



RWS INFORMATIE

Stageonderzoek Zuurstofloosheid Veerse Meer

Eindrapportage



Rico Geuze

Datum	4 juli 2025
Versie	1.1
Status	Definitief

Colofon

Uitgegeven door Rijkswaterstaat Zee & Delta
Netwerkontwikkeling; Verkenningen & Planuitwerking
Auteur Rico Geuze
Informatie Stageonderzoek uitgevoerd onder begeleiding van Eric van Zanten
Telefoon
Mobiel +31627598307
E-mail rico.geuze@rws.nl
Datum 4 juli 2025
Versie 1.1
Status Definitief

Versiebeheer

0.1	23-05-2025	Concept ter beoordeling
0.2	02-06-2025	Opmerkingen EvZ
0.3	04-06-2025	Werkversie t.b.v. aanpassingen
1.0	13-06-2025	Ter beoordeling
1.1	04-07-2025	Aanpassingen figuren t.b.v. leesbaarheid

Inhoud

Samenvatting 5

1 Introductie 6

- 1.1. Inleiding 6
- 1.2. Het Veerse Meer 6
- 1.3. Het effect van zuurstofloosheid op ecologie en gebruik 8
- 1.4. Stratificatie, organische belasting en zuurstofverbruik 9
- 1.5. Zuurstofloosheid in andere meren en estuaria 10
- 1.6. Bestaand onderzoek en monitoring 10
- 1.7. Probleemstelling 11
- 1.8. Gezamenlijk meetplan 12

2 Doel en Onderzoeksvragen 13

- 2.1. Doelstelling 13
- 2.2. Onderzoeksvragen 13
- 2.3. Algemene hypothese 14

3 Methode 15

- 3.1. Gegevensbronnen 15
 - 3.1.1. Meetplan 15
 - 3.1.2. Overige gegevensbronnen 17
 - 3.1.3. Meetresolutie 17
 - 3.1.4. Parameters 17
 - 3.1.5. Kalibratie en validatie van brongegevens 18
- 3.2. Gebruik van software en tools 18
- 3.3. Pre-processing 19
- 3.4. Analyse 19
 - 3.4.1. Beschrijvende fase. 19
 - 3.4.2. Verklarende fase 20
 - 3.4.3. Concluderende fase 21

4 Resultaten 22

- 4.1. Temperatuurdynamiek 22
 - 4.1.1. Dagelijkse stratificatie 23
 - 4.1.2. Opbouwende stratificatie 23
 - 4.1.3. Langdurige stratificatie 25
- 4.2. Meteorologische verklaring 27
 - 4.2.1. Dagelijkse stratificatie 27
 - 4.2.2. Opbouwende stratificatie 28
 - 4.2.3. Langdurige stratificatie 29
 - 4.2.4. Vermenging door de wind 30
- 4.3. Zuurstofdynamiek 31
 - 4.3.1. Zuurstoftekorten tijdens de meetperiode 31
 - 4.3.2. Het effect van stratificatie op zuurstof 32
 - 4.3.3. Interactie met de spronglaag 33
- 4.4. Concluderend model 35
 - 4.4.1. Geteste hypothesen 35
 - 4.4.2. Het ontstaan van stratificatie 35
 - 4.4.3. Het ontstaan van zuurstoftekorten 36
 - 4.4.4. Het verdwijnen en afbouwen van stratificatie 37

- 4.4.5. Variabelen met onbewezen invloed 38
- 4.4.6. Drempelwaarden 38

5 Discussie 39

- 5.1. Sterke punten 39
 - 5.1.1. Hoge meetresolutie 39
 - 5.1.2. Integrale benadering 39
 - 5.1.3. Praktische toepasbaarheid 39
- 5.2. Beperkingen en onzekerheden 40
 - 5.2.1. Ruimtelijke variatie 40
 - 5.2.2. Blootstelling aan de wind 40
 - 5.2.3. Zuurstofconsumptie en -productie 41
 - 5.2.4. Zonlichtpenetratie 41
- 5.3. Vergelijking met bestaande kennis 41
 - 5.3.1. Ontwikkeling van zuurstofloosheid 41
 - 5.3.2. Het bestaan van meerdere spronglagen 42
 - 5.3.3. Het ontstaan van menging 42

6 Conclusie 43

7 Referenties 46

Bijlage A – Detailomschrijving pre-processing 49

Missende waarden en uitschieters 49
Correcties 49
Synchronisatie 49

Bijlage B – Bevindingen t.a.v. testhypothesen 50

Samenvatting

In dit onderzoek is de dynamiek tussen periodiek optredende zuurstofloosheid en temperatuurstratificatie op een locatie in het westelijke deel van het Veerse Meer onderzocht. Aan de hand van hoge-resolutie meetgegevens voor de zomer van 2024 is geanalyseerd hoe stratificatie zich ontwikkelt onder invloed van de weersomstandigheden en hoe dit de zuurstofhuishouding beïnvloedt. De resultaten tonen aan dat sterke stratificatie vrijwel consequent ontstaat bij een combinatie van hoge zonnestraling, hoge luchttemperaturen, en lage windsnelheden. Bij aanhoudende stratificatie trad binnen drie tot zeven dagen zuurstofarmoede op op acht meter diepte, gevolgd door volledige zuurstofloosheid na ongeveer zeven tot veertien dagen. Zuurstofuitputting begon consequent op grotere diepte en verspreide zich daarna daar hogere waterlagen. Herstel van de zuurstofconcentraties trad op bij volledige menging van de waterkolom, wat doorgaans werd veroorzaakt door aanhoudende of stormachtige wind, of tot op beperkte diepte bij gedeeltelijke diffusie van de spronglaag bij krachtige maar niet stormachtige wind. Op basis van de waarnemingen is een beheerdersperspectief opgesteld waarin op basis van meteorologische drempelwaarden een indicatie kan worden gegeven van een verhoogde kans op het ontstaan of beëindigen van zuurstofloosheid. Daarmee kan het resultaat van dit onderzoek helpen bij het duiden van de dynamiek rondom zuurstoftekorten en temperatuurstratificatie op andere momenten in het verleden of in de toekomst, waarvoor minder of alleen meteorologische meetgegevens beschikbaar zijn.

1 Introductie

1.1. Inleiding

Het Veerse Meer onderging drastische veranderingen ten gevolge van de aanleg van de Deltawerken. Waar voorheen een dynamisch getijdengebied bestond, is sindsdien sprake van een vrijwel stilstaand zoutwatermeer met beperkte natuurlijke dynamiek, wat kampt met problemen op het gebied van waterkwaliteit, ecologische balans, en de toestand van de bodem. De laatste jaren laten echter een verslechterend beeld zien (Slager, 2021). Monitoring van de waterkwaliteit door Rijkswaterstaat wijst uit dat de diepere waterdelen van het meer vanaf het voorjaar periodiek zuurstofarm of zuurstofloos zijn, wat bedreigend is voor het leven in en om het meer. Prins et al (2023; 2024) toonden aan dat het zuurstofgebrek ontstaat door een combinatie van het optreden van temperatuurstratificatie en de zuurstofvraag van de waterbodem. Tweewekelijkse metingen van de zuurstofconcentraties laten zien dat deze gedurende de zomer sterk wisselen in tijd, plaats, en diepte. Door het beperkte inzicht dat de tweewekelijkse metingen geven in die variatie is het niet volledig duidelijk onder welke omstandigheden de zuurstofloosheid ontstaat, hoe die ontwikkelt door de tijd, en onder welke omstandigheden de zuurstofconcentraties weer herstellen. Om die reden heeft Rijkswaterstaat besloten op een locatie in het Veerse Meer op drie verschillende dieptes elke tien minuten de zuurstofconcentraties te meten. In dit onderzoek worden deze gegevens gecombineerd met andere data (temperatuur, stroming, wind, neerslag, etc.) om een beter begrip te verkrijgen over het ontstaan, de ontwikkeling, en het beëindigen van de periodieke zuurstofloosheid in het meer.

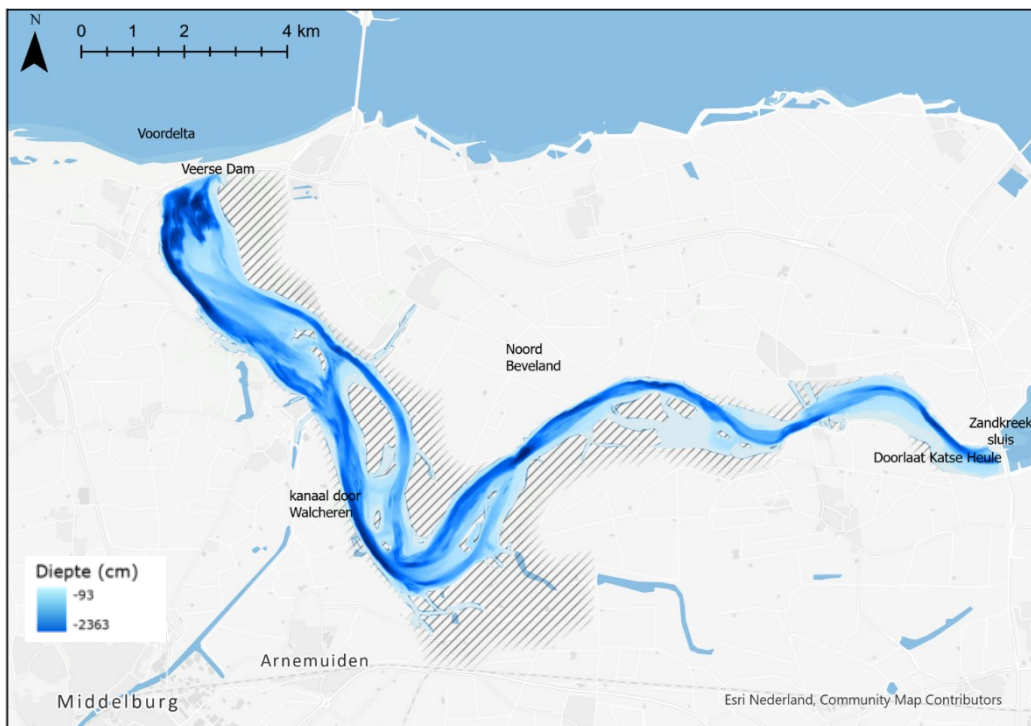
1.2. Het Veerse Meer

Het Veerse Meer is een vrijwel stilstaand zoutwatermeer dat werd gevormd na de afsluiting van het Veerse Gat in 1961 als onderdeel van de Deltawerken. Deze ingreep veranderde het gebied van een aan fors getij blootgestelde zeearm met een afwisseling van diepe geulen en regelmatig droogvallende slikken, platen, en schorren in een stilstaand brakwatermeer. Later kreeg het meer, door de aanleg van een doorlaatmiddel (de Katse Heule) in 2024, een meer zout karakter met wateruitwisseling met de Oosterschelde (Prins et al., 2024). In de tegenwoordige situatie heeft het meer een beperkte instroom van zout water vanuit de oostelijke zijde bij de Katse Heule, terwijl brak water vanuit polderafwatering via verschillende gemalen het meer bereikt. Het zoutgehalte van het meer varieert tegenwoordig gemiddeld tussen de 12 en 16.5 g Cl⁻/L (Craeymeersch & de Vries, 2007), afhankelijk van de wateruitwisseling door de Katse Heule en de poldergemalen. Over het algemeen is het zoutgehalte in de zomer hoger dan in de winter.

Het waterpeil in het meer is nauwkeurig gereguleerd en kent een zomer- en een winterpeil (Peilbesluit Veerse Meer, 2007): in de zomer wordt een peil tussen -0.10 tot 0 m NAP aangehouden ten behoeve van de waterkwaliteit en de recreatie, terwijl in de winter het peil tussen -0.40 en -0.20 m NAP mag bewegen om extra bergingscapaciteit te creëren voor afwatering uit het omliggende land. De getijdeninvloed in het meer is na de afsluiting vrijwel volledig verdwenen. Sinds de aanleg van de Katse Heule is er een zeer beperkte getijdewerking teruggekeerd, maar deze bedraagt slechts enkele centimeters (Prins et al., 2023). Het Veerse Meer heeft onder het zomerpeil een wateroppervlak van circa 2030 ha. Het meer kent nog steeds de bathymetrie van de voormalige zeearm (Nijhof et al., 2002): het meer is gemiddeld ongeveer 5 meter diep, maar de voormalige getijdegeulen zijn aanzienlijk dieper (tot 25 meter diep).

Het Veerse Meer is een populaire bestemming voor watersporters zoals zeilers, windsurfers, en duikers, maar is ook een belangrijke toeristische trekpleister vanwege de omliggende natuur en recreatieve mogelijkheden.

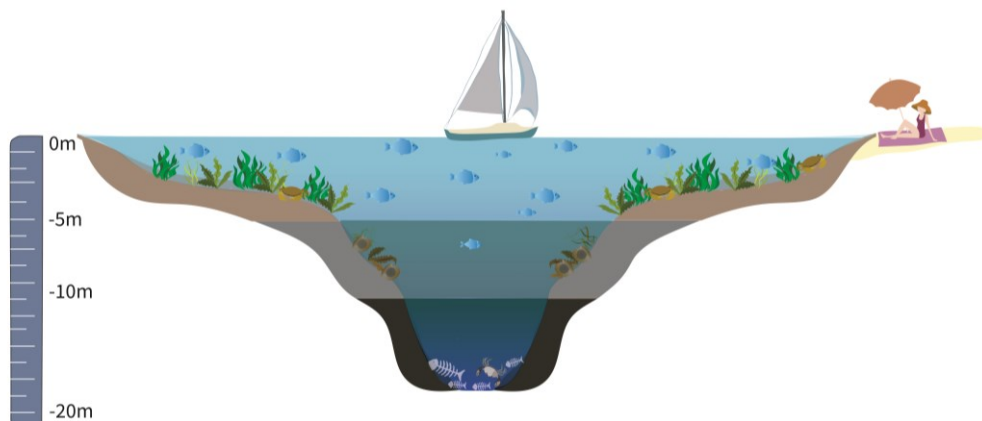
Vanuit ecologisch oogpunt speelt het Veerse Meer een belangrijke rol als Natura 2000-gebied. Het is een belangrijk leefgebied voor kust- en moerasvogels, zoals lepelaars en kleine mantelmeeuwen, en fungeert als hoogwatervluchtplaats voor vogels uit de Ooster- en de Westerschelde. Na de aanleg van de Katse Heule heeft het meer een marien karakter ontwikkeld met specifieke flora en fauna die afhankelijk zijn van brak- of zoutwateromstandigheden (Prins et al., 2024; Rijkswaterstaat, 2016). Kenmerkende mariene soorten zoals schelpdieren, garnalen, krabben, en zoutwatervissen komen in het meer voor.



Figuur 1: Overzichtkaart van het Veerse Meer met de waterdiepte en het buitendijks gebied.

1.3. Het effect van zuurstofloosheid op ecologie en gebruik

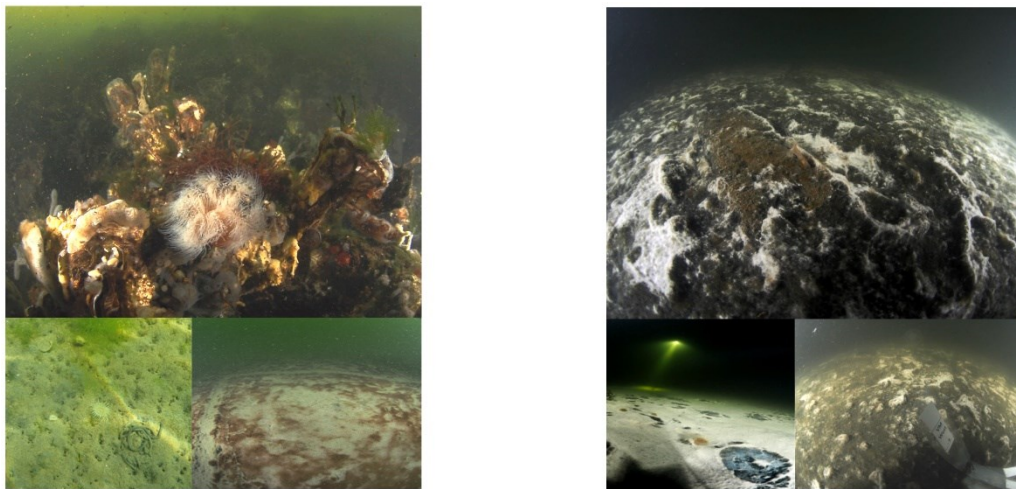
De periodieke zuurstofloosheid in het Veerse Meer vormt een bedreiging voor vissen, bodemdieren, en andere organismen die afhankelijk zijn van zuurstofrijke omstandigheden (Prins et al., 2023; Prins et al., 2024). Het zuurstofgebrek leidt tot een verstoring van essentiële biochemische processen. In anaerobe omstandigheden kunnen sulfaat-reducerende bacteriën gedijen die bijdragen aan de vorming van toxische sulfiden. Er zijn waarnemingen van bacteriematten op de bodem (met name Beggiatoa-culturen) die indicatief zijn voor (ernstige) verstoringen in het onderwaterecosysteem (Prins et al., 2024). De lage zuurstofconcentraties hebben een negatief effect op de aquatische fauna in het meer: in de diepere delen van het westelijke en centrale deel van het meer, waar de meest uitgesproken zuurstofloosheid is vastgesteld, is een significante afname van bodemdieren waargenomen (van der Mast & Eg, 2021; Prins et al., 2023) (figuur 2). Dit heeft een potentieel domino-effect op de gehele voedselketen. Mede met de verhoogde concentraties waterstofsulfide wordt dit gezien als een waarschijnlijke verklaring voor vissterfte, zoals die heeft plaatsgevonden in het meer in 2019 en 2020. De gevolgen van zuurstofloosheid met betrekking tot ecologie en waterkwaliteit vormen een directe bedreiging voor het behalen van de doelen die zijn vastgesteld onder Natura 2000 en de Kaderrichtlijn Water.



Figuur 2: Illustratie van de ecologische toestand van het Veerse Meer tegenover de diepte. Op geringe diepte staat de natuur er relatief goed voor en is er volop leven, maar in de diepe delen worden problemen waargenomen die het hele ecosysteem onder druk zetten.

Onderwaterbeelden (figuur 3) illustreren het beeld van de armere ecologische omstandigheden. Op grotere diepte komt regelmatig het zuurstofloze beeld voor, waarbij de bodem volledig is bedekt met gereduceerd organisch materiaal en matten van witte Beggiatoa-culturen. Bodemleven wordt hier nauwelijks aangetroffen.

De zuurstofproblematiek heeft niet alleen ecologische, maar ook mogelijke economische gevolgen voor het gebied. Een verslechterende waterkwaliteit bedreigt de aantrekkelijkheid van het meer voor watersporters, zwemmers, en dagrecreanten (van der Mast & Eg, 2021). Recreanten ondervinden overlast door kwallen en overmatige wierenbloei (Prins et al., 2023). Bovendien kunnen vissterfte en de afname van biodiversiteit grote gevolgen hebben voor de lokale visserij.



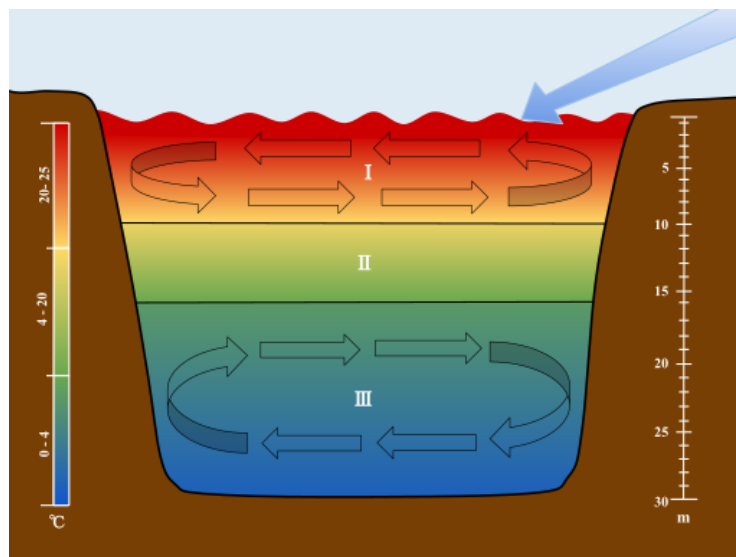
Figuur 3: Links: gezond bodembeeld met sporen van bodemleven en een zichtbare bodem. Rechts: zuurstofloos beeld, de bodem is volledig bedekt met gereduceerd organisch materiaal en witte Beggiatoa is zichtbaar. Afbeeldingen: Nederlandse Onderwatersport Bond (2021).

1.4. Stratificatie, organische belasting en zuurstofverbruik

Zuurstofconsumptie in de diepere delen van het meer is voornamelijk te wijten aan de microbiële afbraak van organisch materiaal in de bentische zone (Smucker et al., 2021). Verhoogde nutriëntenconcentraties kunnen leiden tot verhoogde algenbloei en een verhoogde aanwezigheid van af te breken organisch materiaal. Hoewel is vastgesteld dat de bodem in het Veerse Meer sterk zuurstofvragend is (Slomp & van Helmond, 2022), leidt enkel een hoge zuurstofconsumptie doorgaans niet tot zuurstofgebrek. Het optreden van zuurstofloosheid in de diepere delen van het meer vindt voornamelijk plaats wanneer er ook sprake is van aanhoudende stratificatie in de waterkolom (Lievense, 2004; Prins et al., 2023; Prins et al., 2024; van de Haterd et al., 2010; Ysebaert et al., 2008), waarbij verschillende waterlagen zich onderscheiden door verschillen in temperatuur (thermische- of temperatuurstratificatie) of in zoutgehalte (haline- of zoutstratificatie), en daardoor in dichtheid. In het Veerse Meer komt in de tegenwoordige situatie vooral temperatuurstratificatie voor (Craeymeersch & de Vries, 2007). Tussen de lagen ontstaat dan een overgangslaag met een grote temperatuurgradiënt (de spronglaag). Figuur 4 toont een schematische weergave van de waterkolom onder gestratificeerde omstandigheden. Dit fenomeen beperkt de verticale menging van het water, waardoor opgeloste stoffen zoals zuurstof en voedingsstoffen zich niet gelijkmatig door de waterkolom verspreiden.

Temperatuurstratificatie treedt vaak op tijdens de warmere perioden van het jaar, wanneer de oppervlakkige delen van het water opwarmen terwijl de diepere delen koel blijven. Wanneer dat voor langere tijd het geval is blijven de diepere waterlagen voor langere tijd geïsoleerd van de zuurstofrijkere bovenlagen, terwijl de zuurstofconsumptie door afbraakprocessen blijft bestaan. Het ontstaan van zuurstofloosheid in het meer is in die zin een dynamiek tussen het optreden van temperatuurstratificatie en de hoge organische belasting. De wisselwerking tussen die twee processen als oorzaak van zuurstofloosheid is ook in andere watersystemen beschreven, bijvoorbeeld door Obenour et al. (2012).

In het algemeen wordt het verbreken van perioden met zuurstofloosheid toegeschreven aan het voorkomen van onstuimig weer met veel wind. Dat leidt in veel gevallen tot vermenging en het doorbreken van temperatuurstratificatie, waardoor water met een hogere zuurstofconcentratie de diepere delen weer kan bereiken. Aanhoudende temperatuurstratificatie die door het uitblijven van de juiste weersomstandigheden niet vermengd raakt neemt doorgaans af naarmate de zomer ten einde komt en de temperaturen dalen. Verder kan een forse nutriëntenverlaging de organische belasting van de waterbodem verminderen waardoor deze minder zuurstof uit het water verbruikt. In wateren met een open verbinding met de zee kunnen ook getijdebewegingen en de aanvoer van zuurstofrijker water perioden van zuurstofloosheid beëindigen.



Figuur 4: Schematische weergave van de waterkolom tijdens temperatuurstratificatie. De spronglaag (II) scheidt de boven- van de onderlaag, waardoor zuurstof uit de atmosfeer de onderlaag niet bereikt. Menging beperkt zich tot lokale menging binnen de lagen. Menging voor de hele waterkolom vindt nauwelijks plaats. Afbeelding: Brookings (2018).

1.5. Zuurstofloosheid in andere meren en estuaria

Het optreden van stratificatie en zuurstofloosheid komt ook in andere watersystemen voor: in het Grevelingenmeer is vergelijkbare stratificatie en zuurstofproblematiek waargenomen in de diepere delen (Schellekens & Smaal, 2012; Tangelder et al., 2019). Ook internationaal zijn er voorbeelden van wateren waarin stratificatie en zuurstofloosheid zijn waargenomen, zowel in gesloten meren zoals in British Columbia, Canada (Stevens & Lawrence, 1997), als in estuaria zoals de Limfjord in Denemarken (Schourup-Kristensen et al., 2023). Al gedurende decennia worden er onderzoek en metingen gedaan naar dit fenomeen in wateren met verschillende karakters, van meren in de Schotse Hooglanden (Heaps & Ramsbottom, 1966; Thorpe, 1977) tot Alpenmeren (Münnich et al., 1992; van Senden & Imboden, 1989), meren in Noord-Amerika (Monismih, 1985), Australië (Imberger & Parker, 1985) en grote riviermondingen (Sheng et al., 2024).

1.6. Bestaand onderzoek en monitoring

Er zijn al verschillende onderzoeken uitgevoerd naar zuurstofloosheid en temperatuurstratificatie specifiek gericht op het Veerse Meer. Zo heeft Deltares in 2021 en in 2023 uitgebreide systeemanalyses uitgevoerd gericht op onder andere de zuurstofproblematiek in het meer (Prins et al., 2021; Prins et al., 2023). Deze analyses zijn gebaseerd op beschikbare gegevens uit monitoring, onderzoek, en

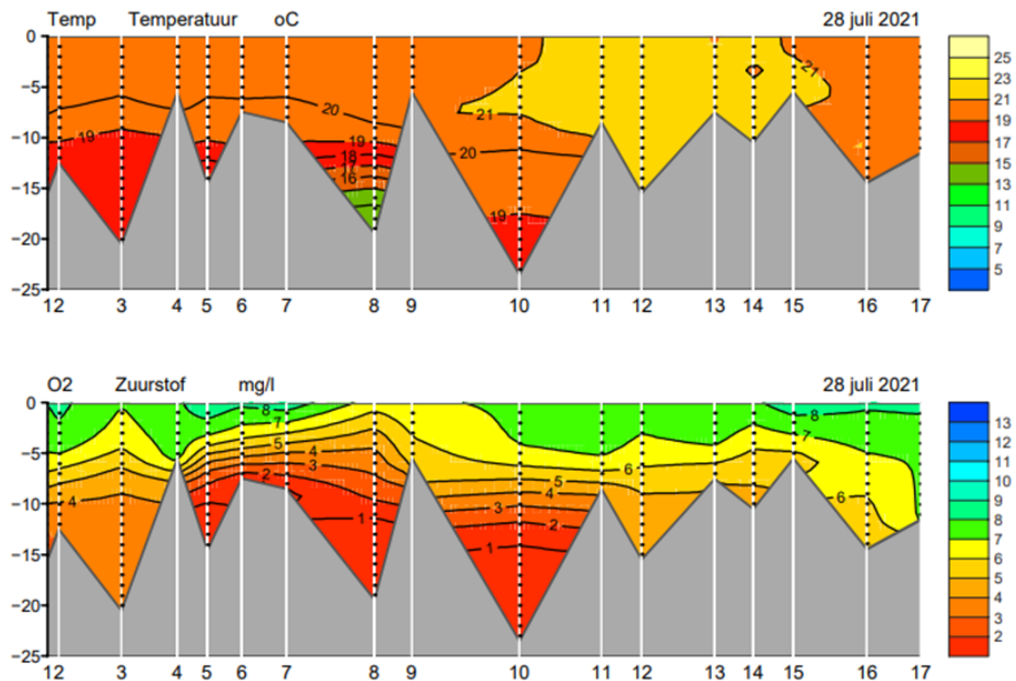
modellering, en de conclusies onderschrijven het karakter van de zuurstofproblematiek in het Veerse Meer: in de zomer treedt volgens de analyse temperatuurstratificatie op, vooral ten westen van de Middelpalen, de opbouw van de stratificatie en de zuurstofconcentraties kunnen gedurende de zomer sterk fluctueren, en de hoge zuurstofvraag van de bodem (Slomp & van Helmond, 2022) draagt bij aan het ontstaan van sterk verlaagde zuurstofconcentraties in de diepe waterlaag in vooral de westelijke helft van het meer. Belangrijke conclusies van de systeemanalyse zijn verder dat de Katse Heule in het oostelijke deel van het meer wel zorgt voor menging tot in de diepe delen, maar dat dit effect niet tot minder doordringt tot in het westelijke deel, en dat er grote variatie optreedt in de stratificatie en de diepte van de spronglaag, waardoor de zuurstofconcentraties tussen de twee en 8 meter diepte behoorlijk kunnen variëren.

Monitoring en metingen in het Veerse Meer worden of werden zowel projectmatig als doorlopend gedaan (DeltaExpertise, 2015). Zo worden er sinds 1995 tweewekelijkse mobiele metingen uitgevoerd die een verticaalprofiel geven van de watertemperatuur, saliniteit, en zuurstof (TSO-metingen) op verschillende dieptes en locaties in het meer. Daarnaast zijn er enkele vaste meetpalen die doorlopend data verzamelen over verschillende waterkwaliteitsparameters.

1.7. **Probleemstelling**

Desondanks blijven er nog belangrijke kennisleemtes ten aanzien van het goed begrijpen van de dynamiek en de oorzaken van stratificatie en zuurstofloosheid in het Veerse Meer. Het onderzoeksplan Zoute Meren (Prins et al., 2024) benadrukt dat er nog onvoldoende inzicht is in de precieze mechanismen die leiden tot deze problemen. Een cruciale kennisleemte betreft de aanzienlijke variatie van de stratificatie en de spronglaagdiepte. Ook is er behoefte aan een beter begrip van de snelheid waarmee zuurstofloze condities ontstaan en verdwijnen, en hoe dit samenhangt met meteorologische gebeurtenissen. Zolang het onduidelijk is hoe (snel) stratificatie en zuurstofloosheid ontstaan, ontwikkelen, en weer verdwijnen, is het lastig de effectiviteit en de haalbaarheid van potentiële maatregelen om zuurstofloosheid tegen te gaan, zoals het vergroten van de wateruitwisseling met de Oosterschelde, in te schatten.

De doorlopende monitoring, met name de verticale profielen van de TSO-metingen, laten enkele duidelijke trends en patronen zien, en bevestigen het optreden van zuurstofloosheid in de diepere delen. Figuur 5 (pagina 12) toont een voorbeeld van die verticaalprofielen van de watertemperatuur en de zuurstofconcentraties tegen de diepte over een dwarsdoorsnede van het meer, waarop duidelijk zichtbaar is dat er temperatuurstratificatie en zuurstofarmoede optreedt in de diepe delen van het meer. Toch schiet deze periodieke monitoring tekort voor het volledig doorgronden van de dynamiek van het probleem: ze missen cruciale informatie over snelle fluctuaties en kortstondige gebeurtenissen die mogelijk kunnen optreden. De gegevens suggereren dat er sprake kan zijn van tijdelijke maar intense periodes van zuurstofloosheid. Grote veranderingen lijken zich binnen een tijdsbestek van uren of dagen te kunnen afspelen, terwijl de huidige verticaalmetingen eens in de twee weken plaatsvinden. Hierdoor ontstaat een incompleet beeld van de werkelijke dynamiek in het Veerse Meer. Om de zuurstofdynamiek adequaat te kunnen analyseren en effectieve maatregelen te ontwikkelen is er behoefte aan informatie met een veel hogere temporele resolutie.



Figuur 5: Verticaalprofielen van watertemperatuur en zuurstof tegenover de diepte, over een doorsnede in de lengte van het Veerse Meer van west (punt 1) naar oost (punt 17), op 28 juli 2021. Bron: TSO, Rijkswaterstaat (2021)

1.8. Gezamenlijk meetplan

Om deze kennisleemtes ten aanzien van stratificatie, zuurstofhuishouding, en hydrodynamiek in het Veerse Meer gericht te onderzoeken is een samenwerking opgezet met het onderzoeksproject StratiFest, wat wordt uitgevoerd door de TU Delft in samenwerking met Deltares, Sweco, Nortek, en Rijkswaterstaat (StratiFest-ival – TKI Deltatechnologie, 2024). Dit project richt zich op het verkrijgen van inzicht in de ruimtelijke en temporele dynamiek van temperatuurstratificatie, spronglaagdiepte, en watercirculatie in afgesloten estuariene systemen, en hoe deze beïnvloed worden door de wind en door de systeemgeometrie.

In het kader van deze samenwerking is door de TU Delft, Rijkswaterstaat, en de Hogeschool Zeeland een gezamenlijk meetplan opgesteld voor het Veerse Meer. Ten behoeve van dit meetplan is er verschillende meetapparatuur uitgezet op verschillende nabij elkaar gelegen locaties in het westelijke deel van het Veerse Meer gedurende de zomer van 2024. Het doel van het meetplan is om, met een grotere ruimtelijke dekking en met een hogere tijds- en diepteresolutie dan voorheen mogelijk was, de interne fysische dynamiek van het meer beter te begrijpen. Daarmee wordt niet alleen invulling gegeven aan de lokale informatiebehoefte, maar wordt ook bijgedragen aan de bredere doelstelling van StratiFest: het ontwikkelen van parameters en ecologische duidingen die ook toepasbaar zijn op vergelijkbare systemen in binnen- en buitenland.

Onderdeel van dit meetplan is een meetboei die namens Rijkswaterstaat iedere tien minuten de zuurstofconcentraties heeft gemeten op een vaste locatie. In dit onderzoek worden deze metingen gecombineerd met andere gegevens, waaronder andere gegevens uit het meetplan, om een beter begrip te verkrijgen over het ontstaan, de ontwikkeling, en het beëindigen van de periodieke zuurstofloosheid in het meer.

2 Doel en Onderzoeksvragen

2.1. Doelstelling

De hoofddoel van dit onderzoek is het beschrijven van de variatie van de zuurstofconcentraties en de temperatuurstratificatie in het Veerse Meer, tegen de tijd en de diepte, en het verklaren van de patronen daarin aan de hand van de voorgekomen weersomstandigheden.

2.2. Onderzoeksvragen

Uit deze doelstelling volgen de volgende onderzoeksvragen:

1. Hoe varieerden de zuurstofconcentraties in het Veerse Meer gedurende de meetperiode en welke patronen zijn hierin te onderscheiden?
 - a. *Welke periodes binnen de meetperiode kenmerken zich door afwijkende zuurstofcondities en wanneer was er sprake van zuurstoftekort?*
 - b. *Hoe ontwikkelen zuurstofarmoede en zuurstofloosheid zich op verschillende diepten?*
 - c. *In hoeverre zijn er dagelijkse patronen waarneembaar in de zuurstofhuishouding?*
 - d. *Wat zijn de karakteristieken van de meest uitgesproken perioden van zuurstoftekorten?*
2. Hoe ontstond en ontwikkelde temperatuurstratificatie zich in het Veerse Meer gedurende de meetperiode en hoe verhoudt dat zich tot de gemeten zuurstofconcentraties?
 - a. *Welke periodes binnen de meetperiode kenmerken zich door sterke temperatuurstratificatie en hoe verhouden deze perioden zich tot zuurstofloosheid?*
 - b. *Hoe varieerde de opbouw van de stratificatie tijdens de meetperiode?*
 - c. *Wat is het effect van de stratificatie op de waterdynamiek en de zuurstofhuishouding?*
3. Hoe kunnen de waargenomen weersomstandigheden het ontstaan, het aanhouden, en het verdwijnen van stratificatie en zuurstofloosheid tijdens de meetperiode verklaren?
 - a. *Welke verklaring biedt de wind?*
 - b. *Welke verklaring biedt de zonnestraling?*
 - c. *Welke verklaring biedt de luchttemperatuur?*
 - d. *Welke verklaring biedt neerslag?*
4. Welke verbanden kunnen worden afgeleid uit de metingen, en hoe kunnen deze vertaald worden naar een handelingsperspectief planvorming en beheer?
 - a. *Welke meteorologische drempelwaarden kunnen op basis van de meetgegevens worden gesteld om het ontstaan en verdwijnen van zuurstoftekort te voorspellen?*
 - b. *Wat is de tijdschaal waarop zuurstofloosheid optreedt na het ontstaan van stratificatie?*
 - c. *Hoe kan het opgestelde model worden ingezet?*

2.3. Algemene hypothese

De algemene hypothese is dat in relatief stilstaand water gedurende zomermaanden temperatuurstratificatie ontstaat, die zuurstoftransport tussen oppervlakkige en diepere lagen beperkt. In samenspel met zuurstofverbruik bij de afbraak van organisch materiaal in de bodem leidt dit tot zuurstofgebrek in de diepere delen. De diepte van de spronglaag en de duur van de stratificatie bepalen de mate van zuurstofuitputting en tot welke diepte de zuurstofuitputting reikt. Bij onstuimige weersomstandigheden ontstaat vermenging door stroming en golven die voldoende kan zijn om de temperatuurstratificatie te doorbreken, waardoor de diepere delen weer van voldoende zuurstof worden voorzien.

3 Methode

3.1. Gegevensbronnen

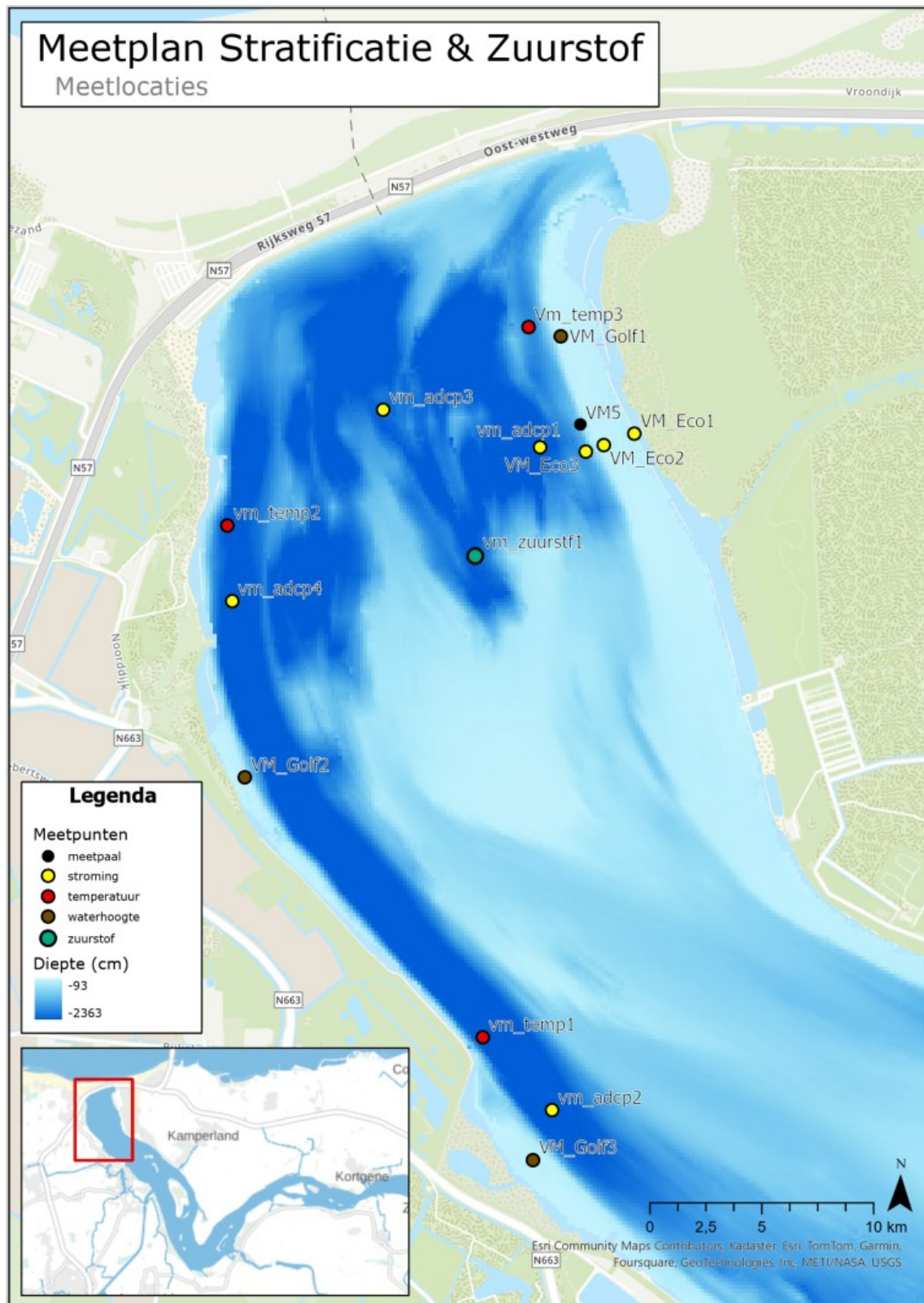
3.1.1. Meetplan

Het gezamenlijk meetplan gaat uit van metingen van verschillende relevante parameters op verschillende nabij elkaar gelegen locaties, die een gezamenlijke meetperiode bestrijken. De vormgeving van het meetnet is het resultaat van enkele uitgangspunten. Zo gaat het er op basis van de observaties van Craeymeersch & de Vries (2007) vanuit dat temperatuurstratificatie de dominante vorm van stratificatie is in het Veerse Meer. De focus ligt daarom op temperatuurstratificatie. Voor het meetplan is er gekozen voor een locatie waar het risico op zuurstofloosheid in de zomer bekend aanwezig is, die zich op voldoende afstand bevindt van de betonde vaarwegen en recreatiestrandjes, die een minimale verversing heeft door wateruitwisseling via de Katse Heule, en die een maximale potentiële dynamiek heeft door blootstelling aan de wind. Daarbij is uitgegaan van een dominant westzuidwestelijke wind. De keuze voor de locatie is op basis van die overwegingen gevallen op het westelijke deel van het meer, tussen de Schotsman en de Veersegatdam. Het meetnet is opgebouwd rond de vaste meetpaal VM5. Figuur 6 toont een kaartweergave van de locaties van de verschillende onderdelen van het meetplan met de waterdiepte ter referentie.

Het meetnet bestaat uit de volgende onderdelen die relevant zijn voor dit onderzoek:

1. **Meetboei:** de meetboei is uitgerust met een reeks EXO-sensoren en is verankerd op de locatie. Het heeft gedurende de meetperiode elke 10 minuten gegevens vastgelegd over verschillende waterkwaliteitsparameters (zuurstof, saliniteit, temperatuur, chlorofyl, troebelheid, en zuurgraad) op drie verschillende dieptes (4, 6, en 8 meter onder het oppervlak). De meetboei werd beheerd door Rijkswaterstaat.
2. **Vaste meetpaal (VM5):** op enkele strategische locaties in het Veerse Meer bevinden zich permanent geplaatste meetpalen van Rijkswaterstaat die elke 10 minuten de temperatuur, de saliniteit, en de waterhoogte vastleggen. De meetpaal VM5 bevindt zich in het westelijke deel van het meer nabij de Schotsman, vlakbij de meetboei en maakt onderdeel uit van het meetplan.
3. **ADCP's:** op vier locaties zijn Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP's) uitgezet. Deze meten de stroomsnelheid en -richting met hoge frequentie over een verticaalprofiel van de locatie, door geluidsgolven uit te zenden en de frequentieverschuiving van de teruggekaatste signalen te meten. De ADCP's zijn deels uitgezet door Rijkswaterstaat en deels door de TU Delft als onderdeel van StratiFest.
4. **Temperatuurmoorings:** Op drie locaties zijn temperatuurmoorings uitgezet door de TU Delft (StratiFest) die met hoge frequentie gedetailleerde gegevens van de watertemperatuur over het diepteprofiel vastleggen door middel van thermometers langs een kabel van de bodem naar een drijvende boei.

Naast deze onderdelen maken ook twee golfslag- en waterhoogtemeters en enkele ECO-stromingsmeters deel uit van het meetplan, maar de data ervan is niet gebruikt in dit onderzoek.



Figuur 6: Overzichtskaart van het meetplan, met de meetlocaties en de waterdiepte.

3.1.2. Overige gegevensbronnen

Naast de gegevens uit het meetplan maken ook de volgende gegevensbronnen deel uit van dit onderzoek:

5. **TSO-meetpunten:** De TSO-metingen (temperatuur, saliniteit, zuurstof) worden iedere twee weken uitgevoerd door Rijkswaterstaat op een vast netwerk van locaties in het meer, van de Veerse Gatdam tot de Zandkreekdijk. Vanaf een schip wordt een meetvis neergelaten en op de meetpunten wordt een verticaalprofiel opgesteld, met metingen op iedere meter diepte, tot de laagst mogelijke dieptemeter boven de bodem. Enkele van de TSO-meetpunten liggen relatief dicht bij de locaties van het meetplan.
6. **Meteo-gegevens:** Het dichtstbijzijnde gelegen weerstation, Oosterschelde 4 bij Neeltje Jans, is gebruikt voor het bepalen van de windsnelheid en -richting. Aangezien gegevens over de luchttemperatuur, neerslag, en zonnestraling voor dit weerstation niet beschikbaar waren is voor deze parameters het weerstation bij Wilhelminadorp gebruikt. Voor de luchtdrukcorrectie van de ADCP-gegevens zijn gegevens van het weerstation in Vlissingen gebruikt, aangezien de apparatuur op die locatie is gekalibreerd.

3.1.3. Meetresolutie

De meetfrequenties en dieptesresoluties van de verschillende metingen zijn weergegeven in tabel 1. De hoge frequentie en de grote dieptesresolutie van de metingen uit het meetplan maken het mogelijk om kortstondige fluctuaties en snelle veranderingen vast te leggen. De TSO-metingen hebben een lagere frequentie, maar een grotere dieptesresolutie voor zuurstofmetingen dan de meetboei. Deze metingen kunnen dienen als referentiemateriaal voor de gegevens uit het meetplan.

Tabel 1: Meetfrequenties en dieptesresoluties van de verschillende onderdelen.

Onderdeel	Meetfrequentie	Dieptesresolutie
Meetboei	10 minuten	Drie vaste dieptes (-4, -6, -8 meter)
Vaste meetpaal VM5	10 minuten	Twee dieptes (-0.95 en -4 meter)
ADCP's	10 minuten	Bins van 50 centimeter
Temperatuurmoorings	1 seconde	30 centimeter
TSO-metingen	2 weken	1 meter
Weergegevens	1 uur	-

3.1.4. Parameters

De volgende parameters zijn gebruikt in dit onderzoek:

1. De **zuurstofconcentratie (opgeloste zuurstof)** is gebruikt als parameter voor het direct in kaart brengen van het zuurstofgebrek. Dit wordt gemeten in milligram per liter (mg/L).
2. De **watertemperatuur** is de belangrijkste parameter voor het in kaart brengen van temperatuurstratificatie. Deze wordt gemeten in graden Celsius (°C).
3. De **temperatuurgradiënt** is de afgeleide van de watertemperatuur tegen de diepte (dT/dz in °C/m) en wordt gebruikt voor het bepalen van de spronglaagdieptes.
4. De **stroomsnelheid en -richting** zijn belangrijk voor het begrijpen van de dynamiek van de waterkolom. De stroomsnelheid wordt gemeten in meters

per seconde (m/s) en de stroomrichting in graden ten opzichte van het noorden.

5. De **windsnelheid en -richting** hebben volgens de algemene hypothese invloed op de menging van het water. Windsnelheden worden gemeten in meters per seconde (m/s) en de windrichting in graden ten opzichte van het noorden.
6. De **luchttemperatuur** beïnvloedt volgens de hypothese de temperatuur van het oppervlakkige water en wordt gemeten in graden Celsius.
7. De **zonne-instraling** is de hoeveelheid zonne-energie die het wateroppervlak bereikt, gemeten in Joules per vierkante centimeter per uur ($\text{J}/\text{cm}^2/\text{uur}$, oftewel W/cm^2).
8. **Neerslag** wordt gemeten als de som over de tijdsperiode sinds de voorgaande meting in millimeters.

Daarnaast zijn onderstaande parameters meegenomen ter context, validatie, of verificatie, maar niet als onderdeel van de belangrijkste gegevensanalyse:

1. **Saliniteit**, oftewel het zoutgehalte van het water wordt gebruikt om het optreden van zoutstratificatie in kaart te brengen. Het zoutgehalte wordt door de meeste meetapparaten indirect gemeten in de vorm van de geleidbaarheid of de concentratie chloor-ionen. Om de saliniteit hieruit te berekenen is een conversie toegepast volgens TEOS-10, die een functie is van de geleidbaarheid, de temperatuur, de waterdiepte, en de breedtecoördinaat. Saliniteit is berekend in Practical Salinity Units (PSU) of in $\text{mg Cl}^-/\text{L}$.
2. **Turbiditeit** is een maat voor de troebelheid van het water, veroorzaakt door zwevende deeltjes zoals sediment, algen, en organisch materiaal, en wordt gemeten in Nephelometric Turbidity Units (TNU).
3. **Chlorofyl-a** is een pigment dat wordt gebruikt door algen en planten bij de fotosynthese. De concentratie van chlorofyl-a is een indicator voor de hoeveelheid algen in het water, en daarmee voor de primaire productie van organisch materiaal. Chlorofyl-a wordt gemeten in $\mu\text{g}/\text{L}$.

3.1.5. *Kalibratie en validatie van brongegevens*

Alle aangeleverde gegevens zijn gekalibreerd en gecontroleerd door de verantwoordelijke leveranciers. Voorafgaand aan de data-analyse zijn alle datasets gecontroleerd op uitschieters en onrealistische waarden. Met de leveranciers van de verschillende metingen is contact geweest om de meetprocedure en de veelvoorkomende meetfouten die daarbij kunnen ontstaan te bespreken. Op basis daarvan zijn uitschieters en extreme waarden beoordeeld en is bepaald hoe met deze waarden werd omgegaan.

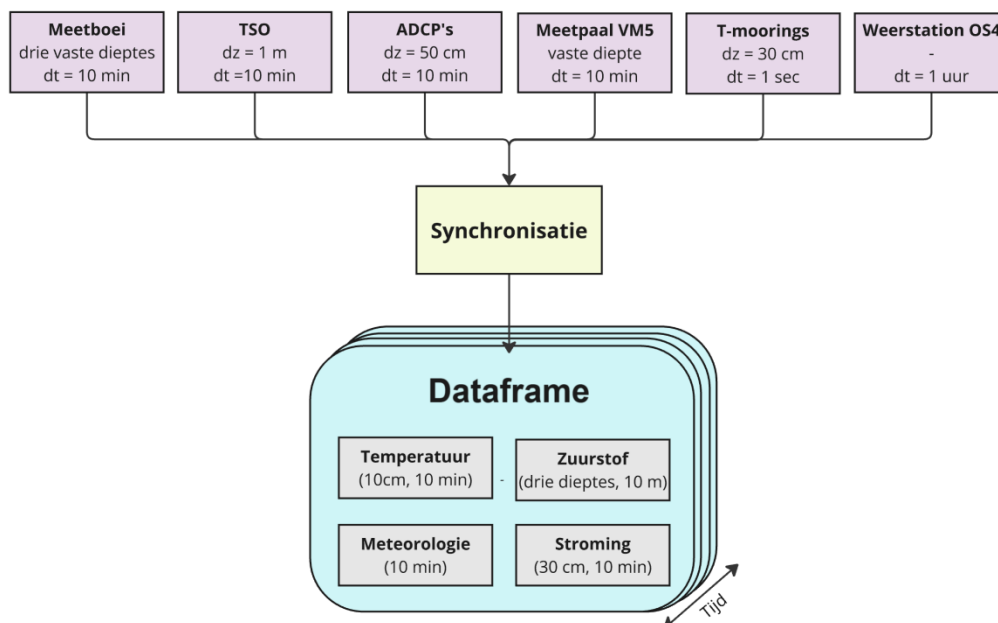
3.2. **Gebruik van software en tools**

De analyse van de gegevens is voornamelijk uitgevoerd met eigen programmering met behulp van Python. Daarbij is gebruik gemaakt van gespecialiseerde pakketten zoals NumPy voor numerieke berekeningen, Pandas voor datamanipulatie, en Matplotlib en Seaborn voor visualisatie. Deze pakketten kunnen goed geautomatiseerd samenwerken zodat de verschillende parameters vrij efficiënt met elkaar op verschillende tijdschalen konden worden geplot en vergeleken. Voor enkele specifieke oceanografische en thermodynamische berekeningen is gebruik gemaakt van de Gibbs-Seawater Oceanographic Toolbox (McDougall & Parker, 2011). Deze toolbox maakt onderdeel uit van de TEOS-10, de internationale standaard voor het berekenen van de thermodynamische eigenschappen van zeewater. Omdat het Veerse Meer zout water heeft en ook wateruitwisseling heeft met de Oosterschelde is aangenomen dat de TEOS-10 standaard een betere omschrijving is van de

thermodynamica in het Veerse Meer dan generieke thermodynamische vergelijkingen die geen rekening houden met de invloed van zout.

3.3. Pre-processing

Vanwege de diversiteit aan databronnen, meetfrequenties, en dataformats is een zorgvuldige pre-processing uitgevoerd. De voornaamste doelen hiervan waren het uniformeren van tijdreeksen, het opschonen van data (inclusief controle op missende waarden en uitschieters) en het gereedmaken van de datasets voor geïntegreerde analyse. Het product hiervan is een dataframe waarin de gegevens uit de verschillende bronnen zijn gecombineerd en waarin alle variabelen zijn gekoppeld en op tijd zijn geïndexeerd. Figuur 7 toont een schematisch overzicht van het combineren van de gegevens en parameters. Alle volgende analysestappen zijn op deze gecombineerde dataset uitgevoerd. In bijlage A van dit rapport wordt het proces van pre-processing en synchronisatie in meer detail omschreven. Dit bevat onder andere hoe is omgegaan met verschillen in resolutie en frequentie.



Figuur 7: Schematisch overzicht van het combineren van de brongegevens tot een enkele dataset.

3.4. Analyse

De analyse van de gegevens is opgebouwd uit drie fasen: een beschrijvende fase, een verklarende fase en een concluderende fase. Deze structuur maakte het mogelijk om eerst een grondig begrip van de situatie te ontwikkelen, vervolgens de onderliggende mechanismen te analyseren, en ten slotte uit de bevindingen een toepasbaar beheerdersperspectief te formuleren.

3.4.1. Beschrijvende fase.

In de beschrijvende analyse lag de focus op het identificeren van patronen en verbanden in de verzamelde data. Dit vond plaats door het maken van een groot aantal plots die uitvoerig zijn geanalyseerd. Daarbij werd telkens de focusvariabele tegen de tijd en/of tegen de waterdiepte geplotted. Dit gebeurde in alle gevallen in een digitale omgeving waarbij gemakkelijk in- en uit kon worden gezoomd op specifieke gebeurtenissen.

Om patronen in de zuurstofconcentraties te vinden werden de zuurstofconcentraties op de drie dieptes volgens de meetboei geplot tegen de tijd. De focus bij de analyse hiervan lag op het identificeren van momenten waarop zuurstofconcentraties een duidelijke dalende trend vertoonden, en hoe dat verschilde tussen de dieptes. Om de zuurstofarme en zuurstofloze perioden in beeld te brengen werden metingen met zuurstofconcentraties lager dan 4 mg/L als zuurstofarm, en metingen met zuurstofconcentraties lager dan 2 mg/L als zuurstofloos geclassificeerd, in lijn met de grenswaarden gehanteerd door Prins et al. (2024). Om te zoeken naar dagelijkse patronen werd het zuurstofverloop op verschillende dagen door de hele meetperiode bepaald.

Om inzicht te krijgen in het optreden van temperatuurstratificatie werden de watertemperaturen op de drie dieptes volgens de meetboei samen met de watertemperatuur op -0.95m diepte volgens de meetpaal VM5 geplot tegen de tijd. Perioden met sterke stratificatie zijn aan de hand daarvan geïdentificeerd als perioden met grote spreiding in de temperatuurwaarden tussen de verschillende dieptes. Als richtlijn is daarbij de maatstaf volgens Engelhardt & Kirilin (2014) gebruikt dat er sprake moet zijn van een verticaal temperatuurverschil van minstens één graden Celsius tussen het water boven en het water onder de spronglaag. Aan de hand van de watertemperatuurplots en de zuurstofplots werd gezocht naar perioden of momenten waarin zuurstoftekort én stratificatie ontstond, om die perioden nader te bestuderen.

Met de gegevens van de temperatuurmoorings zijn contourplots tegen de diepte en tegen de tijd gemaakt voor de watertemperatuur en voor de temperatuurgradiënt. De temperatuurgradiënt. Met behulp van deze plots kon worden bepaald waar in de waterkolom zich spronglagen bevonden, hoe sterk deze waren, en hoe deze ontstonden en verdwenen. Omdat de temperatuurmoorings geen waarden hebben geregistreerd boven de -4m diepte zijn bij deze analyses de temperatuurplots uit de meetboei en voornamelijk die van de meetpaal op -0.95m diepte als aanvulling gebruikt. Hierdoor konden toch uitspraken worden gedaan over het voorkomen van spronglagen tussen -4 en -0.95 meter diepte.

De stromingsdata volgens de ADCP is op soortgelijke wijze als contourplot tegen de tijd en diepte geplot en vergeleken met de andere plots om in beeld te krijgen hoe het water beweegt en vooral hoe dat verschilt naarmate er variaties of events aanwezig waren volgens de andere plots.

Met de combinatie van de verschillende plots is een uitgebreid chronologisch verslag opgesteld van veranderingen en gebeurtenissen door de meetperiode. Dit chronologisch overzicht is in dit onderzoek veelvuldig gebruikt voor het formuleren van de beschrijvende en verklarende resultaten, en ter referentie.

3.4.2. *Verklarende fase*

De verklarende fase is gericht op het blootleggen van de relaties tussen verschillende meteorologische factoren, de zuurstofdynamiek, de structuur van de waterkolom, en het verklaren van hoe bepaalde omstandigheden leiden tot het optreden van zuurstofloosheid.

Voor de parameters wind, zonnestraling, luchttemperatuur, en neerslag heeft de verklarende analyse op steeds dezelfde, systematische wijze plaatsgevonden. Telkens werd eerst in kaart gebracht wat de waarden en patronen waren voor de parameters gedurende de perioden van sterke stratificatie en zuurstofloosheid, die volgden uit de beschrijvende analyse, en vooral wat zij waren tijdens het ontstaan en het afbouwen

van deze perioden. Het doel hiervan was te ontdekken of stratificatie en zuurstofloosheid vaak onder vergelijkbare omstandigheden ontstonden of verdwenen. Om een beeld te verkrijgen van hoe deze parameters de structuur van de waterkolom en de waterdynamiek beïnvloeden is ook een vergelijking gemaakt met de temperatuurgradiënt- en stromingsplots. Daarbij is ook vooral gekeken naar de structuur van de waterkolom voorafgaand aan het ontstaan en verdwijnen van stratificatie.

Vervolgens is voor alle parameters de relatie in omgekeerde richting getest: in plaats van te onderzoeken onder welke omstandigheden stratificatie en zuurstofloosheid ontstonden en verdwenen werd nu gekeken wat er gebeurde met de watertemperaturen, zuurstofwaarden, waterdynamiek, en de structuur van de waterkolom op dagen waarop er extreme of bovengemiddelde waarden voor de verklarende meteorologische parameters werden gemeten. Zo werden als het ware hypothesen en drempelwaarden over deze relaties getest. De drempelwaarden zijn gebaseerd op de statistiek van de meteorologische data. Alle dagen waarop de criteria golden werden geclassificeerd; of de hypothese voor die dag gelde, niet gelde, of gedeeltelijk gelde. Om mogelijke onderlinge verbanden tussen verklarende variabelen mee te kunnen wegen zijn bovendien de correlaties tussen deze variabelen bepaald.

3.4.3. *Concluderende fase*

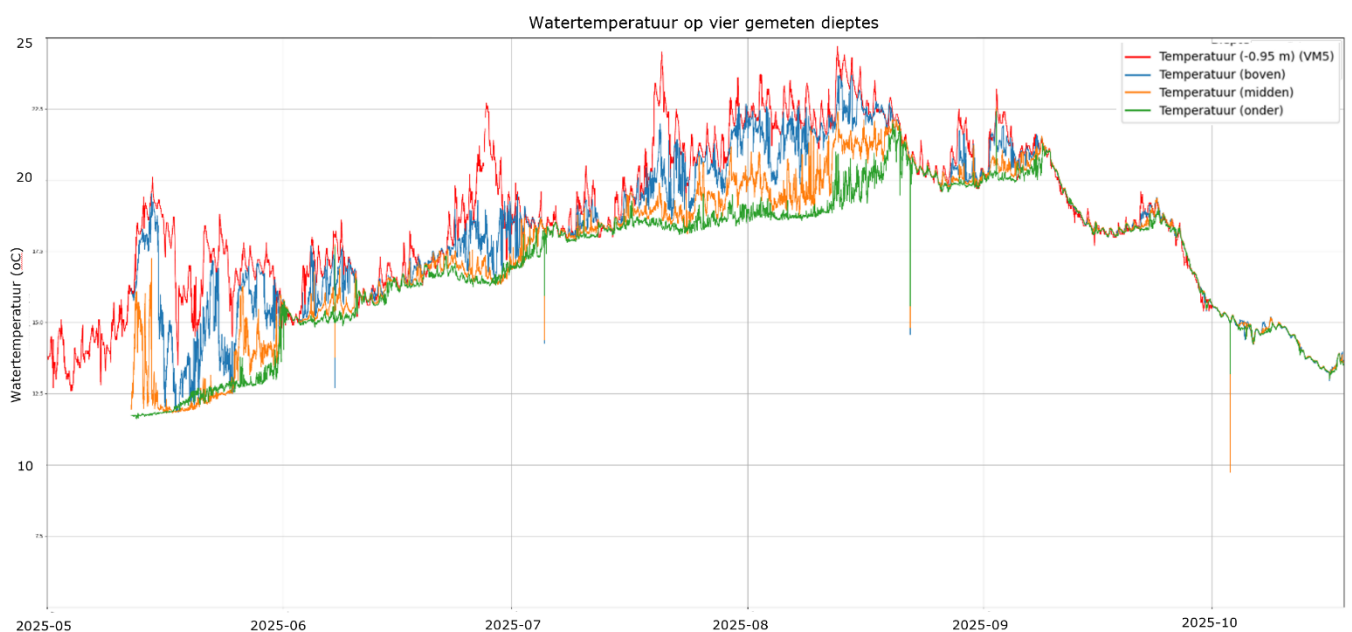
Door het combineren van de resultaten uit de beschrijvende fase met die uit de verklarende fase, beide kanten op, werd een concluderend model of beheerdersperspectief opgesteld voor het ontstaan van stratificatie, het daarop volgende ontstaan van zuurstoftekorten, het verdwijnen van stratificatie en zuurstoftekorten, en het ontstaan van complexiteit in de waterkolom. Hierin zijn de drempelwaarden uit de verklarende fase, voor zover aangetoond, opgenomen. Voor het noemen van een richtlijn voor het optreden van zuurstoftekorten ten gevolge van temperatuurstratificatie is voor alle perioden waarin stratificatie ontstond gekeken hoe snel hierna de zuurstofconcentraties daalden en hoe lang het duurde voordat deze onder de kritische waarden kwamen. Hetzelfde is gedaan voor het herstellen van de zuurstofwaarden.

4 Resultaten

De algemene hypothese stelt dat de temperatuurstratificatie de zuurstofwaarden stuurt en dat de temperatuurstratificatie wordt gestuurd door de weersomstandigheden. Bij de uiteenzetting van de resultaten staat de stratificatie daarom centraal. Om die reden wordt in dit hoofdstuk eerst de waargenomen temperatuurdynamiek beschreven, daarna hoe die relateert aan de weersomstandigheden, en pas daarna de relatie met de zuurstofdynamiek.

4.1. Temperatuurdynamiek

Gedurende de zomer van 2024 ontstond op de meetlocatie op meerdere momenten een duidelijke periodieke temperatuurstratificatie van de waterkolom, met vaak duidelijke identificeerbare en sterke spronglagen. De intensiteit en de duur van de stratificatie en de diepte van de spronglagen vertoonden echter grote variatie. Het optreden van periodieke stratificatie is goed zichtbaar op een plot van de watertemperaturen (figuur 8): er zijn enkele afzonderlijke perioden zichtbaar waar de temperaturen op de verschillende diepten flink uiteenliepen, waarbij de diepere delen altijd kouder waren dan de ondiepere delen. In de meest extreme gevallen bestond er een temperatuurverschil van meer dan 6 graden Celsius tussen -0.95 en -8 meter diepte. Gedurende de hele zomer was er op aanzienlijk meer dagen wel sprake van stratificatie dan niet. Over het algemeen trad temperatuurstratificatie vooral op terwijl het water in een opwarmende trend zat. Vanaf het keerpunt tegen het einde van augustus vanaf wanneer het water een afkoelende trend inzet kwam temperatuurstratificatie aanzienlijk minder vaak en minder sterk voor.



Figuur 8: Plot van de watertemperatuur op vier gemeten dieptes volgens de meetboei en meetpaal VM5, tegen de tijd, voor de zomer van 2024.

Binnen de meetperiode zijn er vijf perioden geïdentificeerd waarin er sprake was van aanzienlijk sterke stratificatie die over meerdere dagen bleef aanhouden (tabel 2).

Tabel 2: Perioden van sterke temperatuurstratificatie

	Van	Tot
A	24 mei 2024	1 juni 2024
B	2 juni 2024	12 juni 2024
C	12 juni 2024	8 juli 2024
D	8 juli 2024	12 juli 2024
E	14 juli 2024	23 augustus 2024

Binnen deze perioden van temperatuurstratificatie zijn er verschillende maten van stratificatie waargenomen. In de volgende subparagrafen komen enkele van deze aan bod.

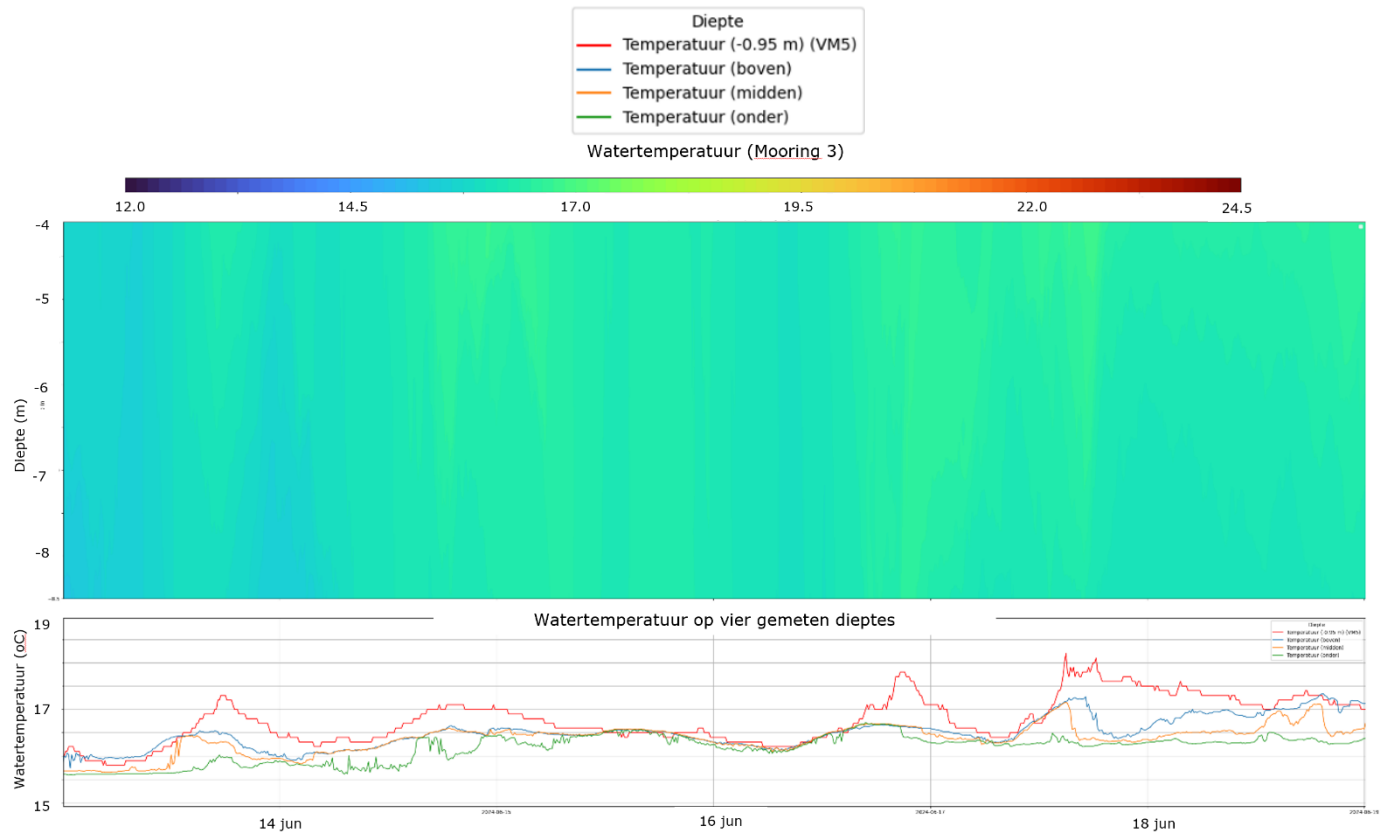
4.1.1. *Dagelijkse stratificatie*

Een zekere mate van temperatuurstratificatie kwam op de meeste dagen voor. Op de meeste dagen ontstond er gedurende de middag en de avond een temperatuurverschil tussen -0.95 meter diepte en de dieper gelegen lagen. De grootte van dit verschil varieerde, maar op een groot aantal dagen was dit groter dan één graden Celsius tussen -0.95 en -8 meter diepte, en op veruit de meeste dagen was het verschil tussen die dieptes groter dan 0.5 graden Celsius. Op enkele dagen ontstond dit temperatuurverschil niet. In bijna alle gevallen nam dit temperatuurverschil weer af in de loop van de nacht en de daaropvolgende ochtend. Dit dagelijkse patroon is zowel waargenomen in perioden met flinke stratificatie als in perioden zonder aanhoudende stratificatie. Wanneer er geen sprake was van aanhoudende of opbouwende stratificatie nam het dagelijkse temperatuurverschil 's nachts zodanig af dat de temperaturen over de dieptes weer gelijk aan elkaar raakten.

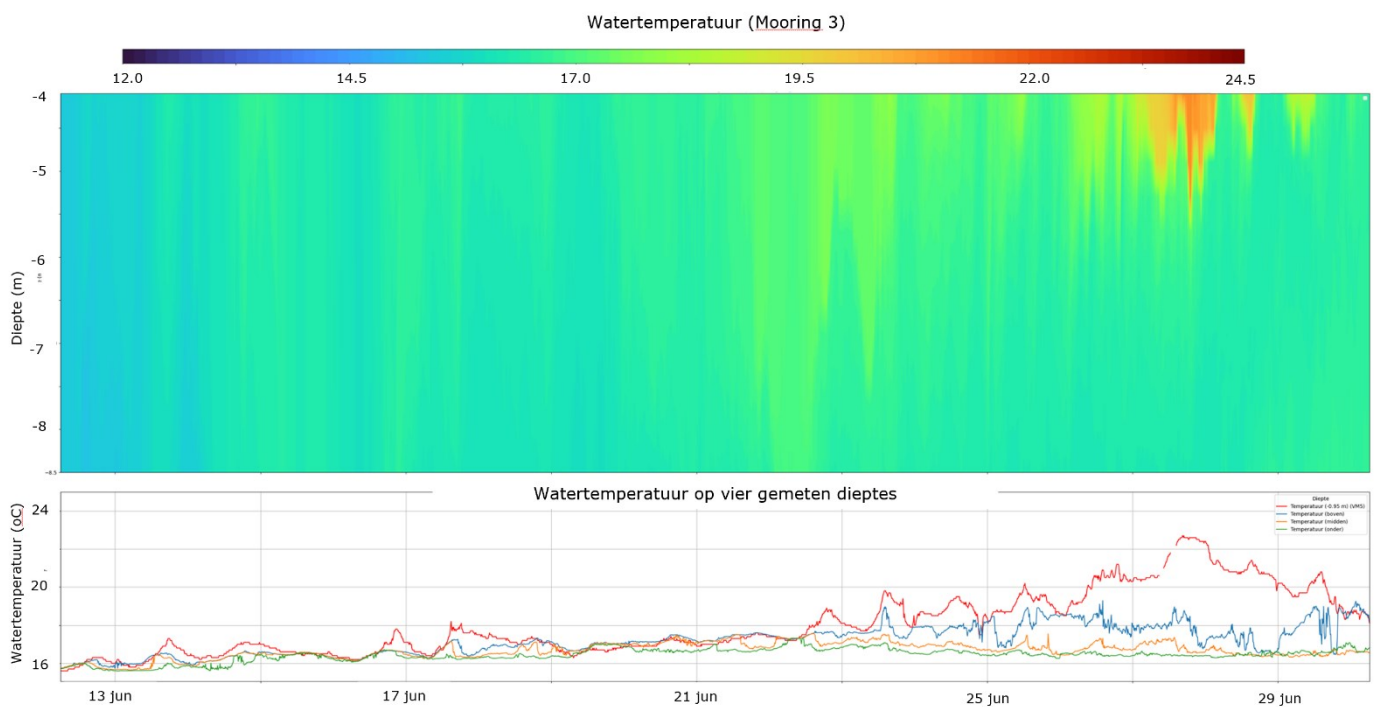
Figuur 9 toont voor enkele dagen in juni, waarop er geen sprake was van aanhoudende stratificatie en waarop we dit patroon goed zien, de watertemperatuur tegen de diepte en de tijd, zowel als contourplot en als lijnplot voor de vier vaste dieptes. De lijnplot laat goed zien hoe dagelijks het water op -0.95 meter aanzienlijk harder opwarmde dan de diepere delen, dat de mate waarin dit gebeurde varieerde, en dat dit verschil 's nachts weer afnam. Ook toont het een dag (15 juni) waarop een dergelijk verschil niet ontstond. De contourplot laat op sommige dagen, met name 13 en 14 juni, een spronglaag zien die wat onder de -4 meter zakte, maar toont ook dat de waterkolom over het algemeen nog redelijk gemengd bleef onder de -4 meter.

4.1.2. *Opbouwende stratificatie*

Op verschillende momenten, voornamelijk in de aanloop naar de vijf gedefinieerde perioden met flinke aanhoudende stratificatie, sloeg het patroon van dagelijkse, matige stratificatie om naar een patroon waarin de stratificatie over meerdere aaneengesloten dagen toenam. Het temperatuurverschil tussen -0.95m en de diepere delen nam dan ook vooral in de middag en avond toe, maar de toename overdag was dan groter dan de afname 's nachts. Hierdoor kon de stratificatie over de tijd opbouwen. Figuur 10 toont hoe het patroon van dagelijkse stratificatie uit figuur 9 omsloeg in opbouwende stratificatie. De temperatuur op -0.95 nam vanaf 21 juni aanzienlijk en opbouwend toe, terwijl de diepere delen achterbleven. De contourplot toont hoe er een spronglaag ontstaat die gedurende deze dagen steeds sterker wordt en waarvan het zwaartepunt steeds ondieper komt te liggen.



Figuur 9: Voorbeeld van enkele dagen in juni 2024 waarop het ontstaan en verdwijnen van dagelijkse, matige stratificatie goed zichtbaar is. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring. Onder: lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes.



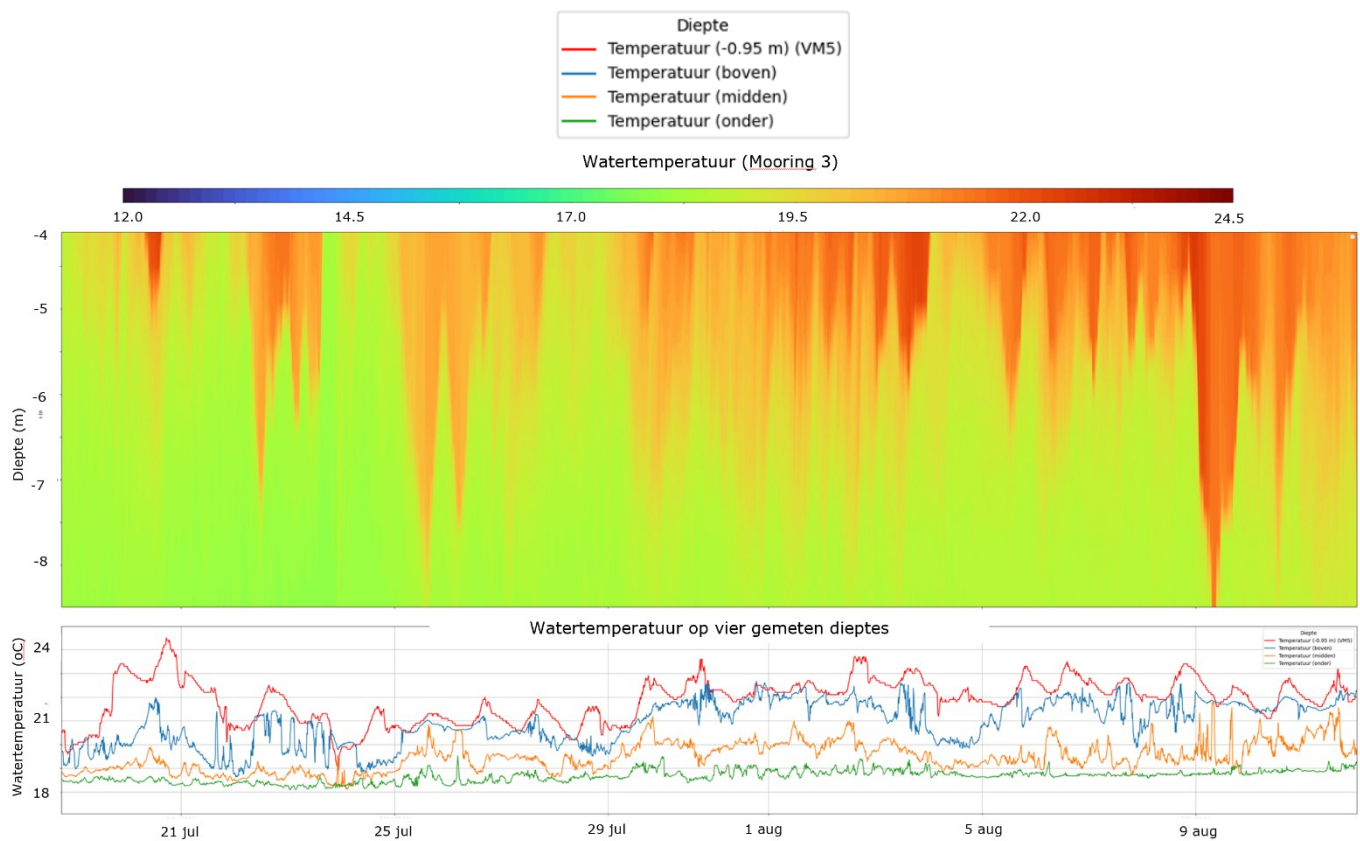
Figuur 10: Voorbeeld van het omslaan van een patroon van dagelijkse, matige stratificatie naar over meerdere dagen opbouwende stratificatie. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring. Onder: lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes.

4.1.3. *Langdurige stratificatie*

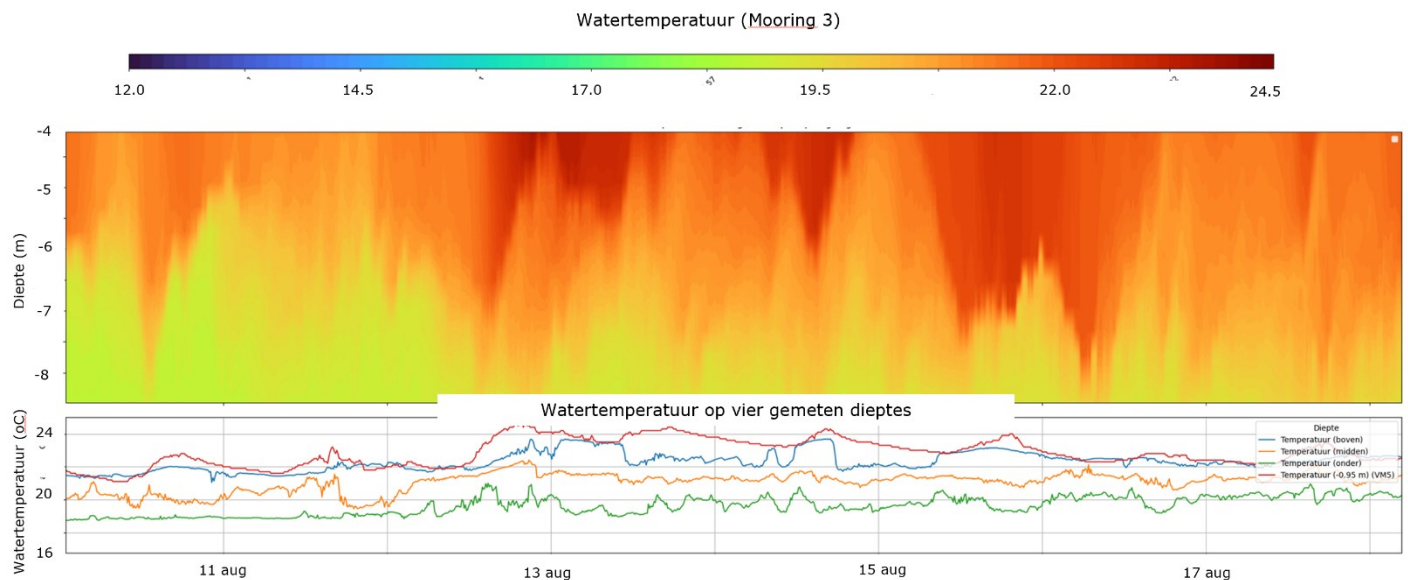
Wanneer forse, meerdaagse stratificatie voor langere tijd (in ieder geval langer dan een week) aanhield, raakte de stratificatie en de structuur van de waterkolom in toenemende mate complex. In de eerder gedefinieerde stratificatieperioden C en E kwam dit voor, in de maanden juli en augustus. Figuur 11 toont een voorbeeld hiervan tijdens periode E. De lijngrafiek toont dat temperatuurstratificatie tijdens deze periode continu (sterk) aanwezig was, maar dat de grootte van de temperatuurverschillen sterk varieerden. Zowel de lijngrafiek als de contourplot toonden bovendien dat er zich grote variaties voordeden in de diepte van de spronglaag, waarbij het zwaartepunt van de spronglaag binnen het tijdsbestek van één dag geregeld meerdere meters in diepte kon veranderen. Over het algemeen gold dat deze fluctuaties het grootst waren in de ondiepe delen en kleiner op grotere diepte. Op -8 meter diepte werden slechts zelden wat kleine variaties in temperatuur waargenomen. De contourplot toont bovendien dat de spronglaag deze diepte nauwelijks bereikte.

Het omlaag bewegen van het zwaartepunt van de spronglaag vond meestal plaats als een diffusie van die laag tot op grotere diepte: de bovenliggende, warmere waterlaag werd dan als het ware tot op grotere diepte uitgespreid. Dit werd vaak, maar niet altijd gevolgd door het opnieuw wat omhoog bewegen van de spronglaag. Dit fenomeen van diffusie leidde ertoe dat sterkere spronglagen meestal op geringere diepte werden waargenomen, terwijl dieper liggende spronglagen vaak minder sterk waren. Dit is op de contourplot in figuur 11 ook goed te zien.

Binnen deze perioden van langdurige temperatuurstratificatie kon complexiteit in de waterkolomstructuur ontstaan wanneer in een sterk gestratificeerde waterkolom diffusie ontstond waarbij de spronglaag zich uitspreidde tot op grotere diepte, en deze niet onmiddellijk weer omhoog bewoog. Wanneer direct aansluitend daarop het meest oppervlakkige waterdeel opnieuw flink harder opwarmde dan de diepere delen, ontwikkelde zich boven de eerdere, gediffundeerde spronglaag een nieuwe, ondiepere spronglaag. Zo was er op verschillende momenten tijdens langdurige stratificatie sprake van meerdere spronglagen tegelijkertijd, waarbij er ook een laag ontstond die ingesloten was tussen de twee spronglagen. Figuur 12 toont een zoom-in op figuur 11 (10 tot 18 augustus 2024), waarop dit fenomeen zichtbaar is. Met name op 12, 13 en 14 augustus is op de contourplot goed te zien dat er in het bereik boven de -6 meter een sterkere spronglaag aanwezig was, terwijl er ook in het bereik -7 tot -8.5 meter een relatief zwakkere, gediffundeerde spronglaag was. Ook op de lijngrafiek is te zien dat er op deze dagen een ongeveer even groot temperatuurverschil zat tussen -6 en -8 meter als tussen -6 meter en de bovengelegen meetdieptes. Verder tonen de lijngrafiek en de contourplot ook dat de diepte van de bovenste spronglaag in deze situatie geregeld varieerde (de lijnen voor -0.95 en -4 meter bewogen op 13 augustus naar elkaar toe en daarna weer uit elkaar), terwijl de diepere spronglaag vrij stabiel rond dezelfde diepte bleef.



Figuur 11: Voorbeeld van een periode van langdurig aanhoudende stratificatie in juli en augustus 2024. Het beeld is beduidend complexer met flinke variatie op geringere diepte. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring. Onder: lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes.



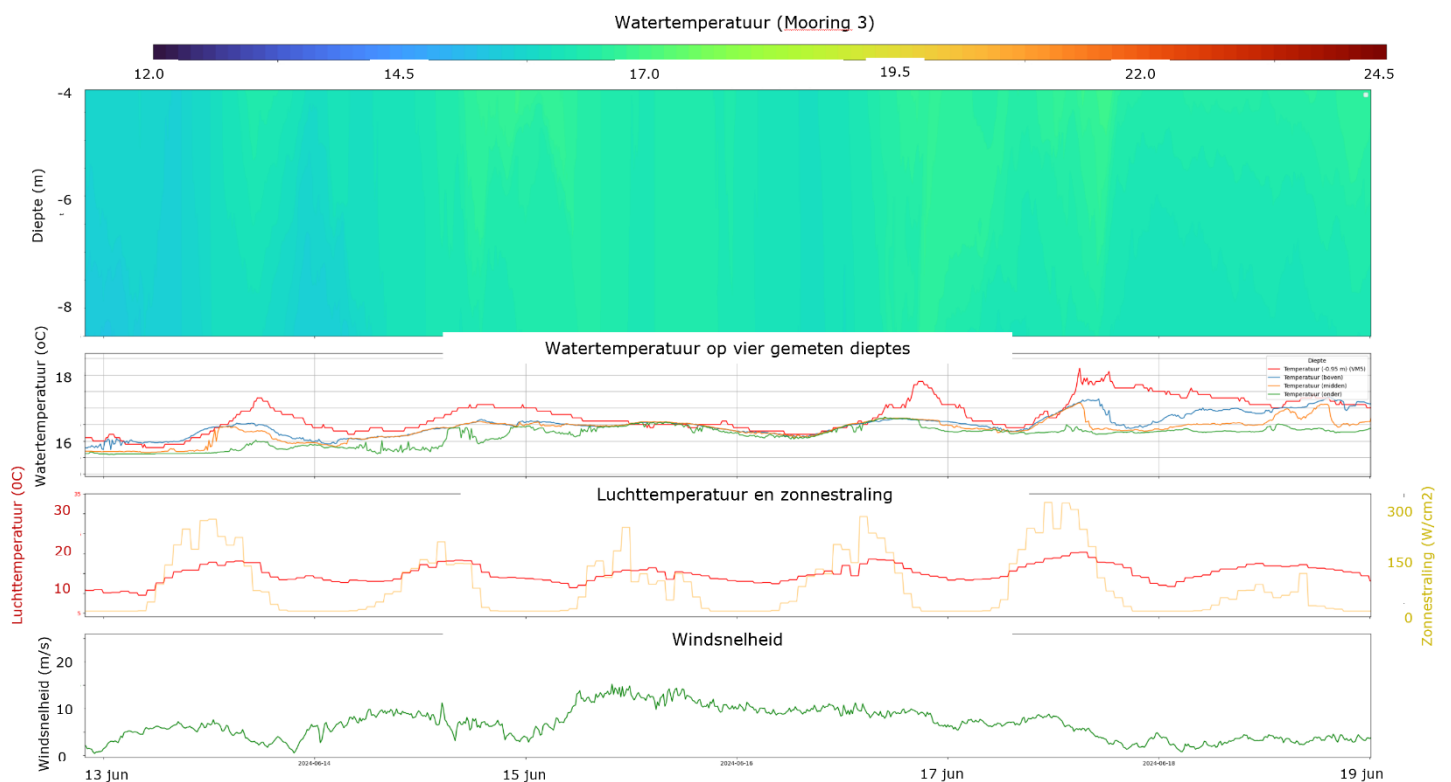
Figuur 12: Zoom-in op de periode 10 tot en met 18 augustus 2024 waarin het bestaan van meerdere spronglagen tegelijkertijd goed zichtbaar is. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring. Onder: lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes.

4.2. Meteorologische verklaring

Dit deelhoofdstuk gaat in op hoe de waargenomen patronen van stratificatie kunnen worden verklaard aan de hand van de weersomstandigheden. Dit wordt gedaan aan de hand van dezelfde voorbeeldperioden als die in het vorige deelhoofdstuk zijn behandeld.

4.2.1. Dagelijkse stratificatie

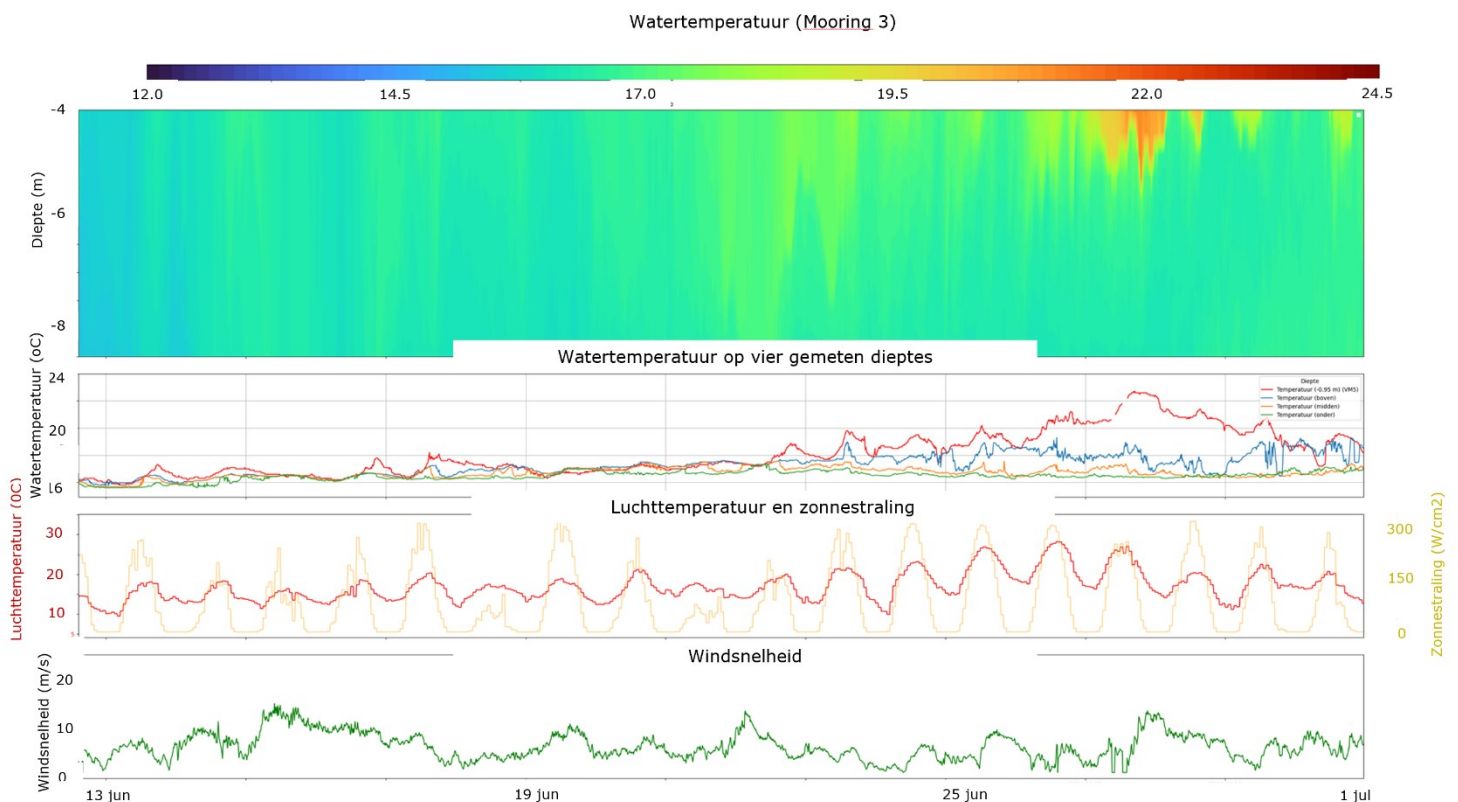
Er is over de hele meetperiode een sterke correlatie tussen de zonnestraling en de temperatuur op -0.95 meter diepte. De stratificatie die dagelijks ontstond gedurende de middag en de avond volgde op bijna alle dagen snel op de dagpiek van de zonnestraling. Wanneer de zonnestraling hoog was steeg de temperatuur op vooral -0.95m snel, en bij lage zonnestraling en vooral bij afwezigheid van zonnestraling in de nacht daalde de temperatuur op diezelfde diepte. De mate waarin de ondiepe watertemperatuur daalde bij afwezigheid van zonnestraling bleek afhankelijk van de luchttemperatuur: hoe lager de luchttemperatuur, hoe groter de afkoeling van het ondiepe water. Op de dagen waarop geen (sterke) dagelijks stratificatie ontstond was er meestal sprake van lage zonnestraling en/of een grote windsnelheid (> 10 m/s). De dagen waarop de dagelijkse stratificatie het grootst was hadden veelal een hoge zonnestraling en/of een lage windsnelheid (< 5 m/s). Figuur 13 toont opnieuw het voorbeeld uit figuur 9 waarop dagelijks stratificatie goed zichtbaar is, met daaraan toegevoegd een lijnplot voor de zonnestraling en de luchttemperatuur, en een lijnplot voor de windsnelheid. De figuur maakt duidelijk hoe de dagelijkse piek in de watertemperatuur op -0.95 meter volgde op de dagelijkse piek in de zonnestraling. Ook is goed zichtbaar hoe er op de 15 juni, een dag waarop ondanks een hoge zonnestraling geen dagelijkse stratificatie optrad, een krachtige wind aanwezig was.



Figuur 13: Voorbeeld van enkele dagen in juni 2024 waarop het ontstaan en verdwijnen van dagelijkse, matige stratificatie goed zichtbaar is. Van boven naar onderen: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuuroormooring; lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes; lijnplots van de zonnestraling en de luchttemperatuur; lijnplot van de windsnelheid.

4.2.2. Opbouwende stratificatie

Het overgaan van een patroon van dagelijkse stratificatie die 's nachts weer (grotendeels) verdwijnt naar een patroon van over meerdere dagen opbouwende stratificatie vond meestal plaats wanneer de luchttemperaturen begonnen te stijgen en voornamelijk wanneer dat samenging met een zwakke wind. Waar de zonnestraling vooral een correlatie vertoonde met de opwarming van het water overdag, vertoonde de luchttemperatuur vooral een omgekeerde correlatie met de afkoeling van het water 's nachts: hoe hoger de luchttemperatuur, hoe minder sterk de afkoeling van het water. Opbouwende stratificatie vond daarom bijna altijd plaats bij én grote instraling overdag, én hoge luchttemperaturen, én een lage windsnelheid. De ondiepe watertemperatuur nam dan iedere dag netto toe, en hoe langer dat aanhield hoe verder de stratificatie zich ontwikkelde. In figuur 14, de meteorologische plots zijn toegevoegd aan de plots van figuur 10, is zichtbaar hoe veranderingen in de weerspatronen samenvielen met de start van het opbouwen van stratificatie. Op bijna alle dagen in dit voorbeeld was de zonnestraling hoog, maar pas wanneer de luchttemperatuur begon te stijgen en de wind stabiel zwakker werd (vanaf 23 juni) begint de stratificatie daadwerkelijk op te bouwen.

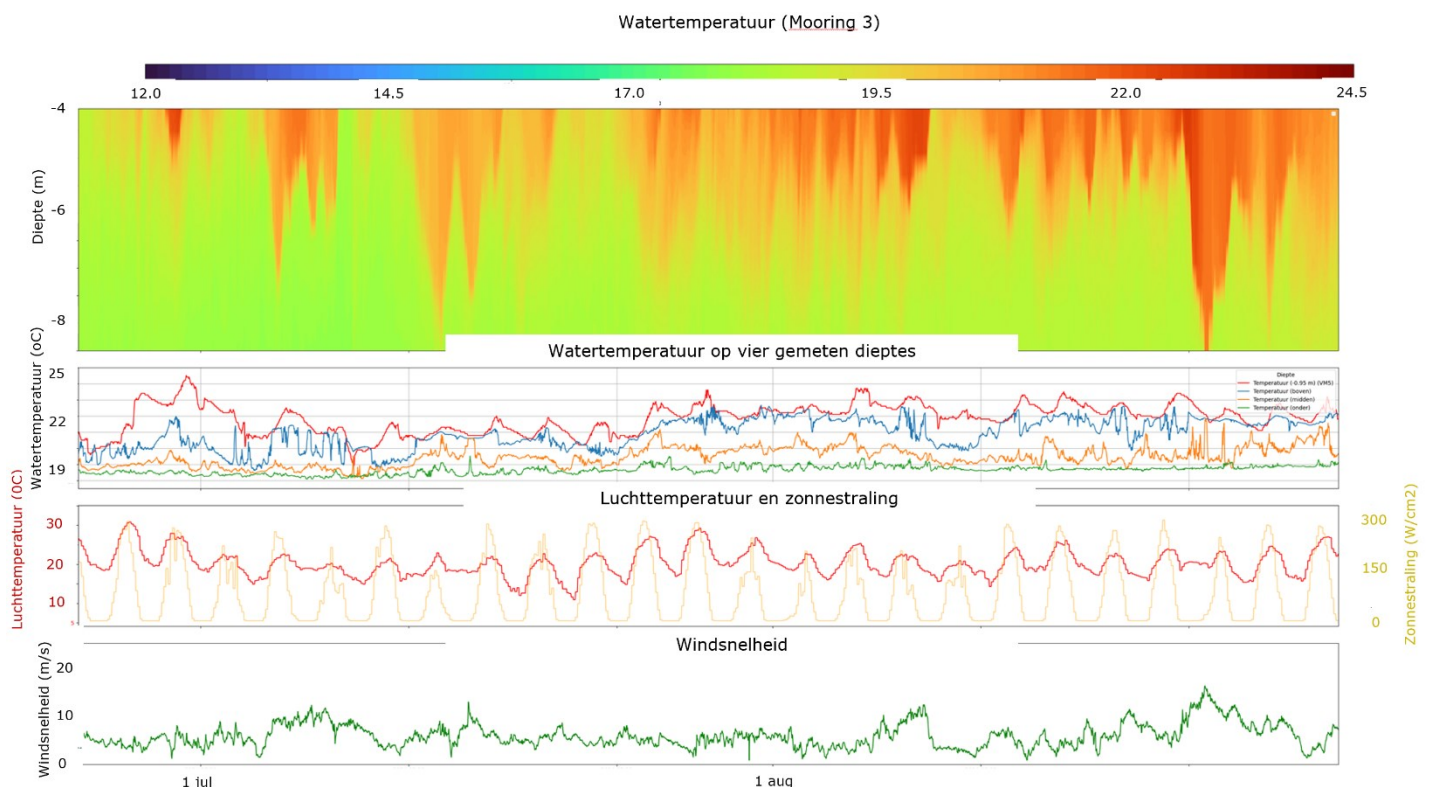


Figuur 14: : Voorbeeld van het omslaan van een patroon van dagelijkse, matige stratificatie naar over meerdere dagen opbouwende stratificatie. Van boven naar onderen: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring; lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes; lijnplots van de zonnestraling en de luchttemperatuur; lijnplot van de windsnelheid.

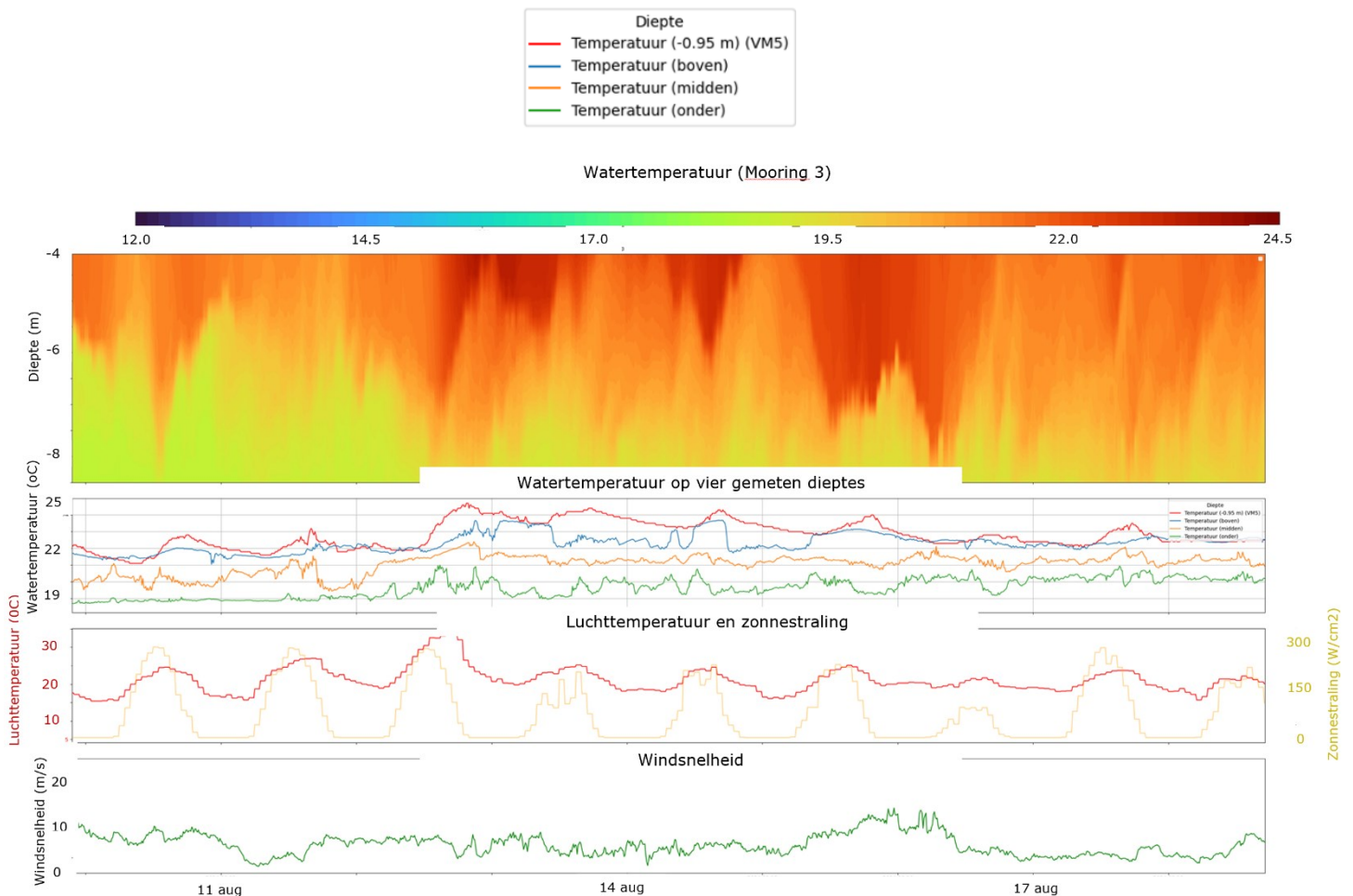
4.2.3. Langdurige stratificatie

Gedurende het bestaan van langdurige stratificatie zijn de variaties goed verklaarbaar door de weersomstandigheden. Figuur 15 illustreert dit. Op momenten wanneer er sprake was van hoge zonnestraling, zwakke wind, en een hoge luchttemperatuur, zoals rond 20 juli in de figuur, was de spronglaag sterk en bevond deze zich vrij ondiep. De momenten waarop de wind beduidend krachtiger was (bijvoorbeeld tijdens de pieken in de windgrafiek in figuur 15) gingen meestal samen met diffusie van de spronglaag tot op grotere diepte. Desondanks bleef gedurende de hele voorbeeldperiode de waterkolom gestratificeerd. Dat lijkt vooral te verklaren doordat gedurende de hele periode, ondanks variatie, de zonnestraling en luchttemperatuur hoog waren en de wind slechts zelden echt krachtig (> 10 m/s) was. De wisselwerking tussen de verschillende meteorologische variabelen lijkt bepalend te zijn voor de variatie binnen een periode van langdurige stratificatie.

Ook het ontstaan van complexiteit in de waterkolomstructuur is ook goed verklaarbaar door het weer. Eerder is de observatie gedaan dat meerdere spronglagen gelijktijdig boven elkaar kunnen bestaan wanneer er een nieuwe spronglaag vormt boven een eerder gevormde spronglaag die tot grotere diepte diffuus geraakt is. Ook is geobserveerd dat diffusie van de spronglaag optreedt met hogere windsnelheden. Vergelijking van de watertemperatuurplots met de meteo-plots toont aan dat er op de momenten waarop er een tweede spronglaag ontstond er een hoge zonnestraling en een hoge luchttemperatuur waren terwijl er al een diffuse, diepere spronglaag bestond. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar op 12 augustus in figuur 16.



Figuur 15: Voorbeeld van een periode van langdurig aanhoudende stratificatie in juli en augustus 2024. Het beeld is beduidend complexer met flinke variatie op geringere diepte. Van boven naar onderen: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring; lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes; lijnplots van de zonnestraling en de luchttemperatuur; lijnplot van de windsnelheid.



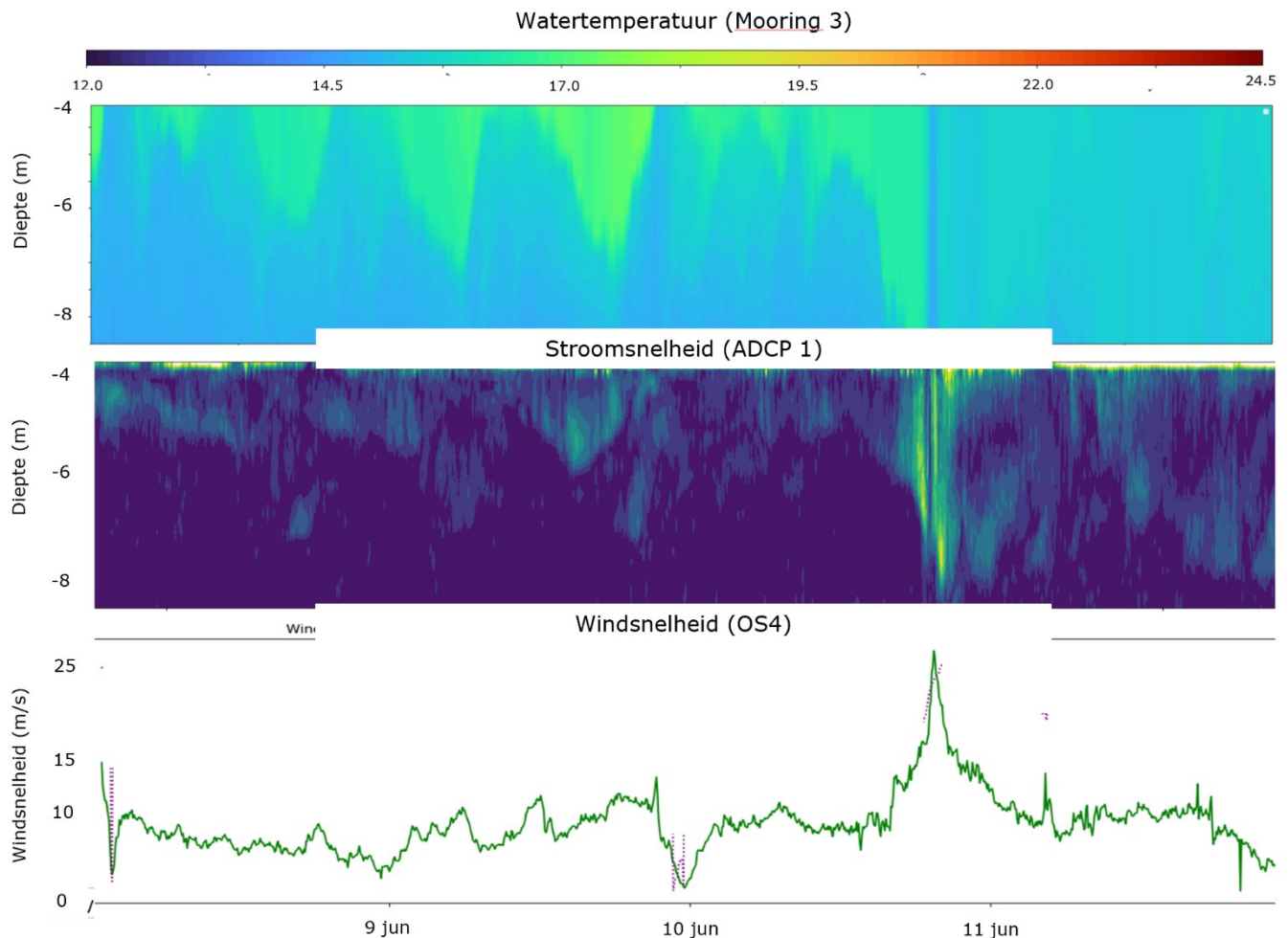
Figuur 16: Zoom-in op de periode 10 tot en met 18 augustus 2024 waarin het bestaan van meerdere spronglagen tegelijkertijd goed zichtbaar is. Van boven naar onderen: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmooring; lijnplots van de watertemperatuur tegen de tijd op vier dieptes; lijnplots van de zonnestraling en de luchttemperatuur; lijnplot van de windsnelheid.

4.2.4. Vermenging door de wind

Tijdens perioden van sterke stratificatie fungeert de spronglaag als een fysieke barrière die menging beperkt. Dit is zichtbaar in figuur 17, waar de ADCP-plot de bewegingssnelheid van het water toont, en de contourplot van de watertemperatuur de diepte van de spronglaag kenbaar maakt. Het deel boven de spronglaag kende in deze voorbeeldperiode variërende beweging (0.02 – 0.15 m/s), terwijl het deel onder de spronglaag nagenoeg stilstond (< 0.02 m/s). Ook toont het voorbeeld dat de diepte van de scheiding tussen beweging en stilstand van het water nauwgezet de diepte van de spronglaag volgde, en dat variaties in die diepte samengingen met een piek in de windsnelheid.

Wanneer de windsnelheid toenam vond meestal gedeeltelijke diffusie van de spronglaag plaats. In het voorbeeld van figuur 17 gebeurde dit drie keer (links op de plot): de windsnelheid vertoonde een lokale piek, en de spronglaag diffundeerde drie keer tot -6 á -7 meter diepte. De ADCP-plot toont dat er op deze momenten menging optreedt tot dezelfde diepte. Bij alle drie deze momenten hervatte de stratificatie zich echter weer na de piek in de windsnelheid; de diffusie van de spronglaag was niet diep genoeg om de gehele waterkolom te vermengen.

Wanneer de windsnelheid zodanig toenam dat er sprake was van storm of stormachtige wind was dit meestal wel voldoende om tot volledige menging van de waterkolom te leiden. In het voorbeeld van figuur 17 gebeurde dit op 10 juni, waar een flinke piek in de windsnelheid samengaat met sterke menging op alle dieptes en het snel verdwijnen van de spronglaag. In de dagen direct daarna hervatte de stratificatie zich niet en bleef de waterkolom goed gemengd.



Figuur 17: Voorbeeldperiode in juni 2024 waar het verschil tussen een gestratificeerde waterkolom (links) en een gemengde waterkolom (rechts) goed zichtbaar is. Ook geeft het het verschil weer tussen gedeeltelijke diffusie en volledige menging van de spronglaag aan de hand van de wind. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen de diepte en tijd volgens de temperatuurmoooring; Midden: contourplot van de stroomsnelheid tegen de diepte en tijd volgens de ADCP; Onder: plot van de windsnelheid (groen).

4.3. Zuurstofdynamiek

4.3.1. Zuurstoftekorten tijdens de meetperiode

Tijdens de zomer van 2024 trad op alle gemeten dieptes variatie op in de zuurstofconcentraties, maar de aard en intensiteit van deze variaties verschillen met de diepte. De grootste variatie is waargenomen op -4 en -6 meter diepte, terwijl er op -8 meter weinig kortstondige fluctuaties zijn gemeten. Binnen de meetperiode vertoonden zich duidelijk onderscheidbare episoden van dalende zuurstofconcentraties. Hoewel veel van deze dalingen van korte duur waren, bereikten de zuurstofconcentraties bij aanhoudende daling kritieke niveaus. In enkele van deze perioden van dalende zuurstofconcentraties raakte het water zuurstofarm ($< 4 \text{ mg O}_2/\text{L}$) en in één periode raakte het zuurstofloos ($< 2 \text{ mg O}_2/\text{L}$). Binnen de periode met de grootste zuurstofloosheid was er in de diepste delen ($< -8 \text{ meter}$) sprake van volledige afwezigheid van zuurstof ($0 \text{ mg O}_2/\text{L}$).

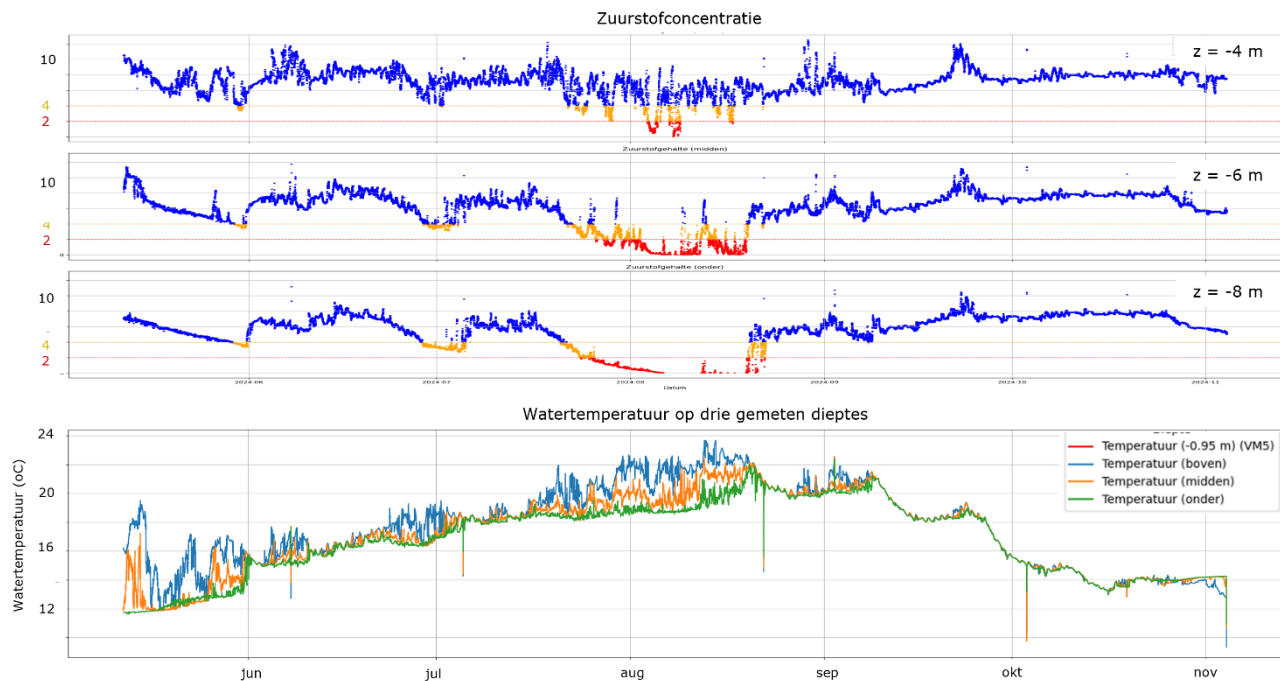
Drie duidelijk onderscheidbare perioden waarin ten minste zuurstofarmoede optrad waren:

- **29 – 31 mei:** In deze periode is zuurstofarmoede voornamelijk beperkt tot de dieptes van -6m en -8m. Op -4m schommelden de waarden rond de grenswaarde, zonder langdurig onder de 4 mg/L te blijven.
- **28 juni – 5 juli:** De zuurstofconcentraties op -6m en -8m zakten opnieuw onder de drempelwaarde, met een kort moment van zuurstofarmoede op -4m rond 1 juli. De ernst en duur van deze zuurstofarme periode was groter dan die in mei, met name op grotere diepte.
- **22 juli – 23 augustus:** Deze periode markeert de langste episode van ernstige zuurstofarmoede en zuurstofloosheid. Op -8m begon de zuurstofarmoede op 22 juli en deze liep vrijwel ononderbroken door tot ver in augustus. Op -6m startte deze fase op 23 juli en op -4m vanaf 25 juli. Binnen deze periode was er bovendien sprake van zuurstofloosheid: op -8m vanaf 25 juli, op -6m vanaf 28 juli, en op -4m incidenteel begin augustus. Opvallend hierbij is dat tijdelijk herstel op geringere diepte vaak niet leidde tot volledige re-oxygenatie op grotere diepte.

De waargenomen patronen laten zien dat zuurstofarmoede zich eerst ontwikkelde op grotere diepte. Naarmate de daling aanhield, breidde de zuurstofarmoede zich uit naar bovenliggende lagen. Figuur 18 toont de zuurstofconcentraties per diepte over de gehele meetperiode tegen de drempelwaarden voor zuurstofarmoede en zuurstofloosheid. De drie beschreven perioden zijn hierin goed te herkennen. Ook is hierin te zien hoe zuurstoftekorten beneden in de waterkolom begonnen en dat de hogere lagen later volgden. Zo begon tijdens de langste zuurstofloze periode in juli en mei de zuurstofconcentratie op -8 meter meteen te dalen met een stabiele gradiënt. De concentratie op -6 meter volgde wat later de trend, maar liet een aantal plotselinge stijgingen zien. Op -4 meter was de trend ook waarneembaar, maar beduidend minder sterk en met behoorlijk meer variatie. Ook het herstel van zuurstofwaarden vertoonde deze volgorde, maar dan in omgekeerde volgorde, en binnen een flink korter tijdsbestek: waar zuurstofarmoede over een periode van dagen geleidelijk ontstond, herstelden de zuurstofwaarden vaak in minder dan een dag tijd.

4.3.2. *Het effect van stratificatie op zuurstof*

Sterke en aanhoudende stratificatie bleek sterk gecorreleerd aan het optreden van zuurstofgebrek in de waterkolom, met name in de diepe delen. Wanneer stratificatie ontstond die over meerdere dagen bleef bestaan begonnen de zuurstofconcentraties in alle gevallen vrijwel direct te dalen. Figuur 18 laat dit goed zien. Volgens de eerder omschreven patronen werd dit altijd het eerst waargenomen op -8 meter diepte, gevolgd door -6 meter en wat later -4 meter diepte. Afgezien van variaties door diffusie-events daalden de zuurstofconcentraties vrij constant. Vooral de duur van de aanhoudende stratificatie bleek bepalend voor het optreden van zuurstofarmoede en zuurstoftekorten: hoe langer de stratificatie aanhield, hoe verder de zuurstofconcentraties daalden, en hoe ondieper zuurstofloosheid voorkwam. Verder herstelden de zuurstofconcentraties zich op alle diepte snel (in minder dan één of soms enkele dagen) wanneer de stratificatie verdween.



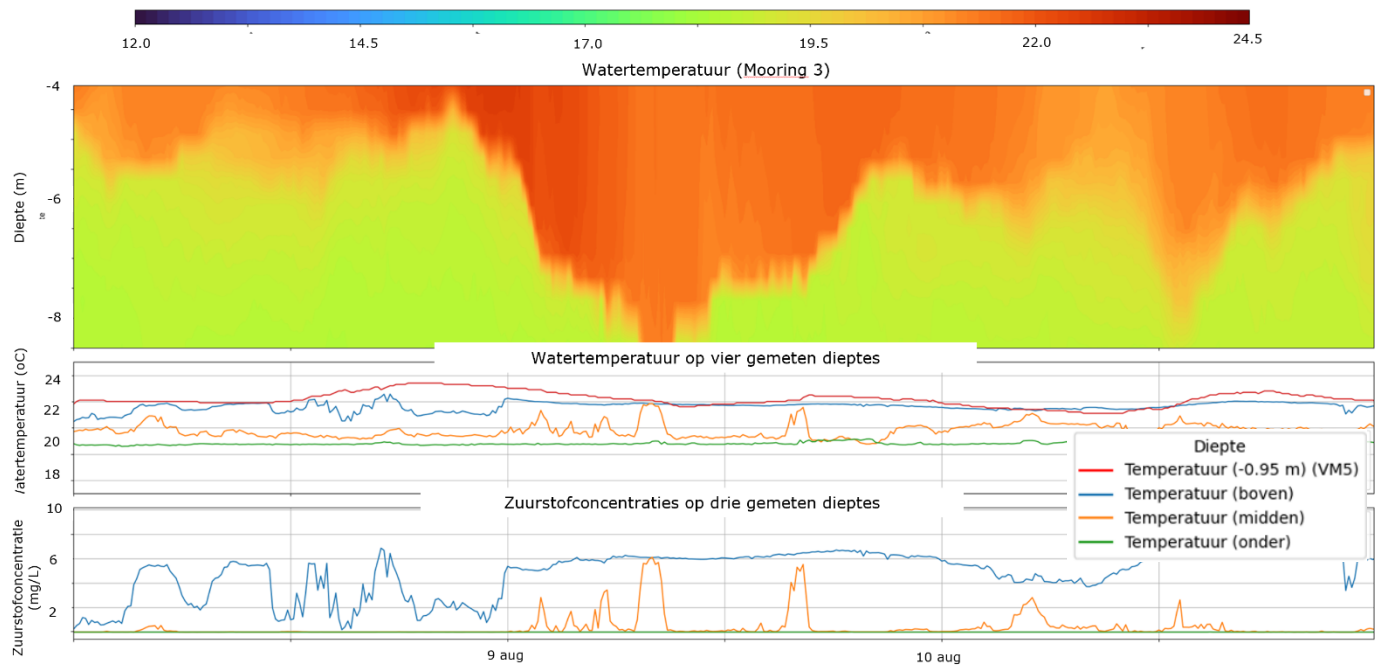
Figuur 18: Boven: plots van de zuurstofconcentraties op de drie gemeten dieptes van de meetboei tegen de tijd. De grenswaarden voor zuurstofarmoede (<4 mg/L) en zuurstofloosheid (< 2 mg/L) zijn ingetekend, en metingen onder deze grenswaarden zijn aangeduid als geel voor zuurstofarm en rood voor zuurstofloos. Onder: plots van de watertemperatuur volgens de meetboei tegen de tijd. Beide plots beslaan de volledige meetperiode.

4.3.3. Interactie met de spronglaag

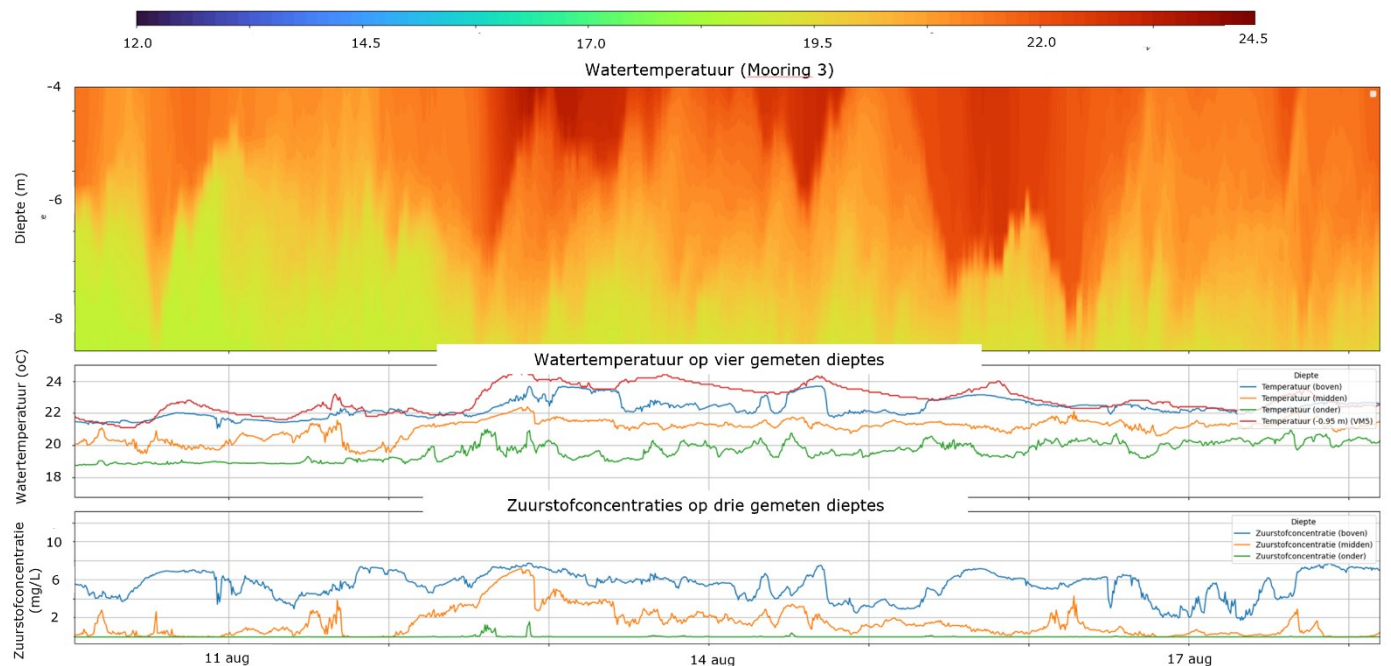
De zuurstofconcentraties bleken vooral sterk te reageren op variaties in de spronglaagdiepte. Deze diepte bleek bepalend voor de beweegrichting van de zuurstofconcentraties en de mate van variatie van de concentraties. In vrijwel alle gevallen begonnen de zuurstofconcentraties op een bepaalde diepte vrijwel direct te dalen zodra deze diepte onder de spronglaag kwamen te liggen, en in vrijwel alle gevallen begonnen de zuurstofconcentraties vrijwel direct te stijgen zodra deze boven de (bovenste) spronglaag kwamen te liggen. Figuur 19 toont een voorbeeld waarin deze snelle reactie van de zuurstofconcentraties op spronglaagvariatie goed te zien is. De contourplot toont dat de spronglaag zich op 8 augustus, met enige variatie, tussen de -4 en -5.5 meter bevond. In deze periode zien we dat er grote variatie optrad in de zuurstofconcentratie op -4 meter diepte, aangezien deze wisselend boven en onder de variërende spronglaag kwam te liggen. Op -6 en -8 meter diepte was het water zonder variatie volledig zuurstofloos. De contourplot toont dat er op 9 augustus diffusie plaatsvindt waarbij het zwaartepunt van de spronglaag daalt tot onder de -6 meter diepte. Direct daarmee samenvallend steeg de zuurstofconcentratie op -4 meter, en verplaatste de variatie in de zuurstofconcentratie zich van -4 meter naar -6 meter diepte. Op -4 meter kwam dan nauwelijks meer variatie voor. Het water op -8 meter diepte bleef in dit voorbeeld continu zonder variatie volledig zuurstofloos, omdat het zwaartepunt van de spronglaag deze diepte nooit bereikte.

Tijdens het bestaan van meerdere spronglagen werd een complexe zuurstofdynamiek waargenomen. Zuurstoftransport werd dan op meerdere dieptes in de waterkolom verhinderd. De diffusie van de oorspronkelijke spronglaag leidde in eerste instantie tot een herintroductie van zuurstof tot op grotere diepte. Wanneer de nieuwe spronglaag dicht bij het oppervlak ontstond, raakte het watervolume daaronder opnieuw afgesloten van zuurstoftoevoer, waardoor de tijdelijk verhoogde

zuurstofconcentratie daar weer een geleidelijke daling inzette. Dit leidde ertoe dat er dan sprake was van een meer trapsgewijze zuurstofgradiënt. Naarmate de zuurstofconcentraties in de tussenlaag daalden namen de zuurstofverschillen tussen de tussenlaag en de onderlaag af. In het voorbeeld in figuur 20 is te zien hoe dit plaatsvindt en hoe met name de zuurstofconcentratie op -6 meter diepte reageert wanneer deze diepte vanaf 12 augustus tussen twee spronglagen komt te liggen.



Figuur 19: Voorbeeld van de snelle reactie van de zuurstofconcentraties op variatie in de spronglaagdiepte. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen tijd en diepte volgens de temperatuurmooring. Midden: watertemperatuur op vier vaste dieptes volgens de meetboei en VM5. Onder: zuurstofconcentratie op drie dieptes volgens de meetboei.



Figuur 20: Voorbeeld van het zuurstofverloop bij het ontstaan van meerdere spronglagen. Boven: contourplot van de watertemperatuur tegen tijd en diepte volgens de temperatuurmooring. Midden: watertemperatuur op vier vaste dieptes volgens de meetboei en VM5. Onder: zuurstofconcentratie op drie dieptes volgens de meetboei.

4.4. Concluderend model

Op basis van de geanalyseerde meetgegevens en de daaruit getrokken observaties is een model opgesteld wat handvaten biedt voor het begrijpen van het ontstaan en verdwijnen van stratificatie in het Veerse Meer, en het daaruit volgende optreden van zuurstoftekorten. Dit model beschrijft hoe stratificatie op basis van de analyse van de meetgegevens ontstaat, hoe dat leidt tot zuurstofloosheid, hoe stratificatie en zuurstofloosheid verdwijnen. Bovendien worden er aan het model grenswaarden gekoppeld die een meer exacte en bruikbare indicatie geven van de omstandigheden waaronder dit alles gebeurt.

4.4.1. *Geteste hypothesen*

Om tot de numerieke grenswaarden te komen is de methode gehanteerd zoals omschreven in hoofdstuk 3.4.3. Daarin wordt echter nog niet benoemd welke hypothesen werden getest, aangezien deze zijn opgesteld aan de hand van de statistiek en interpretatie van de resultaten. Eerst is voor de vijf gedefinieerde perioden van aanhoudende stratificatie (A t/m E) in kaart gebracht wat de patronen waren voor de wind, de zonnestraling, de luchttemperatuur, en de neerslag tijdens en vooraf aan het ontstaan en het verdwijnen van de stratificatie. Vervolgens is voor alle parameters de relatie in omgekeerde richting getest: daarvoor werden enkele testhypothesen opgesteld. Daarbij werd de algemene hypothese als het ware ontleedt in testbare deelhypothese, waarbij iedere deelhypothese een extreme situatie probeert te bevatten. De volgende hypothesen zijn getest:

1. Op dagen met een dagpiek in de zonnestraling groter dan 250 W/cm^2 ontstaat over versterkt de temperatuurstratificatie.
2. Op dagen met een luchttemperatuur groter dan 25 graden Celsius ontstaat over versterkt de temperatuurstratificatie.
3. Op dagen met een neerslag groter dan 5 mm (uurgemiddeld) verdwijnt of verzwakt de temperatuurstratificatie.
4. Op dagen met een windsnelheid groter dan 10 m/s verdwijnt of verzwakt de temperatuurstratificatie.
5. Op dagen met een windsnelheid groter dan 15 m/s verdwijnt of verzwakt de temperatuurstratificatie.

Tabellen met de testresultaten voor deze hypothesen meer specifiek uitgewerkt zijn opgenomen in bijlage B. In het vervolg van het hoofdstuk hier zijn deze resultaten opgenomen in het concluderend model.

4.4.2. *Het ontstaan van stratificatie*

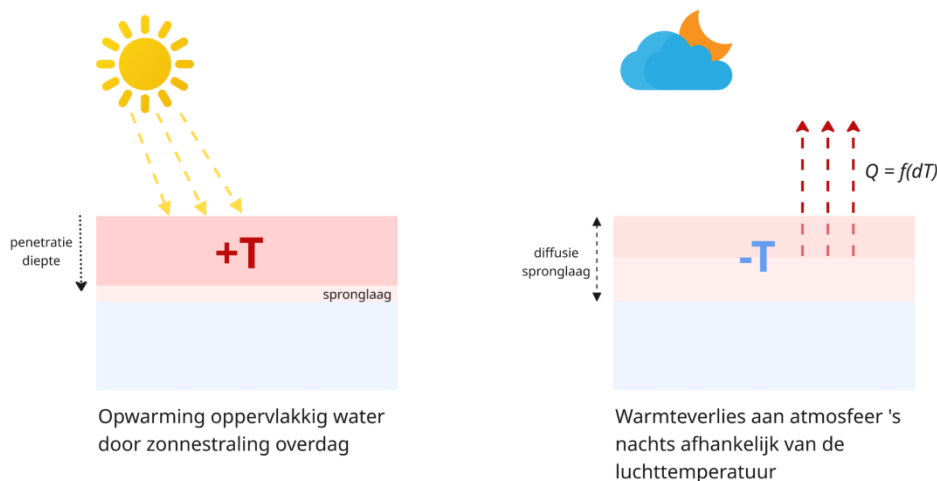
Temperatuurstratificatie ontstaat telkens wanneer het oppervlakkige water significant opwarmt ten opzichte van de diepere waterlagen. Er ontstaat dan een spronglaag die sterk genoeg kan zijn om de menging van het water te beperken. Op de meeste dagen treedt er enige vorm van temperatuurstratificatie op in de middag en avond naarmate het oppervlakkige water door zonnestraling overdag opwarmt. Hoe zonniger het weer, hoe groter dit effect.

Onder normale omstandigheden verdwijnt deze lichte stratificatie weer tijdens de nacht en de ochtend, wanneer zonnestraling afwezig is en het water warmte afgeeft aan de atmosfeer. De snelheid waarmee deze afkoeling plaatsvindt is vooral afhankelijk van het temperatuurverschil tussen het water en de atmosfeer.

Wanneer het oppervlakkige water overdag in grotere mate opwarmt dan dat het gedurende de nacht afkoelt, is er sprake van netto opwarming. Zo lang er geen sprake is van grote menging vindt deze opwarming ongelijkmatig door de waterkolom plaats.

De ondiepe temperatuurgradiënt die overdag ontstaat verdwijnt dan niet (volledig) tijdens de nacht. Wanneer dit meerdere dagen achter elkaar het geval is bouwt dit effect op, waarbij er zich een steeds sterker wordende spronglaag ontwikkelt die in toenemende mate de menging van het water verhindert.

Hoge zonnestraling op zichzelf is dus niet voldoende om tot blijvende stratificatie te leiden. Er zijn meerdere perioden waargenomen waarin dagen met een zonnestralingspiek groter dan 250 W/cm^2 niet tot opbouw van stratificatie leidde zolang de luchttemperatuur gematigd bleef. Het opbouwen van stratificatie is dus het gevolg van een grote opwarming van het oppervlakkige water overdag door een hoge zonnestraling in combinatie met een beperkte afkoeling 's nachts door een hoge luchttemperatuur, en een beperkte menging door de wind. Uit het testen van de hypothesen bleek dat dit in de zomer van 2024 op de meetlocatie bijna altijd het geval was op dagen met een instralingspiek groter dan 250 W/cm^2 , een maximum gemeten luchttemperatuur groter dan 25 graden Celsius, en windsnelheden kleiner dan 8 m/s.



Figuur 11: Opwarming van het oppervlakkige water door hoge zonnestraling versus afkoeling 's nachts door afgifte van warmte aan de atmosfeer, afhankelijk van de luchttemperatuur. De balans hiertussen bepaalt de ontwikkeling van temperatuurstratificatie.

4.4.3. Het ontstaan van zuurstoftekorten

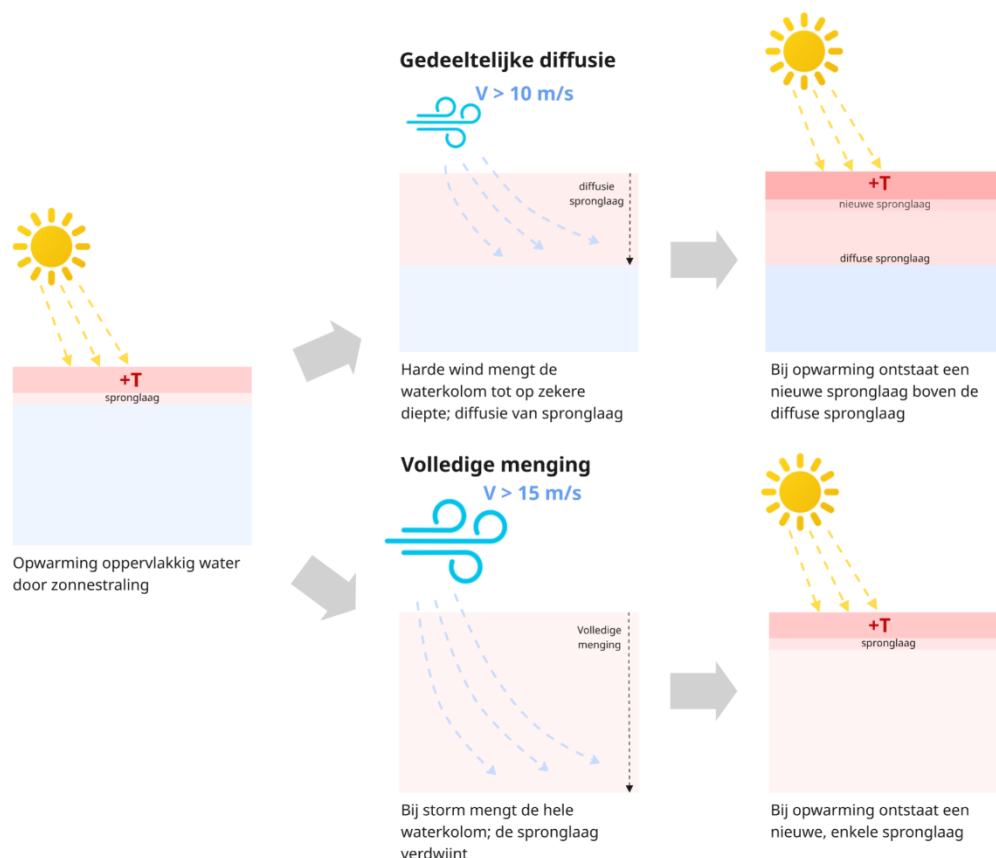
Daling van zuurstofconcentraties vindt plaats in alle delen van het water die zich onder een spronglaag bevinden, waarbij ze met relatief constante snelheid dalen. Als de daling lang genoeg aanhoudt kunnen zuurstofarmoede en zuurstofloosheid ontstaan. Dat gebeurt als eerste in de diepste delen. Op basis van de zomer van 2024, op de meetlocatie, kunnen de volgende algemene patronen worden gesteld. Zuurstofarmoede ($< 4 \text{ mg/L}$) ontstaat doorgaans in de diepere delen binnen 3 tot 7 dagen na het ontstaan van sterke stratificatie (> 2 graden Celsius temperatuurverschil door de hele waterkolom). Zuurstofloosheid ($< 2 \text{ mg/L}$) ontstaat doorgaans na één tot twee weken van aanhoudende sterke stratificatie (> 2 graden Celsius temperatuurverschil door de hele waterkolom). Dit is echter sterk afhankelijk van de diepte. In de diepe delen (~ 8 meter diepte) komt zuurstofarmoede al na enkele dagen voor. Herintroductie van zuurstof door variatie in de spronglaagdiepte komt hier nauwelijks voor. In het middenbereik (~ 6 meter diepte) ontstaat zuurstofarmoede doorgaans na 4 tot 5 dagen, maar hierin zit grotere variatie doordat er tijdens tijdelijke mengingsevents af en toe wat zuurstof tot deze diepte wordt getransporteerd. In de bovenste delen (< 4 meter diepte) treedt zuurstofarmoede veel minder vaak en veel later op doordat dit bereik onderhevig is aan grote variatie

door herintroductie van zuurstof tijdens mengingsevents. Alleen bij zeer sterke ondiepe spronglagen raakt dit bereik lang genoeg geïsoleerd om tot zuurstofarmoede te leiden, maar die is dan vaak van korte duur. Zuurstofschommelingen binnen een periode van aanhoudende stratificatie worden vooral veroorzaakt door variatie in de spronglaagdiepte. Die variatie wordt bepaald door de wisselwerking tussen de stratificerende krachten van de temperatuurverschillen en de mengende kracht door de wind. Wanneer de stratificerende kracht groter is stijgt het zwaartepunt van de spronglaag en wordt deze sterker; wanneer de mengende kracht groter is daalt het zwaartepunt van de spronglaag en wordt deze zwakker.

4.4.4. *Het verdwijnen en afbouwen van stratificatie*

Temperatuurstratificatie verdwijnt vrijwel altijd bij storm of bij stormachtig weer met windsnelheden groter dan 15 m/s, ongeacht de andere weersomstandigheden. Er ontstaat dan menging die groot genoeg is om alle spronglagen te doorbreken en om de temperatuur door de hele waterkolom te homogeniseren. De zuurstofconcentraties herstellen dan vrijwel direct met de menging.

Op dagen met windsnelheden groter dan 10 m/s. maar kleiner dan 15 m/s ontstaat vrijwel altijd diffusie van de (bovenste) spronglaag, waarbij deze zwakker wordt en tot op grotere diepte uitgespreid raakt. Zuurstof wordt dan tot op grotere diepte getransporteerd, wat tot tijdelijk en beperkt herstel op gematigde diepte kan leiden. In veel gevallen is deze windsnelheid onvoldoende om voor volledige menging te zorgen. De kans dat dat wel gebeurt is groter als er ook sprake is een lage zonnestraling ($< 250 \text{ W/cm}^2$), maximumtemperaturen onder de 25 graden Celsius, en wanneer deze sterkere wind voor meerdere dagen aanhoudt.



Figuur 22: Illustratie van de verschillende vormen van menging en hun mogelijke effecten.

De mate van vermenging door de wind bepaalt hoe de stratificatie zich na het mengingsevent ontwikkelt (figuur 22). Wanneer er een nieuwe spronglaag wordt gevormd na het optreden van gedeeltelijke diffusie kunnen er meerdere spronglagen ontstaan. Bij volledige menging door een storm daarentegen raakt de hele waterkolom gehomogeniseerd. Wanneer er daarna een nieuwe spronglaag ontstaat, ontstaat deze als het ware op een 'blanco vel'.

Temperatuurstratificatie kan in gevallen ook verdwijnen zonder krachtige wind, wanneer er sprake is van een lange periode van lage zonnestraling en een lage luchttemperatuur, zodanig dat het water over een periode van meer dan een week afkoelt. Het verdwijnen van temperatuurstratificatie op deze manier komt vooral voor tegen het einde van de zomer en in het najaar, na de jaarlijkse piek voor de watertemperatuur, en niet tot nauwelijks in het begin of in het midden van de zomer, wanneer de watertemperatuur in een op de lange termijn stijgende trend zit.

4.4.5. *Variabelen met onbewezen invloed*

Voor de windrichting en de hoeveelheid gevallen neerslag geldt dat deze wel zijn onderzocht, maar dat voor deze variabelen op basis van de gegevens geen degelijke uitspraak gedaan kon worden over hun invloed op het ontstaan of verdwijnen van temperatuurstratificatie. Vrijwel alle dagen met matige tot flinke neerslag (> 4 mm/uur) vielen samen met verhoogde windsnelheden of een lage zonnestraling (veel bewolking). Voor de windrichting geldt dat alle wind die een snelheid had groter dan 10 m/s uit zuid- tot noordwestelijke richting kwam, en dat wind uit oostelijke richting nooit een snelheid groter dan 5 m/s had. Het is dus lastig een uitspraak te doen over het effect van de neerslag en de windrichting omdat deze in bijna alle gevallen samenvielen met andere omstandigheden die wel op zichzelf aan het ontstaan of verdwijnen van temperatuurstratificatie gekoppeld konden worden.

4.4.6. *Drempelwaarden*

Hieronder, in figuur 23, zijn de drempelwaarden uit het concluderend model op een rij gezet. Deze dienen geïnterpreteerd te worden als: het genoemde fenomeen trad bijna altijd op onder de genoemde omstandigheden gedurende de zomer van 2024 op de meetlocatie.

Meerdaagse stratificatie ontstaat bij:	 > 250 W/cm ²  > 25 °C  < 8 m/s
Gedeeltelijke diffusie:	 10-15 m/s
Volledige menging:	 > 15 m/s
Zuurstofarmoede treedt op na	-4m: incidenteel zuurstofarm -6m: 4-5 dagen (grote variatie) -8m: 1-4 dagen (weinig variatie)
Compleet zuurstofloos bij bodem:	na 7 tot 14 dagen

Figuur 23: Overzicht van de drempelwaarden genoemd in het concluderend model.

5 Discussie

5.1. Sterke punten

De grootste methodologische kracht van dit onderzoek zit in twee punten: de hoge resoluties in tijd en diepte waarop de gegevens zijn geanalyseerd, en de combinatie van meerdere parameters van verschillende bronnen om tot een integrale beschrijving te komen van wat er in de zomer van 2024 in het Veerse Meer plaatsvond.

5.1.1. *Hoge meetresolutie*

Het gebruik van metingen met een hoge resolutie maakt dat ook kortstondige en tijdelijke gebeurtenissen en fijnmazige temperatuurgradiënten en waterbewegingen in beeld worden gebracht. Dat heeft in dit onderzoek meerdere malen tot nieuwe inzichten geleid, zoals het voorkomen van meerdere gelijktijdige spronglagen en de implicaties die dat heeft op de complexiteit van de zuurstofhuishouding, of het bestaan van tijdelijke, dagelijkse spronglagen. Een groot deel van de observaties, zoals de snelle reactie van de zuurstofconcentraties op vluchtige veranderingen in de opbouw van de temperatuurgradiënt, konden enkel gedaan worden dankzij de meetfrequentie van 10 minuten. Een dergelijke monitoring van stratificatie en zuurstof in ondiepe watersystemen met deze resolutie is niet of nauwelijks eerder beschreven.

5.1.2. *Integrale benadering*

Door watertemperaturen, zuurstofconcentraties, temperatuurgradiënten, stromingsdata, en historische gegevens van weerstations bij elkaar te brengen kon er een integraal beeld worden geschetst van de dynamiek rond de locatie in het Veerse Meer dat wordt benaderd als een complex systeem dat wordt gestuurd door een wisselwerking tussen meerdere factoren. Zo beschreef de temperatuurgradiënt waar de spronglagen liggen, de stromingsdata hoe de dynamiek verschilt aan beide zijden van de spronglaag, de temperatuur- en zuurstofmetingen wat de gevolgen daarvan zijn, en de weergegevens hoe dat heeft kunnen ontstaan. Samen gaf dat een goed beeld van wat er heeft plaatsgevonden: bij het ontbreken van één van deze databronnen was het beeld minder compleet geweest. Een dergelijke integrale benadering geeft gehoor aan de vraag naar 'whole-system' monitoring bij het onderzoeken van complexe watersystemen (Woolway et al., 2014). Ook het meenemen van de gegevens van de vaste meetpaal VM5 betaalde zich uit, zowel ter validatie van de gegevens van de meetboei, als ter aanvulling op de gegevens. Met name de sensor van de meetpaal op -0.95m diepte is een zeer waardevolle toevoeging geweest voor dit onderzoek: door deze sensor met de sensors van de meetboei te combineren konden toch uitspraken gedaan worden over temperatuurverschillen en -gradiënten in het ondiepe deel van de waterkolom wat buiten het bereik van de meetboei viel.

5.1.3. *Praktische toepasbaarheid*

De analyses zijn omgezet in een concluderend model: een beheerdersperspectief voor het optreden van zuurstofloosheid. Daardoor is er een bruikbaar instrument geleverd met een scala aan toepassingsmogelijkheden. Met name kan dit model gebruikt worden om zuurstofloosheid te voorspellen of te duiden. Dat kan in de toekomst, waarbij het model kan helpen om met een beperktere set informatie die makkelijker te verkrijgen is, zoals enkel temperatuur- of weersgegevens, toch wat te kunnen zeggen over het optreden van zuurstofloosheid en stratificatie. Dit kan ook gedaan worden voor momenten in het verleden waarvoor slechts beperkte gegevens

beschikbaar zijn, zoals de zomers van 2019 en 2020 waarin grote vissterfte is waargenomen. Mogelijk kan het toepassen van het model uit dit onderzoek op de weergegevens van destijds nieuwe duiding geven aan wat er die zomer heeft plaatsgevonden. Ook kan worden gekeken in hoeverre het model toepasbaar is op andere locaties in het Veerse Meer door de modelverwachting op basis van temperatuurmetingen uit de meetpalen en de TSO te vergelijken met de daadwerkelijk waargenomen zuurstofconcentraties tijdens de TSO-metingen.

5.2. Beperkingen en onzekerheden

De aanpak die bij dit onderzoek is gehanteerd leiden tot enkele onzekerheden in de daaruit volgende observaties en conclusies.

5.2.1. *Ruimtelijke variatie*

De monitoring gebruikt in dit onderzoek beperkt zich tot een bassin in het westelijke deel van het Veerse Meer, rondom de meetpaal VM5. De grootste keerzijde hiervan is dat mogelijke ruimtelijke heterogeniteit in de onderzochte fenomenen niet in beeld is gebracht, en niet in de conclusies uit de observaties is meegenomen. Daardoor blijft het onzeker in welke mate de conclusies van dit onderzoek ook gelden voor andere locaties in het Veerse Meer. Het is bekend dat de dynamiek rond stratificatie en zuurstofloosheid aanzienlijk kan variëren met verschillen in bathymetrie, blootstelling aan de wind, en de aanwezigheid van wateruitwisseling (Read et al., 2011). Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat een zelfde onderzoek als dit uitgevoerd in het oostelijke deel van het Veerse Meer, wellicht door invloed van de wateruitwisseling via de Katse Heule, tot andere observaties leidt. Gezien de verschillen tussen verschillende delen van het Veerse Meer zoals beschreven in de Systeemanalyse Veerse Meer (Prins et al., 2024) is het aannemelijk dat dit het geval is. Een andere keerzijde van de focus op één locatie is dat de invloed van bredere ruimtelijke processen niet kon worden meegenomen. Kranenburg et al. (2023) beschrijft bijvoorbeeld het optreden van scheefstand van de spronglaag als gevolg van windforcering. Aan de hand van de gegevens op één locatie is geen zicht op wanneer er sprake was van zulke scheefstand, en waar in die kanteling de meetlocatie zich bevond. Het is niet ondenkbaar dat variaties in de spronglaag in dit onderzoek zijn toegeschreven aan directe meteorologische invloed, terwijl het ook zo had kunnen zijn dat deze (deels) werden gedreven door processen zoals scheefstand. Dat betekent niet dat de observaties die geen rekening houden met scheefstand per definitie onbetrouwbaar zijn: scheefstand is op zijn beurt immers een gevolg van hoge windsnelheden. Maar nuances in de dynamiek van de waterkolom veroorzaakt door spronglaagkanteling blijven mogelijk buiten beschouwing.

5.2.2. *Blootstelling aan de wind*

Het gebruik van twee verschillende weerstations die beide op enkele kilometers afstand van de meetlocatie lagen, en op nog grotere afstand van elkaar lagen, introduceert een onzekerheid bij het gebruiken van deze meteo-observaties als proxy voor de weersomstandigheden op de meetlocatie. Deze observaties kunnen namelijk verschillen van die op de meetlocatie door het voorkomen van lokale verschillen (Woolway et al., 2014). Dit is met name het geval voor de wind, aangezien deze door de fysieke geografie zoals bomen, bebouwing, of dijken, al flinke lokale variatie kent. Het blijft daarom onzeker in hoeverre de gemeten windsnelheden overeenkomen met de windkrachten die daadwerkelijk op het wateroppervlak zijn uitgeoefend. Het is aannemelijk dat deze discrepantie verschilt met de omstandigheden: bij wind in de lengterichting van het Veerse Meer zal de windsnelheid op het meer waarschijnlijk eerder overeenkomen met de windsnelheid bij het meetstation Oosterschelde 4 dan bij wind in de breedterichting van het meer. Voor de andere meteo-variabelen is een kleiner ruimtelijk verschil aannemelijk.

5.2.3. *Zuurstofconsumptie en -productie*

In dit onderzoek is de aanname gedaan dat de afname van zuurstof onder de spronglaag, wanneer het transport van zuurstof naar de diepe lagen door temperatuurstratificatie verhinderd wordt, toe te schrijven is aan zuurstofconsumptie bij afbraakprocessen in of bij de bodem. De zuurstofvraag van de bodem is daarbij als constant beschouwd. Er zijn geen metingen gedaan om inzicht te verkrijgen in de zuurstofvraag van de bodem. Chlorofyl-*a* metingen van de meetboei zijn wel geanalyseerd, maar gaven geen goed inzicht in productie- of afbraakprocessen. De relatieve bijdrage van biologische processen bij het ontstaan van de zuurstofloosheid in de meetperiode is daarom onderbelicht. Het is bekend dat respiratiepieken in de nacht en algenbloei voor korte-termijn variabiliteit in de zuurstofbeschikbaarheid kunnen zorgen (Foley et al., 2012), maar op basis van de beschikbare gegevens kan niet worden bepaald welke variaties binnen de meetperiode aan deze processen kunnen worden toegeschreven. De invloed van variaties in de zuurstofvraag van de bodem en de zuurstofproductie in het water blijven daarmee onzeker.

5.2.4. *Zonlichtpenetratie*

De turbiditeit van het water is weliswaar gemeten middels de meetboei, maar er is geen expliciete analyse geweest naar de rol van de turbiditeit bij de diepte tot waar opwarming van het water door de zon plaatsvindt. De penetratie van zonne-energie is bepalend voor de diepte waarop een temperatuurgradiënt ontstaat, en in relatief ondiepe, eutrofe systemen zoals het Veerse Meer kunnen algen en sedimentsuspensie de penetratie van zonne-energie beperken (Zhou et al., 2015). De mate waarin dit heeft bijgedragen aan de waargenomen variaties in de meetperiode blijft onzeker.

5.3. **Vergelijking met bestaande kennis**

Ondanks het bestaan van de beschreven beperkingen en onzekerheden vinden de resultaten van dit onderzoek een grote mate van bevestiging in de bestaande literatuur rondom het onderwerp. De analyse van de hoge-resolutie metingen in het Veerse Meer duidt op een dynamische wisselwerking tussen temperatuurstratificatie en zuurstofconcentraties, en ondersteunt grotendeels processen die eerder in de limnologische literatuur zijn omschreven (Imberger & Patterson, 1990; Wetzel, 2001). De meetgegevens bevestigen dat temperatuurstratificatie het dominante mechanisme is dat verantwoordelijk is voor het isoleren van diepere waterlagen en het daaropvolgende geleidelijk ontstaan van zuurstofloosheid in die lagen. Dit proces is uitgebreid beschreven voor zowel diepe als ondiepe wateren (Diaz & Rosenberg, 2008; Foley et al., 2012).

Het optreden van stratificatie in het Veerse Meer bleek sterk verwant aan de meteorologische omstandigheden, met name met het tegelijkertijd voorkomen van hoge zonnestraling, hoge luchttemperaturen, en lage windsnelheden. Deze observatie komt overeen met bestaande onderzoeken, die laten zien dat het ontstaan en het handhaven van stratificatie in ondiepe wateren voornamelijk wordt bepaald door de balans tussen zonnestraling en door wind gedreven menging (Read et al., 2011; Woolway et al., 2014). De observatie dat sterke temperatuurgradiënten zich snel ontwikkelen na meerdere aaneengesloten warme dagen met kalme wind, en dat ze afbreken bij krachtige wind, komt overeen met het klassieke conceptuele model voor de stratificatie van een meer (Imberger & Patterson, 1990).

5.3.1. *Ontwikkeling van zuurstofloosheid*

De ontwikkeling van zuurstofloosheid, die begint in de diepste lagen en na verloop van tijd, onder aanhoudende stratificatie, op steeds geringere diepte optreedt, zoals waargenomen tijdens de meetperiode in het Veerse Meer, komt overeen met omschrijvingen van zuurstofloosheid volgens andere literatuur (Wetzel, 2001); Diaz

& Rosenberg, 2008). Dit waargenomen patroon reflecteert bovendien de beschrijving van Imberger & Patterson (1990), van hoe watervolumes bij aanhoudende stratificatie in toenemende mate geïsoleerd raken van zuurstof uit de atmosfeer, als gevolg van de spronglaag die een fysieke barrière vormt die verticale menging beperkt.

Het herstel van zuurstofconcentraties ten gevolge van vergrote menging bleek ook variërend met de diepte: zuurstofconcentraties vertoonden eerst herstel in de ondiepe lagen, daarna langzamer met de diepte. Bovendien toonden de geringe dieptes beduidend vaker herstel terwijl er van herstel op grotere diepe geen sprake was. De plots van de temperatuurgradiënt toonden dat dit werd veroorzaakt door het vaak voorkomen van onvolledige menging waarbij de spronglaag ten gevolge van verhoogde wind slechts tot op beperkte diepte vermengde. Zulke onvolledige menging is ook eerder omschreven (Foley et al., 2012), maar door de hoge meetfrequentie van de metingen in het Veerse Meer kwamen kortstondige fluctuaties aan het licht, met name in het midden-bereik van de waterkolom, die vaak niet vertegenwoordigd zijn in eerdere monitoring waarbij een grovere tijds- of dieptefrequentie werd gehanteerd.

5.3.2. *Het bestaan van meerdere spronglagen*

Een belangrijke observatie uit de metingen in het Veerse Meer is het optreden van stratificatie waarbij meerdere spronglagen gelijktijdig bestaan tijdens perioden van zeer hoge opwarming van het water. Zulke complexiteit is minder vaak omschreven in de literatuur, maar is wel waargenomen in andere ondiepe of morfologisch complexe watersystemen (Monismith & MacIntyre, 2009). Het ontstaan van een nieuwe spronglaag boven een reeds bestaande spronglaag ging gepaard met karakteristieke zuurstofpatronen. Daarbij vond er eerst een tijdelijk herstel van zuurstofconcentraties plaats gevolgd door een geleidelijke uitputting na het vormen van de tweede spronglaag.

De observatie van deze dynamiek beantwoordt de aansporingen in relatief recente literatuur tot monitoring met hogere tijd- en diepteresoluties om de meer kortstondige en complexere dynamiek te vatten (Read et al., 2011; Monismith & MacIntyre, 2009).

5.3.3. *Het ontstaan van menging*

De observaties uit de meetgegevens tonen de centrale rol van de weersomstandigheden bij de dynamiek rond stratificatie en zuurstof. Hoge zonnestraling en luchttemperaturen leiden tot opwarming van het oppervlakkige water, wat leidt tot temperatuurstratificatie, terwijl harde wind tot menging en verspreiding van zuurstof leidt. De literatuur bevestigt deze bevindingen, namelijk dat het plaatsvinden en de duur van stratificatie sterk afhankelijk is van de luchttemperatuur en windsnelheid (Woolway et al., 2014), terwijl relatief ondiepe meren als het Veerse Meer in het bijzonder gevoelig zijn voor meteorologische fluctuaties op de korte termijn (Read et al., 2011).

Het effect van regenval op stratificatie en menging is zowel in de observaties als in de literatuur minder duidelijk. Hoewel zware regenval tot menging en tot enige erosie van de spronglaag kan leiden, is de invloed daarvan sterk afhankelijk van de context en vaak ondergeschikt aan de invloed van de wind (Monismith & MacIntyre, 2009). Zowel de literatuur als de observaties omschrijven dat grote neerslag vaak samengaat met sterkere wind en bewolking.

6 Conclusie

In dit onderzoek is aan de hand van hoogfrequente en hoge-resolutie meetgegevens onderzocht hoe temperatuurstratificatie en meteorologische factoren de zuurstofdynamiek in het westelijke deel van het Veerse Meer beïnvloeden. De centrale onderzoeksvraag richtte zich op de omstandigheden waaronder stratificatie ontstaat, zich opbouwt, of verdwijnt, en hoe dit leidt tot het optreden van zuurstofgebrek.

Uit de analyses blijkt dat stratificatie in het Veerse Meer vaak optreedt zodra gedurende meerdere aaneengesloten dagen hoge zonnestraling ($> 250 \text{ J/cm}^2/\text{uur}$), hoge luchttemperaturen (> 25 graden Celsius), en lage windsnelheden samenvallen. Onder die omstandigheden warmt het bovenste deel van het water over meerdere dagen opbouwend op, terwijl het diepere water koeler blijft. Daardoor ontstaat er bovenin de waterkolom een sterke spronglaag met een grote temperatuurgradiënt die de verticale menging door het water beperkt. Waterdelen onder die spronglaag raken dan geïsoleerd van zuurstoftoevoer. Hoe langer deze meteorologische condities blijven bestaan, hoe sterker en stabielere de spronglagen worden. Ook kunnen variaties binnen een periode met voor stratificatie gunstige condities leiden tot een complexere opbouw van de waterkolom: in een aantal gevallen werden daarbij meerdere gelijktijdige spronglagen waargenomen.

De gevolgen van de temperatuurstratificatie voor de zuurstofhuishouding zijn duidelijk aanwezig en zijn sterk afhankelijk van de opbouw van de stratificatie gebleken: zodra waterdelen zich onder een spronglaag bevinden dalen de zuurstofconcentraties daar vrijwel direct, terwijl waterdelen boven de (bovenste) spronglaag onmiddellijk herstel vertoonden. Ook bij korte fluctuaties was dat het geval. In perioden met sterke stratificatie trad al na drie tot zeven dagen zuurstofarmoede op in de diepste delen van het meer. Bij verdere voortzetting van de stratificatie ontwikkelde zich daar binnen een tot twee weken volledige zuurstofloosheid. De zuurstofuitputting breidde zich vervolgens uit naar hogere waterdelen, waarbij de afwezigheid van menging bepalend bleek.

De wind bleek de grootste drijfveer voor het beëindigen van sterke stratificatie. In perioden waarin de windsnelheid opliep tot 10 m/s trad in veel gevallen diffusie van de spronglaag op, terwijl er boven de 15 m/s meestal sprake was van volledige menging. In het laatste geval verdween de spronglaag en stegen de zuurstofconcentraties op alle dieptes snel tot normale niveaus.

De algemene hypothese heeft in grote mate bevestiging gevonden in de resultaten van dit onderzoek. De analyse bevestigt dat zuurstoftekort in grote mate ontstaat als een gevolg van temperatuurstratificatie, dat de opbouw van die stratificatie en de diepte van de spronglaag bepalend zijn voor de diepte waarop zuurstoftekort en variatie ontstaan, en dat vooral de duur van de stratificatie bepalend is voor de mate waarin zuurstofarmoede of zuurstofloosheid ontstaan. Ook is bevestigd dat het doorbreken van stratificatie vooral gestuurd wordt door de wind en dat herstel van zuurstofconcentraties daarop volgt. Op veel punten biedt dit onderzoek een uitbreiding of specificatie op de algemene hypothese. Zo biedt het onder andere inzicht in wanneer wind wel en wanneer niet tot het (volledig) doorbreken van stratificatie leidt, en onder welke omstandigheden temperatuurstratificatie ontstaat in de zomermaanden.

De onderzoeksvragen kunnen samenvattend als volgt worden beantwoordt:

1. Hoe varieerden de zuurstofconcentraties in het Veerse Meer gedurende de meetperiode en welke patronen zijn hierin te onderscheiden?

Binnen de meetperiode zijn duidelijk perioden te onderscheiden waarin sprake was van dalende zuurstofconcentraties. Deze vielen bijna altijd samen met het bestaan van temperatuurstratificatie. Zuurstofarmoede trad op meerdere momenten op wanneer de stratificatie voor meerdere dagen aanhield. Volledige zuurstofloosheid kwam vooral voor op grotere diepte (-8 meter), maar kwam in juli en augustus ook in hogere delen voor. Op -4 en -6 meter diepte was aanzienlijke variatie aanwezig, op -8 meter veel minder.

2. Hoe ontstond en ontwikkelde temperatuurstratificatie zich in het Veerse Meer gedurende de meetperiode en hoe verhoudt dat zich tot de gemeten zuurstofconcentraties?

Binnen de meetperiode zijn er meerdere onderscheidbare perioden geweest met sterke temperatuurstratificatie die samenvielen met zuurstofuitputting. Op de meeste dagen ontstond er enige vorm van stratificatie in de middag, maar onder normale omstandigheden verdween deze weer in de nacht. Wanneer die dagelijkse stratificatie 's nachts niet of minder verdween, bouwde de stratificatie zich over de dagen op. Er ontstond dan een blijvende spronglaag waaronder de zuurstofconcentraties daalden. In juli en augustus ontstond stratificatie die zodanig lang aanhield dat er een complexe waterkolomstructuur ontstond die onderhevig was aan aanzienlijke variaties. Daarbij bestonden er op momenten ook meerdere spronglagen tegelijk. De diepte van de spronglaag bleek bepalend voor de bewegingsrichting en de mate van variatie van de zuurstofconcentraties.

3. Hoe kunnen de waargenomen weersomstandigheden het ontstaan, het aanhouden, en het verdwijnen van stratificatie en zuurstofloosheid tijdens de meetperiode verklaren?

De zonnestraling, de luchttemperatuur, en de windsnelheid bleken bepalend voor het ontstaan van temperatuurstratificatie. Onder invloed van zonnestraling ontstaat een temperatuurgradiënt in het ondiepe water. Door afkoeling van het water 's nachts kan deze verdwijnen, maar bij een hoge luchttemperatuur gebeurt dat in mindere mate. Bij de combinatie van een hoge zonnestraling, een hoge luchttemperatuur, en weinig wind, kan stratificatie zich over meerdere dagen opbouwen. De windsnelheid bleek bepalend voor het doorbreken van temperatuurstratificatie. Bij hardere wind vindt diffusie van de spronglaag plaats tot op zekere diepte, waarbij zuurstof tot diezelfde diepte wordt getransporteerd. Bij stormachtige wind vindt menging plaats die voldoende is om de hele waterkolom te mengen en de stratificatie te beëindigen, waarbij de zuurstofconcentraties snel herstellen. De invloed van neerslag en de windrichting bleken moeilijk te isoleren. Er kan daarom geen degelijke uitspraak worden gedaan over het effect van deze variabelen.

4. Welke verbanden kunnen worden afgeleid uit de metingen en hoe kunnen deze vertaald worden naar een toepasbaar beheerdersperspectief?

De analyse heeft geleid tot een concluderend model met concrete grenswaarden (zie hoofdstuk 4.4). Dit geeft een duidelijk beeld van welke omstandigheden in de zomer van 2024 op de meetlocatie bijna altijd leidden tot het ontstaan, dan wel het doorbreken van temperatuurstratificatie, en in welk tijdsbestek het ontstaan van temperatuurstratificatie leidde tot het

optreden van zuurstoftekorten. Dit model maakt het mogelijk een inschatting te maken van het risico op zuurstofloosheid aan de hand van enkel meteorologische factoren, eventueel aangevuld met temperatuurmetingen zoals de TSO. Het is daarmee een instrument dat mogelijk ingezet kan worden bij het duiden van zuurstoftekorten in voorgaande of toekomstige jaren, waarvoor geen uitgebreide meetgegevens beschikbaar zijn.

Hoewel het onderzoek is uitgevoerd op één locatie in het Veerse Meer en beperkt is tot één zomerseizoen, geven de resultaten een consistent beeld van de processen die zich voordoen, die ook in lijn zijn met bestaande kennis over het systeem. Dankzij de hoge resolutie in tijd en diepte was het mogelijk om kortdurende en complexe dynamiek in kaart te brengen die voorheen onopgemerkt bleef. In die detaillering schuilt de toegevoegde waarde van dit onderzoek.

7

Referenties

- Brookings, M. (2018). Lake Stratification (11) [Online image]. In Wikimedia.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lake_Stratification_\(11\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lake_Stratification_(11).svg)
- Craeymeersch, J., & de Vries, I. (2007). Waterkwaliteit en ecologie Veerse Meer: het tij is gekeerd. In DeltaExpertise. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee. https://deltaexpertise.nl/images/6/68/RIKZ_2007-008.pdf
- DeltaExpertise. (2015). VM Ontstaan van zuurstofloze diepere delen VN - DeltaExpertise. Deltaexpertise.nl.
https://www.deltaexpertise.nl/wiki/index.php/VM_Ontstaan_van_zuurstofloze_diepere_delen_VN
- Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- Fischer, H. (1972). Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries. *Journal of Fluid Mechanics*, 53(4), 671–687. <https://doi.org/10.1017/s0022112072000412>
- Fischer, H. B. (2008). Mixing in inland and coastal waters. Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/mixing-in-inland-and-coastal-waters/fischer/978-0-08-051177-1>
- Foley, J. A., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Mueller, N. D. (2012). Erratum: Corrigendum: Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 494(7437), 390–390. <https://doi.org/10.1038/nature11907>
- Hansen, D. V., & Rattray, M. (1966). Gravitational Circulation in Straits and Estuaries. Technical report no. 166. In ResearchWorks. Department of Oceanography, University of Washington. <http://hdl.handle.net/1773/16068>
- Heaps, N. S., & Ramsbottom, A. E. (1966). Wind Effects on the Water in a Narrow Two-Layered Lake. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 259(1102), 391–430. <http://www.jstor.org/stable/73278>
- Imberger, J., & Parker, G. (1985). Mixed layer dynamics in a lake exposed to a spatially variable wind field1. *Limnology and Oceanography*, 30(3), 473–488. <https://doi.org/10.4319/lo.1985.30.3.0473>
- Kranenburg, W., Tiessen, M., Meinte Blaas, & Van, N. P. (2023). Circulation, stratification and salt dispersion in a former estuary after reintroducing seawater inflow. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 282, 108221–108221. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108221>
- Lievense, P. (2004). Stratificatie in het Veerse Meer in de jaren 1995-2003 [Memo aan Rijksinstituut voor Kust & Zee]. https://www.deltaexpertise.nl/images/7/78/Lievense_2004_memo_ZLMID_04.001.pdf
- McDougall, T.J. and P.M. Barker, 2011: Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox, 28pp., SCOR/IAPSO WG127, ISBN 978-0-646-55621-5.
- Monismith, S. G. (1985). Wind-forced motions in stratified lakes and their effect on mixed-layer shear. *Limnology and Oceanography*, 30(4), 771–783. <https://doi.org/10.4319/lo.1985.30.4.0771>
- Monismith, S. G., & MacIntyre, S. (2009). The Surface Mixed Layer in Lakes and Reservoirs. Elsevier EBooks, 636–650. <https://doi.org/10.1016/b978-012370626-3.00078-8>
- Münnich, M., Wüest, A., & Imboden, D. M. (1992). Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnology & Oceanography*, 37(8), 1705–1719. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1705>

Nijhof, B. S. J., Bethe, F. H., van Elderen, B., Goossens, C. M., Hermans, A. G. M., Koomen, A. J. M., Leopold, R., Querner, E. P., & Vervloet, J. A. J. (2002). Landschapswaarden Veerse Meer; een inventarisatie, analyse & integratie. Alterra. <https://edepot.wur.nl/40348>

Obenour, D. R., Michalak, A. M., Zhou, Y., & Scavia, D. (2012). Quantifying the impacts of stratification and nutrient loading on hypoxia in the northern Gulf of Mexico. *Environmental science & technology*, 46(10), 5489–5496. <https://doi.org/10.1021/es204481a>

Peilbesluit Veerse Meer, (2007). https://iplo.nl/publish/pages/138359/peilbesluit_veerse_meer_tcm21-26646.pdf

Prins, T., Buckman, L., & Nolte, A. (2021). Systeemanalyse en werkplan waterkwaliteitsmodel Veerse Meer. In Rijkswaterstaat Publicatie Platform. Deltares. https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/151729/systeemanalyse_en_werkplan_waterkwaliteitsmodel_veerse_meer.pdf

Prins, T., Nolte, A., Buckman, L., & Stolte, W. (2023). Systeemanalyse Veerse Meer. In Rijkswaterstaat Publicatie Platform. Deltares. https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/183660/11208079-000-zks-0009_v1-0-systeemanalyse_veerse_meer.pdf

Prins, T., Mestdag, S., & Nolte, A. (2024). Geïntegreerd meet- en onderzoeksplan voor Grevelingenmeer en Veerse Meer. In Rijkswaterstaat Publicatie Platform. Deltares. https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/205614/onderzoeksplan_zoute_meren_versie_1-0_finale_versie.pdf

Prins, T., Nolte, A., Couvin Rodriguez, S., van der Heijden, L., & Buckman, L. (2024). Het ecologisch functioneren van het Veerse Meer 2005-2023. In Rijkswaterstaat Publicatie Platform. Deltares. https://open.rijkswaterstaat.nl/publish/pages/194556/11209251-000-zks-0012_v1-0-het_ecologisch_functioneren_van_het_veerse_meer_2005-2023.pdf

Read, J. S., Hamilton, D. P., Jones, I. D., Muraoka, K., Winslow, L. A., Kroiss, R., Wu, C. H., & Gaiser, E. (2011). Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software*, 26(11), 1325–1336. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.006>

Rijkswaterstaat. (2016). Natura 2000 Deltawateren. Beheerplan 2016-2022. Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat. Rijkswaterstaat. https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/3549133/documents/NL1251_mgt211012.pdf

Schellekens, T., & Smaal, A. (2012). BO Zuidwestelijke Delta: Nutriëntdynamiek en verandering van draagkracht. In https://www.deltaxpertise.nl/images/e/e8/BO_Zuidwestelijke_Delta_nutri%C3%ABntendynamiek_en_draagkracht.pdf. Imares Wageningen UR.

Schourup-Kristensen, V., Larsen, J., & Maar, M. (2023). Drivers of hypoxia variability in a shallow and eutrophicated semi-enclosed fjord. *Marine Pollution Bulletin*, 188(2023), 114621–114621. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114621>

Sheng, H., Darby, S. E., Zhao, N., Liu, D., Kettner, A. J., Lu, X., Yang, Y., Gao, J., Zhao, Y., & Wang, Y. P. (2024). Anthropogenic eutrophication and stratification strength control hypoxia in the Yangtze Estuary. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01403-w>

Slager, J. W. (2021). Hoe gaan we verder met het Veerse Meer? Werken aan een robuust watersysteem. Rijkswaterstaat Zee & Delta.

Slinger, J. H. (2024). Water renewal and stratification modelling in small estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 300(108720). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108720>

Slomp, C. P., & van Helmond, N. A. G. M. (2022). Zuurstofloosheid in het Veerse Meer en de rol van het sediment. Universiteit Utrecht, Radboud Universiteit.

Smaal, A.C., and J.W.M. Wijsman. (2015) "Minimum Zuurstofgehalte Voor Bodemdieren in Het Grevelingenmeer. Rapport C022/15." Imares Wageningen UR.

Smucker, N. J., Beaulieu, J. J., Nietch, C. T., & Young, J. L. (2021). Increasingly severe cyanobacterial blooms and deep water hypoxia coincide with warming water temperatures in reservoirs. *Global change biology*, 27(11), 2507–2519. <https://doi.org/10.1111/gcb.15618>

Stevens, C. L., & Lawrence, G. A. (1997). Estimation of wind-forced internal seiche amplitudes in lakes and reservoirs, with data from British Columbia, Canada. *Aquatic Sciences*, 59(2), 115. <https://doi.org/10.1007/s000270050080>

StratiFEst-ival – TKI Delta technologie. (2024). [Tkideltatechnologie.nl](https://tkideltatechnologie.nl); Vereniging van Waterbouwers. <https://tkideltatechnologie.nl/project/stratifest-ival/>

Tangelder, M., Ysebaert, T., Wijsman, J., Janssen, J., Mulder, I., Nolte, A., Stolte, W., van Rooijen, N., van den Boogaart, L., Arts, F., Hoekstein, M., Sluijter, M., van der Jagt, H., & Kaardinaal, E. (2019). Ecologisch onderzoek Getij Grevelingen: Onderzoek naar de historische ontwikkeling van het watersysteem en inschatting van de autonome ontwikkeling vergeleken met getijscenario's en effecten op Natura 2000-soorten en habitats bij gedempt getij. (Wageningen Marine Research rapport; No. C089/19). Wageningen Marine Research. <https://doi.org/10.18174/506617>

Thorpe, S. D. (1977). Turbulence and mixing in a Scottish Loch. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 286(1334), 125–181. <https://doi.org/10.1098/rsta.1977.0112>

Valle-Levinson, A. (2010). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. In Cambridge University Press eBooks. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511676567>

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology* (3rd ed.). Academic Press.

Woolway, R. I., Maberly, S. C., Jones, I. D., & Feuchtmayr, H. (2014). A novel method for estimating the onset of thermal stratification in lakes from surface water measurements. *Water Resources Research*, 50(6), 5131–5140. <https://doi.org/10.1002/2013wr014975>

van de Haterd, R. J. W., Lengkeek, W., Bouma, S., & Collombon, M. T. (2010). Herinstructie getij in de Grevelingen en effecten op natuur in intergetijdgebieden. Rapport nr. 10-079. Bureau Waardenburg.

van der Mast, Roel, and Gertjan Eg. *Stille Dood van Het Veerse Meer: Inventarisatie Zuurstofloosheid 2020–2021*. Nederlandse Onderwatersport Bond, Commissie Deltagebied, 22 Mar. 2021.

van Senden, D. C., & Imboden, D. M. (1989). Internal seiche pumping between sill-separated basins. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 48(1-3), 135–150. <https://doi.org/10.1080/03091928908219530>

Ysebaert, T., de Mesel, I. G., & Herman, P. (2008). Kaderrichtlijn Water - Achtergronddocument Zoute Macrofauna 2008. Wageningen Marine Research. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/imares-reports/372962>

Zhou, J., Wang, L., Zhang, Y., Guo, Y., Li, X., & Liu, W. (2015). Exploring the water storage changes in the largest lake (SelinCo) over the Tibetan Plateau during 2003–2012 from a basin-wide hydrological modeling. *Water Resources Research*, 51(10), 8060–8086. <https://doi.org/10.1002/2014wr015846>

Bijlage A – Detailomschrijving pre-processing

Missende waarden en uitschieters

De verschillende datasets zijn eerst opgeschoond. Voor de gegevens van de meetpaal VM5, de temperatuurmoorings, en de weergegevens geldt dat deze al gecontroleerd en/of gevalideerd werden aangeleverd. Verkenning van deze datareeksen brachten ook geen grote bijzonderheden aan het licht, op enkele ontbrekende waarden voor de meetpaal na. De gegevens van de meetboei zijn gecontroleerd op ontbrekende waarden voor iedere parameter en voor iedere diepte. Daarbij zijn slechts negen metingen aangetroffen die een missende waarde hadden voor de onderste diepte. In de bovenste en middelste diepte werden geen missende waarden aangetroffen. Voor de verdere analyse zijn de missende waarden voor de meetboei en de meetpaal VM5 opgevuld met behulp van forward-filling. De datasets zijn vervolgens gecontroleerd op uitschieters met behulp van de interkwartielafstand (IQR) methode. Een matige hoeveelheid uitschieters waren in alle variabelen en op alle dieptes wel aanwezig, maar gezien de kwalitatieve aard van de analyse is er voor gekozen deze uitschieters te behouden. Ook zijn de gemeten waarden volgens de meetboei en de temperatuurmooring vergeleken met de waarden volgens de meetpaal en de TSO: daarbij zijn geen grote afwijkingen geconstateerd en de waarden voor dezelfde parameter tussen verschillende meetinstrumenten lagen algemeen in lijn met elkaar.

Correcties

De ADCP-gegevens zijn als rauwe gegevens aangeleverd en vereisten daarom wat meer stappen, voornamelijk met betrekking tot het indexeren van de diepte. De dieptewaarden waarvoor de stromingswaarden gemeten zijn waren oorspronkelijk opgeslagen als bins geteld vanaf het apparaat. Met behulp van de metadata zijn deze bins omgezet naar absolute dieptewaarden. Vervolgens zijn de dieptewaarden gecorrigeerd voor fluctuaties in de luchtdruk met behulp van de weergegevens. Ten slotte is met behulp van de luchtdruk het niveau van de waterspiegel bepaald en zijn de dieptereeksen telkens op dat niveau afgesneden. Voor alle andere datasets geldt dat deze niet als rauwe gegevens werden aangeleverd en daarop zijn geen dergelijke correcties toegepast.

Synchronisatie

De gegevens uit de verschillende bronnen zijn gecombineerd tot een enkel dataframe waarin alle variabelen zijn gekoppeld. Alle tijdsaanduidingen van de metingen zijn afgerond op 10 minuten en samengebracht tot een uniforme tijdsindex om datasets van verschillende herkomst met elkaar te kunnen combineren. Voor de datasets die een lagere tijdsresolutie hadden, zoals de meteorologische urengegevens, zijn synthetische tussenstappen ingevoerd om deze ook op te delen in ensembles per tien minuten. Voor de gegevens van de temperatuurmooring is dit omgekeerd toegepast: deze had oorspronkelijk een waarde voor iedere seconde, en deze metingen zijn tot gemiddelde waarden per 10 minuten geaggregeerd. Ook zijn alle waarden voor de variabelen in de verschillende datasets naar uniforme eenheden omgerekend.

Bijlage B – Bevindingen t.a.v. testhypothesen

Tabel 3: Windomstandigheden bij het ontstaan en verdwijnen van de stratificatieperiodes.

Stratificatie periode	Wind bij ontstaan	Wind bij doorbreken
A	-	Matig (6-8 m/s)
B	Zwak (1-5 m/s)	Oplopend: stormachtig naar storm (17-25 m/s)
C	Zwak tot matig (1-8 m/s)	Oplopend: vrij krachtig naar storm (10 -> 23 m/s)
D	Matig (3-8 m/s)	Vrij krachtig (10-12 m/s)
E	Zwak tot matig (2-6 m/s)	Oplopend: zwak naar hard, maar grootste doorbreking bij matig (5-8 m/s).

Tabel 4: Zonnestraling en luchttemperatuur bij het ontstaan van stratificatie.

Bij ontstaan stratificatie			
Stratificatie periode	Max. luchttemperatuur	Zonnestraling	Bijzonderheden
A	-	-	Stratificatie al aanwezig bij start meetperiode.
B	18 – 25 oC	Zonnig (~ 280 J/cm ²)	Snelle opbouw stratificatie na zonnige dagen.
C	Geleidelijk stijgend van 15 naar 27 oC over twee weken.	Hoog met enkele bewolkte dagen in de aanlooperperiode; zeer hoog tijdens het ontstaan van sterke stratificatie.	Sterke, meerlagige stratificatie ontstaat.
D	24 - 26 oC	Gemiddeld tot licht bovengemiddeld (200 – 220 J/cm ²)	Lichte, kortdurende stratificatie.
E	> 25 oC gedurende vele opeenvolgende dagen	Hoog (> 250 J/cm ²) gedurende vele opeenvolgende dagen	Opbouw van langdurige stratificatie met complexe structuur.

Tabel 5: Zonnestraling en luchttemperatuur bij het verdwijnen van stratificatie.

Bij verdwijnen stratificatie		
Stratificatie periode	Luchttemperatuur	Zonnestraling (dagpiek)
A	13 – 18 oC over drie dagen	Zeer wisselend over drie dagen (30 – 200 J/cm ²)
B	10-13 oC	Halfbewolkt (~ 180 J/cm ²)
C	15-19 oC	Halfbewolkt (~ 150 J/cm ²)
D	13 – 15 oC	Bewolkt (< 100 J/cm ²)
E	Geleidelijk dalend over een periode van 10 dagen van 25 – 30 oC naar 15 – 23 oC	Gemiddeld (~200 J/cm ²), geleidelijk licht afnemend.

Tabel 6: Neerslag bij het ontstaan van stratificatie in de gedefinieerde periodes.

Bij ontstaan stratificatie	
Stratificatie periode	Neerslag
A	-
B	Geen neerslag tijdens ontstaan/opbouwen stratificatie.
C	Af en toe lichte neerslag of motregen (max. 2 mm/uur) tijdens de periode met wisselende lichte stratificatie (12 t/m 22 juni). Stratificatie neemt in deze wisselvallige periode wel af op de dagen met lichte regen, maar wederom valt dit samen met hardere wind. Na 22 juni, wanneer er echt flinke stratificatie ontstaat, valt er in deze stratificatieperiode geen neerslag meer.
D	De stratificatie ontstaat op een warme dag (> 25 oC) met enige wind (~8 m/s) waarop hevige regen valt (14 mm/uur gedurende meerdere uren). Gedurende de hevige regenbui daalt de temperatuur van het oppervlakkige water geleidelijk, wat de opbouw van stratificatie tijdelijk wat remt, maar wanneer de regenbui stopt zet de stratificatie door.
E	Geen tot nauwelijks neerslag in de periode waarin de stratificatie ontstaat (hooguit incidentele motregen van max. 1 mm/uur).

Tabel 7: Neerslag bij het verdwijnen van stratificatie in de gedefinieerde periodes.

Bij verdwijnen stratificatie	
Stratificatie periode	Neerslag
A	Lichte regen tijdens verdwijnen stratificatie (0-2 mm/uur); valt samen met een piek in de windsnelheid.
B	Matige regenval (max. 4 mm/uur) tijdens de storm waarbij de stratificatie verdwijnt.
C	In de periode waarin de stratificatie afbouwt en verdwijnt is valt er iedere dag wel wat neerslag, variërend van lichte regen tot matige regen (0 – 4 mm/uur). Dit gaat gepaard met harde wind.
D	De stratificatie bouwt af over een periode van twee dagen met matige neerslag (4 mm/uur) en toenemende wind.
E	In de periode waarin de stratificatie afbouwt zijn er drie dagen met flinkere neerslag (4 – 7 mm/uur). Alle drie deze dagen zijn ook dagen met windsnelheden groter dan 10 m/s.

Validatie: leidt harde wind altijd tot menging en dynamiek?

Groen: Grote diffusie, grote vermenging, trend van zuurstofgebrek wordt verbroken.

Geel: Diffusie en vermenging aanwezig, maar slechts licht of tijdelijk effect: trend van stratificatie en zuurstofgebrek wordt niet verbroken.

Rood: Nauwelijks tot geen diffusie en menging.

Dagen met windsnelheid > 15 m/s	
10 juni	Stratificatie wordt op deze dag in korte tijd doorbroken waarna zuurstofconcentraties herstellen.
6 juli	Harde wind valt samen met het verdwijnen van stratificatie waarna zuurstofconcentraties herstellen.
9 aug	Harde wind valt samen met het dalen van de sterke spronglaag en zorgt voor enige diffusie van de temperatuurgradiënten en vermenging tot ongeveer -7m diepte. Op grotere diepte geen waarneembaar effect. Licht herstel van zuurstofconcentraties boven -7m diepte. Menging en zuurstofherstel zijn echter van tijdelijke aard: geen volledige menging en stratificatie blijft sterk en neemt na enkele dagen weer toe.
23, 24 aug	Harde wind gaat samen met verdere diffusie van de temperatuurgradiënten, maar het water was hier al grotendeels gemengd. Wind nam over een periode van dagen geleidelijk toe.

Dagen met windsnelheid > 10 m/s	
10 juni	Stratificatie wordt op deze dag in korte tijd doorbroken waarna zuurstofconcentraties herstellen.
15,16 juni	Tijdelijke vermenging in een periode met wisselende lichte stratificatie; licht tijdelijk herstel zuurstofconcentraties.
22 juni	Zeer tijdelijke vermenging, grote daling spronglaag in korte tijd, lichte diffusie; licht tijdelijk herstel zuurstofconcentraties.
28 juni	Lichte daling spronglaag tot -5m; zeer beperkte diffusie; geen herstel zuurstofconcentraties.
4 t/m 6 juli	Harde wind leidt tot duidelijke daling en diffusie van de spronglaag tot grote diepte; enig herstel zuurstofconcentraties; spronglaag vertoont een duidelijke relatie met de wind en stijgt direct op korte momenten binnen deze dagen waarop de wind tijdelijk gaat liggen; volledige vermenging na de piek van de wind op 6 juli.
12, 13 juli	Diffusie spronglaag en volledige vermenging; herstel zuurstofconcentraties.
16 juli	Tijdelijke diffusie spronglaag tot grote diepte; tijdelijk kleinere stratificatie; tijdelijk zeer licht herstel zuurstof
23 juli	Tijdelijke diffusie spronglaag tot -5m diepte; tijdelijk licht herstel zuurstofconcentraties daarboven; onder -5m blijft zuurstof dalen.

26 juli	Tijdelijke diffusie spronglaag tot gemiddeld -6.5m diepte; tijdelijke afname stratificatie en enig herstel zuurstofconcentraties op -4m en wisselend op -6m; geen effect op -8m (onder de uiterlijke diffusiediepte).
3 augustus	Zeer tijdelijke en geringe diffusie tot -5m diepte; zeer lichte afname stratificatie en zeer lichte stijging zuurstofconcentraties boven die diepte; geen effect onder die diepte.
9 augustus	Snelle diffusie tot -7m diepte, maar een groot temperatuurverschil en een sterke spronglaag tot die diepte blijft bestaan; grote verplaatsing van warmer en zuurstofrijker water naar grotere diepte; blijvend diffuse temperatuurgradiënt tussen de -5m en -7m na deze dag; stijging van zuurstofconcentraties op deze diepte; geen effect onder de uiterlijke diffusiediepte.
16 augustus	Tijdelijke diffusie/daling van de bovenste spronglaag (er is hier sprake van een meerlagensysteem) tot vlak boven de onderste spronglaag, tot ongeveer -7m. Tijdelijk herstel van zuurstofconcentraties boven die diepte, geen effect daaronder.
19 t/m 23 augustus	Meerdere dagen met krachtige wind; geleidelijke diffusie van alle temperatuurgradiënten door de hele waterkolom verspreid over meerdere dagen; diffusie vindt eerst plaats op de ondiepere gradiënten en pas later op de diepere gradiënten; diffusie zet al in de dagen voor deze dagen van krachtige wind, wanneer de wind nog lager in snelheid is; op 23 augustus volledige menging door de waterkolom, afbraak van het meerlagensysteem, en herstel van zuurstofconcentraties tot een nagenoeg gelijke concentratie op alle dieptes.
31 augustus	Volledige vermenging van de waterkolom; verdwijnen van matige stratificatie die op 29 en 30 augustus aanwezig was.

Validatie: dragen hete dagen altijd bij aan stratificatie?

Groen: Hoge luchttemperaturen gaan samen met het ontstaan of uitbreiden van stratificatie.

Dagen waarop de luchttemperatuur boven de 25 oC kwam	
25 t/m 27 juni	Stratificatie neemt iedere opeenvolgende hete dag toe; ondiep water warmt flink op; sterke spronglaag ontstaat
9 juli	Significante opwarming water, met name op geringe diepte lichte stratificatie ontstaat.
18 t/m 20 juli	Na dagen van zeer lichte stratificatie ontstaat in deze drie dagen flinke stratificatie met grote temperatuurverschillen en een sterke spronglaag.
29 t/m 31 juli	Flinke opwarming oppervlakkig water; er ontstaat een nieuwe spronglaag boven de oudere spronglaag die enkele dagen eerder wat diffuser werd.
2 augustus	Oppervlakkig water (-0.95m) warmt enkele graden op, dieper water niet; er ontstaat een nieuwe temperatuurgradient tussen -0.95m en -4m.

6 augustus	Opwarming oppervlakkig water ten opzichte van de rest van de waterkolom; toename gradiënt tussen -0.95m en -4m.
11 t/m 13 augustus	Grote opwarming van het ondiepe water; ontstaan van een sterke nieuwe spronglaag boven de bestaande spronglaag die inmiddels tot grote diepte diffuus is.
15 augustus	Enige opwarming ondiep water, verdere uitbouw complex meerlagensysteem.
28 augustus	Waarneembare opwarming ondiep water, ontstaan van zeer lichte stratificatie die twee dagen blijft bestaan.
1 en 2 september	Opwarming ondiep water, ontstaan van zeer lichte stratificatie.

Validatie: draagt hoge zonnestraling altijd bij aan stratificatie?

Groen: Hoge zonnestraling gaat samen met het duidelijk ontstaan of uitbreiden van stratificatie; het effect hiervan is meer dan tijdelijk.

Geel: Hoge zonnestraling gaat samen met het ontstaan van temperatuurgradiënten, maar dit beperkt zich tot verschillen op geringe diepte en het effect hiervan beperkt zich tot diezelfde dag.

Rood: Zonnestraling gaat niet samen met het ontstaan of opbouwen van stratificatie

Feller rood: hoge zonnestraling gaat samen met het afbouwen of verdwijnen van stratificatie.

Perioden met zonnestraling > 250 J/cm²	
4 t/m 9 juni	Zeer hoge instraling; stratificatie ontstaat en blijft bestaan gedurende deze dagen.
11 t/m 13 juni	Enige opwarming van het water rond middagpiek, maar geen sprake van stratificatie
16 en 17 juni	Enige opwarming van het water rond middagpiek, slechts zeer lichte, tijdelijke stratificatie
19 en 20 juni	Geen waarneembaar ontstaan of uitbreiding van stratificatie
23 juni t/m 1 juli	Stratificatie neemt iedere opeenvolgende hete dag toe; ondiep water warmt flink op; sterke spronglaag ontstaat; Deze stratificatie bouwt echter flink af vanaf 28/29 juni, terwijl de zonnestraling op deze dagen onverminderd hoog blijft.
4 juli	Enige, zeer lichte opwarming van het meest oppervlakkige water, maar menging en diffusie blijven doorzetten en stratificatie blijft afbouwen.
6 juli	Enige, zeer lichte opwarming van het meest oppervlakkige water, maar menging en diffusie blijven doorzetten en stratificatie blijft afbouwen.
10 en 11 juli	Ongelijke opwarming door de waterkolom; er ontstaat enige stratificatie die maar kort aanhoudt.
15 juli	Opwarming van ondiep water; enige toename stratificatie
17 t/m 20 juli	Na dagen van zeer lichte stratificatie ontstaat in deze drie dagen flinke stratificatie met grote temperatuurverschillen en een sterke spronglaag.

22 juli	Grote opwarming van ondiep water; stratificatie neemt toe na enige afbouw de vorige dag.
24 juli	Grote opwarming van ondiep water; stratificatie neemt toe na enige afbouw de voorgaande dag.
26 t/m 28 juli	Hoge instraling leidt tot flinke middagpieken in de temperatuur van het oppervlakkig water en zorgt voor tijdelijke ondiepe nieuwe gradiënten, maar deze verdwijnen weer in de loop van de nacht.
29 t/m 31 juli	Hoge instraling zorgt nog steeds voor flinke middagpieken en nieuwe spronglagen, maar nu ook de luchttemperaturen stijgen blijven deze door de nacht bestaan; stratificatie neemt deze dagen flink toe.
5 t/m 12 augustus	Flinke opwarming van het oppervlakkige water telkens rond de middagpiek; stratificatie neemt dan tijdelijk toe en er ontstaan tijdelijk meerdere spronglagen; 's nachts nemen deze altijd weer af, maar helemaal verdwijnen doen ze niet. Eerst geen toename stratificatie over meerdere dagen. Pas vanaf 11 augustus, wanneer ook de luchttemperaturen flink stijgen, bouwt de stratificatie verder op.
17 augustus	Tijdelijke toename stratificatie in de middag, toename verdwijnt weer in de nacht.
19 augustus	Enige opwarming in de middag, maar stratificatie blijft afbouwen.
23 augustus	Enige opwarming in de middag, maar stratificatie blijft afbouwen.
27 en 28 augustus	Opwarming leidt tot stratificatie die twee dagen blijft bestaan.

Validatie: heeft grote neerslag effect op stratificatie?

Groen: flinke neerslag heeft een duidelijk effect op de stratificatie in de waterkolom, zonder dat dat effect door andere factoren verklaarbaar is.

Geel: flinke neerslag valt samen met een duidelijk effect op de stratificatie in de waterkolom, maar valt ook samen met andere factoren die een zeer waarschijnlijke verklaring voor het effect zijn.

Rood: geen waarneembaar effect.

Perioden met neerslag groter dan 5 mm/uur	
25 en 26 mei	Geen éénduidig waarneembaar effect
9 juni	Hevige neerslag bij hoge temperaturen en gemiddelde windsnelheden tijdens het ontstaan van stratificatie; oppervlakkig water koelt geleidelijk af tijdens deze bui en zorgt voor wat tijdelijke remming op de toename van de stratificatie, maar dit heeft geen groot blijvend effect en de stratificatie zet door de dagen na de bui.
15 en 16 juni	Bewolkte dagen met neerslag en krachtige wind binnen een periode van wisselende lichte stratificatie; de stratificatie verdwijnt bijna volledig gedurende deze twee dagen, maar zet daarna verder door.

1 augustus	Dag met flinkere neerslag maar matige wind, halfbewolkt; geen zichtbaar effect op stratificatie en temperatuurgradiënten.
20 augustus	Bewolkte dag met regen en krachtige wind; stratificatie was al dagenlang aan het afbouwen en bouwt deze dag verder af.
24 augustus	Bewolkte dag met regen en stormachtige wind; stratificatie was aan het begin van de dag al grotendeels verdwenen en dit blijft die dag zo; watertemperaturen koelen door de hele waterkolom wat af.