rond waterkwaliteit; rapportages wijzen vooral op de effecten van verstoring en predatie (Hoekstein *et al.* 2022).

In deze rapportage ligt de prioriteit bij de waterkwaliteit en daarmee samenhangende ecologische problemen. Er is een effectketen opgesteld die de belangrijkste relaties beschrijft (Figuur 2-7), inzicht geeft in de samenhang en bedoeld is als een hulpmiddel bij discussies over oorzaken en maatregelen. Om het overzichtelijk te houden worden relaties die als minder belangrijk worden ingeschat niet weergegeven. De effectketen laat ecosysteemelementen en belangrijke factoren zien en geeft met de pijlen aan waar belangrijke onderlinge relaties zijn.

De effectketen laat zien dat het peilbeheer van het Veerse Meer sturend is voor de uitwisseling tussen Veerse Meer en Oosterschelde en daarmee in belangrijke mate van invloed op de water- en stoffenbalans. De water- en stoffenbalans wordt ook nog beïnvloed door afvoer via poldergemalen en het Kanaal door Walcheren en neerslag/atmosferische depositie. De stoffenbalans is van belang voor de hoeveelheid nutriënten in het Veerse Meer die een sturende factor zijn voor de primaire productie, naast abiotische omstandigheden die door meteorologie worden bepaald.

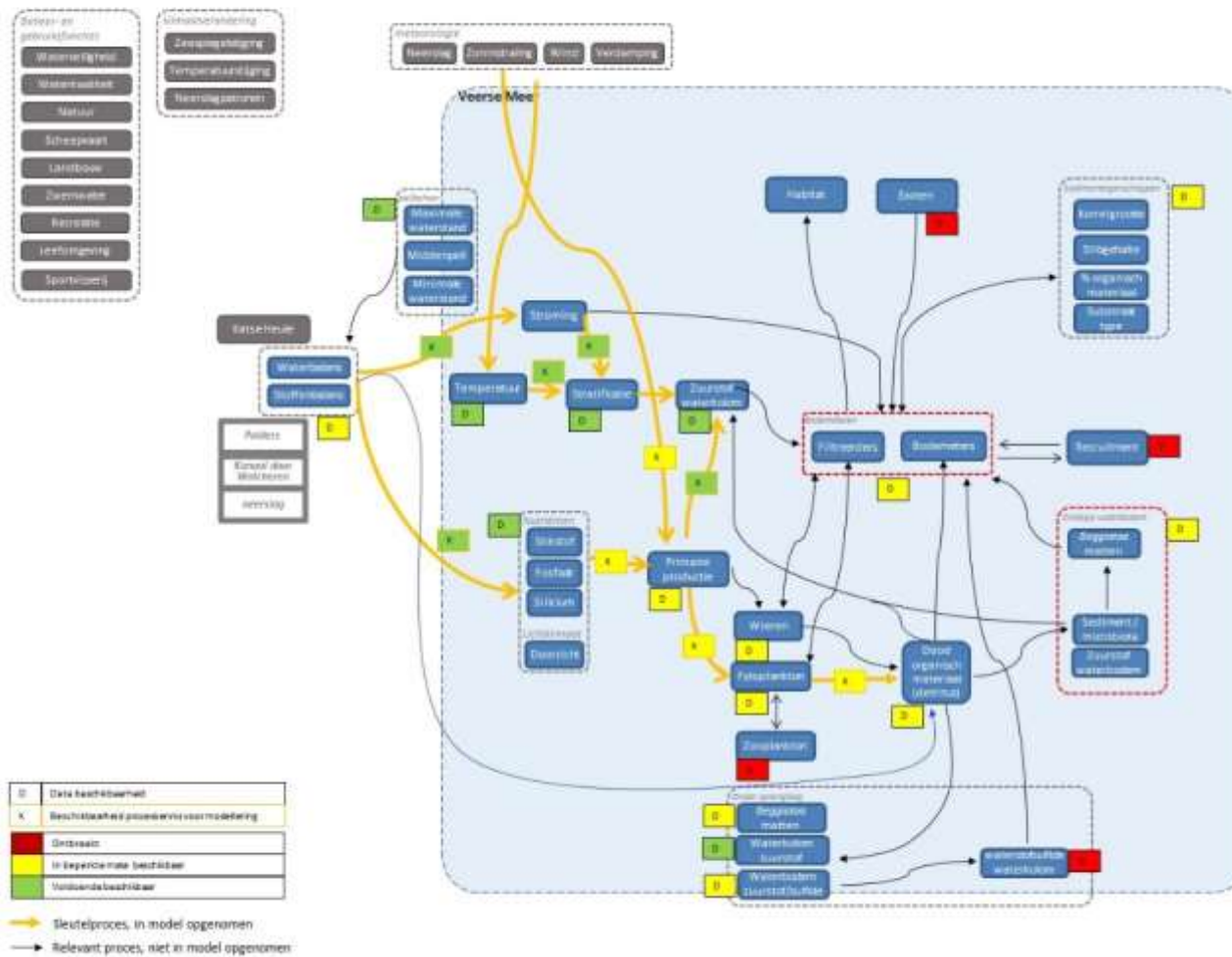
Primaire productie levert voedsel voor bodemdieren en zoöplankton en detritus dat in de waterkolom wordt afgebroken of bezinkt naar de waterbodem. Er is zuurstofproductie door primaire productie en zuurstofgebruik door afbraakprocessen in de waterkolom en in de bodem. De zuurstofconcentratie beïnvloedt de leefomstandigheden van bodemdieren. Van belang voor soortensamenstelling en biomassa van het bodemdierenbestand zijn ook de sedimentsamenstelling, onderlinge interacties, recruitment, introductie van exoten en mogelijk ook interactie met matten van de bacterie *Beggiatoa*.

Het sediment, zowel boven als onder de spronglaag, kent een aanvoer van organisch materiaal die afbraakprocessen in de bodem voedt. Bij die afbraakprocessen wordt o.a. waterstofsulfide geproduceerd dat onder bepaalde omstandigheden vrij kan komen in de waterkolom en van invloed kan zijn op fauna, waaronder het macrobenthos.

De oranje pijlen in de effectketen geven aan welke van deze processen onderdeel zijn van het ecologisch model (3D D-HYDRO Veerse Meer)



## Effectketen Veerse Meer Waterkolom en waterbodem boven de spronglaag



Figuur 2-7 Effectketen van de belangrijkste elementen en processen in de waterkolom en waterbodem boven de spronglaag

## 3 Wat zijn mogelijke oorzaken?

### 3.1 De belangrijkste processen voor de zuurstofhuishouding

Een aantal processen is van belang voor de zuurstofhuishouding van het Veerse Meer (zie Figuur 3-1). Daarbij is het nuttig om onderscheid te maken tussen enerzijds de ondiepe zones en in de diepere delen van het meer de oppervlaktelaag boven de spronglaag (tot ca. 5 m diepte). De spronglaag bevindt zich meestal tussen 5-10 m diepte. Daarnaast is er de bodemlaag van de waterkolom onder de spronglaag (dieper dan ca. 10 m) in de diepere delen.

Primaire productie door fytoplankton is een belangrijke zuurstofbron in de oppervlaktelaag in het gehele Veerse Meer. In de oeverzones kan ook productie door wieren en macrofyten een bijdrage leveren. Die primaire productie wordt gestuurd door de beschikbaarheid van licht en nutriënten. Hierbij kunnen verschillen optreden tussen jaren. De primaire productie wordt beïnvloed door o.a. licht en nutriënten. Verschillen in de aanvoer van nutriënten naar het Veerse Meer en verschillen in lichtinstraling en troebelheid kunnen dus leiden tot verschillen tussen jaren in de hoogte van de primaire productie.

Er is zuurstofverbruik in de waterkolom door zoöplankton, vissen, bodemdieren en door afbraak van organisch materiaal in de waterkolom en in de waterbodem. Die zuurstofvraag speelt een rol in de oeverzone (denk aan ophoping van afgestorven wieren/macrofyten), in de waterkolom en in de waterbodem. De aanvoer van organisch materiaal, door primaire productie maar mogelijk ook door aanvoer via polderwaterafvoer en uitwisseling met de Oosterschelde, is van invloed op de omvang van het zuurstofverbruik.

Naast uitwisseling van zuurstof met de atmosfeer is horizontaal transport een belangrijke bron van zuurstof. In de diepere delen van het Veerse Meer wordt, door de stratificatie, de zuurstofvoorraad in het water onder de spronglaag bepaald door horizontale en (beperkte) verticale aanvoer en door zuurstofverbruik als gevolg van respiratie en afbraakprocessen. Verticaal transport van zuurstof naar de bodemlaag wordt beperkt door de gelaagdheid, wel is er horizontaal transport van zuurstof (inclusief verversing vanuit de Oosterschelde). Zuurstofvragende processen zijn respiratie door organismen en afbraakprocessen in de waterkolom en de waterbodem. Deze processen worden beïnvloed door de aanvoer van organisch materiaal, hetzij door het bezinken van organisch materiaal vanuit de bovenlaag of door horizontaal transport, bijvoorbeeld door aanvoer vanuit de Oosterschelde.

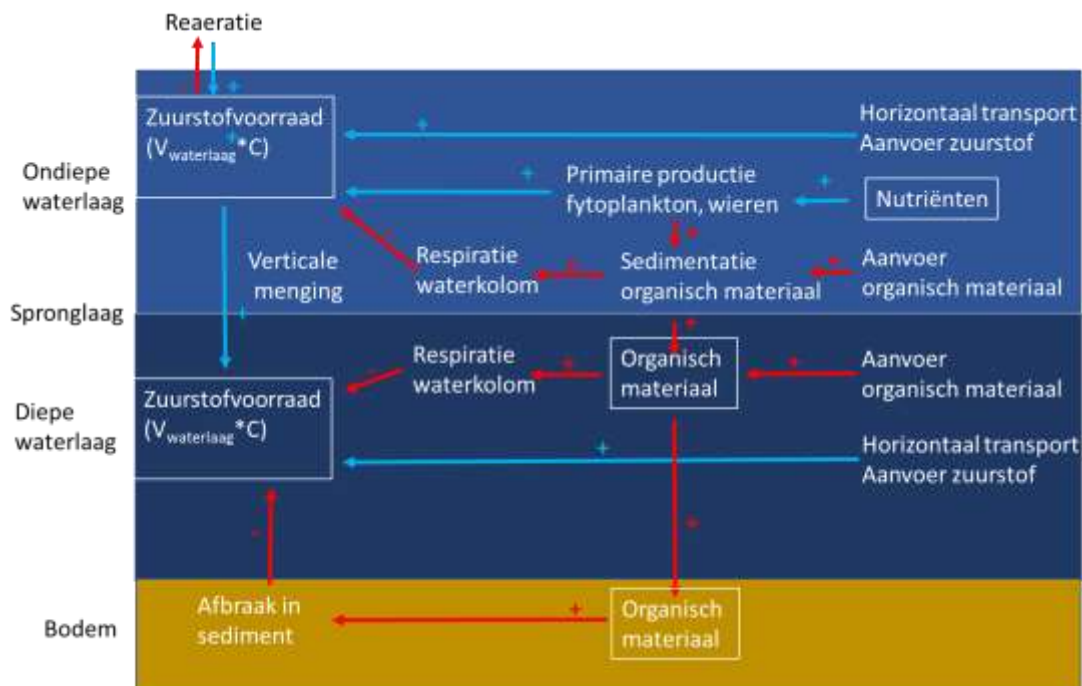
Voor het beter begrijpen van de zuurstofbalans is het daarom zaak een aantal processen beter te kunnen kwantificeren:

1. primaire productie i.v.m. zuurstofproductie
2. factoren die van invloed kunnen zijn op de primaire productie
3. aanvoer van organisch materiaal, door primaire productie of door transport
4. horizontaal en verticaal transport van zuurstof
5. afbraakprocessen in de bodem en zuurstofopname door fauna (zoöplankton, bodemdieren, etc.)

Daarbij speelt de vraag of er veranderingen in deze processen zijn, die

- de trend in zuurstofconcentraties in de laatste 15 jaar kunnen verklaren?
- De incidenten in 2019 en 2020 (vissterfte) kunnen verklaren?

In de volgende paragrafen wordt op een rij gezet wat we nu weten over deze processen.



Figuur 3-1 Schematisch overzicht van de processen die van belang zijn voor de zuurstofbalans.

### 3.1.1 Primaire productie

Een mogelijke oorzaak van de verslechtering in de zuurstofhuishouding van het Veerse Meer is de aanvoer van organisch materiaal door primaire productie die leidt tot een toename in de zuurstofvraag als gevolg van afbraak van dat organische materiaal, in de waterkolom of in de bodem.

De eerste vraag is dan of er aanwijzingen zijn voor veranderingen in de primaire productie in de laatste jaren, ofwel door fytoplankton in de waterkolom ofwel door wieren en macrofyten in de oeverzone.

#### 3.1.1.1 Fytoplankton

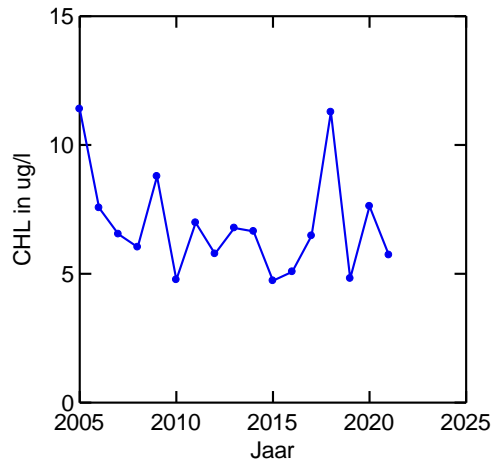
De gemiddelde chlorofylconcentraties over het groeiseizoen maart-september zijn een maat voor de biomassa van fytoplankton. De concentraties in de jaren 2006-2021 variëren een factor 2 (Figuur 3-2). Er is geen significante trend in de gemiddelde concentraties over de periode 2005-2021. In de laatste 10 jaar was 2018 een jaar met relatief hoge concentraties, terwijl 2019 een lage seizoensgemiddelde concentratie heeft.

Wanneer meer in detail wordt gekeken (Figuur 3-3), valt op dat het jaar 2018 zowel in voorjaar als in zomer relatief hoge concentraties ( $>20 \mu\text{g/l}$ ) had en ook in 2020 zijn relatief hoge concentraties gemeten in de zomer. Het jaar 2019 had juist relatief lage concentraties ( $<9 \mu\text{g/l}$ ) maar in dat jaar ontbreken gegevens voor de voorjaarsperiode van eind april en de hele maand mei, een periode met hoge concentraties.

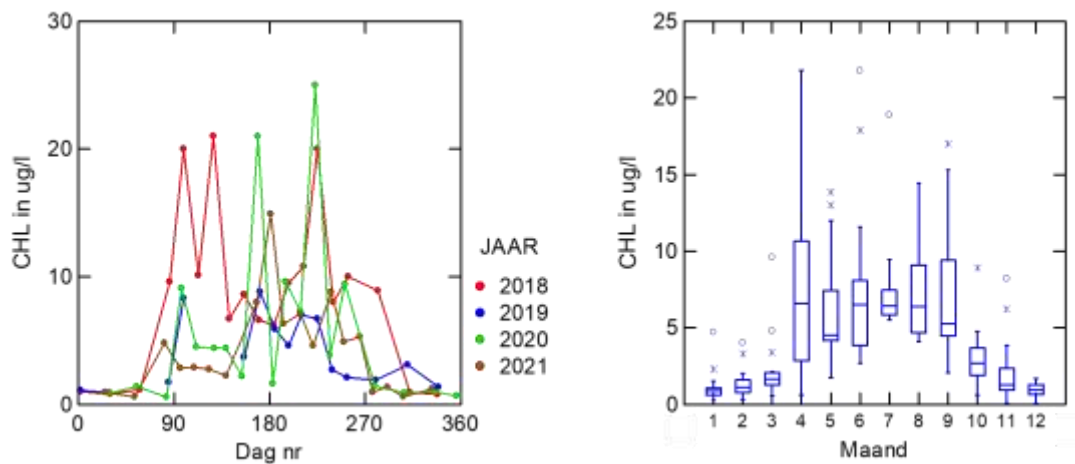
De chlorofylconcentraties in het Veerse Meer vertonen een seizoenspatroon met relatief hoge concentraties (tot ca.  $20 \mu\text{g/l}$ ) gedurende de hele periode april-september en lagere concentraties (gemiddeld  $<3 \mu\text{g/l}$ ) in de overige maanden (Figuur 3-3).

Uit dit patroon valt in ieder geval af te leiden dat er geen duidelijk verband is tussen het optreden van pieken in chlorofylconcentraties en de waargenomen vissterfte in 2019 en 2020.

Daarbij moet natuurlijk opgemerkt worden dat er alleen metingen zijn van meetpunt Soelekerkepolder en de meetfrequentie in principe 2-wekelijks is, maar in 2019 geen gegevens voor eind april en de maand mei beschikbaar zijn. De concentraties van chlorofyl kunnen ook niet rechtstreeks vertaald worden naar primaire productie, omdat begrazing door zoöplankton of bodemdieren ook van invloed is op de chlorofyl-concentraties.



Figuur 3-2 Groeiseizoengemiddelde concentratie van chlorofyl op MWTL meetpunt Soelekerkepolder



Figuur 3-3 Chlorofylconcentraties in 2019, 2020, 2021 op MWTL meetpunt Soelekerkepolder (links) en box-plots van de maandgemiddelde concentratie van chlorofyl over de jaren 2006-2021 (rechts).

Aangenomen kan worden dat de primaire productie van fytoplankton voornamelijk plaats vindt in de bovenste 6 meter van de waterkolom. Primaire productie beneden de spronglaag is niet waarschijnlijk. De gemiddelde extinctiecoëfficiënt in het Veerse Meer is ca.  $0.75 \text{ m}^{-1}$ , bij die waarde is de maximale diepte waarop nog voldoende licht is voor primaire productie 6 m, terwijl de spronglaag meestal tussen 5-10 m optreedt.

Uitgaand van eerdere metingen en schattingen (zie Holland *et al.* 2004) is de primaire productie in de orde van  $200\text{-}300 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$ . De eerste resultaten van recent uitgevoerde metingen geven een range van  $150\text{-}190 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$  (pers.med. S. Ciarelli). Het ontbreekt aan meetgegevens van primaire productie over een lange reeks van jaren zodat er geen conclusies kunnen worden getrokken over veranderingen in de tijd.

Uitgaand van een productie van  $200 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$  en een wateroppervlak van ca. 2500 ha, is de totale productie door fytoplankton in de ordegrrootte van 5000 ton koolstof per jaar.

### 3.1.1.2 Wieren

Vergelijking met andere primaire producenten kan alleen gemaakt worden op basis van biomassaschattingen. Recente opnames van de dichtheid wieren en macrofyten zijn uitgevoerd in 2021 en 2022 en er zijn schattingen gemaakt van de biomassa van Japans bessenwier in 2022 (van der Jagt *et al.*, van der Jagt *et al.* 2022b).

In 2022 bleek de dichtheid van Japans bessenwier veel lager dan in 2021, maar was er meer visdraadwier. Op basis van de opnames in 2022 schatten van der Jagt *et al.* (2022) de biomassa van Japans bessenwier in 2022 op ca. 37 g C m<sup>-2</sup> op locaties waar het wier groeit. Met de aanname dat op 10% van het oppervlak van het Veerse Meer Japans bessenwier voorkomt, zou de primaire productie van Japans bessenwier, op basis van de geschatte biomassa, <10 g C m<sup>-2</sup> jaar<sup>-1</sup> zijn, aanmerkelijk minder dan de schattingen van fytoplankton primaire productie (150-190 g C m<sup>-2</sup> jaar<sup>-1</sup>). Onbekend is hoe groot de productie van andere wieren is.

Voor de effecten op zuurstof in het Veerse Meer is relevant, dat het wier groeit in de ondiepe delen. Afbraak vindt deels plaats in de waterkolom, deels op de bodem en deels op de oevers. Lokaal kan dit effect hebben op de zuurstofhuishouding in de ondiepe delen (van der Jagt *et al.* 2022b). De zuurstofvraag als gevolg van afbraak na het afsterven van Japans bessenwier is geschat op 96 g m<sup>-2</sup>, met een range van 0.8-1.6 g m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup>, voor de locaties waar het wier voorkomt.

Het verschil in dichtheid van Japans bessenwier tussen 2021 en 2022 biedt een mogelijkheid om te onderzoeken of dit ook leidt tot verschillen in andere onderdelen van het ecosysteem. Op dit moment zijn alleen TSO meetgegevens van 2021 en 2022 beschikbaar, andere gegevens uit het MWTL programma zijn voor 2022 nog niet beschikbaar. Het grootste verschil in dichtheid van Japans bessenwier is waargenomen in het meest oostelijk deel van het Veerse Meer, tussen de Zandkreekdijk en Kortgene/Wolphaartsdijk. TSO meetpunten 15, 16 en 17 liggen in dat gebied. De zuurstofdata geven geen consistent beeld van verschillen in concentratie tussen 2021 en 2022 voor de verschillende dieptestrata (0-2 m, 2-5 m, 5-8 m, >8 m, zie ook Figuur 2-3) in juni of juli op deze meetpunten. Van belang daarbij is dat de TSO metingen worden uitgevoerd in de geul en niet in de nabijheid van de meer ondiepe locaties waar het wier voorkomt.

#### 3.1.1.3 Conclusies

De gemeten chlorofylconcentraties geven geen aanwijzingen voor een toename in fytoplanktonbiomassa of primaire productie door fytoplankton in de laatste 15 jaar. De concentraties bieden ook geen verklaring voor de opgetreden vissterfte in 2019 en 2020. De geschatte primaire productie van wieren is gering in vergelijking met de fytoplankton primaire productie. De afbraak van afgestorven wieren heeft waarschijnlijk alleen lokaal in de ondiepe zones effect op de zuurstofhuishouding.

#### 3.1.2 Nutriëntenbelasting

Naast de metingen van biomassa van algen en wieren, kan ook gekeken worden naar de nutriëntenbelasting van het Veerse Meer, omdat de beschikbaarheid van nutriënten (vooral fosfaat en stikstof) een belangrijke sturende factor voor de primaire productie is.

Het Veerse Meer wordt belast met stikstof en fosfaat via de poldergemalen, de sluis van het Kanaal door Walcheren en emissies in het Veerse Meer (inclusief atmosferische stikstofdepositie). Daarnaast is er uitwisseling tussen Veerse Meer en Oosterschelde via de Katse Heule en de sluis in de Zandkreekdijk.

De nutriëntenbalans voor de jaren 2011-2020 is opgesteld in 2021 (van der Heijden 2021). De berekende belasting met N en P verschilt tussen jaren met ongeveer een factor 2, zonder een duidelijke trendmatige verandering over de tijd (Figuur 3-4). Poldergemalen vormen de belangrijkste bron (70-75%), gevolgd door het Kanaal door Walcheren (N: 16%, P: 27%).

Directe emissies vormen slechts een klein deel (N: ca. 7%, P: ca. 2%) van de totale belasting. Uit een schatting van de bijdrage van vogels aan de stikstofbelasting (guanotrofie) blijkt dat deze verwaarloosbaar is ten opzichte van de andere bronnen (van der Heijden 2021). De verhouding tussen stikstof en fosfaat in de belasting via poldergemalen, Kanaal door Walcheren en emissies is gemiddeld over 2011-2020, wat wijst op een lichte relatieve overmaat aan stikstof.



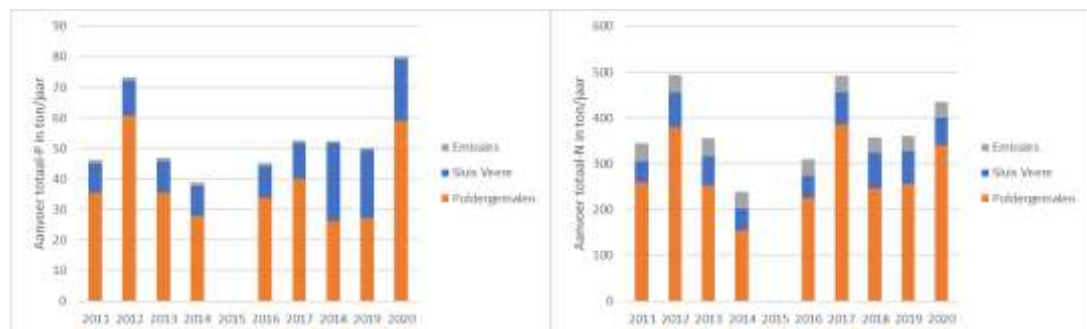
De concentraties van totaal-P en totaal-N zijn in de Oosterschelde lager dan in het Veerse Meer. Dit betekent dat er netto export is van P en N vanuit het Veerse Meer naar de Oosterschelde (Figuur 3-5).

Over de periode 2005-2021 zijn de concentraties van nutriënten significant gedaald (Mann-Kendall test,  $p < 0.05$ ) terwijl de saliniteit licht (10%) gestegen is. De wintergemiddelde concentraties van totaal-P, orthofosfaat, totaal-N, opgelost anorganisch stikstof en silicaat zijn met 40-50% gedaald. Ook de concentraties van TN en TP in de Oosterschelde zijn significant afgenomen in deze periode met 20-30%. De concentraties van TP en TN in het Veerse Meer zijn significant gecorreleerd met die in de Oosterschelde ( $p < 0.010$ ). De daling van de nutriëntenconcentraties in het Veerse Meer kan dus deels verklaard worden door de grotere uitwisseling met de Oosterschelde en verdunning (door dalende concentraties in de Oosterschelde), wat ook ondersteund wordt door de dalende silicaatconcentraties in het Veerse Meer.

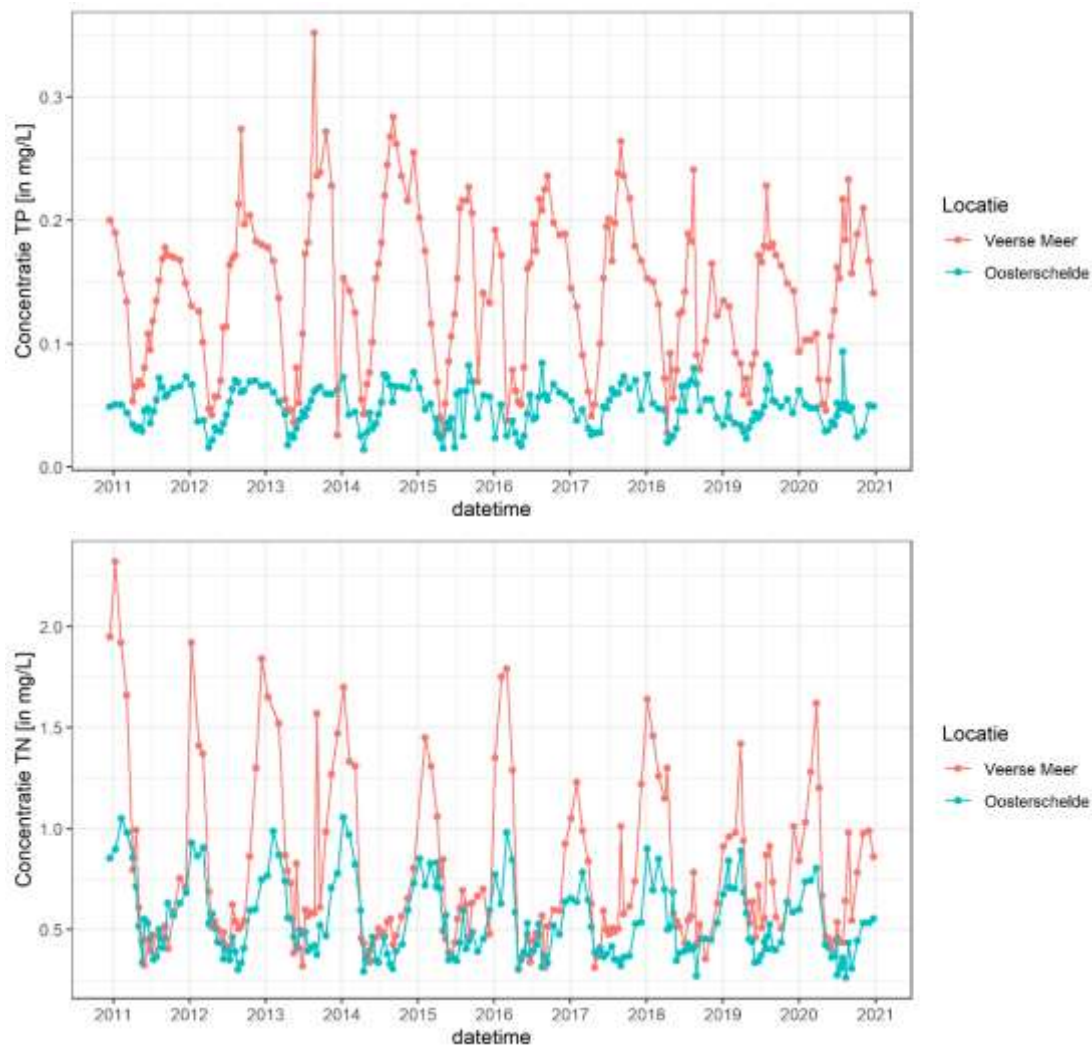
Met de aanname dat de winterconcentraties van nutriënten een lineair verband met saliniteit hebben, zijn de concentraties in Veerse Meer en Oosterschelde geëxtrapoléerd naar concentraties bij saliniteit 0 als benadering voor de concentraties in het polderwater. Op basis van die extrapolatie tonen de totaal-N concentraties in het polderwater ook een significante afname van bijna 50% over de periode 2005-2020. De geschatte totaal-P concentraties tonen grotere variatie en geen significante trend.

Een analyse van de concentraties bij een aantal poldergemalen over 2000-2020 (Roks 2022) laat zien dat zowel de concentraties van fosfaat als die van totaal-stikstof significant zijn afgenomen in één van de drie gemalen die in de analyse zijn meegenomen, maar niet in de andere. De ontwikkelingen in de concentraties geven geen duidelijke aanwijzing dat dalende nutriëntenconcentraties in het polderwater tot dalende vrachten via de poldergemalen hebben geleid, maar daarbij moet worden opgemerkt dat de beschikbaarheid van gegevens over concentraties bij de gemalen beperkt is (Roks 2022).

Met de MWTL data voor Soelekerkepolder over 2005-2020 en de resultaten van de nutriëntenbalans voor 2011-2020 is nagegaan of de gegevens een correlatie laten zien tussen enerzijds de nutriëntenbelasting via gemalen en de sluis bij Veere, de nutriëntenconcentraties in het Veerse Meer (wintergemiddeld, jaargemiddeld) en de waargenomen chlorofylconcentraties. Vanzelfsprekend is er een verband tussen de hoeveelheid nutriënten die naar het Veerse Meer wordt aangevoerd via poldergemalen en sluis en de concentratie in het Veerse Meer zelf. De vraag is of de waargenomen variatie in concentraties tussen jaren verklaard kan worden uit verschillen in de berekende belasting. Dit bleek niet het geval. Dit komt waarschijnlijk door de beperkte reeks gegevens voor de nutriëntenbelasting (slechts 10 jaar).



Figuur 3-4. Belasting van het Veerse Meer met P (links) en N (rechts) via poldergemalen, sluis Veere en directe emissies. NB Gegevens voor 2015 waren incompleet. Data: van der Heijden 2021



Figuur 3-5. Concentraties van totaal-P (boven) en totaal-N (onder) in Veerse Meer en Oosterschelde (gemiddelde van meetstations Wissenkerke en Lodijkse Gat).

De chlorofylconcentraties vertonen evenmin een correlatie met de nutriëntenbelasting of nutriëntenconcentraties. De grote jaarlijkse fluctuaties in chlorofylconcentraties worden ook veroorzaakt door andere factoren, zoals lichtinstraling, troebelheid en mogelijk graas, waardoor een statistische relatie tussen nutriëntenbeschikbaarheid en chlorofylconcentraties niet eenvoudig is vast te stellen. Daarnaast is het de vraag in welke mate de concentraties van P en N beperkend zijn voor de groei van fytoplankton.

De nutriëntenconcentraties vertonen een duidelijke seizoensdynamiek (Figuur 3-6a), die samenhangt met de bloei van fytoplankton. Er is een sterke afname in fosfaatconcentraties in april (samenvallend met de voorjaarsbloei van fytoplankton), maar daarna al weer snel een toename als gevolg van teruglevering uit de bodem. Alleen in april komen zeer incidenteel concentraties van minder dan  $0.5 \mu\text{M}$  voor, wat wordt beschouwd als de grens waaronder in principe P-limitatie kan optreden. Opgelost anorganisch stikstof (DIN) begint te dalen in april, en bereikt laagste concentraties in mei-september, waarbij de concentraties soms beneden de grens voor potentiële limitatie ( $2 \mu\text{M}$ ) komen. Silicaat, dat van belang is voor de groei van kiezelwieren (diatomeeën) daalt sterk in april en limiterende concentraties komen vooral voor in april-juni.

Vergelijking van de concentraties in de periode 2005-2010 en 2016-2021 laat zien dat de daling in concentraties vanaf 2005 vooral effect heeft gehad op de concentraties in winter en vroege voorjaar, minder in de zomerperiode.

Om te bepalen of een nutriënt limiterend is, wordt niet alleen gekeken naar de concentratie maar ook naar de verhouding tussen nutriënten. De N:P ratio is na april veel lager dan 16. De Redfield ratio van 16:1 is de gemiddelde N:P verhouding van marien fytoplankton. Bij ratio's lager dan 16:1 is er sprake van een overmaat aan P en is in principe N limiterend (mits de concentraties laag genoeg zijn). De ratio tussen N:Si is vooral in juni-augustus lager dan 1, wat wijst op potentiële N-limitatie van kiezelwieren in die maanden.

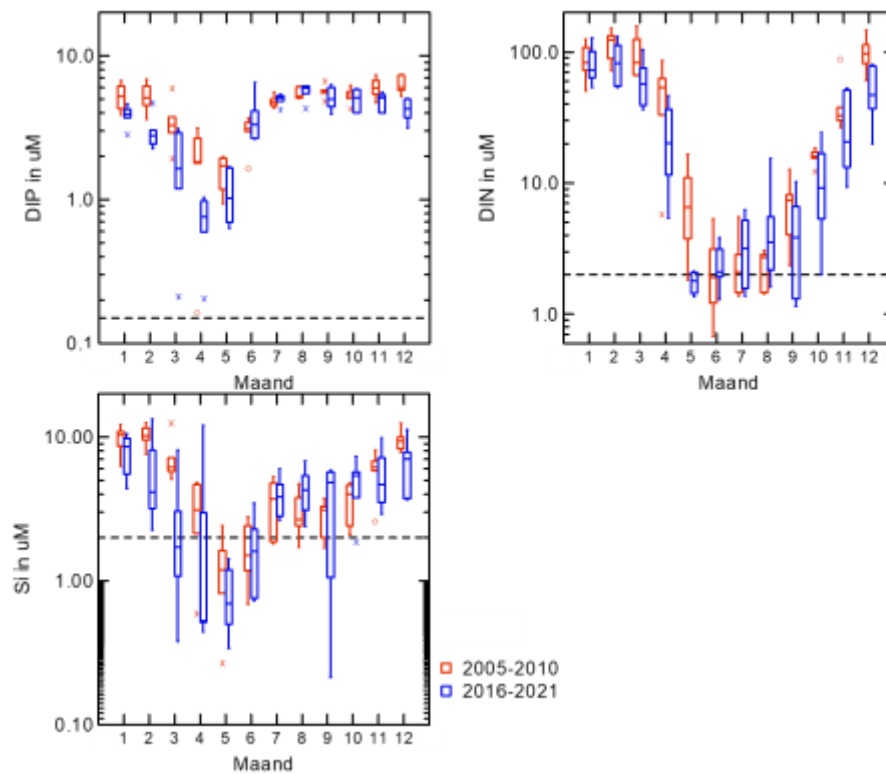
Uit een analyse van de tijdreeksen over 2006-2021 komt naar voren dat stikstof gemiddeld 1 maand (diatomeeën) tot 2 maanden (overig fytoplankton) per jaar potentieel limiterend is, fosfaatlimitatie verwaarloosbaar is en potentiële silicaat-limitatie voor diatomeeën 2-3 maanden per jaar optreedt. Er is geen duidelijk effect te zien van de daling in concentraties.

### Conclusies

De nutriëntenbalans geeft geen duidelijke aanwijzingen voor een verandering in de belasting van het Veerse Meer met nutriënten via polderwater en Kanaal door Walcheren.

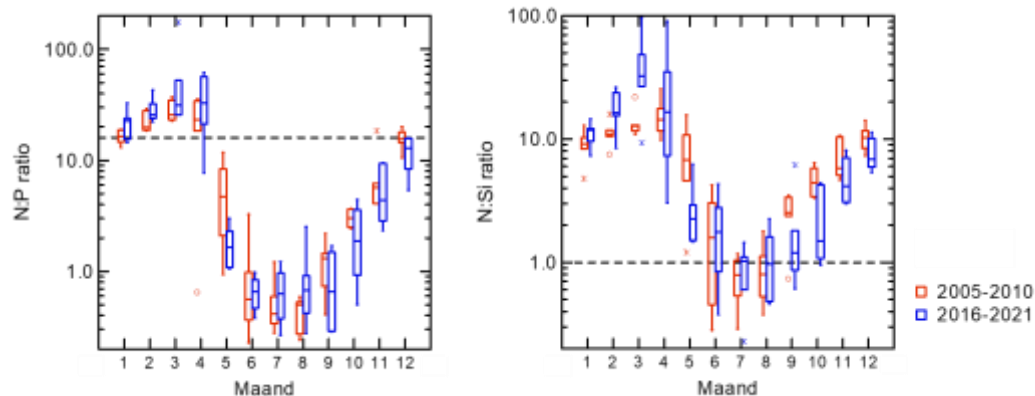
Er is een daling in de concentraties van N en P, door de uitwisseling met de Oosterschelde waar de concentraties ook dalen en waarschijnlijk deels ook door een daling van stikstofconcentraties in het polderwater.

Er is in beperkte mate sprake van nutriëntenlimitatie van de groei van fytoplankton, waarbij Si-limitatie en in mindere mate N-limitatie in de zomer een rol spelen. P-limitatie speelt geen rol van betekenis.



Figuur 3-6a Box-plots van de maandgemiddelde concentraties van fosfaat (DIP<sub>-</sub>, opgelost anorganisch stikstof (DIN) en silicaat voor de jaren 2005-2010 en 2016-2021. De verticale as heeft een logaritmische schaal. De onderbroken lijn is indicatief voor het niveau waaronder concentraties potentieel limiteren worden voor fytoplankton.

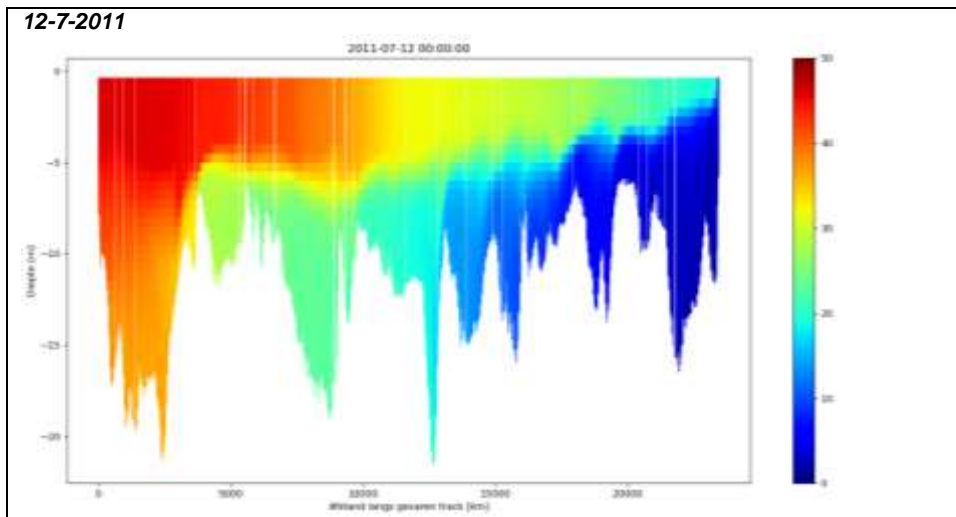




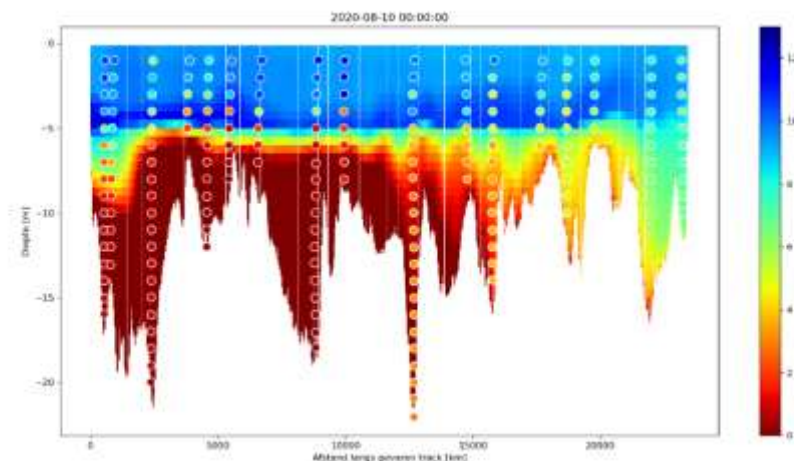
*Figuur 3-6b* Box-plots van de maandgemiddelde N:P ratio (links) en N:Si ratio (rechts) voor de jaren 2005-2010 en 2016-2021. De verticale as heeft een logaritmische schaal. De onderbroken lijn geeft de N:P ratio van 16 (links) en N:Si ratio van 1 (rechts) aan. Boven die lijn is stikstof in overmaat (en P of Si potentieel limiterend), onder die lijn is fosfaat/silicaat in overmaat (en N potentieel limiterend).

### 3.1.3 Verversing

De mate van verversing van het Veerse Meer via de Katse Heule, door aanvoer van water vanuit de Oosterschelde, kan ook een belangrijke factor zijn voor de zuurstofbalans van het Veerse Meer. Met het water uit de Oosterschelde komt zuurstofrijk water het Veerse Meer binnen. Dat water is in het algemeen zouter en zwaarder dan het Veerse Meer water en verspreidt zich vooral via de bodemlaag van oost naar west. Wisselingen in de instroom via de Katse Heule kunnen van invloed zijn op de verblijftijd van het water. Modelberekeningen laten dit ook zien. Figuur 3-7 laat zien dat het water zich verspreidt langs de bodem van de diepere delen en de drempels in het Veerse Meer, waarbij de leeftijd van het water toeneemt van oost naar west. Doordat de verticale uitwisseling belemmerd wordt door de stratificatie is het water boven de spronglaag ook ouder dan het water onder de spronglaag. Met het transport van oost naar west neemt de concentratie van zuurstof in die bodemlaag geleidelijk af door zuurstofverbruik van de bodem: hoe langer de weg is die het waterpakket aflegt en hoe 'ouder' het waterpakket is, hoe lager de zuurstofconcentratie. Dit is duidelijk zichtbaar in de modelresultaten maar ook in de TSO metingen, met een duidelijke gradiënt van afnemende zuurstofconcentraties in de bodemlaag van oost naar west (Figuur 3-8).



Figuur 3-7 Dwarsdoorsnede van het Veerse Meer (rechts: Katse Heule; links: Veerse Dam) met modelberekening van de leeftijd van het water dat het Veerse Meer binnenstroomt via de Katse Heule op de dagen 11-16 juli 2011. De kleurschaal geeft de leeftijd in dagen vanaf het moment dat het water bij de Katse Heule binnen komt..



Figuur 3-8 Dwarsdoorsnede van het Veerse Meer (rechts: Katse Heule; links: Veerse Dam) met gemodelleerde en gemeten (cirkels) zuurstofconcentratie (mg/l) op 10 augustus 2020.

Het is duidelijk dat de Katse Heule heeft geleid tot betere verversing van het Veerse Meer. De vraag is of verschillen in de grootte van de instroom via de Katse Heule, zoals die zijn opgetreden in de jaren sinds de ingebruikname van het doorlaatmiddel, merkbare invloed hebben gehad op de verversing en op de zuurstofhuishouding.

De gemiddelde saliniteit bij de bodem in de zomermaanden (juni-augustus) op de meest westelijke TSO meetpunten (1, 2,3) is significant gecorreleerd met die op het meest oostelijke meetpunten (16, 17) ( $r^2$  0.67-0.87,  $p < 0.010$ ). Dit wijst er op dat variaties in zoutgehalte bij de Zandkreekdam, die een gevolg zijn van verschillen in instroom vanuit de Oosterschelde, worden weerspiegeld in variaties in zoutgehalte helemaal in het westen. De verschillen die zijn opgetreden in de jaren vanaf 2006 (variatie in zomergemiddelde saliniteit bij de Zandkreekdam is 30-31,5) zie je terug in het westen (variatie in saliniteit tussen 28-29,7). De jaren met hoogste saliniteit waren 2011 en 2022, de jaren met de laagste saliniteit waren 2006-2008 en 2021.

Er is echter geen significant verband tussen saliniteit en zuurstofconcentratie bij de bodem op die westelijke meetpunten. Als de verschillen in saliniteit een indicator zijn voor verschillen in instroom vanuit de Oosterschelde, dan zijn die verschillen in instroom te klein om een merkbare invloed te hebben op de zuurstofconcentraties bij de bodem in het westelijk deel. De verklaring hiervoor is waarschijnlijk dat de verschillen in aanvoer van zuurstofrijk water naar het westen klein zijn in vergelijking met de zuurstofopname door de bodem.

#### *Conclusies*

De uitwisseling met de Oosterschelde via de Katse Heule zorgt voor aanvoer van zuurstofrijk water naar het Veerse Meer. Er zijn verschillen in de mate van uitwisseling met de Oosterschelde, maar de verschillen in verversing hebben niet aantoonbaar geleid tot verschillen in de zuurstofconcentratie in het westelijk deel van het Veerse Meer. Het is waarschijnlijk dat de verschillen in verversing binnen een jaar een relatief gering effect hebben op de aanvoer van zuurstofrijk water naar het westen, in vergelijking met de grote zuurstofvraag vanuit het sediment.

### **3.1.4 Stratificatie**

#### **3.1.4.1 Gemiddelde patroon in de zomer**

Stratificatie belemmert de verticale uitwisseling van stoffen tussen de bovenlaag en de bodemlaag van de waterkolom. Het verschil in dichtheid tussen de waterlaag tot 5 m boven de bodem (bodemlaag) en de waterlaag tot 5 m onder het oppervlak (bovenlaag), berekend uit de TSO-metingen en gemiddeld over de maanden juni t/m augustus, is gebruikt als indicator voor de sterkte van de stratificatie. Het gemiddelde dichtheidsverschil voor de zomermaanden juni-augustus op meetpunt Soelekerkepolder werd kleiner van 2006 tot 2015 (=minder sterke stratificatie) en toonde de laatste jaren (2018, 2020, 2021) weer een toename, maar in 2022 was het verschil juist weer klein. Het jaar 2013 wijkt sterk af van de andere jaren in 2006-2015 (Figuur 3-9).

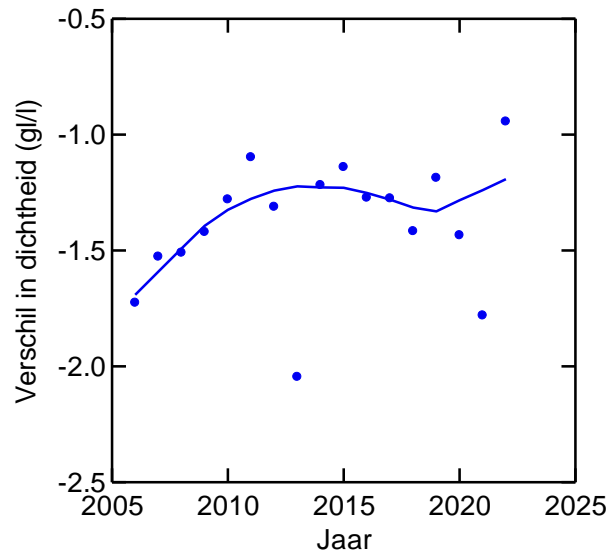
Voor de jaren 2006-2021 was er een significant verband tussen het gemiddelde dichtheidsverschil en de gemiddelde zuurstofconcentratie bij de bodem voor de maanden juni-augustus ( $r^2=0.4$ ,  $p<0.010$ ): hoe groter het verschil in dichtheid (=hoe sterker de stratificatie), hoe lager de zuurstofconcentratie bij de bodem (Figuur 3-10). Echter, het jaar 2022 wijkt sterk af van dit patroon. Afgezien van het afwijkende jaar 2022, zijn de jaren met de grootste dichtheidsverschillen en laagste bodemconcentraties 2013 en 2021, de jaren met de kleinste verschillen en hoogste bodemconcentraties zijn 2011 en 2015. Uit de figuur blijkt ook dat de jaren 2019 en 2020, waarin sterfte van vis en bodemdieren was waargenomen, niet sterk afwijken van andere jaren.

De stratificatie wordt vooral veroorzaakt door temperatuurstratificatie; in 2013 was de bodemtemperatuur relatief laag, vanaf 2015 vertonen de oppervlakte temperaturen een stijgende trend. In 2022 was de bodemtemperatuur juist ongewoon hoog (Figuur 3-11). Dit verklaart het geringe verschil in dichtheid. Waarschijnlijk is de hoge bodemtemperatuur de oorzaak geweest van verhoogd zuurstofgebruik in sediment en waterkolom en daarmee van de lage zuurstofconcentratie in de bodemlaag in 2022.

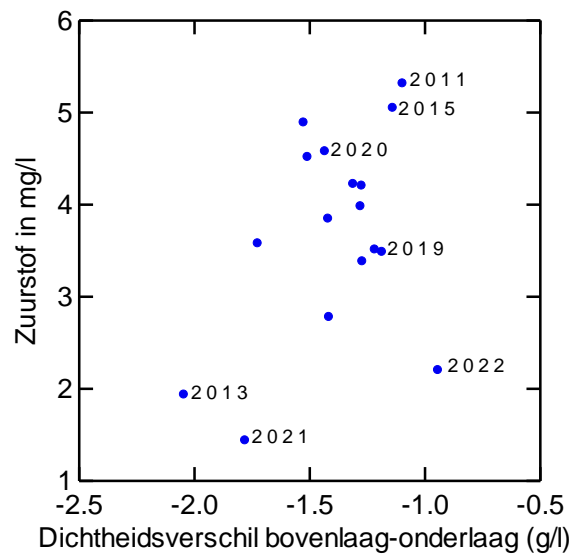
Voor andere TSO meetpunten zijn deze patronen niet duidelijk, door het ontbreken van metingen in de jaren 2012-2019. In het oostelijk deel nabij de Zandkreekdijk is er geen sprake van sterke stratificatie en zijn de zuurstofconcentraties in zowel bodem- als oppervlaktelaag in het algemeen hoog (>6 mg/l).

#### *Conclusies*

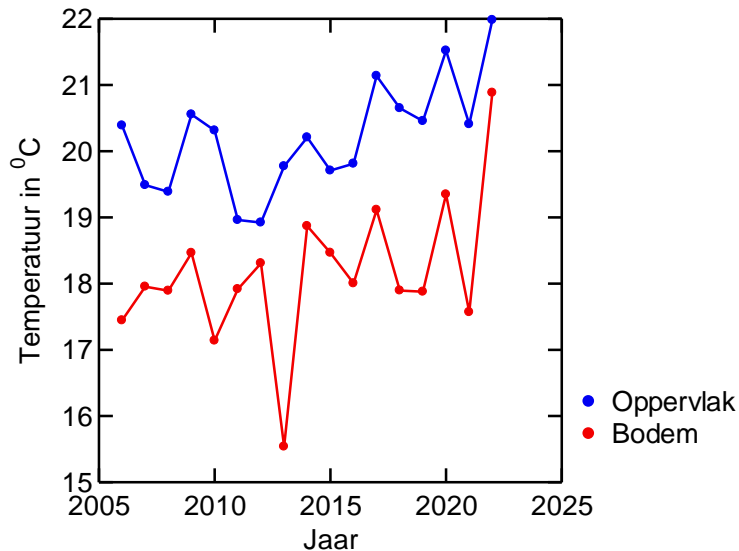
Stratificatie speelt een belangrijke rol bij het ontstaan van zuurstofuitputting in de diepere delen van de waterkolom, maar is niet de enige verklarende factor.



Figuur 3-9 Ontwikkeling van het verschil in dichtheid tussen bodemlaag en oppervlaktelaag op Soelekerkepolder (gemiddelde juni-augustus) in de jaren 2006-2022.



Figuur 3-10 Zuurstofconcentratie in de bodemlaag in relatie tot het verschil in dichtheid tussen bodemlaag en oppervlaktelaag op Soelekerkepolder (gemiddelde juni-augustus) in de jaren 2006-2022.



Figuur 3-11 Watertemperatuur in de bodem- en oppervlaktelaag op Soelekerkepolder (gemiddelde juni-augustus) in de jaren 2006-2022.

#### 3.1.4.2 Korte termijn variatie in stratificatie en zuurstofconcentraties

Het hierboven geschetste beeld dat de verlaagde zuurstofconcentraties in de bodemlaag samenhangen met de sterkte van de stratificatie klopt wanneer gekeken wordt naar het globale beeld tijdens de zomermaanden. Uit de TSO metingen blijkt ook, dat er op een termijn van weken verschillen kunnen optreden, waarbij de patronen ook op de schaal van het westelijk deel van het Veerse Meer ruimtelijk kunnen verschillen.

In Figuur 3-12 zijn de verticale profielen van dichtheid van het water en van de zuurstofconcentraties te zien in de maanden juli en augustus 2021 op TSO meetpunten 1 (Vrouwenpolder), 3 (ten westen van Oostwating) en 8 (Oranjeplaat). Op 12 juli is op de drie meetpunten een duidelijke verticaal dichtheidsverschil en stratificatie te zien, met zuurstofconcentraties die op ongeveer 5 m diepte onder de 4 mg/l komen. Op TSO meetpunt 1 en 3 verzwakt de stratificatie in de daaropvolgende metingen, waarbij de zuurstofconcentraties op meetpunt 1 al op 9 augustus weer boven 6 mg/l zijn, terwijl op meetpunt 3 dat pas op 26 augustus het geval is. Op meetpunt 8 blijft de stratificatie tot eind augustus in stand al daalt de spronglaag geleidelijk naar ongeveer 12 m eind augustus. Figuur 3-13 laat de profielen zien van juli-augustus 2022, met opnieuw de spronglaag op ongeveer 5 m en zuurstofconcentraties onder 4 mg/l op dieptes tussen 5 en 10 m in juli. Ook in 2022 is voor meetpunten 1 en 3 een geleidelijke verzwakking van de stratificatie te zien in de periode juli-augustus. De zuurstofconcentraties laten een verbetering zien op 10 augustus 2022 maar daarna is er weer een verslechtering op 22 augustus 2022, vlakbij de bodem op meetpunt 1 en beneden 7 m diepte op meetpunt 3, ondanks het feit dat de stratificatie nauwelijks verandert. Op meetpunt 8 houdt de stratificatie gedurende de hele periode juli-augustus stand. De spronglaag varieert wel in diepte, van ongeveer 5 m diepte in juli naar 10 m op 10 augustus en dan weer terug naar 5 m diepte op 22 augustus.

De profielen laten zien dat er behoorlijk wat variatie kan optreden in een periode van 2 maanden, waarbij dit ook verschilt tussen meetpunten. Ook is duidelijk te zien dat vooral op de diepte tussen 5-10 m de zuurstofconcentraties sterk kunnen variëren over een periode van enkele weken, tussen >6 mg/l en <2 mg/l.

De oorzaak van de veranderingen over de periode juli-augustus 2022 lijkt een grotere instroom van zouter water (verversing vanuit de Oosterschelde): in augustus 2022 was de saliniteit in de waterlaag bij de bodem op de drie meetpunten ongeveer 1 psu hoger dan in juli 2022. Mogelijk heeft dat op 10 augustus 2022 tot een verbetering geleid waarna het niet volledig verdwijnen van de stratificatie weer tot een verslechtering heeft geleid op 22

augustus 2022. Als verversing de verklaring is, blijft nog wel de vraag waarom dit effect op meetpunt 8 minder sterk was.

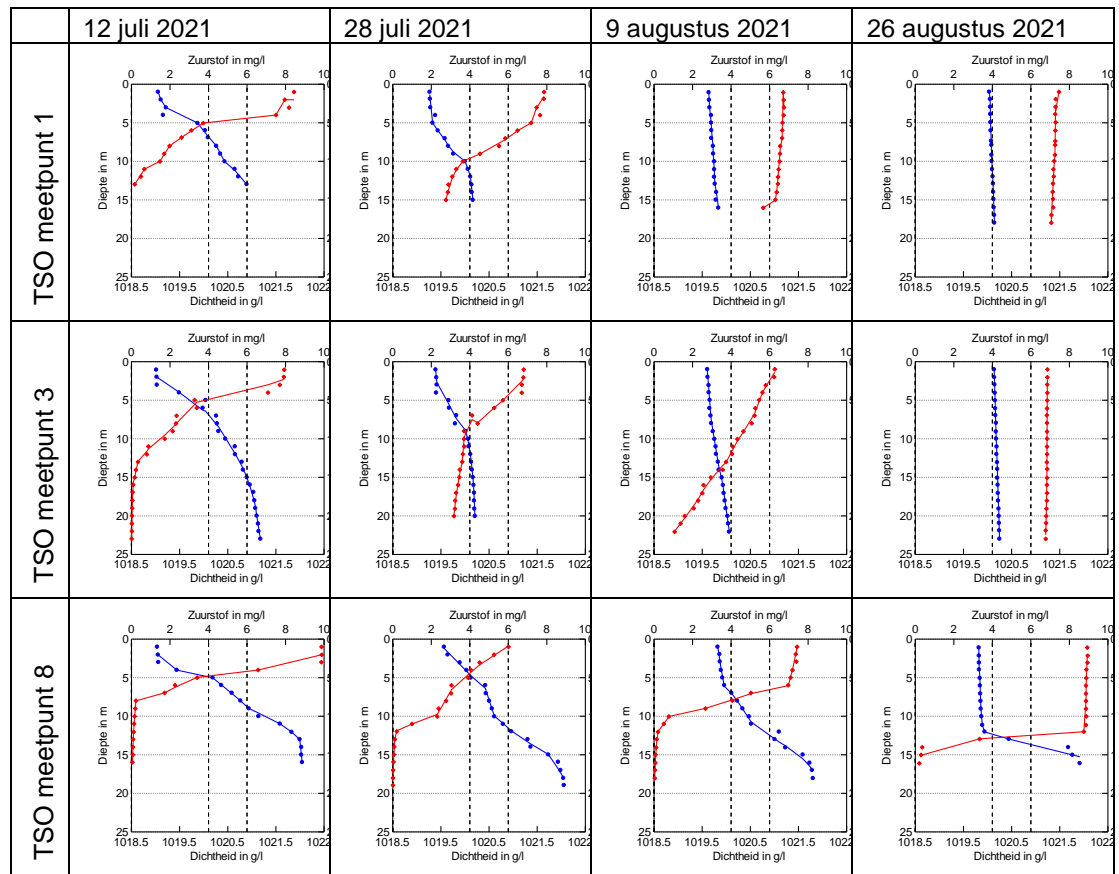
Voor de veranderingen in juli-augustus 2021 hebben we nog geen verklaring, er zijn in ieder geval geen grote veranderingen in saliniteit of temperatuur tussen juli en augustus.

De profielen van de TSO meetpunten 1, 3, 5, 8, 10 en 12 voor de maanden juni-augustus in 2020, 2021 en 2022 zijn te zien in Appendix 1.

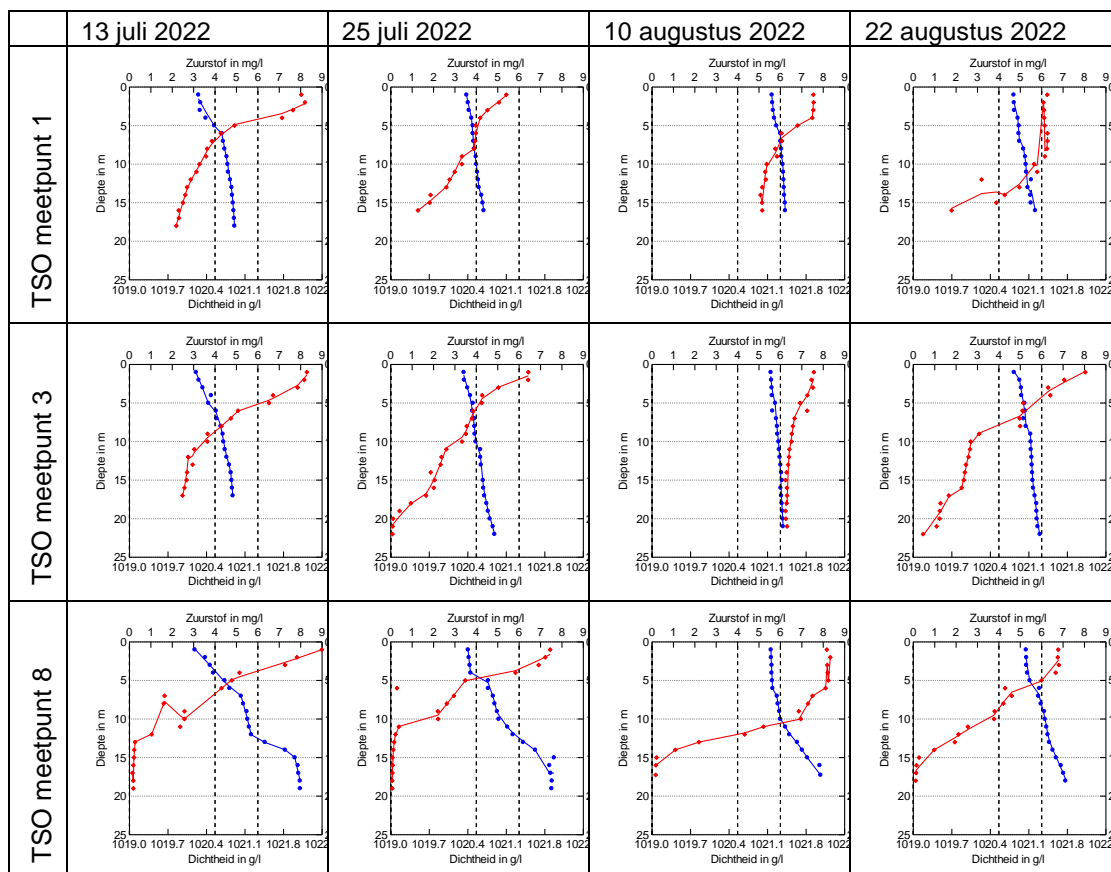
De ondiepere meetpunten (2,4, 7, 9, 11) vertonen meestal minder duidelijke patronen van stratificatie, de meer oostelijke meetpunten (13-16) laten slechts incidenteel verlaagde zuurstofconcentraties zien.

### Conclusies

De sterkte van de stratificatie kan gedurende een zomer op een termijn van weken variëren (het interval tussen opeenvolgende TSO metingen). Het verticale profiel van zuurstofconcentraties kan deels, maar niet volledig, verklaard worden uit de stratificatie.



Figuur 3-12 Verticale profielen van dichtheid (blauwe lijn en zuurstofconcentratie (rode lijn) op TSO meetpunten 1, 3 en 8 in juli en augustus 2021. De onderbroken verticale lijnen geven de zuurstofconcentraties van 4 en 6 mg/l aan.



Figuur 3-13 Verticale profielen van dichtheid (blauwe lijn en zuurstofconcentratie (rode lijn) op TSO meetpunten 1, 3 en 8 in juli en augustus 2022. De onderbroken verticale lijnen geven de zuurstofconcentraties van 4 en 6 mg/l aan.

### 3.1.5 Zuurstofverbruik in waterkolom en sediment

Er is zuurstofverbruik door organismen in de waterkolom (bijv. zoöplankton, vis) en de bodem (bodemdieren) en door afbraakprocessen in de waterkolom en de bodem. Er zijn slechts beperkt gegevens over de omvang van het zuurstofverbruik, eventuele veranderingen in de tijd en ruimtelijke verschillen.

Door Universiteit Utrecht is onderzoek gedaan aan het zuurstofverbruik door de bodem. De resultaten van de metingen (Slomp & van Helmond 2022) wijzen op een hoge zuurstofvraag vanuit het sediment, zowel op ondiepe locaties (ca. 5 m) als op diepe locaties (>15 m). De metingen bevestigen het beeld van sterkere zuurstofloosheid in het water bij de bodem in het westelijk deel van het Veerse Meer. Uit de metingen blijkt dat er een hogere zuurstofvraag van het sediment is in het oostelijk deel (nabij de Zandkreekdam), zowel op de ondiepe als op de diepe locatie, dan op de meer westelijke locaties. De gradiënt in zuurstofverbruik door het sediment is dus tegengesteld aan de gradiënt in zuurstofconcentraties nabij de bodem. Het zuurstofverbruik van de bodem varieert tussen  $10 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$  in het westelijk deel van het Veerse Meer tot  $100 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$  in het oosten nabij de Zandkreekdam. De zuurstofopname in het oostelijk deel is vrij hoog in vergelijking met bijvoorbeeld metingen in het Grevelingenmeer met een range van ca.  $10\text{-}70 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$  (Seitaj *et al.* 2017).

Ook de resultaten uit de modellering wijzen op de grote rol van zuurstofopname door het sediment (Buckman *et al.* 2022; zie ook Figuur 3-8). Resultaten van modelberekeningen voor de jaren 2019 en 2020 geven een zuurstofvraag van het sediment tussen  $15\text{-}100 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ , een orde van grootte vergelijkbaar met de metingen van Universiteit Utrecht.



Uit de schattingen van biomassa en afbraak van Japans bessenwier (§3.1.1.2) kwam een gemiddelde zuurstofopname van 0,8 g zuurstof m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup> met een maximum van 1,6 g m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup> oftewel gemiddeld 25 mmol m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup>. Hier gaat het echter om de zuurstofopname gedurende een beperkte periode van het jaar (met de aanname dat de afbraak in 3 maanden optreedt) en specifiek voor de locaties waar Japans bessenwier voorkomt. Het is niet eenvoudig deze getallen door te vertalen naar een schatting op systeemniveau door het ontbreken van een goede schatting van de totale biomassa van Japans bessenwier. Maar ter vergelijking met de gemeten zuurstofopname door het sediment: deze is in het ondiepe water van het oostelijk deel van het Veerse Meer ongeveer 20 mmol m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup> en in de diepe delen meer dan 100 mmol m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup>. In het oosten komt ook het meeste Japanse bessenwier voor. Grof geschat is ongeveer de helft van het gebied ondiep. Als we die verdeling tussen diep en ondiep aanhouden en verder aannemen dat 25%-50% van het ondiepe gebied bedekt is met wier, dan is de geschatte zuurstofopname bij de afbraak van wier ongeveer 3-6 mmol m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup> gemiddeld over het hele gebied, en de geschatte zuurstofopname door het sediment ongeveer 60 mmol m<sup>-2</sup> dag<sup>-1</sup> (het gemiddelde van gemeten zuurstofopname in diepe en ondiepe deel).

In 2021 zijn metingen uitgevoerd met twee meetboeien, beide op ca. 1 m diepte (Figuur 3-14). Eén meetboei lag op ca. 1 m diepte bij meetpunt VM5 (Oranjeplaat), de andere meetboei lag bij meetpunt VM6 (Schotsman). Opvallend in de zuurstofconcentraties op VM5 is de sterke dag-nacht ritmiek die wordt veroorzaakt door productie overdag en zuurstofverbruik 's nachts. Op VM6 vond een sterke daling van zuurstofconcentraties tot <4 mg/l plaats op 13 juli 2021 terwijl tegelijkertijd de saliniteit toenam. De waarschijnlijke oorzaak is de instroom van zouter en zuurstofarmer water uit de diepere waterlaag van dit deel van het Veerse Meer, mogelijk opwelling veroorzaakt door een verandering in wind. De gebeurtenis volgt kort op een verandering in windrichting van O naar NW en een toename in windkracht.

In 2022 zijn van 15 juli tot eind september metingen uitgevoerd bij de Schotsman, met twee meetboeien op een diepte van respectievelijk 3 en 5 m. Uit de resultaten blijkt dat de zuurstofconcentraties sterk kunnen variëren (Tabel 3-1). Ook op een termijn van enkele dagen kunnen de verschillen vrij groot zijn. Een korte tijd kwamen de concentraties onder 4 mg/l (Figuur 3-15).

Gemiddeld was het verschil in zuurstofconcentratie tussen 3 en 5 m diepte 0,6 mg/l. Dit laat zien dat de verticale gradiënt in zuurstofconcentratie, veroorzaakt door zuurstofopname door het sediment, ook in ondiep water groot kan zijn. Er is geen relatie tussen watertemperatuur en de grootte van het verticale verschil in zuurstofconcentratie, dus geen directe aanwijzing dat verhoogde respiratie bij hogere watertemperatuur een rol speelt.

De resultaten van de metingen van Universiteit Utrecht laten ook zien dat op ondiepe locaties soms sterke zuurstofverschillen (ordegrootte 0,8 mg/l) worden gemeten op de laatste paar meter boven het sediment (Figuur 4, Slomp & van Helmond 2022).

	T (°C)			Zuurstof (mg/l)		
	3 m diepte	5 m diepte	Vershil	3 m diepte	5 m diepte	Vershil
<b>Minimum</b>	16,7	15,7	-1,2	3,8	3,4	-2,7
<b>Maximum</b>	24,8	24,6	3,0	12,5	10,6	5,9
<b>Gemiddelde</b>	21,1	20,9	0,2	7,2	6,6	0,6

Tabel 3-1 Minimum, maximum en gemiddelde van de zuurstofconcentratie, watertemperatuur en van het verschil tussen de metingen op 3 m en 5 m, gemeten met meetboeien op twee dieptes bij de Schotsman tussen 15 juli en 27 september 2022.

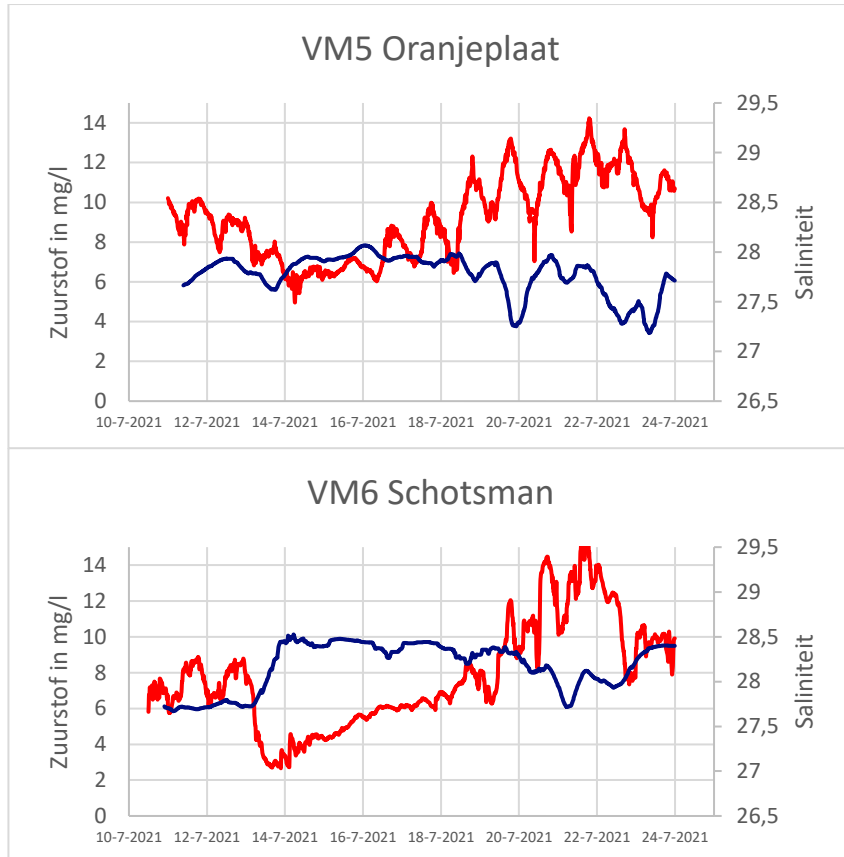


### Conclusies

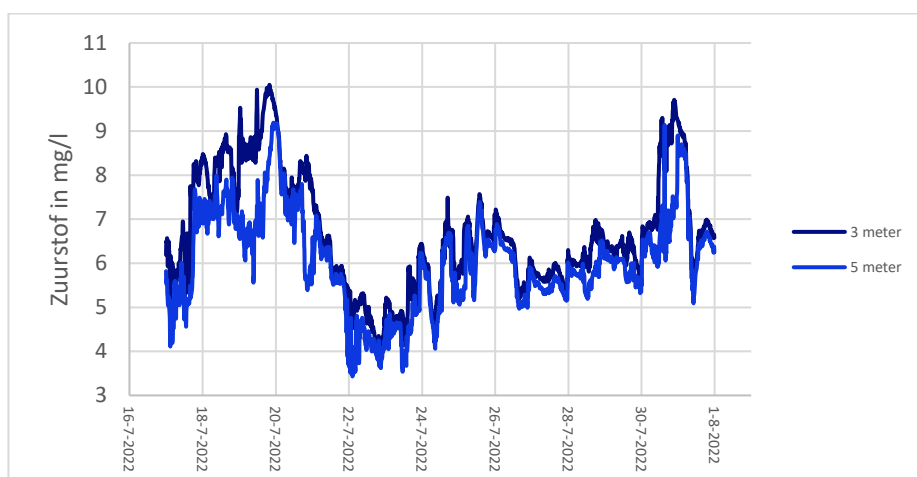
De zuurstofvraag door het sediment is kwantitatief belangrijk voor de zuurstofbalans. Er zijn aanwijzingen voor een gradiënt van west naar oost met de hoogste zuurstofvraag door het sediment in het oostelijk deel van het Veerse Meer.

Ook ondiep kunnen incidenteel verlaagde zuurstofconcentraties dicht bij de bodem voorkomen.

Het ontbreekt aan gegevens over de zuurstofvraag van het sediment over de reeks van jaren sinds 2005, zodat het onbekend is of er een verandering is opgetreden.



Figuur 3-14 Zuurstofconcentraties (rode lijn) en saliniteit (blauwe lijn) gemeten met meetboeien op 1 m diepte in juli 2021.



Figuur 3-15 Zuurstofconcentraties gemeten met meetboeien bij de Schotsman in juli 2022.

### 3.1.6 Import van organisch materiaal

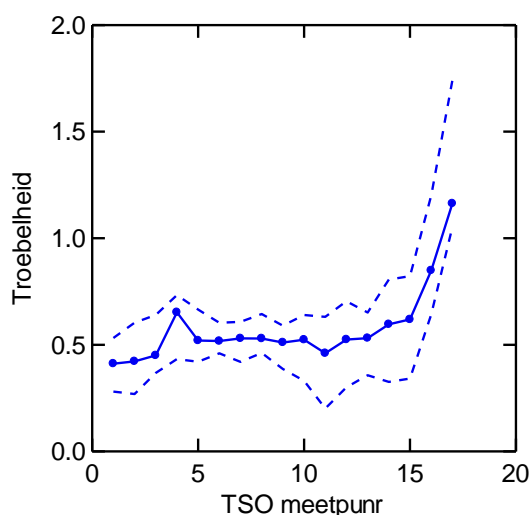
Polderwater en de uitwisseling met de Oosterschelde kan een bron zijn van organisch materiaal. Als dat organisch materiaal in het Veerse Meer achterblijft en daar wordt afgebroken, leidt dit tot een zuurstofvraag bovenop de zuurstofopname die veroorzaakt wordt door lokale (d.w.z. in het Veerse Meer) productie van organisch materiaal (bijv. door fytoplankton en wieren).

Er zijn geen gegevens over de aanvoer van organisch materiaal via de poldergemalen. Schatting van de import en export van organisch materiaal via de Katse Heule is ook lastig. Er zijn beperkt (tot 1995) meetgegevens van concentraties van particulier organisch koolstof (POC) en chlorofyl in de Zandkreek (Oosterschelde) beschikbaar. Uit een vergelijking met andere meetpunten in de Oosterschelde die nog steeds gemonitord worden, blijkt dat twee meetpunten in de Oosterschelde (Hammen oost en Lodijkse Gat) niet significant verschillen in POC en chlorofylconcentraties van het meetpunt in de Zandkreek. Een vergelijking van de concentraties op die twee meetpunten in de Oosterschelde met het meetpunt Soelekerkepolder in het Veerse Meer, voor de jaren 2005-2020, toont geen verschillen in POC concentraties maar wel significant hogere concentraties chlorofyl in het Veerse Meer. Dit concentratieverschil zou dus wijzen op een netto export vanuit het Veerse Meer. Het is natuurlijk denkbaar dat, bij de import van Oosterschelde water via de Katse Heule tijdens de vloedfase, er sedimentatie optreedt van materiaal in het Veerse Meer direct achter de Katse Heule. Metingen van Universiteit Utrecht geven een schatting die gaan in de richting van een aanzienlijke sedimentatiesnelheid in het meest oostelijk deel van het Veerse Meer, in de orde van 5 cm jaar<sup>-1</sup>.

Van de TSO metingen van 2020 en 2021 zijn ook gegevens over troebelheid beschikbaar. Die data laten zien dat de meetpunten dicht bij de Zandkreekdijk (meetpunt 15, 16) hogere troebelheid hebben dan de andere punten in het Veerse Meer (Figuur 3-16). Dit is een aanwijzing dat er een import is van zwevende stof vanuit de Oosterschelde. Sedimentgegevens wijzen uit dat het sediment in het oostelijk deel van het Veerse Meer een grotere slibfractie en kleinere mediane korrelgrootte heeft, wat ook wijst op sedimentatie van materiaal (Prins & Vergouwen 2015, van Son & Verduin 2021).

#### Conclusies

Beschikbare gegevens wijzen op sedimentatie van materiaal in met name het oostelijk deel van het Veerse Meer. Een kwantificering op basis van de modelresultaten kan mogelijk meer onderbouwing leveren.



Figuur 3-16. Troebelheid (uitgedrukt in ftu) op de TSO meetpunten. De lijnen geven de mediaan, 25- en 75-percentiel van alle metingen in 2020-2021.

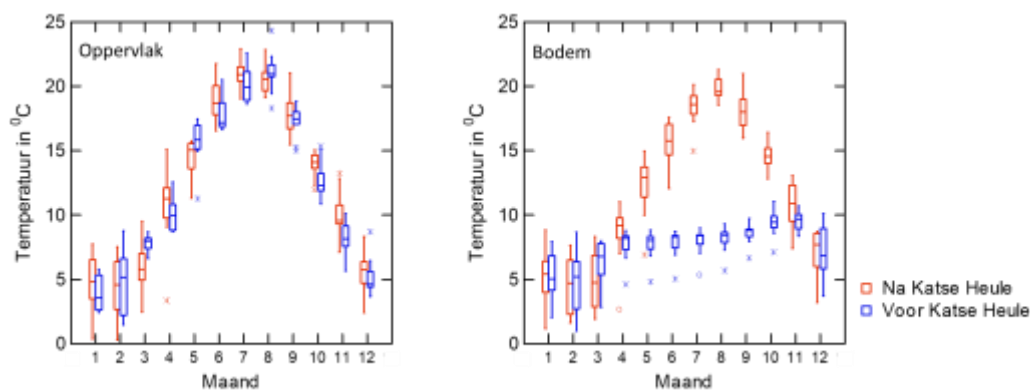
### 3.1.7 Watertemperatuur

De watertemperatuur is van belang omdat hogere watertemperaturen leiden tot een lagere oplosbaarheid van zuurstof en daarmee tot lagere concentraties. Hogere watertemperaturen leiden ook tot versnelling van afbraakprocessen en daarmee tot, bijvoorbeeld, een hogere zuurstofvraag van het sediment.

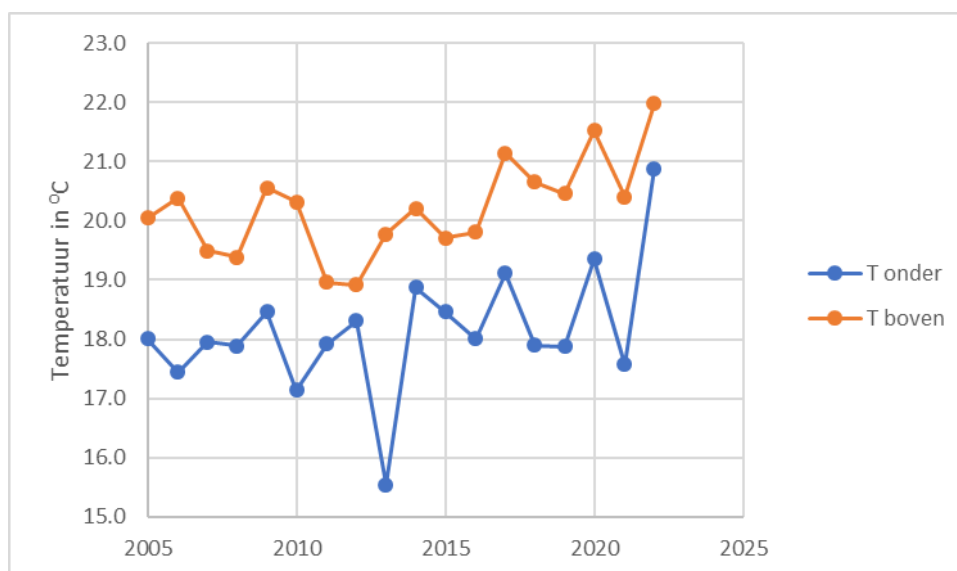
De watertemperatuur in de bodemlaag in de zomermaanden is sterk toegenomen na de ingebruikname van de Katse Heule. In de oppervlaktelaag is dat niet het geval (Figuur 3-17).

De jaargemiddelde watertemperatuur is zowel in de bodemlaag als in de oppervlaktelaag op meetpunt Soelekerkepolder vanaf 2006 significant gestegen. Deze stijging vindt zowel plaats in de winter (dec-feb) als in de zomerperiode (mei-aug) (Mann-Kendall test,  $p < 0.05$ ). Voor de andere meetpunten uit de TSO metingen is, door het ontbreken van gegevens over de periode 2012-2019, geen significant trend vast te stellen.

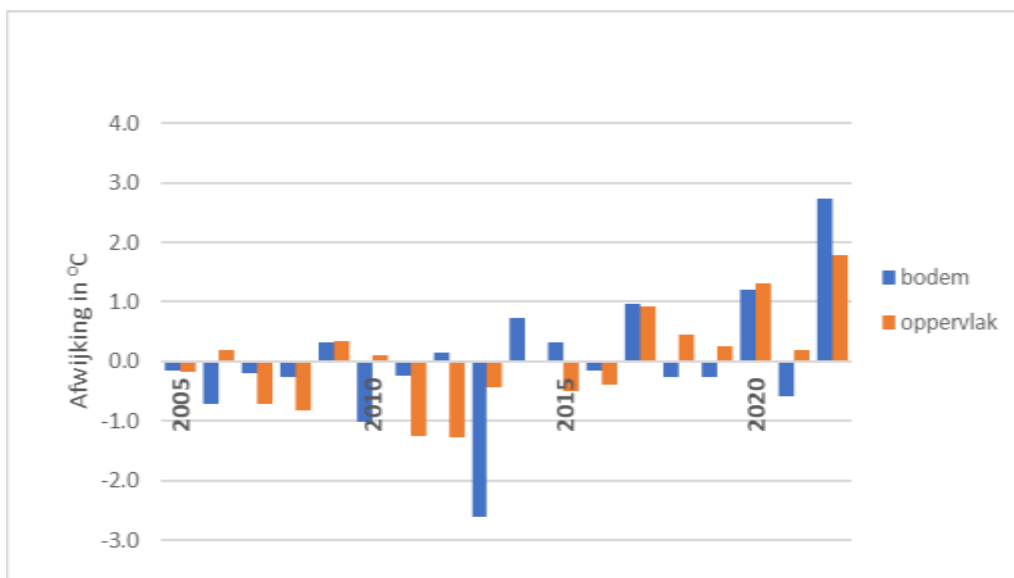
Door de gemiddelde jaartemperatuur te vergelijken met het langjarig gemiddelde, wordt duidelijk dat in 2013 de temperatuur bij de bodem relatief laag was. In de jaren 2017, 2020 en 2021 was juist sprake van relatief hoge temperaturen (Figuur 3-19).



Figuur 3-17. Maandgemiddelde watertemperatuur bij het oppervlak (<5 m diep) en bij de bodem (<5 m boven de bodem) in de periode vóór en na de ingebruikname van de Katse Heule op meetpunt Soelekerkepolder (data TSO metingen).



Figuur 3-18. Temperatuur (gemiddelde juni-augustus) van de bodem- en oppervlaktelaag over de jaren 2005-2022 op Soelekerkepolder (data TSO metingen).



Figuur 3-19 Afwijking van de jaarlijkse temperatuur (gemiddelde juni-augustus) van de bodem- en oppervlaktelaag t.o.v. de gemiddelde temperatuur over juni-augustus over de jaren 2005-2022 op Soelekerkepolder (data TSO metingen).

### Conclusies

Als gevolg van de ingebruikname van de Katse Heule is de watertemperatuur in de diepe waterlaag nu hoger dan in de jaren vóór 2005. De jaargemiddelde watertemperatuur en de temperatuur in winter en zomer is sinds 2005 ook boven de spronglaag gestegen. Het jaar 2022 had de hoogste watertemperaturen.

## 3.2 Model resultaten

Het rapport over de validatie van de modelresultaten is afgerond (Buckman *et al.* 2022).

De modelresultaten die nu beschikbaar zijn (voor de jaren 2011, 2012, 2019, 2020) laten zien dat het transport van water vanaf de Katse Heule van grote invloed is op de zuurstofconcentraties en wisselingen in de instroom via de Katse Heule werken meteen door op de verversing en de zuurstofconcentraties.

De zuurstofopname door het sediment is van grote invloed in zowel de diepe delen als de ondiepe delen en verlaagde zuurstofconcentraties dicht bij de waterbodem worden ook door het model voorspeld (zie Figuur 3-8).

De modelberekeningen laten in het algemeen hogere chlorofylconcentraties zien dan op meetpunt Soelekerkepolder worden waargenomen. Omdat in het model alleen een algemene term voor begrazing van fytoplankton (door zoöplankton of filterende bodemdieren) is opgenomen, bij gebrek aan voldoende data over grazers, is aangenomen dat begrazing van fytoplankton een relatief belangrijk proces is dat van invloed is op de concentraties van chlorofyl.

## 4 Conclusies

### *Stratificatie, uitwisseling met de Oosterschelde en zuurstof*

In het Veerse Meer zijn de zuurstofconcentraties laag in de waterlaag onder de spronglaag. Dit wordt veroorzaakt door stratificatie, die de toevoer van zuurstof naar de diepere delen belemmert. In combinatie met zuurstofgebruik in de bodem en in het water leidt dit tot lage zuurstofconcentraties in de waterlaag onder de spronglaag, in met name de zomerperiode en vooral in het deel van het Veerse Meer westelijk van de Middellaten. De ingebruikname van de Katse Heule heeft de situatie verbeterd door de grotere uitwisseling met de Oosterschelde waardoor de aanvoer van zuurstofrijk water vergroot is.

Echter, het was voor de ingebruikname van de Katse Heule al bekend dat het doorlaatmiddel niet in het hele Veerse Meer tot verbetering van de zuurstofconcentratie zou leiden. In het midden en westelijk deel is de verversing onvoldoende, de lange transportweg van water vanaf de Katse Heule naar het westen leidt er toe dat de zuurstofconcentraties door zuurstofvraag vanuit de bodem al verlaagd zijn voordat het water in dat deel van het meer aankomt. Daar komt bij dat in die delen van het meer verticale verversing wordt belemmerd door de stratificatie, die het sterkst en meest stabiel lijkt te zijn in het middendeel van het Veerse Meer, waar dan ook de laagste zuurstofconcentraties in de diepe delen worden gemeten (Figuur 2-5).

Het voorkomen van zuurstofarme diepere waterlagen in het midden en westelijk deel van het Veerse Meer is dus deels een gegeven volgend uit de fysieke karakteristieken van het meer: aanvoer van (zuurstofrijk) water vanuit de Oosterschelde en daardoor voldoende verversing in het oostelijk deel, langere verblijftijd, het optreden van temperatuurstratificatie en de aanwezigheid van diepe waterlagen onder de spronglaag in het midden en westelijk deel.

### *Trends in zuurstofconcentratie sinds ingebruikname Katse Heule*

Er zijn echter wel veranderingen in de zuurstofhuishouding in de laatste jaren. De 25-percentiel van de zuurstofconcentraties in de zomerperiode juni-augustus bij meetpunt Soelekerkepolder vertoont een daling over de periode 2005-2022. Dit wijst op een daling van de laagste concentraties die worden gemeten. Deze daling is niet waargenomen in de diepste waterlaag (>8 m), mogelijk omdat de concentraties daar al laag waren en de variatie groot is. In de ondiepere waterlaag tussen 2-8 m daalt zowel de concentratie als de zuurstofverzadiging, wat wijst op een verslechtering die niet alleen wordt veroorzaakt door een toenemend zoutgehalte en hogere watertemperatuur. In de meest ondiepe waterlaag (0-2 m) nemen de concentraties wel af maar de zuurstofverzadiging niet, wat wijst op een effect van toename in saliniteit en temperatuur op de zuurstofconcentratie.

Stratificatie speelt een belangrijke rol bij het optreden van lage zuurstofconcentraties. In het midden en westelijk deel van het Veerse Meer komen lage zuurstofconcentraties ondieper voor dan in het oostelijk deel, wat samenhangt met de diepte van de spronglaag. De diepte van de spronglaag (en daarmee de diepte waarop lage zuurstofconcentraties voorkomen) is echter variabel en dat leidt vooral op de diepte tussen 2-8 m tot sterk wisselende zuurstofconcentraties.

### *Invloed van andere factoren op de zuurstofhuishouding*

Uit de nu beschikbare gegevens komen geen duidelijke aanwijzingen dat er een verandering is opgetreden in de primaire productie en daarmee in de toevoer van organisch materiaal als oorzaak voor veranderingen in de zuurstofhuishouding. Er zijn geen aanwijzingen voor veranderingen in de aanvoer van voedingsstoffen, de concentraties van stikstof en fosfaat in het Veerse Meer vertonen een daling als gevolg van meer uitwisseling, dalende concentraties in de Oosterschelde en mogelijk ook dalende concentraties (van stikstof) in het polderwater. Toch lijken de concentraties nog zo hoog dat potentiële limitatie van de groei

van fytoplankton door fosfaat verwaarloosbaar is en potentiële limitatie door stikstof in de zomer een beperkte rol lijkt te spelen. Het is daarmee de vraag of een verandering in de aanvoer van nutriënten via polderwaterafvoeren van grote invloed is voor primaire productie en biomassa van fytoplankton, zo lang het niet gaat om een zeer aanzienlijke reductie die tot substantiële daling van de nutriëntenconcentraties leidt.

Voor beter begrip van het belang van nutriëntenlimitatie kunnen analyse van de fytoplanktonsamenvatting (op basis van MWTL metingen) en de resultaten van de recent uitgevoerde primaire productie ook nog een bijdrage leveren.

Op grond van de nu beschikbare schattingen van biomassa van wieren lijkt de primaire productie en zuurstofopname na afbraak van de wieren een relatief kleine bijdrage te leveren, in vergelijking met de primaire productie door fytoplankton. Wel is het waarschijnlijk dat de afbraak van wieren na afsterven op lokale schaal een rol speelt.

De resultaten van het onderzoek van de Universiteit Utrecht aan de zuurstofvraag van het sediment wijzen op een grote zuurstofvraag van het sediment, zowel in de diepe geulen als in de ondiepere zone, en sterker in het oostelijk deel van het Veerse Meer dan in het westelijk deel. Deze zuurstofvraag is waarschijnlijk een belangrijke oorzaak van de lage zuurstofconcentraties in de diepere waterdelen die ontstaan uit een onbalans tussen zuurstofaanvoer en zuurstofverbruik. Deze onbalans lijkt het sterkst in het middendeel van het Veerse Meer.

De resultaten van Universiteit Utrecht geven ook aan dat concentraties van waterstofsulfide in het sediment hoog zijn en incidenteel is waterstofsulfide in de waterkolom waargenomen. De productie van waterstofsulfide is een gevolg van afbraakprocessen in de bodem, die worden gevoed door aanvoer van organisch materiaal.

Het vrijkomen van waterstofsulfide vormt een potentieel risico voor fauna in het Veerse Meer en is waarschijnlijk een verklaring voor het optreden van vissterfte in 2019 en 2020. Een nog openstaande vraag is onder welke omstandigheden waterstofsulfide vrijkomt in zodanige hoeveelheden dat dit effect heeft op de fauna, zodat beter ingeschat kan worden hoe groot het potentiële risico van negatieve effecten is

De vraag is ook wat de achterliggende oorzaak is van de waargenomen verschillen in zuurstofvraag tussen de meetpunten dicht bij de Zandkreek en meer westelijke meetpunten. De hogere zuurstofvraag door het sediment in het oostelijk deel van het Veerse Meer is een gevolg van een hogere aanvoer van organisch materiaal. Is dat organisch materiaal lokaal geproduceerd (bezinking fytoplankton), afkomstig van baggerstort of is het materiaal dat geïmporteerd wordt vanuit de Oosterschelde? Er zijn aanwijzingen voor een hogere sedimentatie in dit deel van het meer, maar goede gegevens om de mogelijke import van organisch materiaal vanuit de Oosterschelde te kwantificeren ontbreken op dit moment. Voor het Veerse Meer als geheel is ook de vraag in hoeverre aanvoer van organisch materiaal via de polderwaterafvoeren kwantitatief van belang is, in vergelijking met andere bronnen zoals primaire productie en import vanuit de Oosterschelde.

#### *Effecten op het ecosysteem*

De nu beschikbare gegevens wijzen op een achteruitgang in dichtheid en biomassa van bodemdieren en een verandering in soortensamenstelling in de delen dieper dan 2 m in 2019-2020, maar ook gedeeltelijk herstel in 2020. Een voor de hand liggende vraag is of de wisselende zuurstofconcentraties in de waterlaag tussen 2-8 m effect hebben op het bodemdierenbestand op die diepte. Een meer gedetailleerde uitwerking van de bodemdiergegevens en analyse van de relatie met omgevingsfactoren (zuurstof, maar ook sedimentsamenstelling, enz.) is nodig om tot beter begrip te komen van de oorzaken van de veranderingen in de bodemdiergemeenschap, waaronder de vraag wat het verband is met de optredende zuurstofcondities.

Er is mogelijk sprake van een toename in het voorkomen van bacteriematten (*Beggiatoa*) in de ondiepere delen van het Veerse Meer. Daarvoor zijn anekdotische aanwijzingen uit

waarnemingen van duikers, maar dit vraagt nog om een meer kwantitatieve onderbouwing. Mogelijk leidt de grote variatie in zuurstofconcentraties in de waterlaag tussen 2-8 m en de zuurstofuitputting dichtbij en in de bodem tot gunstige omstandigheden voor *Beggiatoa*. Ook hier is een nadere analyse nodig om beter inzicht te krijgen welke effect maatregelen zouden kunnen hebben op het voorkomen van deze bacteriematten.

Voor andere ecologische problemen in het Veerse Meer, zoals het niet behalen van de instandhoudingsdoelen voor de Vogelrichtlijn of het niet voldoen aan de KRW doelen door het ontbreken van zeegras sinds 2003, is een relatie met de hiervoor geschetste zuurstofproblematiek niet waarschijnlijk.

Voor de meeste vogelsoorten worden predatie en verstoring genoemd als mogelijke verklaring. In 2023 verschijnt de evaluatie van het Natura 2000 beheerplan, dat mogelijk meer inzicht biedt in achterliggende oorzaken.

Bij het geleidelijk verdwijnen van zeegras uit het Veerse Meer hebben verdringing door zeesla en wisselingen in zoutgehalte een rol gespeeld.

Overlast voor gebruikers door groei van wieren en kwallen komt regelmatig voor. Voor wieren en kwallen is er geen relatie met de zuurstofproblematiek in de diepere delen van het Veerse Meer, maar mogelijk is de relatief hoge nutriëntenbelasting wel één van de factoren die van invloed is op de omvang van de populaties.

#### *Mogelijke maatregelen*

Vervolganalyses met behulp van het 3D model voor het Veerse Meer moeten meer inzicht geven in de effectiviteit van mogelijke maatregelen. Hierbij wordt een aantal scenario's onderzocht, zoals vergroten van de uitwisseling met de Oosterschelde en het verminderen van polderwaterafvoer, ook rekening houdend met het effect op langere termijn van zeespiegelstijging. Deze modelstudie loopt nog.

#### *Kennisleemtes en discussiepunten*

Uit dit rapport komt naar voren dat er op verschillende aspecten nog kennisleemtes zijn. Een van de kennisleemtes betreft de menging en gelaagdheid in het systeem. Uit de verticale profielen van de TSO metingen komt naar voren dat de gelaagdheid sterker en stabiel is in het middendeel van de Veerse Meer (§3.1.4). Dit is mogelijk een gevolg van sterkere menging door wind in het westelijk deel dan in het middendeel, maar dit moet nog worden onderbouwd door een nadere analyse.

Hierop aansluitend is de vraag in hoeverre variatie in de uitwisseling met de Oosterschelde, als gevolg van variatie binnen een jaar door polderwaterafvoeren en beheer van de Katse Heule, van invloed is op de zuurstofcondities.

De zuurstofvraag van het sediment lijkt een belangrijke rol te spelen in de zuurstofbalans van het meer. Die zuurstofvraag wordt gevoed door aanvoer van organisch materiaal, maar een kwantificering van de belangrijkste bronnen van organisch materiaal vraagt om nader onderzoek. Het sediment is potentieel een bron van waterstofsulfide en metingen hebben aangetoond dat waterstofsulfide in de waterkolom kan voorkomen. De vraag is nog onder welke omstandigheden het waterstofsulfide vrijkomt en in hoe groot het risico is voor de fauna.

De achteruitgang in het bodemdierenbestand lijkt de laatste jaren samen te vallen met de geleidelijke verslechtering in zuurstofcondities, vooral in de laag tussen 2-8 m. Of er werkelijk een directe relatie is, zal ook nader onderzocht moeten worden door een meer gedetailleerde (op locatieniveau) analyse van de veranderingen in bodemdieren.

Een belangrijke kennisleemte is de vraag wat veranderingen in het bodemdierenbestand en het voorkomen van wieren en kwallen betekenen voor de ecologie van het Veerse Meer en andere natuurwaarden onder de KRW (o.a. vis) en Natura 2000 (vogels).

In 2023 komen meer gegevens uit monitoring en onderzoek beschikbaar die gebruikt kunnen worden om de nu nog bestaande onzekerheden en kennisleemtes te verkleinen.



## 5 Referenties

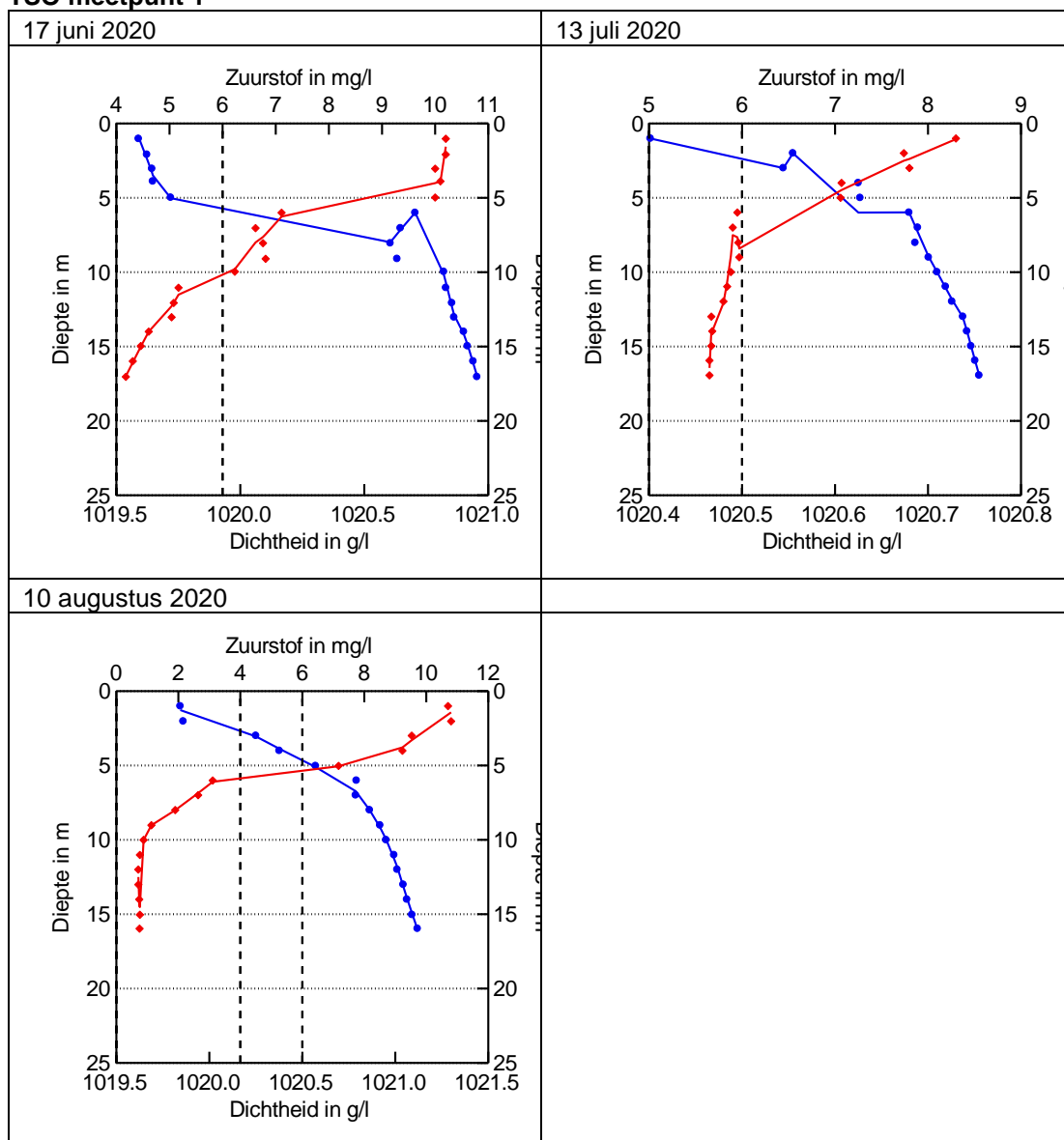
- Buckman, L., A. Nolte and L. Van der Heijden (2022). Development of sixth generation model schematisation 3D D-HYDRO Veerse Meer. Model set-up, calibration and validation D-FLOW and D-Water Quality. Delft, Deltares, Rapport nr 11208079-000-ZKS-0005, 52 pp.
- Hoekstein, M.S.J., M. Sluijter and K.D. van Straalen (2022). Watervogels en zeezoogdieren in de Zoute Delta 2020/2021. Vlissingen, Deltamilieu Projecten, Rapportnr. 2022-01. Rijkswaterstaat CIV. Rapport BM 22.02
- Holland, A.M.B.M., C.M. Berrevoets, J. Consemulder, L. Peperzak, E.C. Stikvoort, F. Twisk, L.P.M.J. Wetsteyn, K. Wolfstein, C. van der Male, J.P.F. Pieters, A.M. van der Pluym, P. Lievense and I. Schep (2004). Veerse Meer aan de Oosterschelde : toestand ecosysteem Veerse Meer vóór ingebruikname doorlaاتمiddel. Middelburg, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee & Directie Zeeland, Rapport RIKZ/2004.007, 72 pp.
- Houtekamer, N. and O. van Kleef (2021). Verslag kennissessie ontwikkeling waterkwaliteit en ecologie Veerse Meer Houtekamer & Van Kleef, 13 oktober 2020 9 pp.
- Prins, T.C. and S.A. Vergouwen, Eds. (2015). *Bekkenrapport Veerse Meer 2000-2014*. Delft, Deltares, 134 pp.
- Roks, L. (2022). De ontwikkelingen in de tijd van enkele fysische-chemische parameters gemeten in polderwatergemalen Adriaan, De Piet en Willem die uitslaan op het Veerse Meer. stagerapport HAS Hogeschool, RWS Zee en Delta, Waterschap Scheldestromen, 31 pp.
- Seitaj, D., F. Sulu-Gambari, L.D.W. Burdorf, A. Romero-Ramirez, O. Maire, S.Y. Malkin, C.P. Slomp and F.J.R. Meysman (2017). Sedimentary oxygen dynamics in a seasonally hypoxic basin. *Limnology and Oceanography* 62: 452-473.
- Slomp, C.P. and N.A.G.M. van Helmond (2022). Zuurstofloosheid in het Veerse Meer en de rol van het sediment. Universiteit Utrecht, Radboud Universiteit, rapport in prep.
- Troost, K., M. van Asch, D. van den Ende, Y. van Es, K.J. Perdon, J. van der Pool, W. Suykerbuyk, C. van Zweeden and J. van Zwol (2022). Schelpdierbestanden in de Nederlandse kustzone, Waddenzee en zoute deltawateren in 2021. IJmuiden, Centrum voor Visserijonderzoek (CVO), CVO rapport: 22.011.
- van der Heijden, L. (2021). Water- en stoffenbalans Veerse Meer 2011-2020. Delft, Deltares, Rapport nr 11206834-000-ZKS-0014, 70 pp.
- van der Jagt, H., P. Neijenhuis, P.B. Broeckx, M. Japink and D.B. Kruijt (2021a). Kruiskwallenmonitoring Veerse Meer 2021. Bureau Waardenburg Rapportnr. 21-265, 24 pp.
- van der Jagt, H.A., P. Neijenhuis, P.B. Broeckx, P.J. de Gier and D.B. Kruijt (2021b). Ecologische monitoring Veerse Meer – Wieren en bodemgesteldheid. Culemborg, Bureau Waardenburg, Rapport nr.21-266, 34 pp.
- van der Jagt, H.A., B. Achterkamp, M. Japink and D.B. Kruijt (2022a). Macrozoöbenthos in het Veerse Meer 2021. Culemborg., Waardenburg Ecology, rapportnummer 22-316.
- van der Jagt, H.A., P.B. Broeckx, P. Neijenhuis, D.S. Spruijt and D.B. Kruijt (2022b). Zuurstofvraag van Japans bessenwier in het Veerse Meer. Culemborg, Bureau Waardenburg, Rapportnr.22-0310, 16 pp.
- van Rijssel, J.C., O.A. van Keeken and J.J. de Leeuw (2021). Vismonitoring Rijkswateren t/m 2020. Deel 1: Toestand en trends. Wageningen, Wageningen Marine Research, Rapport nr C096/21, 450 pp.
- van Son, L. and E. Verduin (2021). MWTL Macrozoöbenthos Veerse meer. Jaarrapportage 2020. Amsterdam, Eurofins AquaSense, 38 pp.
- Wolfstein, K. (2004). De ontwikkeling van zeesla en zeegras in het Veerse Meer. RIKZ, Werkdocument RIKZ/OS/2004.824x.



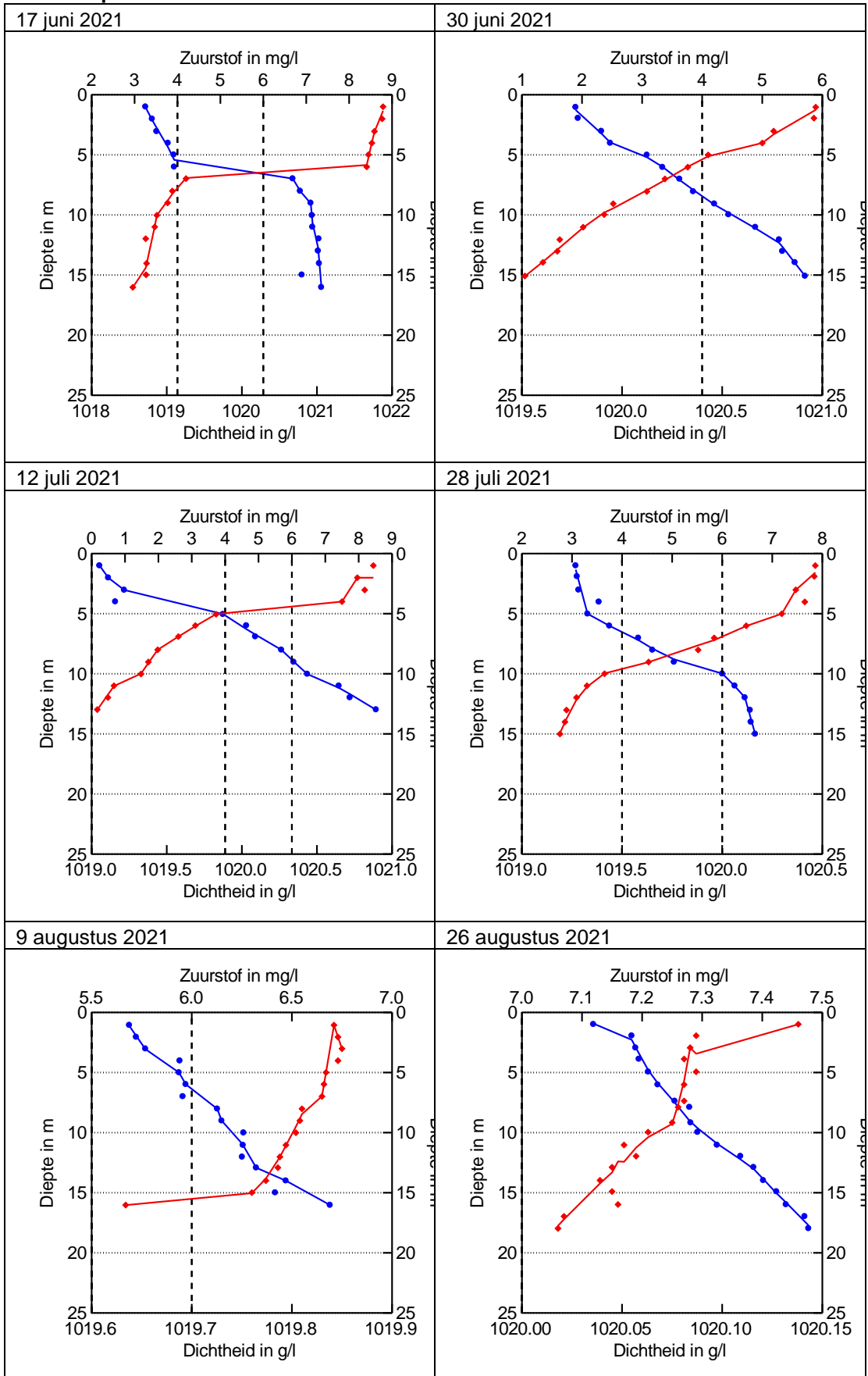
# 6 Appendix 1

De figuren in deze appendix laten de verticale profielen zien van dichtheid van het water (blauw) en zuurstof (rood), voor de metingen in juni, juli en augustus voor de jaren 2020-2022.

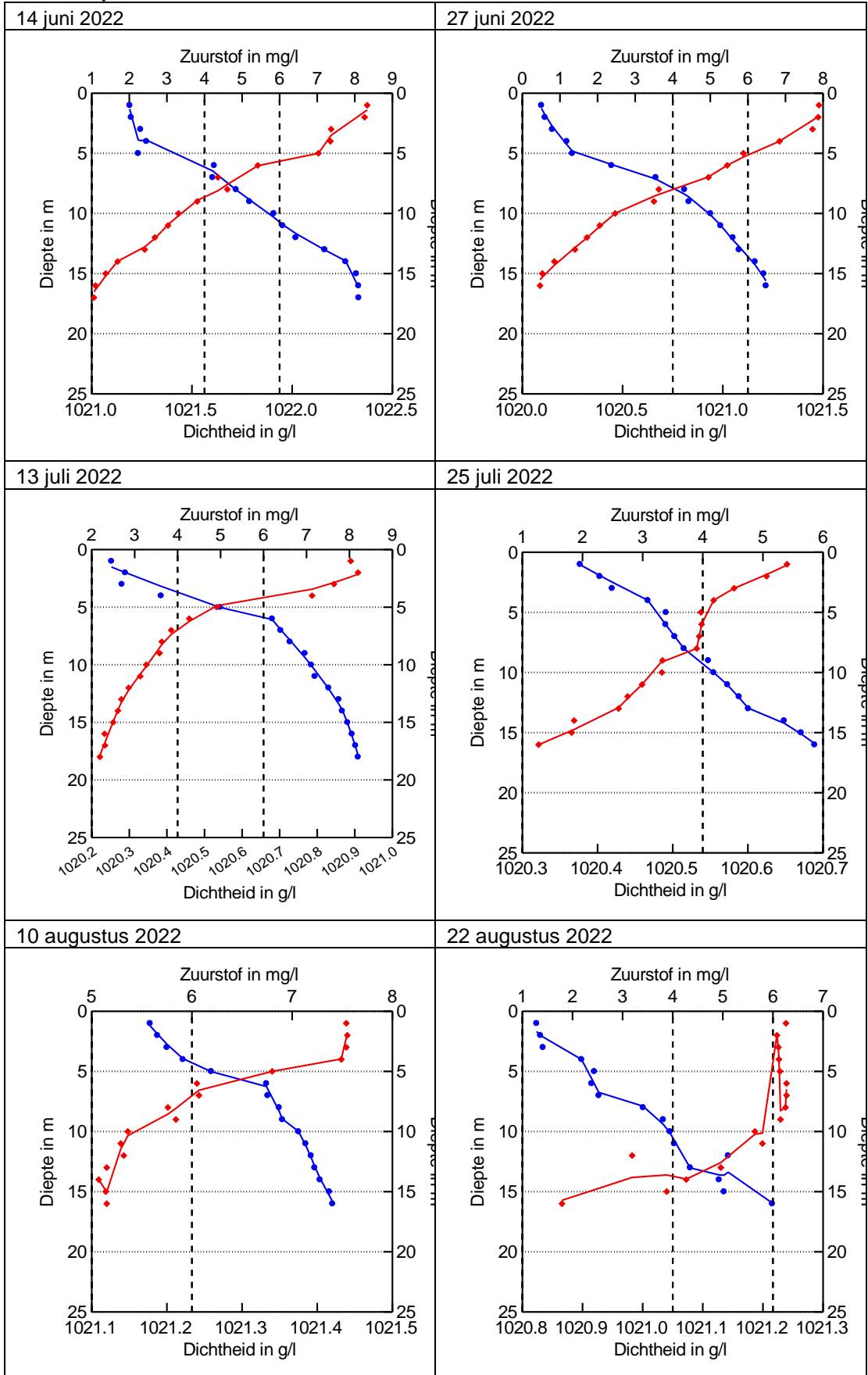
## TSO meetpunt 1



**TSO meetpunt 1**

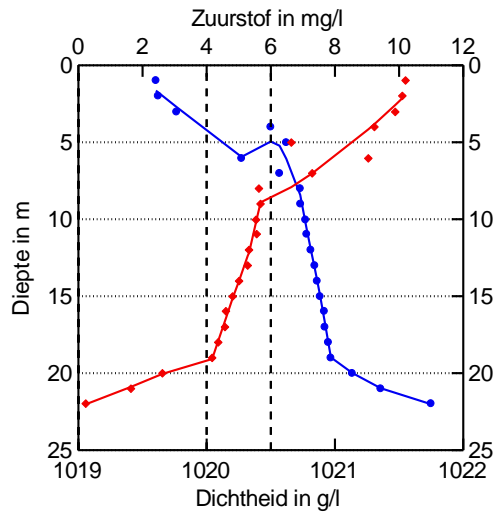


**TSO meetpunt 1**

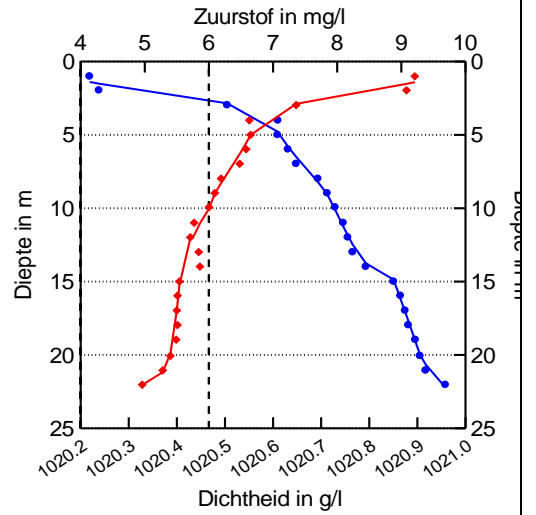


**TSO meetpunt 3**

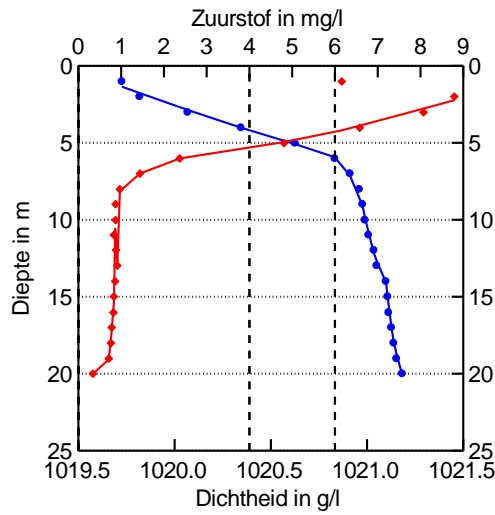
17 juni 2020



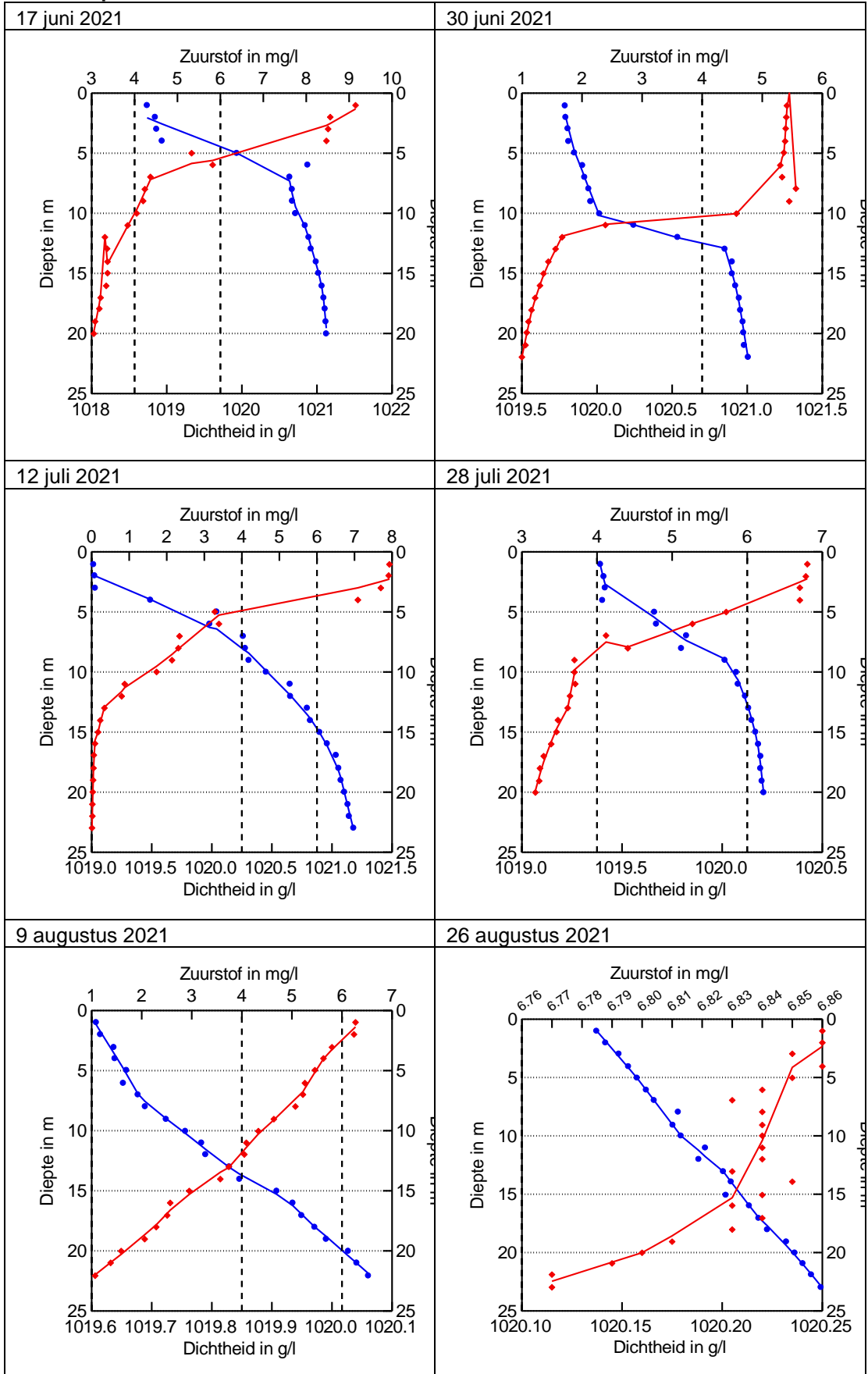
13 juli 2020



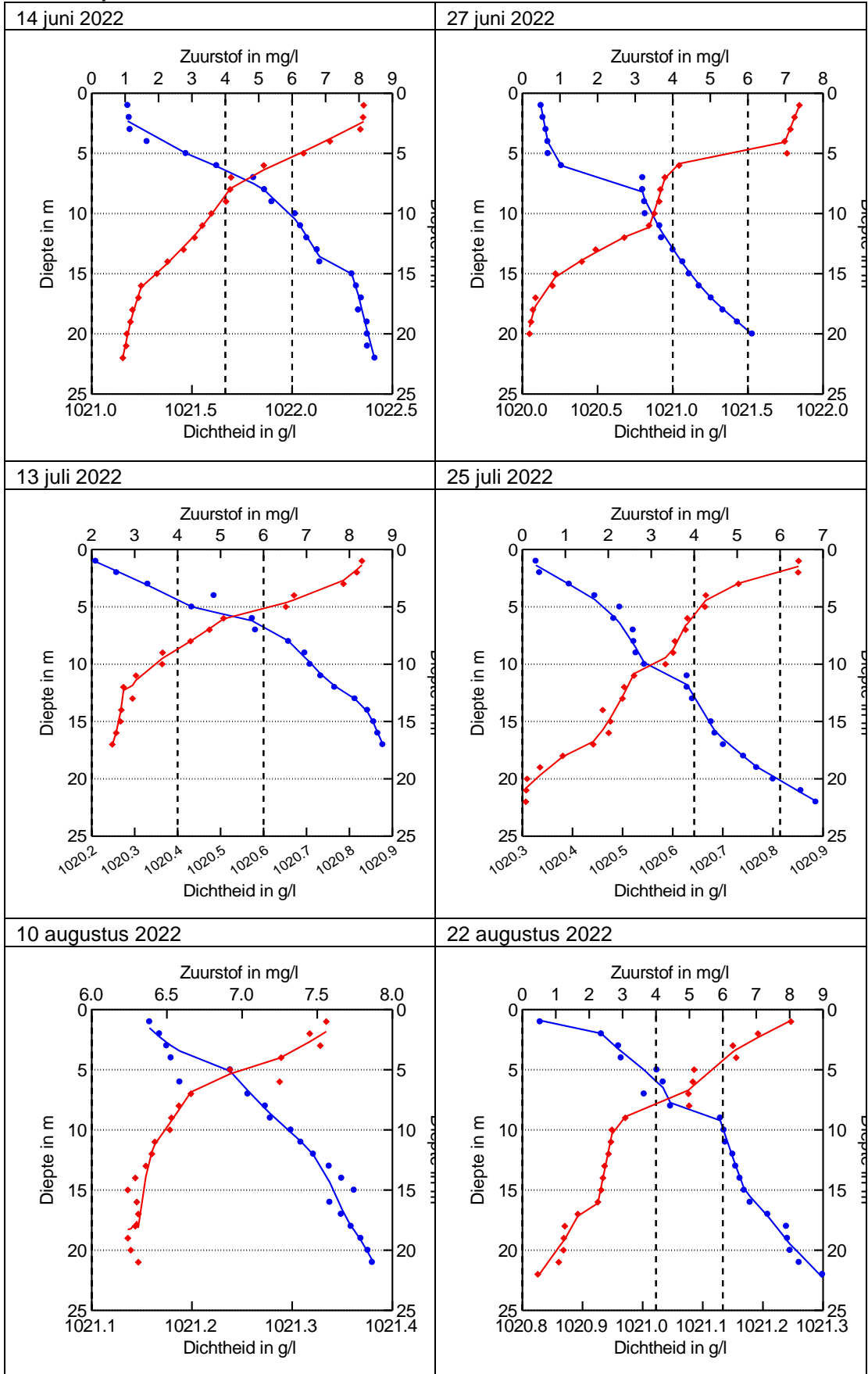
10 augustus 2020



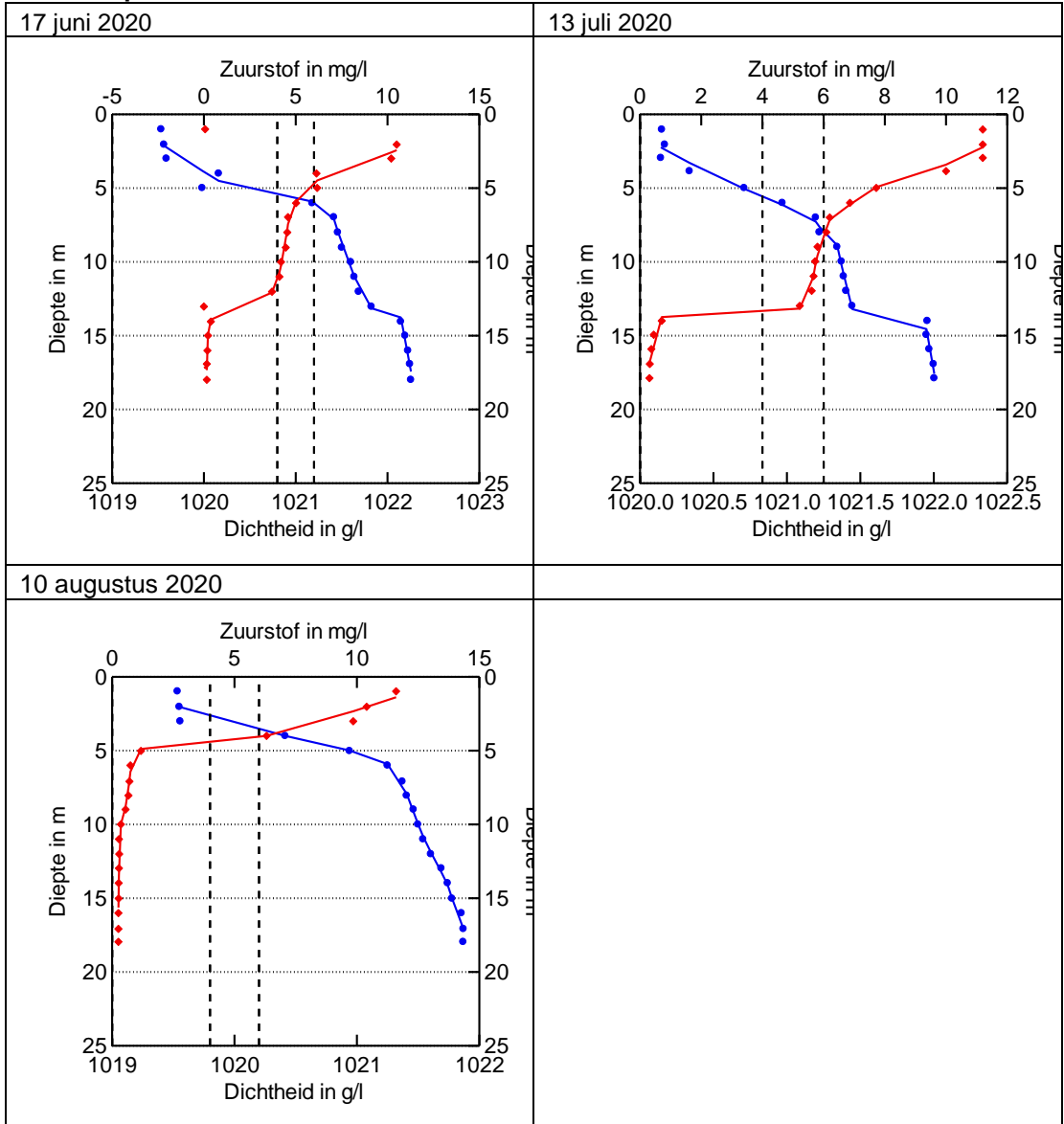
**TSO meetpunt 3**



**TSO meetpunt 3**

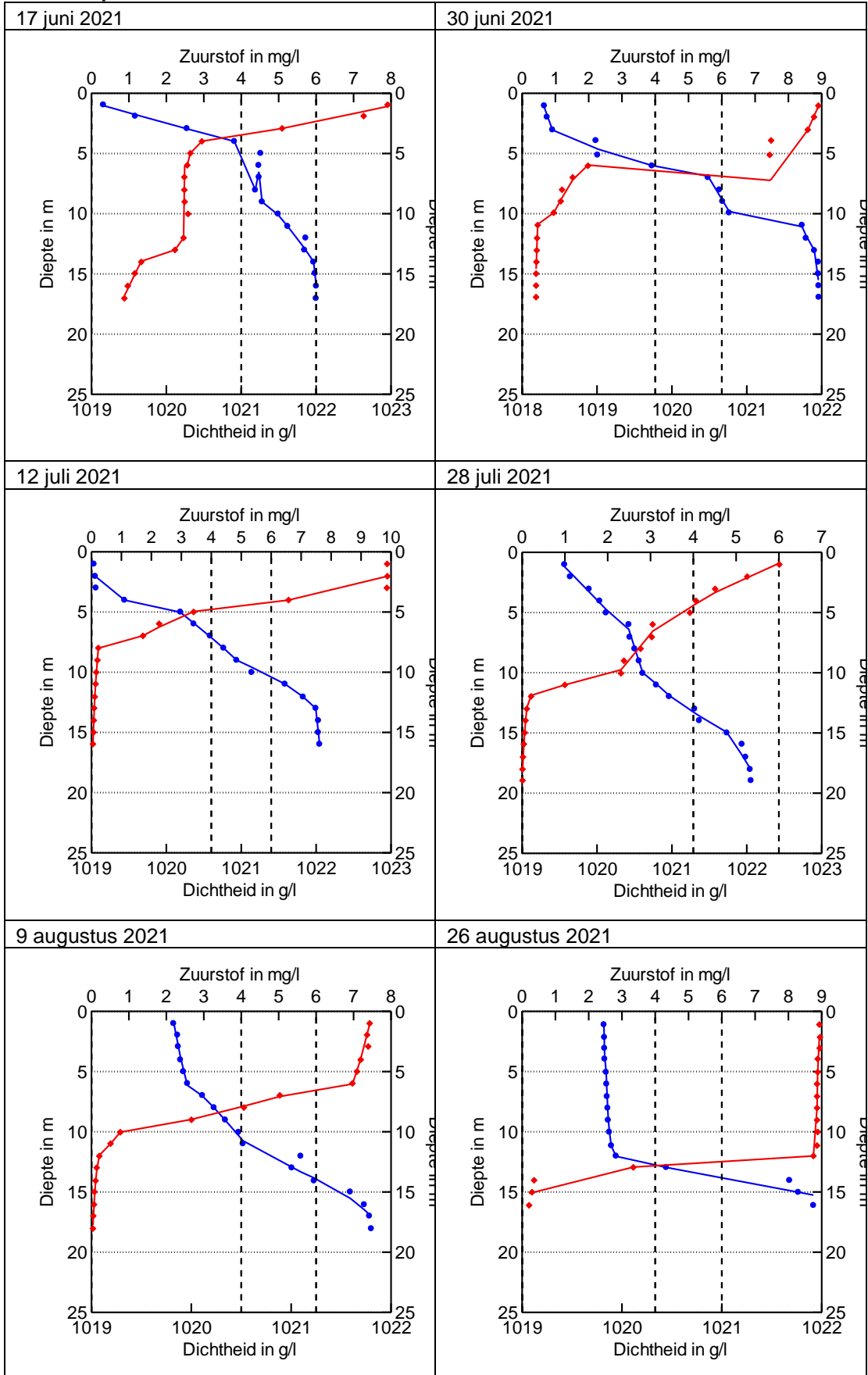


**TSO meetpunt 8**

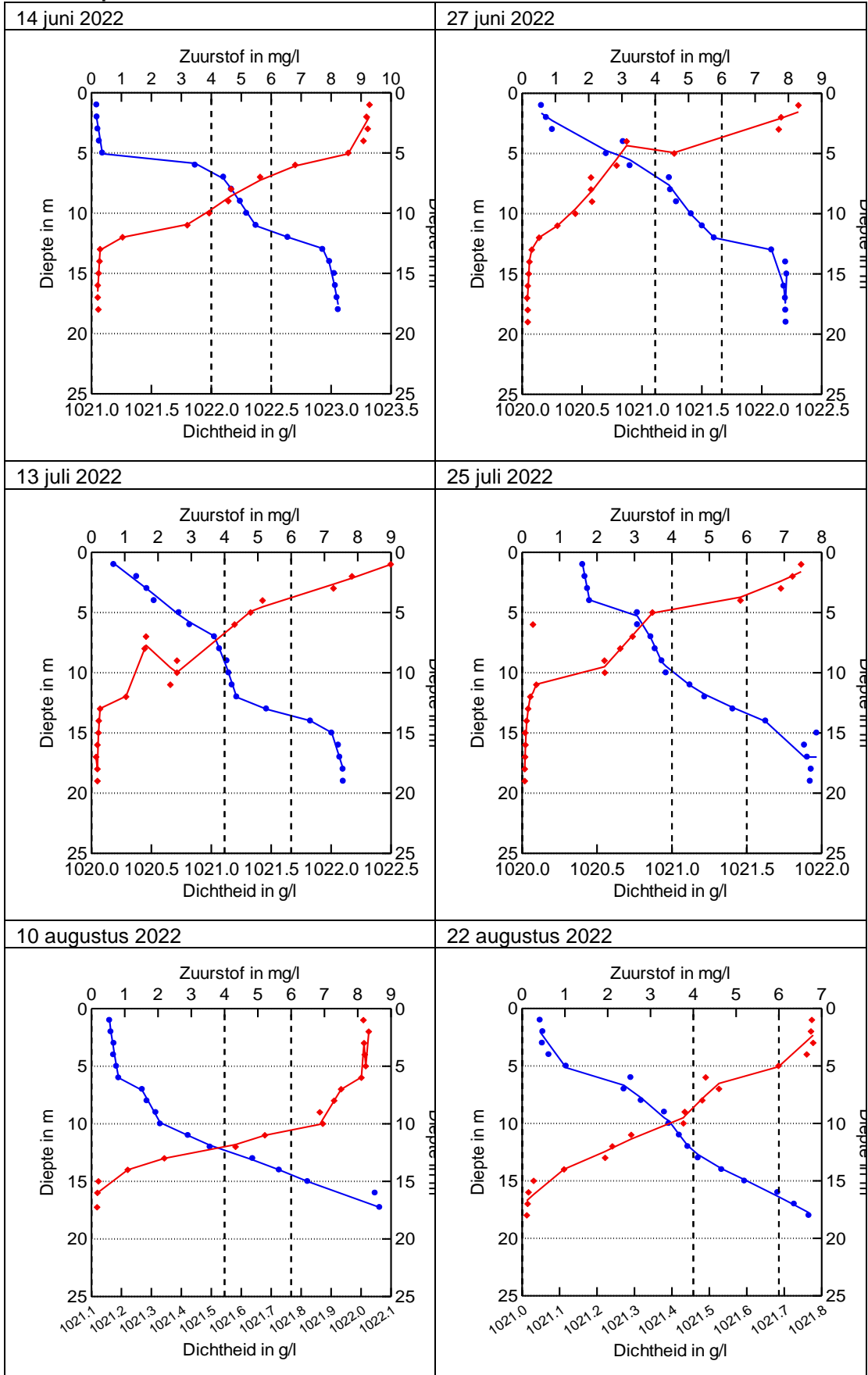




**TSO meetpunt 8**

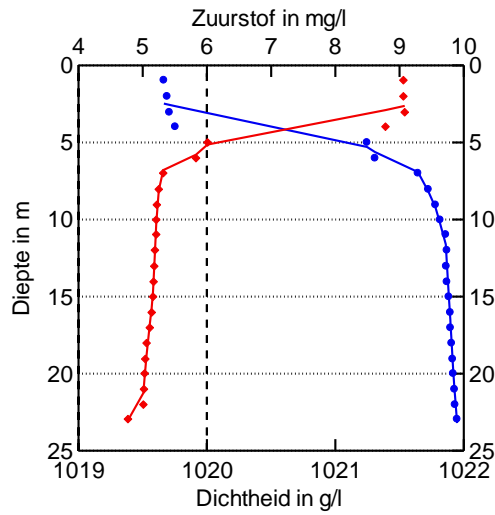


**TSO meetpunt 8**

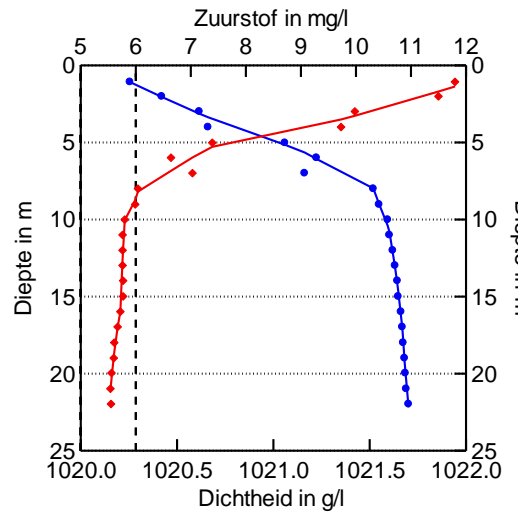


**TSO meetpunt 10**

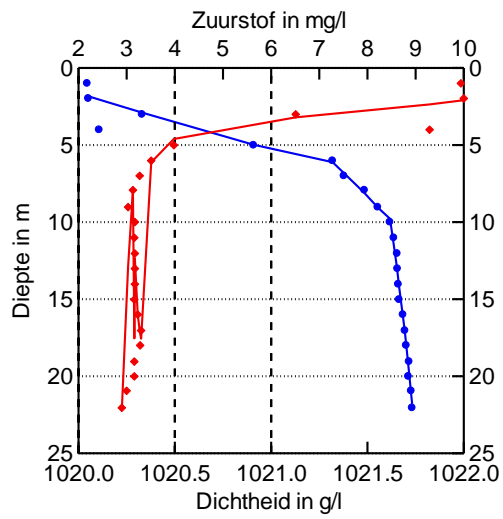
17 juni 2020



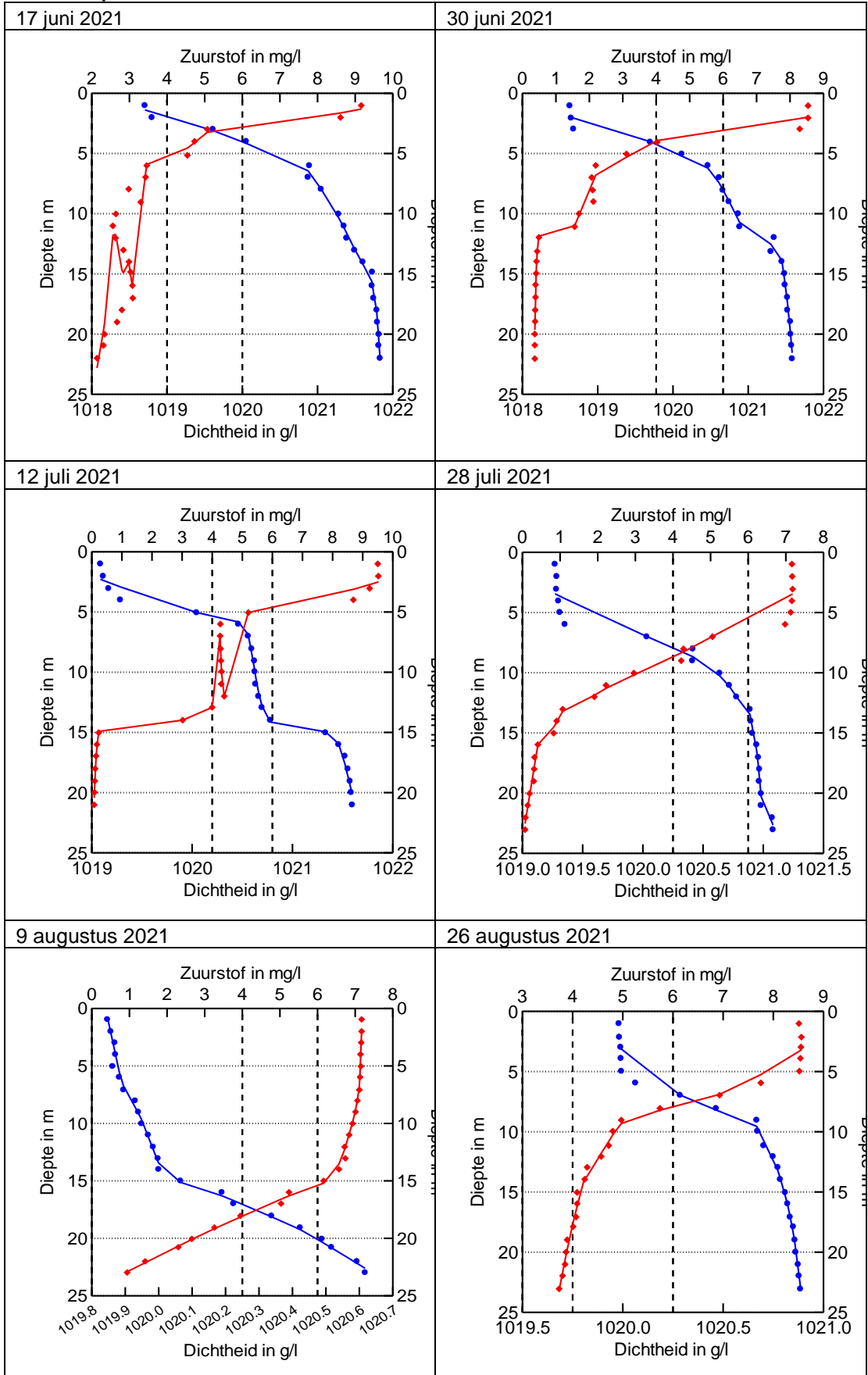
13 juli 2020



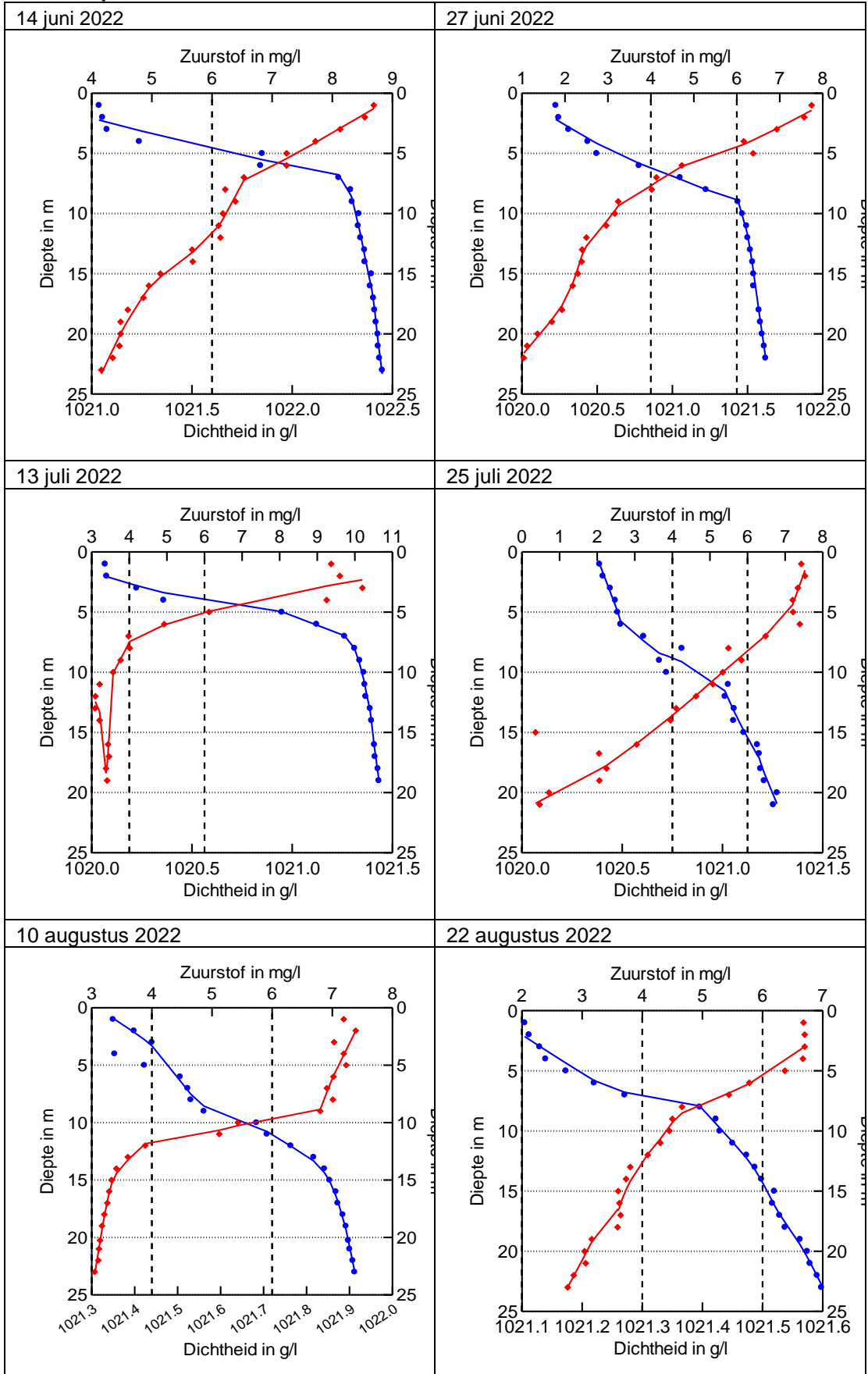
10 augustus 2020



**TSO meetpunt 10**



**TSO meetpunt 10**



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

**Deltares**

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