



RWS INFORMATIE

**Pelagische primaire productie Grevelingenmeer,
Oosterschelde, Veerse Meer en Westerschelde**

Primaire productie metingen met behulp van Fast Repetition Rate fluorometrie

Tussenrapportage resultaten 2020-2022

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat CIV Hydrobiologisch Laboratorium
Auteur	Nicole Dijkman
Rapportnummer	BM 23.38
Informatie	Nicole Dijkman
Mobiel	06 50 16 60 68
E-mail	nicole.dijkman@rws.nl
In opdracht van	S. Ciarelli (RWS ZD), J. Maaskant (RWS WVL), A. Mulder (RWS WVL)
Datum	29 december 2023

Inhoud

1	Samenvatting 5
2	Inleiding 6
3	Doelstellingen 8
4	Achtergrond en methode 9
4.1.	Fotosynthese – licht curve 9
4.2.	Stappen berekenen primaire productie 10
4.3.	Gebieden 11
4.4.	Varende metingen 12
4.5.	Fotosynthese – licht (P-E) curve 13
4.5.1.	FRRF 13
4.5.2.	¹⁴ C-incubatie methode 14
4.5.3.	Fit P-E curves 14
4.6.	F _v /F _m 14
4.7.	Chlorofyl a 14
4.8.	Instraling 14
4.9.	Lichtuitdoving onder water 15
4.10.	Overzicht gemeten parameters en omrekeningsfactoren 15
4.11.	Berekeningen 16
4.11.1.	1 Fotosynthese – licht curve parameters 16
4.11.2.	2 Dagproductie 17
4.11.3.	3 Jaarproductie 17
4.12.	Dataopslag 17
5	Resultaten 18
5.1.	Chlorofyl a – ijklijn 18
5.2.	K _d – ijklijn 18
5.3.	Vergelijking FRRF - ¹⁴ C 20
5.4.	Chlorofyl a 21
5.5.	F _v /F _m 22
5.6.	Fotosynthese – licht parameters 23
5.7.	Primaire productie – dagproductie 25
5.8.	Jaarproductie 27
6	Discussie 29
6.1.	Validatie FRRF-techniek 29
6.2.	Gebiedsanalyse 30
7	Conclusie 33
8	Aandachtspunten 34
8.1.	Extinctie 34
8.2.	Schoonhouden FRRF 34
9	Referenties 35
10	Bijlagen 38
10.1.	Bijlage 1 Fluorescentie 38

- 10.1.1. FRRF – meten activiteit fotosysteem II. 38
- 10.1.2. Elektronen transport 39
- 10.1.3. Absorptie algoritme 40
- 10.2. Bijlage 2 Chlorofyl a vergelijking analytisch gemeten vs schatting FRRF 41
 - 10.2.1. Grevelingenmeer 41
 - 10.2.2. Oosterschelde 42
 - 10.2.3. Veerse Meer 43
 - 10.2.4. Westerschelde 44
- 10.3. Bijlage 3 P-E parameters 45
- 10.4. Bijlage 4 Nutriënten 46

1 Samenvatting

Primaire productie is de omzetting van CO₂ en nutriënten in biomassa door middel van fotosynthese, waarbij de energie van het zonlicht wordt gebruikt om CO₂ vast te leggen. Primaire productie staat aan de basis van de voedselketen en is een belangrijke maat voor de draagkracht van een ecosysteem.

Traditioneel is de ¹⁴C-techniek de meest gebruikte methode om primaire productie te meten waarbij de opname van ¹⁴CO₂ wordt gemeten. Vanwege verschillende redenen is deze techniek moeilijk in voldoende hoge frequentie in te zetten. In het huidige onderzoek is een fluorescentie-gebaseerde methode (Fast Repetition Rate fluorescentie oftewel FRRF) ingezet. Metingen zijn uitgevoerd in 2020, 2021 en 2022 in de Oosterschelde, het Grevelingenmeer, het Veerse Meer en de Westerschelde. Het doel van de metingen is enerzijds het toetsen van de geschiktheid van de FRRF-methode om primaire productie te meten en berekenen, anderzijds het vergelijken van primaire productie tussen de waterlichamen en de variatie in de jaren.

De vergelijking tussen de FRRF techniek en de ¹⁴C techniek toont goede resultaten, vooral voor de metingen in 2022. De met behulp van de FRRF techniek berekende getallen voor primaire productie voor de onderzochte waterlichamen tonen een duidelijk jaarlijks -en seizoenaal patroon en duidelijke verschillen tussen de waterlichamen.

De metingen zullen de komende jaren worden voortgezet om de reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid verder te testen en de gevonden patronen/verschillen tussen jaren en (deel)waterlichamen robuuster maken.

2 Inleiding

Primaire productie is de omzetting van CO₂ en nutriënten in biomassa middels fotosynthese¹, waarbij de energie van het zonlicht wordt gebruikt om CO₂ vast te leggen. Primaire productie is te beschouwen als de integratie van het fotosyntheseproces over tijd en ruimte (Kromkamp & Philippart, 2015). In het aquatisch milieu vindt dit proces plaats door algen en cyanobacteriën (ook wel blauwalgen genoemd). Gezamenlijk vormen dezen het fytoplankton. Ook waterplanten en wieren spelen hier een rol, alhoewel minder belangrijk dan algen.

Primaire productie staat aan de basis van de voedselketen en is een belangrijke maat voor de draagkracht van een ecosysteem. De ontwikkelingen van primaire productie in tijd en ruimte zijn direct of indirect van invloed op de hogere trofische niveaus van een watersysteem. Inzicht in primaire productie is nodig om betere (beleids)keuzes te kunnen maken en (herstel)maatregelen in het kader van de KRW en Natura 2000 te kunnen nemen. Primaire productie wordt ook als verklarende parameter gebruikt om oorzaak-gevolg relaties te achterhalen en als input in ecologische- en waterkwaliteitsmodellen.

Primaire productie wordt over het algemeen gerapporteerd als hoeveelheid koolstof per oppervlakte per tijdseenheid, dus bv g C m⁻² dag⁻¹. Belangrijk is het gegeven dat primaire productie een processnelheid is, in tegenstelling tot de chlorofyl-concentratie wat een toestandsvariabele is. De chlorofyl concentratie, als proxy voor biomassa, is het gevolg van groei en verliesprocessen. Daarnaast varieert productie per chlorofyl afhankelijk van de fysiologische toestand van het fytoplankton als reactie op variaties in groeiomstandigheden zoals onder andere licht, temperatuur en nutriëntbeschikbaarheid. Het is dan ook van belang primaire productie daadwerkelijk te meten in plaats van de chlorofyl concentratie te beschouwen als equivalent aan primaire productie.

De basis van de hier gebruikte methode voor het bepalen van primaire productie is het meten van de relatie tussen licht en de fotosynthese-snelheid. Deze gegevens worden gecombineerd met de instraling van licht op het wateroppervlak en uitdoving van licht onder water om primaire productie per oppervlakte te berekenen.

Er kunnen verschillende technieken worden ingezet om de fotosynthese-snelheid te meten, met elk voor- en nadelen en onzekerheden (Marra, 2002; Regaudie-de-Gioux et al., 2014; Wijsman, 2019). Traditioneel is de ¹⁴C-techniek de meest gebruikte methode. ¹⁴CO₂ wordt toegevoegd aan een watermonster en de ¹⁴C die in organische vorm wordt vastgelegd is een maat voor primaire productie (Underwood & Kromkamp, 1999; van Oevelen et al., 2021). Deze methode is duur en omslachtig, met name vanwege de voorzorgsmaatregelen die moeten worden getroffen aangezien met radioactief materiaal wordt gewerkt. Ook duren de ¹⁴C-incubaties relatief lang waardoor ruimtelijke en temporele dekking beperkt zijn (van Oevelen et al., 2021).

¹ Een andere mogelijkheid is chemosynthese, waarbij de energie uit anorganische verbindingen wordt gehaald in plaats van uit zonlicht. Hier wordt alleen naar fotosynthese gekeken.

Fast repetition rate fluorometrie (FRRF)² biedt een alternatief voor ¹⁴C incubaties (Aardema et al., 2019; Kromkamp et al., 2017; Oxborough et al., 2012; Silsbe et al., 2015; van Oevelen et al., 2021; Wijsman, 2019). Deze methode meet de snelheid van elektronen transport vanuit fotosysteem 2. Dit is de eerste stap in het fotosynthese proces wat uiteindelijk leidt tot het vastleggen van CO₂. Deze elektronentransportsnelheid kan worden omgerekend naar koolstof-fixatie in dezelfde eenheden als de ¹⁴C-techniek, namelijk g C m⁻² dag⁻¹. In recente jaren is de FRRF-techniek onder andere toegepast in de Westerschelde in het kader van MONEOS (Kromkamp, 2016; Kromkamp, 2020; van Oevelen et al., 2021) en op de Noordzee (Aardema et al., 2019).

Vanwege het belang van de primaire productie voor het functioneren van het systeem is binnen het Visserij Initiatief Zeeland (VIZ) een aantal jaren geleden gezamenlijk afgesproken dat RWS de monitoring van primaire productie in de waterkolom in de Oosterschelde, Grevelingenmeer en het Veerse Meer zou oppakken. Wijsman (2019) heeft een inventarisatie uitgevoerd naar de verschillende methoden om primaire productie te meten en komt tot de conclusie dat de FRRF-methode op het moment de meest geschikte methode lijkt. De metingen beschreven in de huidige tussenrapportage zijn de uitvoering van het plan van aanpak beschreven in Wijsman (2019).

Dit project wordt beschouwd als een pilot om ervaring op te doen met de FRRF-methode waarna er geëvalueerd zal worden. Metingen en evaluatie FRRF-methode worden uitgevoerd in opdracht van Silvana Ciarelli (Zee en Delta) voor de Oosterschelde, Grevelingenmeer en Veerse Meer. Ter vergelijking zijn resultaten van de Westerschelde toegevoegd. De metingen voor de Westerschelde zijn een voortzetting van metingen in het kader van MONEOS in opdracht van John Maaskant (WVL, tot en met 2021) en Albert Mulder (WVL, vanaf 2022) die sinds 2016 worden uitgevoerd (Kromkamp, 2020; van Oevelen et al., 2021).

Deze tussenrapportage is te beschouwen als een levend document en bevat een beschrijving van de techniek, beschikbare metingen en resultaten over 2020, 2021 en 2022. De metingen lopen door en te zijner tijd zullen de resultaten getoond in deze rapportage worden aangevuld met nieuwe gegevens.

² FRRF maakt gebruik van het verschil in fluorescentie signaal tussen open (Q_A geoxideerd) en gesloten (Q_A gereduceerd) fotosystemen om de efficiëntie van ladingscheiding in fotosysteem 2 te berekenen. Een serie korte snelle lichtpulsjes wordt gebruikt om alle fotosystemen te sluiten, vandaar 'Fast Repetition Rate'. Verdere uitleg in Bijlage 1.

3 Doelstellingen

Het doel van de metingen en van de huidige rapportage is tweeledig:

- Het toepassen en evalueren van de FRRF-methode om primaire productie te berekenen
- Het zo betrouwbaar als mogelijk en vlakdekkend inschatten van pelagische primaire productie in de Deltawateren als $\text{g C m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ en $\text{g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$, inclusief een vergelijking tussen jaren en waterlichamen.

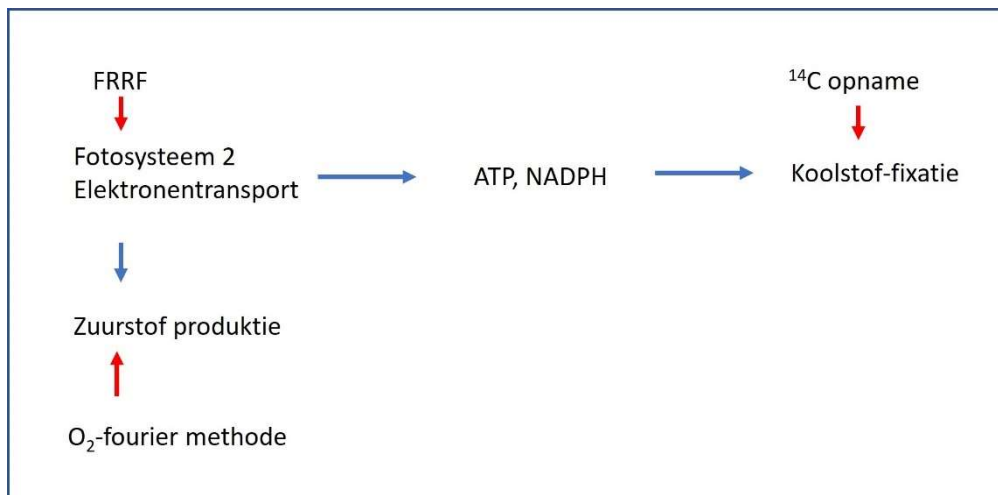
Validatie ofwel betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van de methode vinden zal plaatsvinden aan hand van:

- Vergelijking FRRF en ^{14}C metingen
- Analyse seizoens-datareeksen
- Integratie in tijd en ruimte

4 Achtergrond en methode

Fotosynthese is het proces waarbij de energie van (zon)licht wordt gebruikt om CO₂ vast te leggen. Dit proces start met het opvangen van licht door fotosysteem 2. Deze lichtenergie wordt gebruikt om water te splitsen in elektronen, protonen en zuurstof. De elektronen worden een elektronentransportketen ingestuurd en er worden enkele tussenproducten (NADPH en ATP) gevormd. Deze tussenproducten worden in een volgende stap gebruikt om CO₂ (koolstof) vast te leggen (Figuur 1).

Er bestaan meerdere methoden om de fotosynthese-snelheid te meten, waaronder de opname van ¹⁴CO₂, O₂ productie of variaties in O₂ concentratie (O₂-Fourier methode, Cox et al., 2015), en het met behulp van fluorescentie meten van elektronentransport vanuit fotosysteem 2 (onder andere FRRF) (Wijsman, 2019). Deze technieken meten elk op ander punt in het fotosynthese proces (Figuur 1). De FRRF-techniek meet aan het begin van het proces, nauw gekoppeld aan O₂ gebaseerde technieken, terwijl de ¹⁴C-techniek de laatste stap in de keten meet. Figuur 1 toont een sterk vereenvoudigd schema van fotosynthese en de punten waar door de verschillende technieken wordt gemeten.

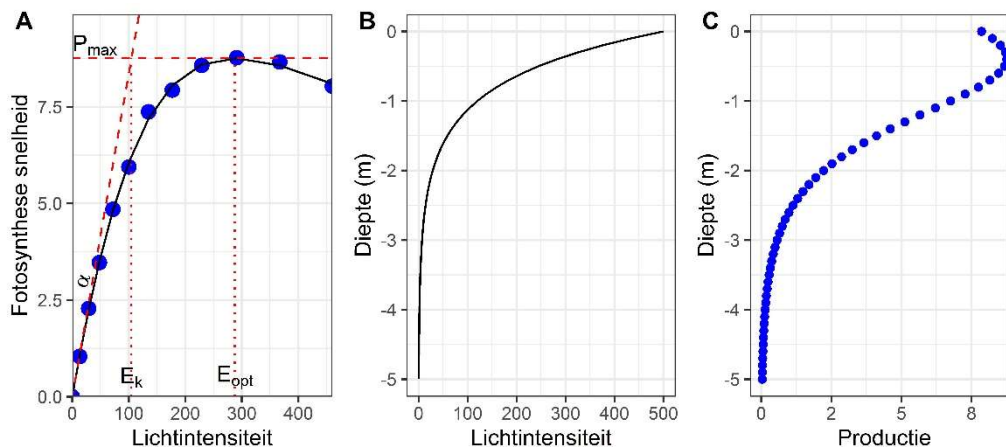


Figuur 1 Sterk vereenvoudigde weergave van fotosynthese. Vanuit fotosysteem 2 worden elektronen een elektronen-transportketen ingestuurd. ATP en NADPH worden als tussenproducten gevormd, welke gebruikt worden om CO₂ vast te leggen (koolstof-fixatie). De elektronen zijn afkomstig van water bij fotosysteem 2, waarbij zuurstof wordt gevormd. De blauwe pijlen geven de processen van fotosynthese, de rode pijlen de punten waarop de verschillende methodes meten.

4.1. Fotosynthese – licht curve

De basis van de gebruikte methode, zowel voor de FRRF-techniek als de ¹⁴C-techniek, is het meten van een fotosynthese-licht (P-E) curve. De fotosynthese-snelheid wordt bepaald voor een serie lichtintensiteiten van donker tot de maximaal mogelijke lichtintensiteit (zie Figuur 2).

In eerste instantie neemt de productiesnelheid lineair toe met de lichtintensiteit. Dit wordt gekwantificeerd met de parameter α , de initiële helling van de P-E curve. De stijging vlakt af als de lichtintensiteit verder toeneemt en een maximale productiesnelheid (P_{\max}) wordt bereikt. De lichtintensiteit waar licht verzadigend begint te worden is E_k , deze parameter is te berekenen als P_{\max}/α . Als de lichtintensiteit hoger wordt dan de lichtintensiteit waarbij P_{\max} daadwerkelijk bereikt wordt (E_{opt}) kan het zijn dat de productiesnelheid daalt door beschadigingen aan het fotosysteem.



Figuur 2 A Voorbeeld P-E curve. De blauw cirkels zijn de metingen van de FRRF, de zwarte lijn de fit met het model van Eilers-Peeters. P_{\max} is de maximale fotosynthese snelheid, α de initiële helling en E_{opt} de lichtintensiteit waar P_{\max} wordt bereikt. Ook aangeduid is E_k , het licht verzadigingspunt, berekend als P_{\max}/α . B. Voorbeeld van een diepte profiel van de lichtintensiteit. C Productiesnelheid per diepte. Sommeren van deze productiesnelheid geeft primaire productie per tijdseenheid.

4.2. Stappen berekenen primaire productie

De gebruikte methode om primaire productie te meten doorloopt de volgende stappen:

- Fotosynthese snelheid wordt gemeten tijdens een serie lichtintensiteiten zodat een fotosynthese – lichtintensiteit (P-E) curve kan worden opgesteld (Figuur 2A). De fotosynthese-snelheid kan worden gemeten met de FRRF-techniek of met de ^{14}C -techniek. De eenheid van de fotosynthese-snelheid is $\text{mg C L}^{-1} \text{ uur}^{-1}$, dus koolstof-fixatie per volume per tijdseenheid.
- De P-E curve wordt gefit aan hand van een model. Dit levert parameters (P_{\max} , α , E_{opt} en E_k) die de curve beschrijven en voor verdere berekeningen worden ingezet (Figuur 2A).
- De beschikbaarheid van licht onder water wordt berekend met behulp van de instraling op het wateroppervlak en de uitdoving van licht onder water (Figuur 2B).
- Voor elke diepte is nu de lichtintensiteit bekend en met behulp van de P-E curve wordt voor elke diepte productie berekend. Dit wordt gedaan met stapjes van 1 mm (Figuur 2C).
- Sommeren over de diepte levert productie per oppervlak per tijdseenheid. De gegevens voor instraling zijn meestal een uurgemiddelde, waardoor de eenheid op dit punt in de berekening $\text{g C m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$ is.

- Als voor de hele dag gegevens voor instraling bekend zijn kan, onder de aanname dat biomassa concentratie en P-E karakteristieken niet veranderen gedurende die dag, voor elk uur productie als $\text{g C m}^{-2} \text{uur}^{-1}$ worden berekend. Optellen voor de hele dag levert primaire productie per dag ($\text{g C m}^{-2} \text{dag}^{-1}$).
- Bij voldoende metingen gedurende een jaar in een waterlichaam kan primaire productie als hoeveelheid C per m^2 per jaar worden berekend.

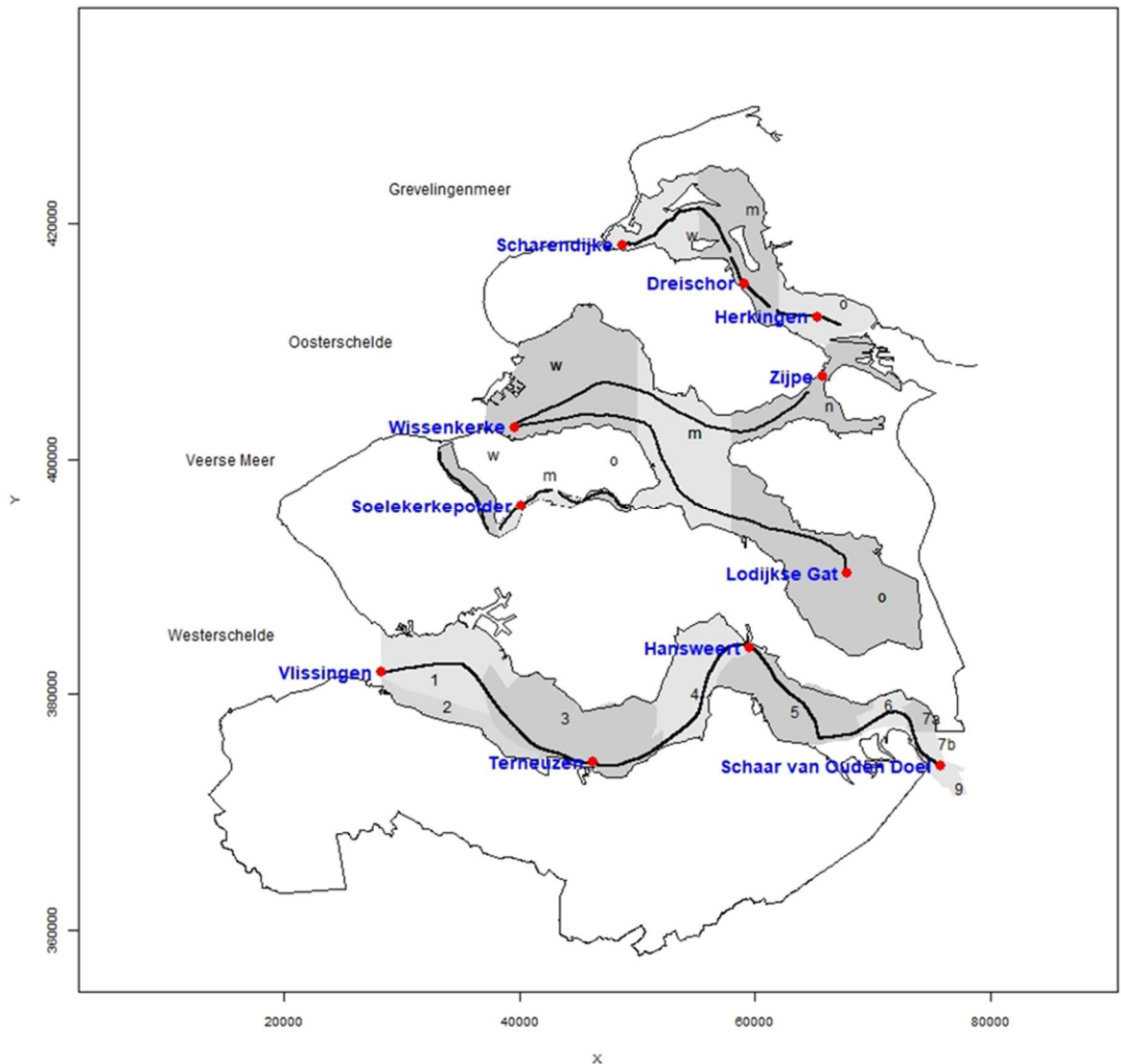
4.3. Gebieden

De metingen worden uitgevoerd in de Oosterschelde, het Grevelingenmeer, het Veerse Meer en de Westerschelde. Figuur 3 toont de waterlichamen waar metingen zijn gedaan. De metingen worden gedaan tijdens de waterkwaliteits-vaartrachten voor het MWTL³-programma en er wordt een route gevaren die de MWTL-meetpunten verbindt. De route kan variëren per meetdag. De kaart toont ook hoe de waterlichamen zijn opgedeeld in deelgebieden bij het uitwerken van de gegevens. Het Grevelingenmeer en het Veerse Meer zijn opgedeeld in west, midden en oost en de Oosterschelde is opgedeeld in west, midden, oost en noord, grotendeels zoals gesuggereerd in Wijsman (2019). Voor de Westerschelde zijn een aantal genummerde deelgebieden bepaald gebaseerd op macro-cellen (Kromkamp, 2020; Maris et al., 2014; van Oevelen et al., 2021).

De vaartrachten op de Oosterschelde, Grevelingenmeer en Veerse Meer vinden van oktober tot en met maart elke vier weken plaats en in de maanden april tot en met september elke twee weken. In de Westerschelde wordt het hele jaar elke twee weken gemeten.

De metingen in de Westerschelde zijn verdeeld over twee dagen waarbij rekening wordt gehouden met het getij. Op één dag worden FRRF-metingen gedaan van Hansweert naar Schaar van Ouden Doel, waarbij Schaar van Ouden Doel met laag water wordt bereikt. De metingen in het westelijk deel van de Westerschelde worden uitgevoerd op een separate dag, waarbij 1 uur voor hoogwater wordt gestart in Vlissingen en de FRRF-metingen varend richting Hansweert worden uitgevoerd. De Oosterschelde en het Veerse Meer zijn ook intergetijdengebieden, maar in deze waterlichamen worden de metingen niet afgestemd op het getij.

³ MWTL staat voor Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands



Figuur 3. Kaart van de waterlichamen waar metingen ten behoeve van primaire productie zijn gedaan, een voorbeeld van de route die wordt gevaren (zwarte lijn), de deelgebieden waarin de waterlichamen zijn opgedeeld (w = west, m = midden, o = oost, n = noord), en de MWTL-metpunten (rood).

4.4. Varende metingen

De metingen worden uitgevoerd aan boord van schepen van de Rijksrederij voorzien van een milieu meetcontainer. Naast het schip wordt een zogenaamde meetvis meegetrokken. Dit is een metalen frame met daaraan bevestigd een Exo

multiparameter sonde (YSI). Ook is een waterslang bevestigd aan de meetvis, waarmee een continue stroom van monsterwater naar de milieumeetcontainer wordt gepompt.

De Exo multiparameter sonde legt elke 10 seconden onder andere datum, tijd, turbiditeit en temperatuur vast. Daarnaast worden de geografische coördinaten in Rijksdriehoekskoördinaten, afkomstig van de scheeps GPS, samen met de Exo gegevens gelogd.

FRRF-metingen worden uitgevoerd aan het continu stromende monsterwater FRRF-metingen worden op basis van tijd gematched aan de gegevens van de Exo multiparameter sonde.

Lichtextinctie (K_d) en chlorofyl a concentratie zijn onderdeel van het MWTL-programma en worden volgens RWSV op de meetpunten bepaald.

^{14}C P-E curves dienen ter validatie van de FRRF P-E metingen en worden een aantal keer per jaar uitgevoerd. In dat geval worden monsters genomen aan boord en bewaard bij de *in situ* temperatuur totdat deze naar een laboratorium kunnen worden getransporteerd waar de ^{14}C P-E curves worden gemeten.

4.5. Fotosynthese – licht (P-E) curve

De fotosynthese-licht curves (P-E curves) worden gemeten met de FRRF-techniek of met de ^{14}C -techniek, waarbij de ^{14}C metingen dienen ter validatie van de FRRF-metingen.

4.5.1. FRRF

FRRF-metingen worden uitgevoerd aan boord in de milieu meetcontainer. De FRRF-techniek meet met behulp van fluorescentie de fotosynthese snelheid als volumetrisch elektronentransport (JV_{PII}), oftewel het aantal elektronen per liter per uur. De metingen worden uitgevoerd met een Fast Repetition Rate fluorometer (FRRF) bestaande uit een FastOcean met Act2 unit (Chelsea Technologies Ltd, East Molesea, UK). De metingen worden aangestuurd door de bijgeleverde Act2Run software. De FRRF meet automatisch ca elke 20 minuten een P-E curve, bestaande uit een serie stapsgewijs oplopende lichtintensiteiten. Elke lichtintensiteit duurt 90 seconden. Voor start van elke meting wordt vers monster naar de meetcuveet gepompt vanuit het continu doorstromende monsterwater.

De fluorescentie waarden van de FRRF worden gecorrigeerd voor een blanco waarde gemeten aan gefiltreerd monsterwater (0.45 μm , PuradiscTM, WhatmanTM).

Om tot een voor een ecosystemen relevante eenheid te komen worden de getallen omgerekend naar koolstofeenheden door aan te nemen dat 5 elektronen nodig zijn om 1 koolstofatoom vast te leggen. Zo worden dezelfde eenheden verkregen als bij de ^{14}C -techniek, namelijk $\text{g C L}^{-1} \text{h}^{-1}$. De omrekening van elektronen per koolstofatoom is gekozen aan hand van literatuurgegevens (Kromkamp, 2016; Kromkamp et al., 2017; Lawrenz et al., 2013). De omrekening wordt gecontroleerd en eventueel aangepast aan hand van P-E curves met de ^{14}C techniek (zie Resultaten en Discussie)

Verdere details over de FRRF-techniek worden beschreven in Bijlage 1.

4.5.2. ¹⁴C-incubatie methode

Bij de ¹⁴C-techniek wordt een monster verrijkt met ¹⁴CO₂, verdeeld over monsterbuizen en gedurende ca 2 uur geïncubeerd bij een serie lichtintensiteiten. De verrijking wordt bepaald met behulp van de totale hoeveelheid anorganisch koolstof. Aan het einde van de incubatieperiode wordt voor elk deelmonster bepaald hoeveel ¹⁴C is opgenomen in fytoplankton-biomassa en omgerekend naar de totale hoeveelheid C vastgelegd (g C L⁻¹ h⁻¹) (Kromkamp et al., 1995).

De ¹⁴C metingen kunnen niet aan boord worden uitgevoerd en worden uitbesteed. Watermonsters worden naar een laboratorium getransporteerd waar de metingen worden uitgevoerd. Indien mogelijk gebeurt dit op de dag van monsternamen, maar vaak kan dit pas de volgende dag.

4.5.3. Fit P-E curves

Zowel de FRRF als de ¹⁴C P-E curves zijn gefit aan hand van het model van Eilers en Peeters (Eilers & Peeters, 1988). Dit levert de parameters P_{max}, α en E_{opt} (zie ook Figuur 2A). Veel andere modellen hebben een parameter E_k, deze kan eenvoudig worden berekend als P_{max}/ α .

4.6. F_v/F_m

F_v/F_m is de maximale efficiëntie van fotosynthese (Zie Bijlage 1). Deze parameter wordt gemeten door de FRRF. F_v/F_m geeft informatie over de gezondheid van het fytoplankton waarbij de maximale waarde voor gezond fytoplankton ~0.65 is (Falkowski et al., 2017). Veel vormen van stress (te veel licht, hoge temperatuur, nutriënt limitatie) zorgen voor een onbalans tussen de absorptie van licht en het kunnen inzetten van dit licht voor fotosynthese, wat tot regulatie en/of schade leidt en daardoor tot lagere waarden voor F_v/F_m (Kalaji et al., 2014).

4.7. Chlorofyl a

De bepaling van de chlorofyl concentratie is onderdeel van het MWTL-programma en wordt elke 4 weken (winter) of 2 weken (groeiseizoen) gemeten op de MWTL-meetpunten. De FRRF levert een op fluorescentie⁴ gebaseerde schatting van chlorofyl. Er is een ijklijn opgesteld tussen de chlorofyl schatting van de FRRF en analytisch gemeten chlorofyl. De schatting van de FRRF is met behulp van deze gegevens gecorrigeerd (zie verder bij Resultaten)

4.8. Instraling

Voor instraling van de zon op het wateroppervlak oftewel de lichtintensiteit wordt gebruik gemaakt van gegevens van het KNMI (<https://daggegevens.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens>). Instraling kan worden gemeten als de energie-inhoud (Q, J cm⁻¹ uur⁻¹) of als het aantal deeltjes (fotonen, $\mu\text{mol fotonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) waarbij de energie-inhoud van een foton afhankelijk is van de golflengte. Als een foton de juiste golflengte (en daarmee

⁴ Niet alle chlorofyl draagt bij aan het fluorescentiesignaal van levende algen. Rode fluorescentie in levend fytoplankton is voornamelijk afkomstig van aan fotosysteem 2 gebonden chlorofyl. Er is ook chlorofyl gebonden aan fotosysteem 1, dit draagt nauwelijks bij aan het fluorescentie signaal. Fluorescentie wordt ook ingezet bij het analytisch bepalen van chlorofyl a, maar in dat geval worden de pigmenten eerst geëxtraheerd, waarna wel al het chlorofyl bijdraagt aan het fluorescentie signaal.

energie-inhoud) heeft om te worden geabsorbeerd door het fotosysteem is de energie-inhoud niet meer relevant en telt alleen het aantal deeltjes. Vandaar dat voor primaire productie-berekeningen de lichtintensiteit als $\mu\text{mol fotonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in het golflengtebereik 400-700 nm wordt gebruikt. Licht in dit golflengtebereik wordt ook wel PAR (photosynthetically active radiation) genoemd.

Het KNMI meet globale straling (Q) op een aantal locaties in het land. Om tot een voor primaire productie bruikbare eenheid te komen moet Q worden omgerekend naar PAR. Hiervoor bestaat geen standaard omrekening, aangezien deze afhankelijk is van de spectrale verdeling van het licht en van het golflengte bereik van de gebruikte sensoren.

Afgelopen jaren is een empirische relatie opgesteld tussen Q en PAR door het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) in Yerseke. Het NIOZ meet PAR op het dak van het instituut in Yerseke. Een vergelijking tussen PAR zoals gemeten door het NIOZ en Q zoals gemeten door het KNMI levert een omrekening van $\text{PAR} = 4.69 * \text{Q}$ (Kromkamp, 2020; Rutten & Kromkamp, 2019; van Oevelen et al., 2021). Voor het huidige rapport is voor instraling het gemiddelde genomen van de 3 KNMI stations in Zeeland (Vlissingen, Westdorpe en Wilhelminadorp) en op bovenstaand wijze omgerekend naar PAR.

Een klein gedeelte van het licht gaat verloren door breking op de overgang licht water. Hiervoor is een verlies van 6% aangenomen (Kromkamp, 2016; van Oevelen et al., 2021).

4.9. Lichtuitdoving onder water

Lichtintensiteit onder water neemt af met de diepte door absorptie van licht door deeltjes zoals algen, bacteriën en sediment maar ook door absorptie door het water zelf. De lichtuitdovingscoëfficiënt (K_d)⁵ is onderdeel van het MWTL-programma en dus beschikbaar op de MWTL-metpunten. Troebelheid of turbiditeit is gerelateerd aan K_d . Turbiditeit wordt minimaal elke 60 seconde gemeten met de Exo sonde. Er is met beschikbare meetgegevens een relatie opgesteld tussen turbiditeit en K_d (Figuur 5). K_d kan hiermee berekend worden voor alle locaties waar gegevens voor turbiditeit beschikbaar zijn.

Soms ontbreken gegevens van de Exo-sonde. In dat geval kan total sideward scatter van flowcytometer metingen worden gebruikt om K_d in te schatten. Hiervoor is eenzelfde ijklijn opgesteld. Dit wordt hier verder niet getoond. De omrekening staat wel vermeld in Tabel 1 .

4.10. Overzicht gemeten parameters en omrekeningsfactoren

Voor zowel chlorofyl als K_d geldt dat de relatie steeds wordt bijgewerkt naarmate meer gegevens beschikbaar komen. De coëfficiënten in de figuren kunnen daardoor licht afwijken van de gebruikte coëfficiënten. De coëfficiënten zoals gebruikt bij de berekeningen in dit rapport staan vermeld in Tabel 1.

⁵ Binnen Rijkswaterstaat wordt de lichtuitdovingscoëfficiënt gerapporteerd als extinctie met als afkorting E. Internationaal wordt E gebruikt voor de lichtintensiteit en K_d voor de lichtuitdovingscoëfficiënt. Deze laatste variant wordt aangehouden in deze rapportage.

Tabel 1 Overzicht parameters, apparatuur waarmee deze zijn gemeten, eenheden en gebruikte omrekeningsfactoren.

Parameter	Bron	Eenheid	Omrekening indien afgeleide parameter
F_v/F_m	FRRF	relatieve eenheid	
elektronentransport (JV_{PII})	FRRF	$\mu\text{mol elektronen m}^{-3} \text{ h}^{-1}$	
Turbiditeit	Exo	FNU	
Geografische coördinaten	Exo, schip	m, Rijksdriehoek-coördinaten	
Lichtinstraling (PAR)	KNMI	$\mu\text{mol fotonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	4.69 *Q
lichtuitdovingscoëfficiënt K_d	MWTL	m^{-1}	
lichtuitdovingscoëfficiënt K_d	Exo	m^{-1}	0.11846 * turbiditeit + 0.81469
lichtuitdovingscoëfficiënt K_d	FCM	m^{-1}	$1.53 \cdot 10^{-8}$ * total sideward scatter + 0.569
Chlorofyl a	MWTL	mg m^{-3}	
Chlorofyl a	FRRF	mg m^{-3}	0.52625 * chlorofyl FRRF
Omrekening JV_{PII} naar C	Literatuur	Elektronen per koolstof	5

4.11. Berekningen

De berekeningen zijn gedaan in R (R Development Core Team, 2015) en er is gebruik gemaakt van het package 'FRRF: Tools for fitting photosynthesis-irradiance response curves' (Soetaert et al., 2014)

De primaire productiegegevens worden op drie niveaus doorgerekend en gepresenteerd:

4.11.1. 1 Fotosynthese – licht curve parameters

- Fotosynthesesnelheid – licht (P-E) curves worden gefit met het Eilers-Peeters algoritme. Dit levert de parameters P_{max} , α en E_{opt} . E_k wordt berekend als P_{max} / α .
- P_{max} en α worden genormaliseerd op chlorofyl a. Chlorofyl a dient in dit geval als maat voor de biomassa. De normalisatie wordt uitgevoerd omdat deze parameters meestal op deze wijze in de literatuur worden gepresenteerd en zo dus eenvoudiger te vergelijken zijn. Een superscript 'B' wordt toegevoegd om aan te duiden dat de parameters zijn genormaliseerd op chlorofyl a (P_{max}^B , α^B).
- E_{opt} en E_k zijn beide een lichtintensiteit en dus onafhankelijk van de chlorofyl a concentratie.
- Op basis van de geografische coördinaten is elke meting toegewezen aan een waterlichaam en deelgebied.

4.11.2. 2 Dagproductie

- Voor elke gemeten FRRF P-E curve is de dagproductie berekend als $g\ C\ m^{-2}\ dag^{-1}$.
- De parameters die hiervoor worden gecombineerd zijn de FRRF P-E parameters, instraling (KNMI) en K_d (lichtuitdoving onder water).
- K_d is berekend uit de turbiditeit van de Exo multiparameter sonde, op basis van de in tijd dichtst bij het start-tijdstip van de FRRF liggende turbiditeitswaarde.
- FRRF P-E parameters en K_d zijn puntmetingen, instraling zijn uurgemiddeldes voor elk uur van de dag van de P-E meting.
- Zie verder bij 'Stappen berekenen primaire productie'

4.11.3. 3 Jaarproductie

- Jaarproductie ($g\ C\ m^{-2}\ jaar^{-1}$) is berekend per waterlichaam en per deelgebied.
- De parameters die hiervoor worden gecombineerd zijn de FRRF P-E parameters, instraling (KNMI) en K_d (lichtuitdoving onder water).
- Voor elke meetdag is per waterlichaam en per deelgebied een gemiddelde berekend voor de P-E parameters en de bijbehorende K_d waarde.
- Voor dagen waarop niet is gemeten wordt voor elke parameter een waarde berekend middels lineair interpoleren tussen de meetdagen waarop wel is gemeten.
- Voor instraling zijn voor elke dag en elk uur gemeten gegevens beschikbaar van het KNMI.
- Voor elke dag is per waterlichaam en per deelgebied de dagproductie berekend (Zie 'Stappen berekenen primaire productie').
- Optellen van de dagproductie van elke dag in het jaar levert de jaarproductie.
- De berekeningen zijn afzonderlijk uitgevoerd per waterlichaam (gemiddeldes van alle metingen per meetdag per waterlichaam) en per deelgebied van een waterlichaam (gemiddeldes van alle metingen per meetdag per deelgebied). De berekening per waterlichaam kan afwijken van het gemiddelde van de berekeningen per deelgebied van dat waterlichaam aangezien het aantal FRRF-metingen per deelgebied kan variëren.

4.12. Dataopslag

Alle meetgegevens worden zowel bewaard in het oorspronkelijk format van de desbetreffende apparatuur als in een database. Afgeleide parameters, waaronder de data waarvoor in het rapport van Wijsman (2019) wordt aangegeven dat deze dienen te worden opgeslagen, worden bewaard in een database. In de toekomst zullen deze gegevens beschikbaar worden gemaakt via de website waterinfo.rws.nl.

5 Resultaten

De metingen zijn gestart in 2020. Door de coronapandemie zijn dat jaar veel vaartochten en metingen uitgevallen. In de jaren 2021 en 2022 konden de meeste metingen wel plaatsvinden.

Bij het uitwerken van de gegevens van 2020 en eerste maanden 2021 bleek dat vervuiling in het koelcircuit (meer uitleg in § 8.1) een probleem was. Deze gegevens zijn zoveel mogelijk verwijderd uit de resultaten op basis van het vergelijken van de fluorescentie van de Exo multiparameter sonde en de FRRF.

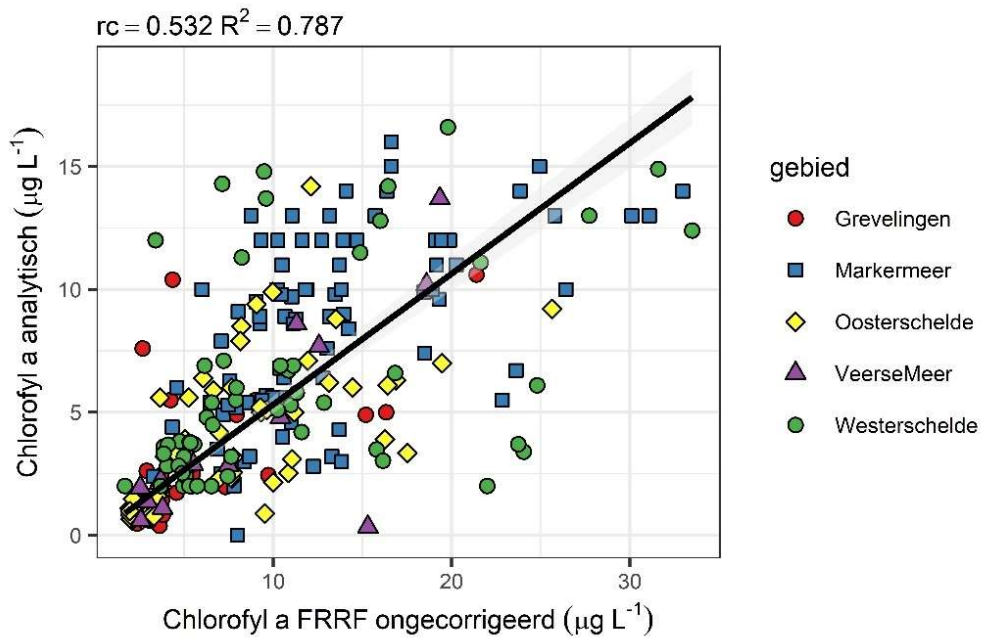
5.1. Chlorofyl a – ijklijn

Figuur 4 toont de ijklijn tussen analytisch gemeten chlorofyl a concentratie en de schatting van de FRRF. Voor het opstellen van de relatie zijn gegevens van de Zeeuwse wateren en van het Markermeer gebruikt. Het Markermeer is toegevoegd om voldoende metingen te hebben voor een betrouwbare relatie. Er is a priori geen reden om aan te nemen dat verschillende typen water eenzelfde relatie oplevert. De metingen lijken echter op zelfde lijn te liggen, waardoor toevoegen van het Markermeer in dit geval gerechtvaardigd is.

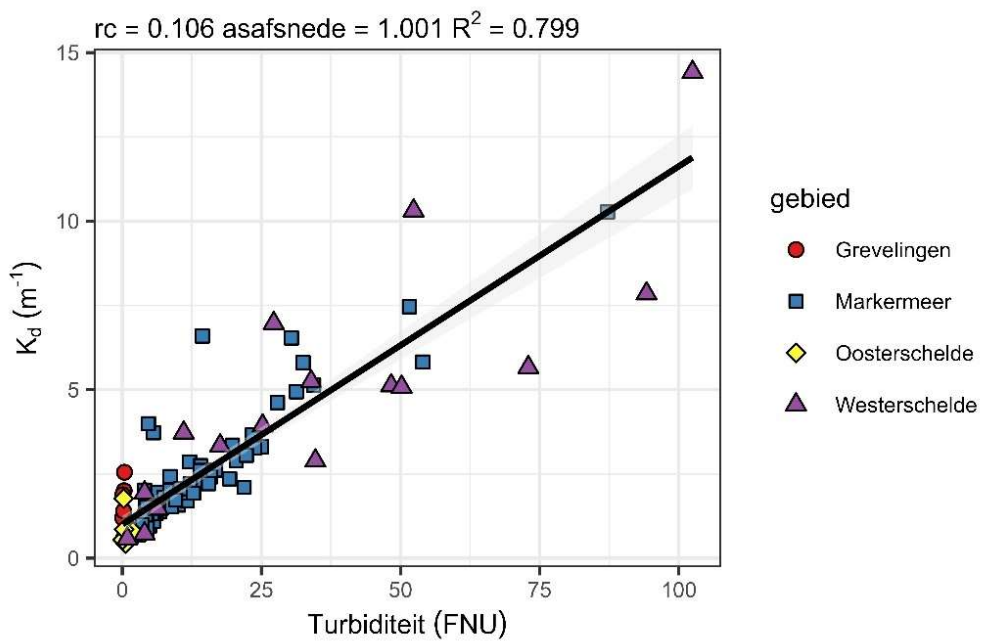
Alhoewel de correlatiecoëfficiënt behoorlijk hoog is ($r^2 = 0.787$), is de spreiding aanzienlijk. Om te controleren of analytisch gemeten chlorofyl a concentratie niet consequent hoger of lager is dan de (reeds gecorrigeerde) chlorofyl a getallen in de verschillende waterlichamen en deelgebieden zijn alle gegevens uitgezet tegen de tijd en getoond in Bijlage 2. De getallen van de FRRF zijn het gemiddelde per deelgebied. Als een MWTL-meetpunt in het deelgebied valt zijn deze gegevens toegevoegd. De spreiding in analytisch gemeten chlorofyl a is ook op deze wijze terug te zien, maar leidt niet tot een systematische over- of onderschatting. Alle verder getoonde resultaten waar chlorofyl a gegevens worden gebruikt of getoond zijn de met behulp van de ijklijn in figuur 4 gecorrigeerde waarden van de FRRF.

5.2. K_d – ijklijn

De ijklijn tussen turbiditeit en K_d wordt getoond in Figuur 5. Voor het opstellen van de relatie zijn gegevens van de Zeeuwse wateren en van het Markermeer gebruikt. Het Markermeer is toegevoegd om voldoende metingen te hebben voor een betrouwbare relatie. Er is a priori geen reden om aan te nemen dat verschillende typen water eenzelfde relatie oplevert. De metingen lijken echter op zelfde lijn te liggen, waardoor het toevoegen van metingen van het Markermeer in dit geval gerechtvaardigd is. Hierbij moet worden opgemerkt dat vanwege technische problemen het grootste gedeelte van 2021 en 2022 geen K_d metingen zijn uitgevoerd in de Oosterschelde, het Grevelingenmeer en het Veerse Meer. Op de Westerschelde zijn alleen metingen op het meest oostelijk gelegen meetpunt Schaar van Ouden Doel uitgevoerd. De gegevens van de Westerschelde en Markermeer hebben de grootste amplitude en bepalen daardoor grotendeels de ijklijn. Er zijn minder gegevens voor de overige waterlichamen beschikbaar, en dit zijn bovendien grotendeels lage waarden.



Figuur 4 IJklijn analytisch gemeten chlorofyl a uitgezet tegen de ongecorrigeerd schatting van de FRRF

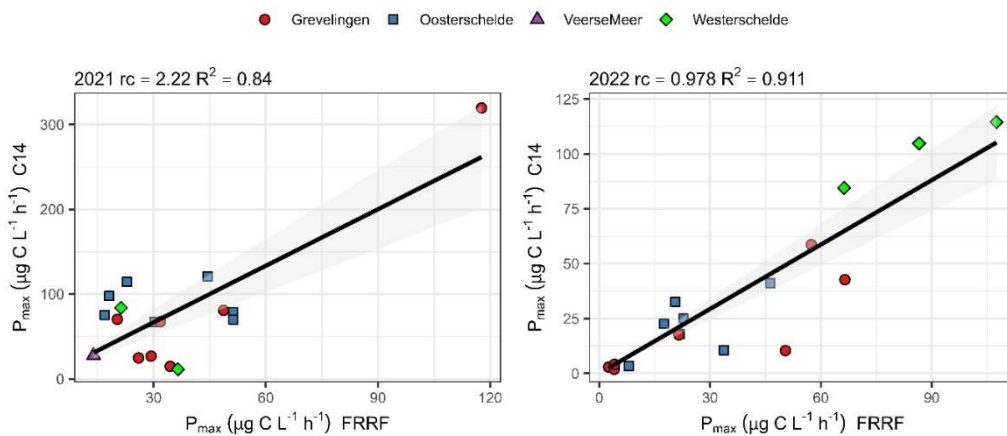


Figuur 5 IJklijn lichtuitdovingscoëfficiënt uitgezet tegen turbiditeit.

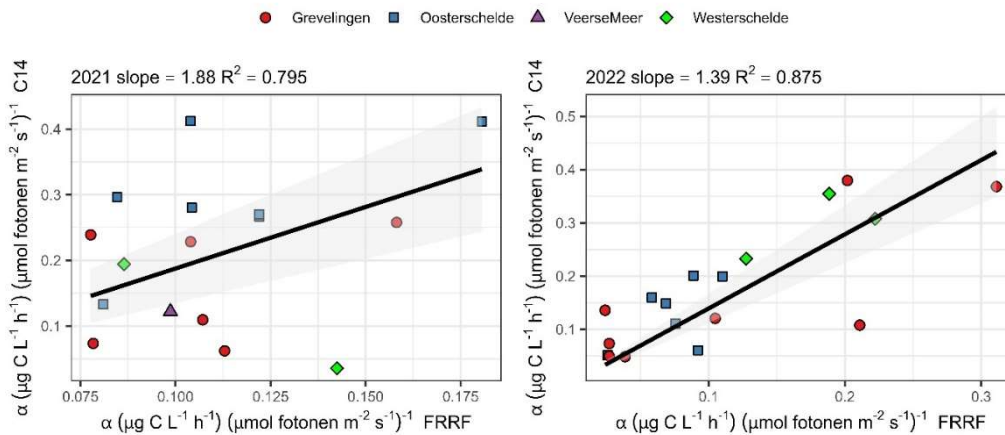
5.3. Vergelijking FRRF - ¹⁴C

Een aantal keer zijn tegelijkertijd met de FRRF-metingen monsters genomen voor ¹⁴C incubaties zodat een vergelijking kan worden uitgevoerd tussen beide methodes. In 2021 zijn de ¹⁴C metingen uitgevoerd door de Universiteit Antwerpen, in 2022 door het Nederland Instituut voor Onderzoek der Zee in Yerseke.

Figuur 6 toont de vergelijking voor P_{max} , terwijl Figuur 7 de vergelijking voor α toont. De getallen zijn op volume-basis, dus niet genormaliseerd op chlorofyl a om zo min mogelijk extra variabelen toe te voegen. De correlatiecoëfficiënt is steeds hoog ($r^2 > 0.8$), maar de waarden voor zowel P_{max} als α zijn in 2021 bijna twee keer zo hoog voor de ¹⁴C-techniek dan voor de FRRF-techniek. In 2022 komen de waarden veel beter overeen, met voor P_{max} een richtingscoëfficiënt van bijna 1. De richtingscoëfficiënt voor α is 1.39, dus iets hoger voor de ¹⁴C-techniek dan voor de FRRF-techniek.

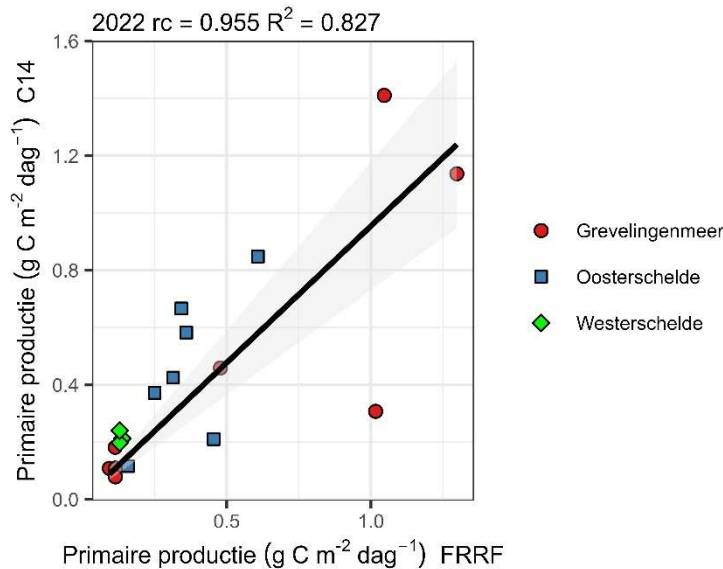


Figuur 6 Vergelijking ¹⁴C- en FRRF-techniek P_{max} (op volume basis) in 2021 (links) en 2022 (rechts).



Figuur 7 Vergelijking ¹⁴C- en FRRF-techniek α (op volume basis) in 2021 (links) en 2022 (rechts).

Voor 2022 is voor zowel de ^{14}C -metingen als de FRRF-metingen de dagproductie ($\text{g C m}^{-2} \text{dag}^{-1}$) berekend (Figuur 8). Ook op deze manier vergelijken toont een goede overeenkomst tussen beiden technieken voor 2022.

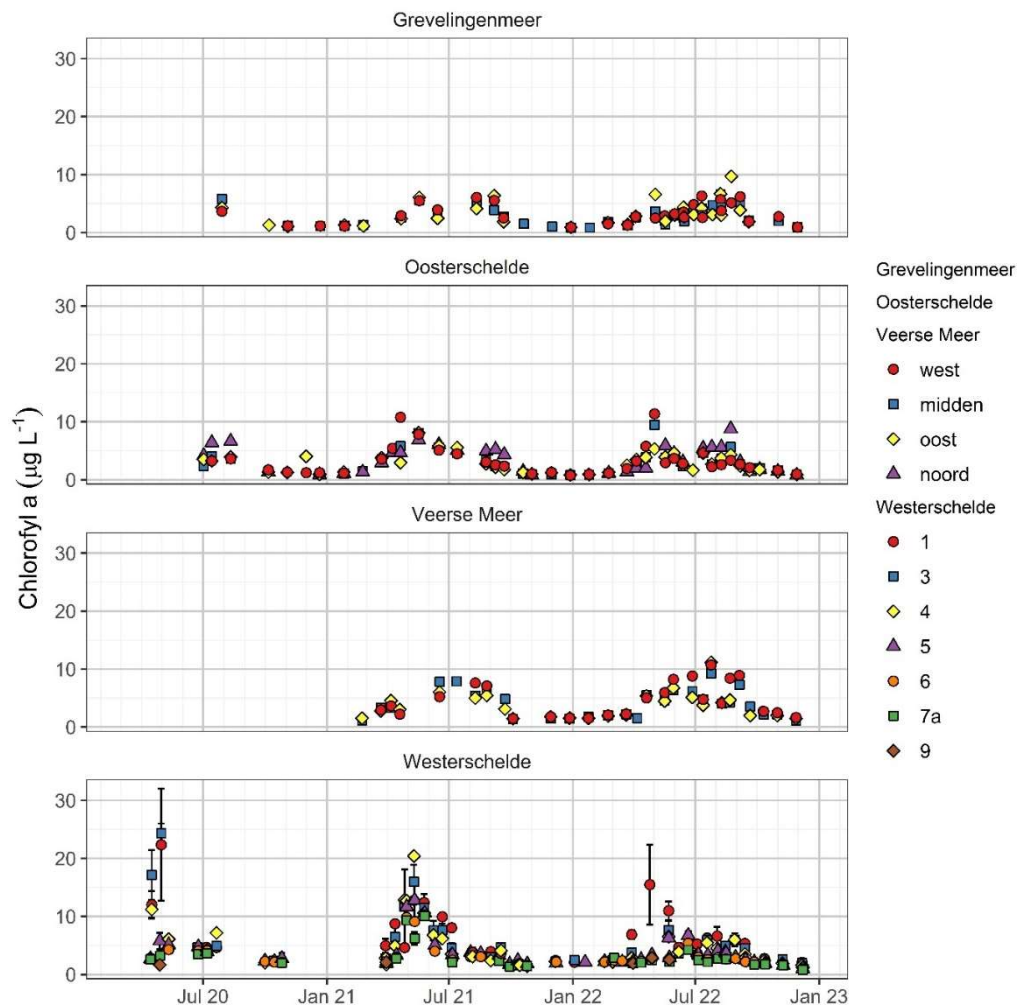


Figuur 8 Vergelijking ^{14}C - en FRRF-techniek dagproductie ($\text{g C m}^{-2} \text{dag}^{-1}$) voor 2022.

5.4. Chlorofyl a

Figuur 9 toont gecorrigeerd chlorofyl a concentraties van de FRRF. Net als bij alle resultaten die hierna worden gepresenteerd zijn de waarden het gemiddelde van de metingen per dag in een deelgebied. In alle waterlichamen is een jaarlijks patroon duidelijk zichtbaar. Maxima liggen voor het Grevelingenmeer, de Oosterschelde en het Veerse Meer rond de $10 \mu\text{g L}^{-1}$. De Westerschelde vertoont een hoger maximum in het voorjaar, terwijl de chlorofyl a concentraties de rest van het jaar lager zijn dan in de andere waterlichamen. De minimum-waarden worden in alle waterlichamen in de wintermaanden bereikt en zijn $< 1 \mu\text{g L}^{-1}$.

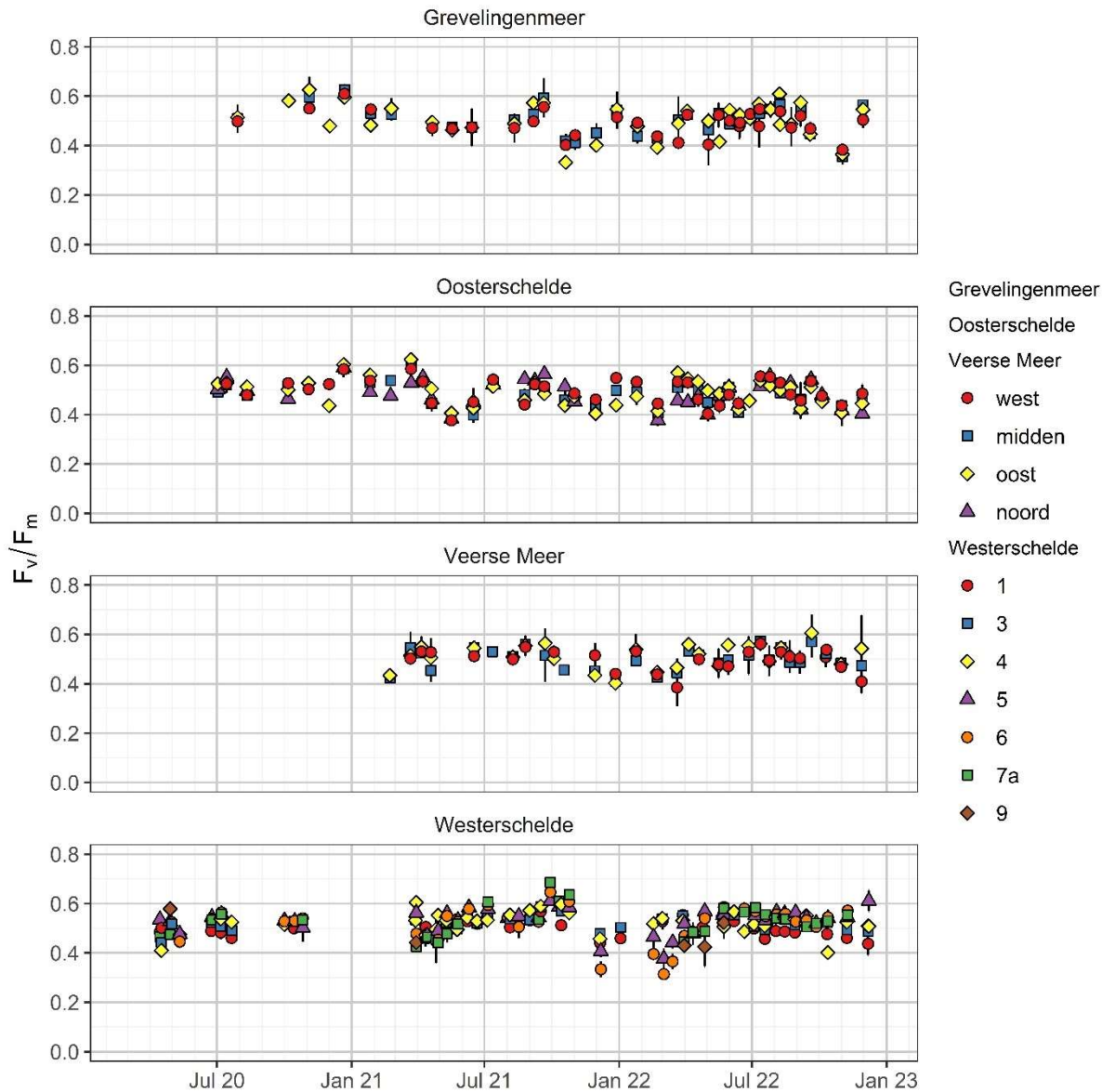
In het Grevelingmeer en het Veerse Meer worden maximale concentraties in de tweede helft van de zomer bereikt en zijn geen duidelijk verschillen tussen de deelgebieden (west, midden, oost) te zien. In de Oosterschelde is zowel 2021 als 2022 een maximum in het voorjaar zichtbaar, en in 2022 een tweede maximum in de tweede helft van de zomer. Het maximum in het voorjaar lijkt vooral in deelgebied 'west' en in iets minder mate in deelgebied 'midden' op te treden. Vanaf juli tot ca september zijn de concentraties in deelgebied 'noord' duidelijk hoger. Zowel het maximum in het voorjaar en de concentraties de rest van het jaar zijn in de Westerschelde hoger in het westelijk deelgebied (1, 2,3) dan in de oostelijke deelgebieden (6, 7a, 9).



Figuur 9 Chlorofyl a concentratie ($\mu\text{g L}^{-1}$) per waterlichaam. Op basis van de ijklijn in Figuur 4 berekende schatting van de FRRF. De getoonde waarde is het gemiddelde van de metingen die in een deelgebied vallen.

5.5. F_v/F_m

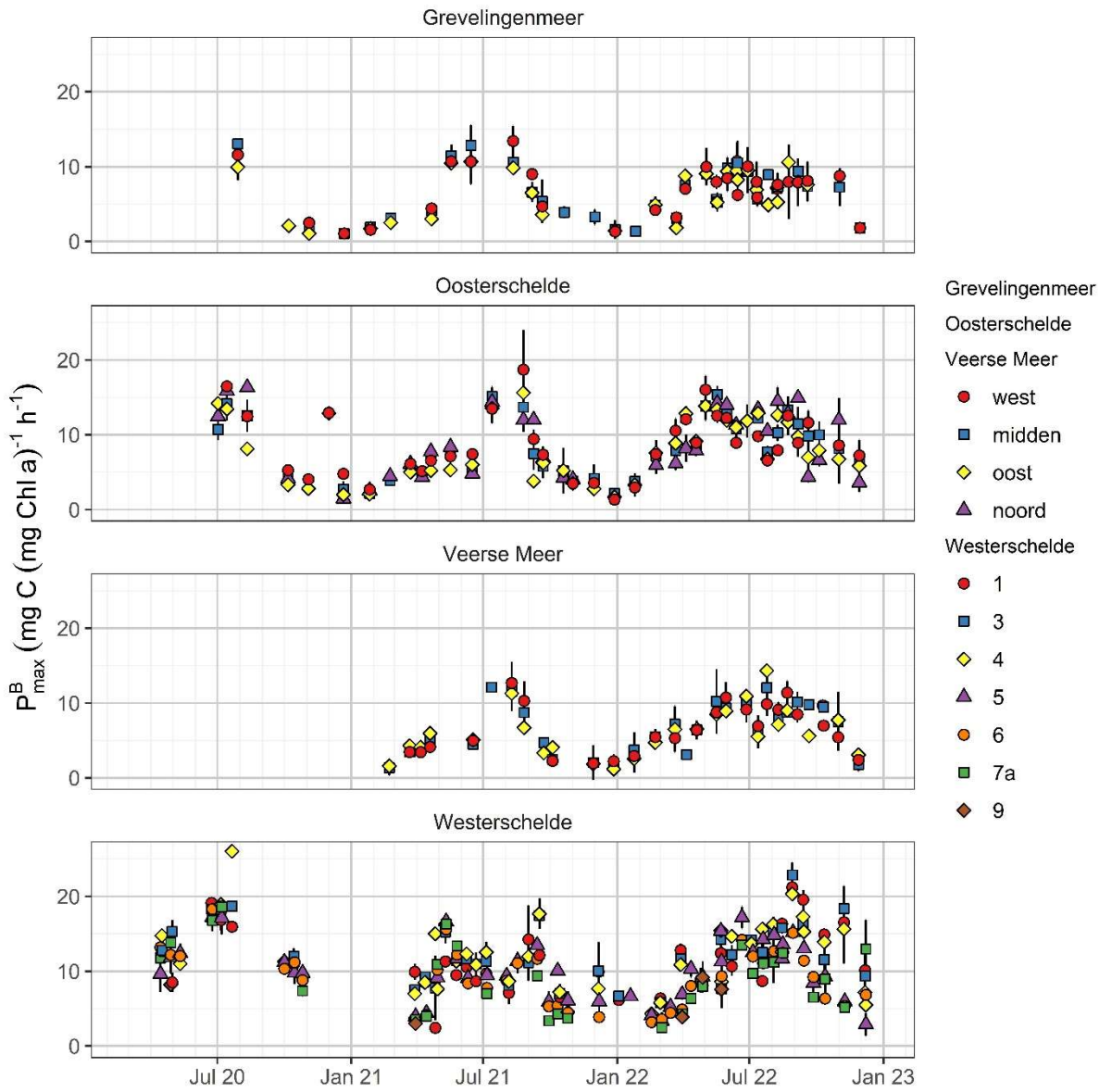
F_v/F_m is de maximale efficiëntie van fotosynthese en te beschouwen als indicator van de gezondheid van het fytoplankton. De waarden liggen grotendeels tussen 0.4 en 0.6 in alle waterlichamen en toont weinig seizoens-variantie (Figuur 10).



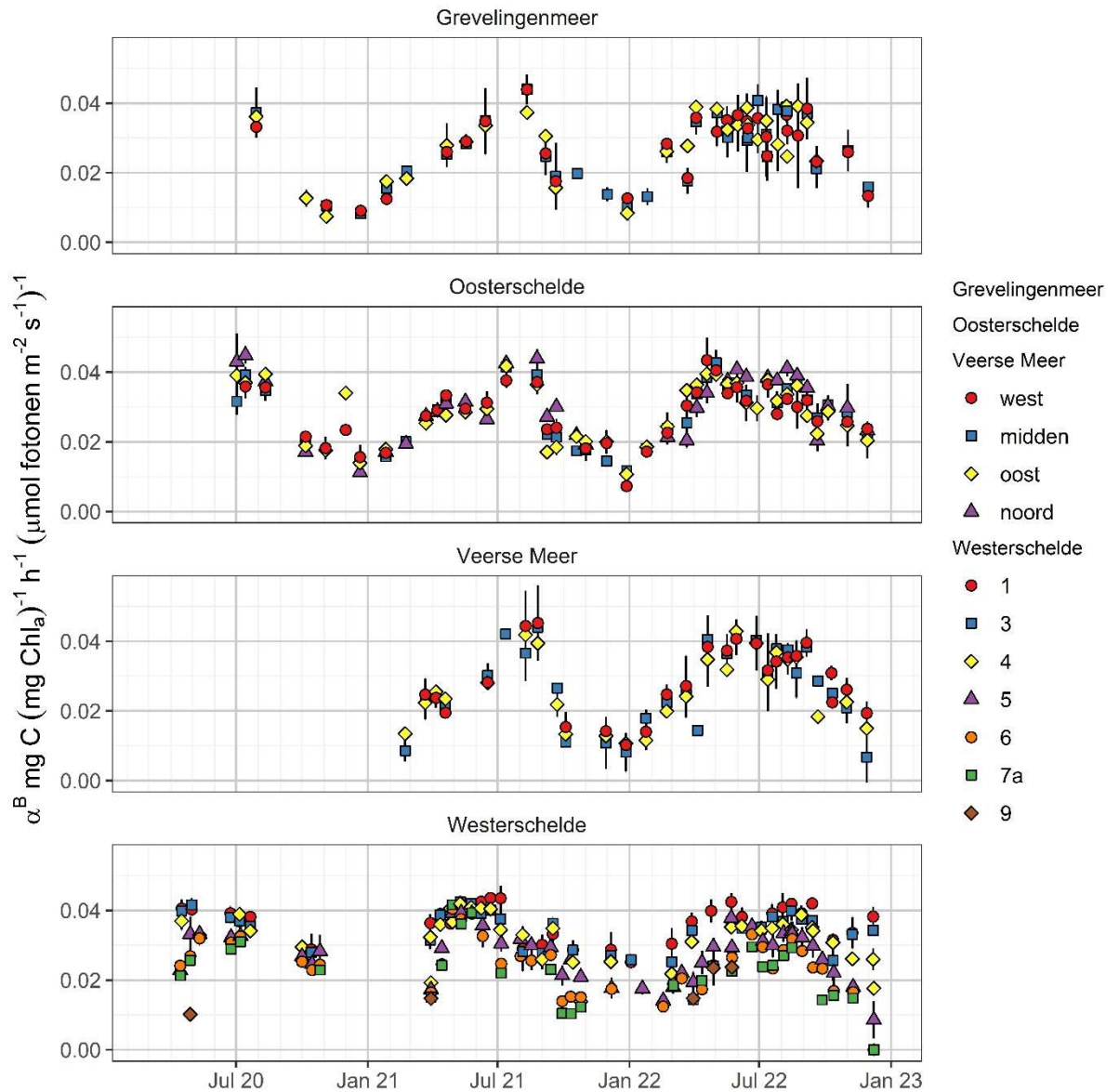
Figuur 10 De maximale efficiëntie van fotosynthese, F_v/F_m , te beschouwen als gezondheids-indicator van het fytoplankton.

5.6. Fotosynthese – licht parameters

P_{max}^B en a^B worden getoond in respectievelijk Figuur 11 en Figuur 12. Beide parameters vertonen voor alle gebieden een duidelijk patroon gedurende het jaar, met hoge waarden in de zomer en lage waarden in de winter. Eenzelfde figuur voor E_k wordt hier niet getoond maar is toegevoegd in Bijlage 3.



Figuur 11 P_{\max} genormaliseerd op chlorofyl a (mg C(mg Chl a)⁻¹uur⁻¹) per waterlichaam.



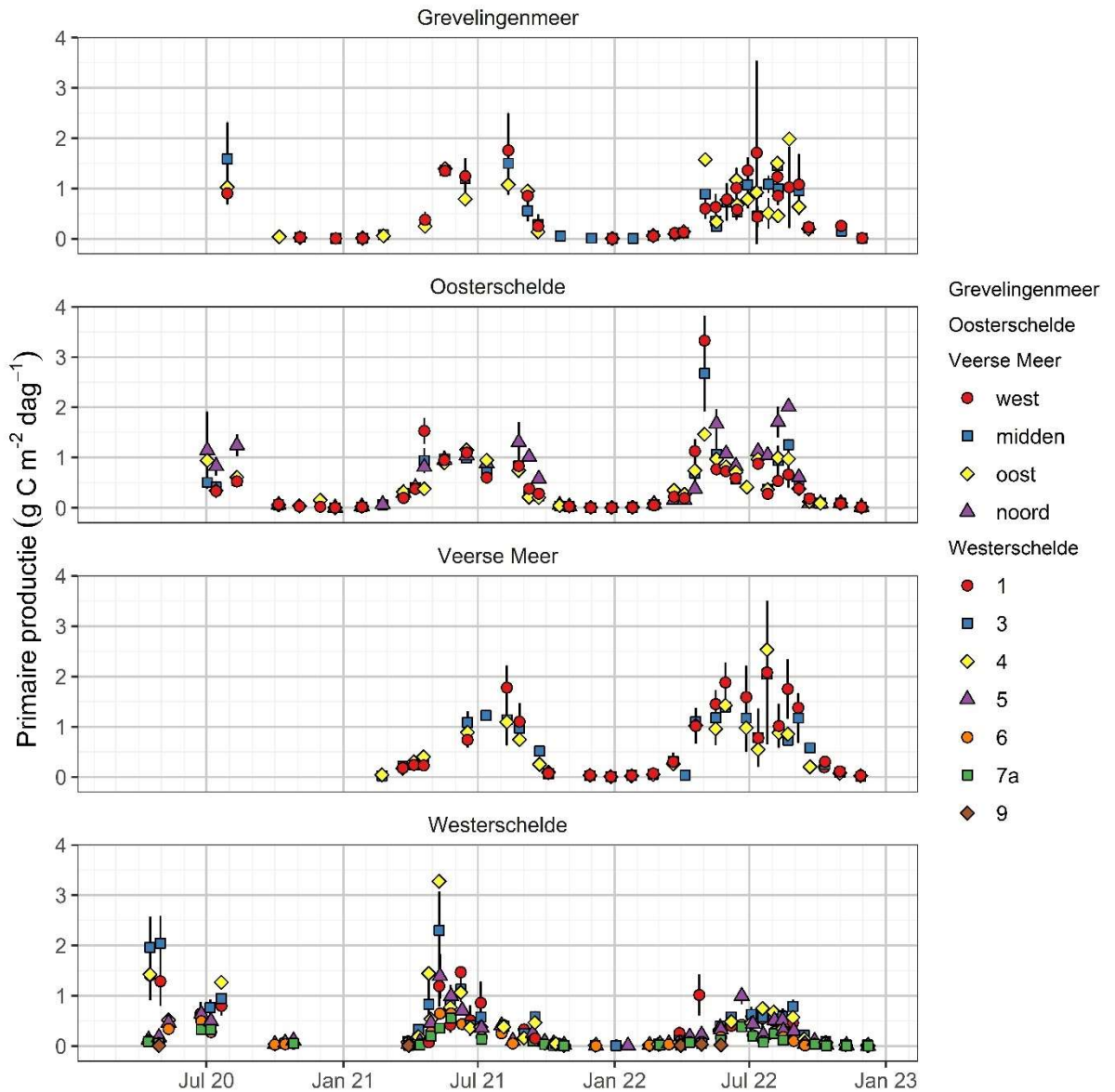
Figuur 12 a, genormaliseerd op chlorofyl a ($\text{mg C (mg Chl a)}^{-1} \text{ uur}^{-1} (\mu\text{mol fotonen m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$) per waterlichaam.

5.7. Primaire productie – dagproductie

Voor elke FRRF P-E meting is de primaire productie als $\text{g C m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ berekend waarbij instraling voor de dag van meting is gebruikt en de in tijd en plaats bij elkaar horende gegevens voor FRRF P-E parameters en K_d (Figuur 13). De aanname bij de berekening is dat de P-E karakteristieken en K_d voor die locatie niet veranderen gedurende de dag (Figuur 13).

De Oosterschelde en de Westerschelde vertonen beide een maximum in het voorjaar in het westelijk deel (west en midden voor Oosterschelde, 1, 3 en 4 voor de

Westerschelde). Primaire productie is duidelijk lager in de Westerschelde vergeleken met de ander waterlichamen.



Figuur 13 Primaire productie (g C m⁻² dag⁻¹) per waterlichaam.

De turbiditeit, en daarmee K_d , is een belangrijke parameter voor de dagproductie. De jaargemiddeldes staan vermeld in Tabel 2. Turbiditeit is het hoogst in de Westerschelde en het laagst in het Grevelingenmeer en het Veerse Meer. De turbiditeit in de Oosterschelde is iets hoger dan in het Grevelingenmeer en het Veerse Meer.

Tabel 2 Turbiditeit (NTU) per waterlichaam per jaar. Het aantal metingen per waterlichaam varieert tussen 4822 en 32494 metingen per jaar.

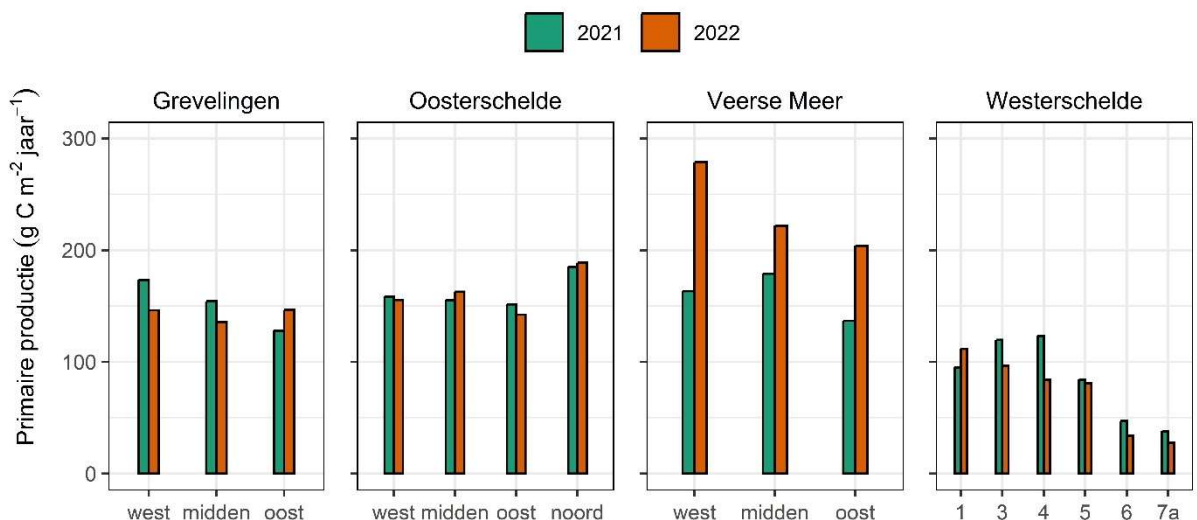
Waterlichaam	2021	2022
Grevelingenmeer	0.472±0.365	0.469±0.192
Oosterschelde	1.257±1.525	1.935±1.803
Veerse Meer	0.359±0.295	0.558±0.321
Westerschelde	12.174±14.640	20.094±21.583

De Westerschelde vertoont ook een duidelijk verloop in turbiditeit (niet getoond in dit rapport) van helderder water bij de monding (deelgebied 1) en hogere turbiditeit richting de Belgische grens (deelgebied 7b en 9).

5.8. Jaarproductie

Als laatste stap is per deelgebied en per waterlichaam primaire productie per jaar berekend ($\text{g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$). Deze berekening is alleen uitgevoerd voor de jaren 2021 en 2022, aangezien voor het jaar 2020 niet voldoende gegevens beschikbaar zijn. Figuur 14 toont jaarlijkse primaire productie per waterlichaam per deelgebied. In het Grevelingenmeer en de Oosterschelde zijn de verschillen tussen de deelgebieden klein. Alleen de noordelijke tak is duidelijk hoger in de Oosterschelde. 2021 en 2022 zijn redelijk vergelijkbaar voor deze waterlichamen. Voor het Veerse Meer is primaire productie aanzienlijk hoger in 2022 dan in 2021.

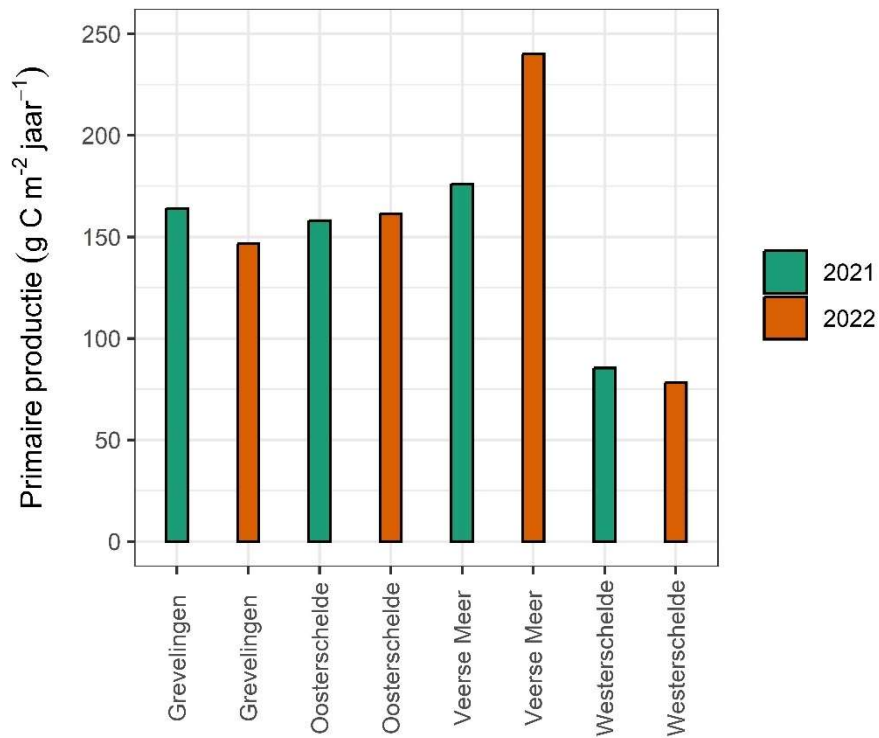
De Westerschelde vertoont in 2022 een afname van jaarlijkse primaire productie van de monding (deelgebied 1) naar Belgische grens (deelgebied 7a), oftewel van hoge saliniteit naar lage saliniteit, en ook van lage turbiditeit naar hoge turbiditeit. In 2021 neemt productie eerst toe van deelgebied 1 tot en met deelgebied 4, om daarna af te nemen zoals in 2022.



Figuur 14 Primaire productie per deelgebied per waterlichaam per jaar ($\text{g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$).

De jaarlijkse primaire productie per waterlichaam wordt getoond in Figuur 15. Voor de jaarlijkse productie per waterlichaam is eerst voor het hele waterlichaam een gemiddelde van de relevante parameters per dag berekend, en vervolgens zoals hierboven beschreven de jaarlijkse productie. De verschillen tussen 2021 en 2022

zijn relatief klein, afgezien van het Veerse Meer waar de productie duidelijk hoger is in 2022 dan in 2021.



Figuur 15 Primaire productie per waterlichaam per jaar (g C m⁻² jaar⁻¹)

6 Discussie

6.1. Validatie FRRF-techniek

Een belangrijke doelstelling van de huidige pilot is het evalueren van de FRRF-techniek als methode om primaire productie te meten en de betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid beoordelen.

De ^{14}C -techniek is van oudsher de meest gebruikte methode, vandaar dat dit de benchmark is waarmee andere technieken worden vergeleken. Een zekere mate van variatie tussen de ^{14}C - en de FRRF-techniek is te verwachten. FRRF-metingen kunnen direct na monsternamen worden gestart terwijl monsters voor ^{14}C -incubaties eerst naar het desbetreffende laboratorium moeten worden gebracht. Dit is logistiek lastig gebleken gezien de onzekerheid van het tijdstip van terugkomst van de schepen in een haven en het transport naar de laboratoria. Idealiter wordt de incubatie zo snel mogelijk na monsternamen uitgevoerd. In de praktijk kan de incubatie meestal pas de volgende dag worden uitgevoerd. Een ander verschil tussen beide technieken zijn de incubatietijden. Bij de FRRF-techniek wordt de complete P-E curve binnen 20 minuten gemeten terwijl een ^{14}C -incubatie bij het gebruikte protocol ongeveer 2 uur duurt.

In 2022 komen beiden technieken behoorlijk goed overeen, en de richtingscoëfficiënten voor de vergelijking tussen P_{max} en de dagproductie komen zelfs dichtbij de ideale waarde van 1. In 2021 was er ongeveer een factor twee verschil tussen de beide technieken.

De resultaten van de FRRF-metingen zijn vergelijkbaar in 2021 en 2022, waarmee het vermoeden bestaat dat het verschil door de ^{14}C -metingen wordt veroorzaakt. Het totale gehalte aan anorganisch koolstof (Total Inorganic Carbon, TIC) is als parameter noodzakelijk bij de ^{14}C -techniek. TIC is in 2021 is aangeleverd door Rijkswaterstaat waar deze als onderdeel van MWTL wordt gemeten op de MWTL-meetpunten, terwijl deze in 2022 direct voorafgaande aan de ^{14}C -incubatie aan elk monster is bepaald. Wellicht komen daardoor ^{14}C en FRRF-techniek beter overeen in 2022. Het is echter onwaarschijnlijk dat dit het complete verschil kan verklaren.

Een andere wijze om de FRRF-techniek te evalueren is vergelijken van de resultaten met literatuurgegevens die over het algemeen op de ^{14}C -techniek zijn gebaseerd. De met de FRRF-techniek bepaalde chlorofyl-genormaliseerde P-E parameters (σ^{B} en $P_{\text{max}}^{\text{B}}$) liggen in de bandbreedte die in de literatuur wordt gerapporteerd voor op de ^{14}C -techniek gebaseerde metingen. Zo wordt voor de Oosterschelde maximale waarden van $P_{\text{max}}^{\text{B}} \sim 15$ gevonden (Wetsteyn & Kromkamp, 1994) en voor de Westerschelde 5-10 (Kromkamp et al., 2013). Ook berekende primaire productie per jaar ligt in dezelfde lijn als gepubliceerde ^{14}C gebaseerde getallen voor de Oosterschelde (Smaal et al., 2013; Wetsteyn & Kromkamp, 1994), het Grevelingenmeer (Vegter & de Visscher, 1984) en de Westerschelde (Kromkamp et al., 2013). Dit biedt uiteraard geen zekerheid over de correctheid van de metingen. Echter, grote afwijkingen ten opzichte van deze verwachte literatuurwaarden zou aanleiding geven tot twijfel over de betrouwbaarheid.

Een uitgebreide vergelijking tussen ^{14}C en FRRF afgeleide primaire productie getallen voor de Oosterschelde en Westerschelde is in recente jaren uitgevoerd in zowel de Westerschelde als de Oosterschelde als onderdeel van PROTOOL

(Productivity Tools: Automated Tools to Measure Primary Productivity in European Seas. A New Autonomous Monitoring Tool to Measure the Primary Production of Major European Seas, onderdeel van Seventh Framework Programme) (Kromkamp et al 2012., Aardema et al., 2019; Kromkamp et al., 2017). Op basis van deze gegevens en de rapporten over de Westerschelde in het kader van MONEOS (Kromkamp, 2016; Kromkamp, 2020; Van Oevelen et al., 2021) is ervoor gekozen in eerste instantie een omrekening van 5 elektronen per vastgelegd CO₂ te gebruiken. Op basis van de vergelijking tussen FRRF en ¹⁴C-incubaties is er geen reden tot bijstelling van de omrekeningsfactor van 5 elektronen per koolstof.

In sterk nutriënt-gelimiteerd gebieden zoals open oceanen worden veel hogere waarden voor de omrekeningfactor ('electron requirement') van elektronen naar koolstof gevonden tot >20 aan toe, terwijl in relatief nutriënt-rijke kustgebieden waarden van 4 tot 6 worden gevonden (Lawrenz et al., 2013). Een hoge omrekeningsfactor komt vaak overeen met lage waarden voor F_v/F_m. De waarden voor de in de huidige studie onderzochte gebieden komen overeen met gezond fytoplankton, wat de keuze voor een omrekening van 5 elektronen per koolstof ondersteunt.

Een punt van aandacht bij alle methodes om primaire productie te bepalen is of bruto (GPP, gross primary production) en of netto (NPP, nett primary production) wordt gemeten. Dit is niet eenvoudig te bepalen. ¹⁴C-incubaties meten ergens tussen GPP en NPP, waarbij korte incubaties dicht bij GPP liggen en lange incubaties (bv 24 uur) eerder bij NPP liggen (Aardema et al., 2019; Kromkamp et al., 2017; Wijsman, 2019). Een complicerende factor is dat dit ook nog afhankelijk is van groeisnelheid van het fytoplankton. De FRRF meet in principe GPP, waarbij in gedachte moet worden gehouden dat, aangezien de FRRF-metingen 'gekalibreerd' worden door vergelijking met ¹⁴C metingen, een zekere mate van onzekerheid of GPP of NPP wordt gemeten ook in FRRF getallen aanwezig.

6.2. Gebiedsanalyse

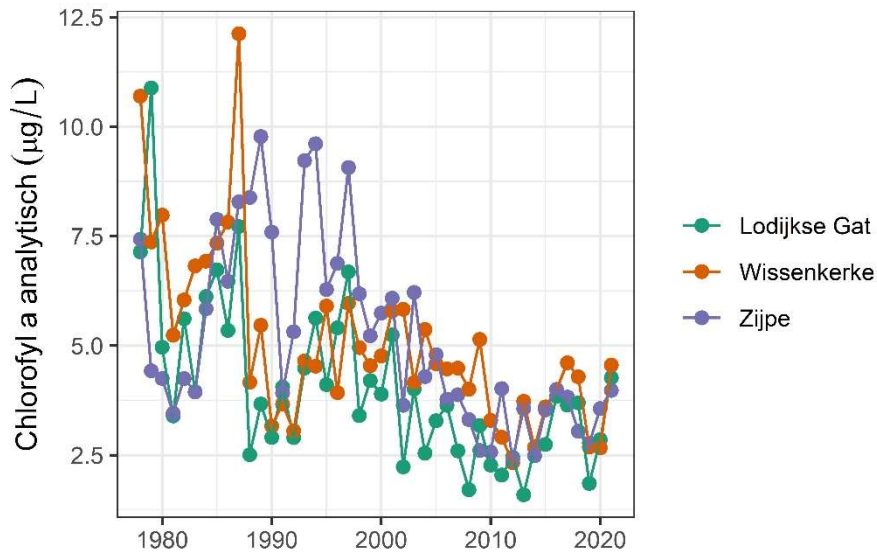
Het uiteindelijke doel van de metingen is het onderzoeken van de variatie in primaire productie tussen de waterlichamen en deelgebieden, en het inzetten van deze gegevens in verdere berekeningen en modellen.

De onderzochte gebieden hebben elk eigen karakteristieken. De verschillen zullen hieronder op beperkte wijze worden besproken, waarbij moet worden opgemerkt dat een uitgebreidere analyse buiten de scope van het huidige document valt.

Het Grevelingenmeer is een afgesloten zoutwatermeer. Vegter & de Visscher (1984) rapporteren voor het Grevelingenmeer een toename in jaarlijkse primaire productie van 80 g C m⁻² jaar⁻¹ in 1976, 171 g C m⁻² jaar⁻¹ in 1979 tot 225 g C m⁻² jaar⁻¹ in 1981. De huidige jaarproductie van 164 g C m⁻² jaar⁻¹ voor 2021 en 146 g C m⁻² jaar⁻¹ voor 2022 in het hele Grevelingenmeer ligt in dezelfde orde van grootte als gemeten in de jaren 1979-1981 na het sluiten van de Brouwersdam. De metingen tonen geen duidelijke consistente verschillen in productiviteit tussen de deelgebieden.

De Oosterschelde is een zeearm met getijdewerking. De productiviteit is hoger in deelgebied noord dan in de andere deelgebieden. Tussen west, midden en oost is weinig verschil in productiviteit. In het verleden zijn voor deelgebied oost, ook wel bekend als de kom, lagere productiesnelheden en chlorofyl concentraties gemeten dan wel berekend voor de jaren 1990-2010 (Malkin et al., 2011) wat niet terugkomt

in de huidige gegevens. Om dit verder te onderzoeken zijn de chlorofyl a gegevens voor de drie MWTL meetpunten in de Oosterschelde erbij gezocht (Figuur 16). Deze gegevens tonen vergelijkbaar met Malkin et al. (2011) lagere chlorofyl concentraties voor het in het deelgebied oost gelegen meetpunt Lodijkse Gat. Vanaf 2015 is dit verschil echter niet of nauwelijks aanwezig wat overeenkomt met de huidige gegevens voor chlorofyl a concentratie en primaire productie.



Figuur 16 Jaargemiddeld chlorofyl a concentraties van de drie MWTL-punten in de Oosterschelde (bron: Waterinfo.nl aangevuld met recente gegevens uit het Laboratory Information Management System CIV)

In de Oosterschelde zijn in verleden primaire productie metingen gedaan, met als belangrijke reden het volgen van veranderingen door de aanleg van de Deltawerken. Wetsteyn & Kromkamp (1994) tonen dat primaire productie lager is in het oostelijk deel in de jaren 1987-1990 ten opzichte van 1980-1984, terwijl productie in de noordelijke tak juist is toegenomen. In de overig gebieden werden geen grote verandering gemeten en lag de jaar productie rond $250 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$. Smaal et al. (2013) toont op basis van deels gemodelleerde deels gemeten (^{14}C) gegevens een afname aan van primaire productie in de Oosterschelde tussen 1995 en 2010 van $250\text{-}300 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$ rond 1995 tot ~ 150 in 2010. De huidige gegevens met een jaarproductie van $158 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$ voor 2021 en $161 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$ voor 2022 lijken aan te duiden dat primaire productie niet verder is afgenomen. Verdere analyse of modellering waarbij onder andere schelpdierbestanden en filtratiesnelheden worden meegenomen zal moeten aantonen of de gemeten jaarproductie voldoende dan wel te laag is om een gezond voedselweb te dragen.

Het Veerse Meer is een afgesloten brakwatermeer met een doorlaat naar de Oosterschelde en een getij van ongeveer 10 cm. Opvallend is de hogere productiviteit in 2022 vergeleken met 2021. Dit was enerzijds al zichtbaar in de chlorofyl concentratie (

Figuur 9) en de getallen voor primaire productie per dag (Figuur 13) en daarmee ook een daadwerkelijk verschil tussen beide jaren. Anderzijds lijkt het verschil veel groter als jaarlijkse primaire productie wordt berekend. Dit wordt in ieder geval

gedeeltelijk veroorzaakt doordat in 2021 in mei en juni enkele meetdagen zijn uitgevallen en de enige dag dat in die periode wel is gemeten P_{\max} relatief laag was. Een dergelijke variatie komt ook voor in de andere waterlichamen, maar omdat het hier de enige meetdag was in een langere periode is het effect relatief groot. Totale instraling (hier niet getoond) is ook een factor die verschillen tussen de jaren kan verklaren. Echter, dit kan niet de (enige) verklaring zijn aangezien voor alles waterlichamen dezelfde gegevens voor instraling zijn gebruikt en het Veerse Meer als enige een duidelijk hogere productie heeft in 2022 dan in 2021.

De primaire productie in het Veerse Meer is gemeten in de periode 1969 t/m 1971 met een productie tussen 250 en 360 g C m⁻² jaar⁻¹ en in de periode 1980 t/m 1982 met een productie tussen 229 en 377 g C m⁻² jaar⁻¹ (Holland, 2004 en referenties daarin). Deze getallen zijn van voor ingebruikname van het doorlaatmiddel Katse Heule in de Zandkreekdijk welke zorgt voor uitwisseling van water met de Oosterschelde en getijdewerking heeft teruggebracht in het Veerse Meer. In 2021 was de productie 176 g C m⁻² jaar⁻¹, in 2022 240 g C m⁻² jaar⁻¹. Daarmee lijkt primaire productie te zijn afgenomen ten opzicht van de eerdere metingen, waarbij komende jaren zal moeten blijken hoe groot de variatie van jaar tot jaar is.

De Westerschelde is een estuarium met gradiënten in onder andere zoutgehalte, turbiditeit en soortensamenstelling fytoplankton. De productiviteit is hoger bij de monding van de Westerschelde (deelgebieden 1, 2, 3) en lager richting Belgische grens (deelgebied 7a). De productiviteit is ook duidelijk lager in de Westerschelde dan in het Grevelingenmeer, de Oosterschelde en het Veerse Meer. Dit wordt grotendeels veroorzaakt door de hogere turbiditeit en daarmee ook hogere K_d en daardoor dunnere fotonische laag. Voor de Westerschelde zijn getallen van eerdere jaren bekend. Deze worden hier niet verder besproken maar zullen in een rapport voor MONEOS verder worden uitgewerkt.

De Oosterschelde en de Westerschelde vertonen beide een maximum in chlorofyl a concentratie en dagproductie in het voorjaar in het westelijk deel (west en midden voor Oosterschelde, 1, 3 en 4 voor de Westerschelde). Dit is waarschijnlijk de bijna elk jaar optredende bloei van *Phaeocystis* sp..

Naast graasdruk op het fytoplankton, bv door filtratie van mosselen en oesters, is de beschikbaarheid van nutriënten een belangrijk factor voor primaire productie. Verandering in nutriënt-concentraties kunnen verantwoordelijk zijn voor historische en recente veranderingen in primaire productie. Ter informatie zijn de concentraties van nitraat en fosfaat zijn toegevoegd in Bijlage 4. De gegevens zijn afkomstig van Waterinfo.nl, aangevuld met recente gegevens uit het CIV Laboratory Information Management System.

7 Conclusie

De vergelijking tussen de FRRF techniek en de ^{14}C techniek toont goede resultaten, vooral voor de metingen in 2022. De met behulp van de FRRF techniek berekende getallen voor primaire productie tonen een duidelijk jaarlijks patroon en er zijn ook duidelijke verschillen tussen de waterlichamen.

Voortzetten van de metingen in de komende jaren kan aantonen in hoeverre de gevonden patronen en verschillen reproduceerbaar zijn en hoe groot de variatie van jaar tot jaar is.

8 Aandachtspunten

8.1. Extinctie

De lichtuitdovingscoëfficiënt (K_d of extinctie binnen Rijkswaterstaat) is een belangrijke parameter. De verschillen in primaire productie tussen de Westerschelde en de andere drie waterlichamen worden bijvoorbeeld grotendeels veroorzaakt door de hogere turbiditeit, en dus K_d , in de Westerschelde. Het is dan ook uiterst ongelukkig dat juist deze parameter vanaf midden 2020 tot eind 2022 niet is gemeten vanwege softwareproblemen. Eind 2022 zijn deze problemen opgelost, en inmiddels worden K_d weer gemeten en gerapporteerd.

Er is een relatie opgesteld tussen turbiditeit en K_d , die gebruikt wordt om K_d af te schatten. In het kader van Moneos wordt al meerdere jaren op vergelijkbare wijze K_d geschat (Kromkamp, 2020; van Oevelen et al., 2021) met steeds vergelijkbare resultaten voor de ijklijn. Steeds als meer gegevens beschikbaar komen wordt de relatie aangepast. De veranderingen zijn steeds gering en de relatie blijkt consistent en betrouwbaar. Om deze relatie te kunnen controleren en versterken is het van belang dat K_d gemeten blijft worden.

8.2. Schoonhouden FRRF

Afgelopen jaren is gebleken dat het schoonhouden van de FRRF extreem belangrijk is. In de Westerschelde waar de metingen in het kader van MONEOS al langer lopen dan in de andere waterlichamen waren de metingen meerdere jaren niet betrouwbaar vanwege (waarschijnlijk) verontreiniging van het koelwater (Van Oevelen et al., 2021). De FRRF heeft een gesloten koelwater circuit. Water in een 1 L fles wordt op de juiste temperatuur gehouden in continu stromend monsterwater. Het koelwater stroomt om de meet-cuvet en over het detectievenster. Fytoplankton in het koelwater wordt daardoor gemeten door de FRRF. Als dit het geval is zijn de resultaten niet meer bruikbaar, aangezien geen onderscheid kan worden gemaakt tussen vervuiling (zijnde algen in het koelwater) en fytoplankton in het monster. Inmiddels treedt vervuiling van het koelwater door technische aanpassingen en een regelmatig schoonmaakroutine niet meer op, maar dit blijft absoluut een punt van aandacht.

9 Referenties

- Aardema, H. M., Rijkeboer, M., Lefebvre, A., Veen, A., & Kromkamp, J. C. (2019). High-resolution underway measurements of phytoplankton photosynthesis and abundance as an innovative addition to water quality monitoring programs. *Ocean Science*, 15(5), 1267–1285. <https://doi.org/10.5194/os-15-1267-2019>
- Cox, T. J. S., Maris, T., Soetaert, K., Kromkamp, J. C., Meire, P., & Meysman, F. (2015). Estimating primary production from oxygen time series: A novel approach in the frequency domain. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(10), 529–552. <https://doi.org/10.1002/lom3.10046>
- Dau, H. (1994). *Molecular mechanisms and quantitative models of variable photosystem II fluorescence* (Vol. 60, Issue 1).
- Eilers, P. H. C., & Peeters, J. C. H. (1988). A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. In *Ecological Modelling* (Vol. 42).
- Falkowski, P. G., Lin, H., & Gorbunov, M. Y. (2017). What limits photosynthetic energy conversion efficiency in nature? Lessons from the oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1730), 1–7. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0376>
- Genty, B., Briantais, J. M., & Baker, N. R. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 990(1), 87–92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)
- Holland, A. M. B. M. (2004). *Veerse Meer aan de Oosterschelde Toestand ecosysteem Veerse Meer vóór ingebruikname doorlaatmiddel Rapport RIKZ/2004.007*. www.ceebeeit.nl
- Hughes, D. J., Campbell, D. A., Doblin, M. A., Kromkamp, J. C., Lawrenz, E., Moore, C. M., Oxborough, K., Prášil, O., Ralph, P. J., Alvarez, M. F., & Suggett, D. J. (2018). Roadmaps and Detours: Active Chlorophyll- a Assessments of Primary Productivity Across Marine and Freshwater Systems. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 52, Issue 21, pp. 12039–12054). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03488>
- Kalaji, H. M., Schansker, G., Ladle, R. J., Goltsev, V., Bosa, K., Allakhverdiev, S. I., Brestic, M., Bussotti, F., Calatayud, A., Dąbrowski, P., Elsheery, N. I., Ferroni, L., Guidi, L., Hogewoning, S. W., Jajoo, A., Misra, A. N., Nebauer, S. G., Pancaldi, S., Penella, C., ... Zivcak, M. (2014). Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: Practical issues. In *Photosynthesis Research* (Vol. 122, Issue 2, pp. 121–158). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s11120-014-0024-6>
- Kromkamp, J. (2016). *Primaire productie in de Westerschelde in 2016 bepaald m.b.v. de Fast Repetition Rate fluorometrie techniek MONEOS voortgangsrapport 2016*.
- Kromkamp, J. C. (2020). MONEOS FRRF-PP reportage 2017-2018. Primaire productie in de Westerschelde in bepaald m.b.v. de Fast Repetition Rate fluorometrie techniek.MONEOS voortgangsrapport 2017 en 2018. In *2020*.
- Kromkamp, J. C., & Philippart, C. J. M. (2015). *Primaire productie in het Primaire productie in het waddengebied: meten en berekenen waddengebied: meten en berekenen*.
- Kromkamp, J., Capuzzo, E., & Philippart, C. J. (2017). *Measuring phytoplankton primary production: review of existing methodologies and suggestions for a common approach*.
- Kromkamp, J., Peene, J., van Rijswijk, P., Sandee, A., & Goosen, N. (1995). Nutrients, light and primary production by phytoplankton and microphytobenthos in the

- eutrophic, turbid Westerschelde estuary (The Netherlands). *Hydrobiologia*, 311, 9–19.
- Kromkamp, J., Peene, J., & Vlaming, J. (2013). *Primaire productie in de Westerschelde 2010_2013 Eindrapport*.
- Kromkamp, J., Silsbe, G., & Peene, J. (2012). *Final report on field testing and implementation in Dutch estuaries*.
- Lawrenz, E., Silsbe, G., Capuzzo, E., Ylöstalo, P., Forster, R. M., Simis, S. G. H., Prášil, O., Kromkamp, J. C., Hickman, A. E., Moore, C. M., Forget, M. H., Geider, R. J., & Suggett, D. J. (2013). Predicting the Electron Requirement for Carbon Fixation in Seas and Oceans. *PLoS ONE*, 8(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058137>
- Malkin, S., Kromkamp, J. & Herman, P. (2011). Primary production in the Oosterschelde: an analysis of historical data, size distribution and effect of grazing pressure.
- Maris, T., Bruens, A., van Duren, L., Vroom, J., Holzhauer, H., de Jonge, M., van Damm, S., Nolte, A., Kuijper, K., Taal, M., Jeuken, C., Kromkamp, J., van Wesenbeeck, B., van Ryckegem, G., van den Bergh, E., Wijnhoven, S., & Meire, P. (2014). *Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium*.
- Marra, J. (2002). Approaches to the measurement of plankton production. In *Phytoplankton productivity: Carbon assimilation in marine and freshwater ecosystems*. Eds. P.J.le B. Williams, D.N. Thomas, C.S. Reynolds (pp. 78–108).
- Oxborough, K., Moore, C. M., Suggett, D. J., Lawson, T., Chan, H. G., & Geider, R. J. (2012). Direct estimation of functional PSII reaction center concentration and PSII electron flux on a volume basis: A new approach to the analysis of Fast Repetition Rate fluorometry (FRRf) data. *Limnology and Oceanography: Methods*, 10(MARCH), 142–154. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.142>
- R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Regaudie-de-Gioux, A., Lasternas, S., Agusti, S., & Duarte, C. M. (2014). Comparing marine primary production estimates through different methods and development of conversion equations. *Frontiers in Marine Science*, 1. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00019>
- Rutten, T., & Kromkamp, J. (2019). *Thomas Rutten Projects Handleiding EasyFRRF-SimJacco*.
- Silsbe, G. M., Oxborough, K., Suggett, D. J., Forster, R. M., Ihnken, S., Komárek, O., Lawrenz, E., Prášil, O., Röttgers, R., Šicner, M., Simis, S. G. H., van Dijk, M. A., & Kromkamp, J. C. (2015). Toward autonomous measurements of photosynthetic electron transport rates: An evaluation of active fluorescence-based measurements of photochemistry. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13(3), 138–155. <https://doi.org/10.1002/lom3.10014>
- Smaal, A. C., Schellekens, T., van Stralen, M. R., & Kromkamp, J. C. (2013). Decrease of the carrying capacity of the Oosterschelde estuary (SW Delta, NL) for bivalve filter feeders due to overgrazing? *Aquaculture*, 404–405, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.04.008>
- Soetaert, K., Kromkamp, J., & Silsbe, G. (2014). FRRF: Tools for fitting photosynthesis-irradiance response curves. R package version 1.0
- Underwood, G. J. C., & Kromkamp, J. (1999). Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Advances in Ecological Research*, 29, 93–153.
- Van Oevelen, D., Kromkamp, J. C., Dijkman, N., & Lander Blommaert, &. (2021). *Primaire productie in de Westerschelde over de periode de Fast Repetition Rate Fluorometry techniek MONEOS eindrapport*.
- Vegter, F., & de Visscher, P. R. M. (1984). Phytoplankton primary production in Brackish Lake Grevelingen (SW Netherlands) during 1976–1981. *Netherlands Journal of Sea Research*, 18(3–4), 246–259. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(84\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0077-7579(84)90004-8)
- Wetsteyn, L. P. M. J., & Kromkamp, J. C. (1994). Turbidity, nutrients and phytoplankton primary production in the Oosterschelde (The Netherlands) before, during and after

a large-scale coastal engineering project (1980-1990). *Hydrobiologia*, 282–283(1), 61–78. <https://doi.org/10.1007/BF00024622>

Wijsman, J. (2019). *Meten van primaire productie in de Oosterschelde, Grevelingenmeer en het Veerse Meer. Overzicht van methodieken en plan van aanpak voor monitoring*. <https://doi.org/10.18174/472107>

10 Bijlagen

10.1. Bijlage 1 Fluorescentie

Fluorescentie is de basis van de FRRF-techniek. De fluorescentie is afkomstig van chlorofyl a, en specifiek van het aan fotosysteem 2 gebonden chlorofyl a. Een klein gedeelte van het door fytoplankton opgevangen licht wordt weer uitgestraald als fluorescentie. Deze fluorescentie is rood en meetbaar en op verschillende manieren in te zetten. Hieronder volgt een korte uitleg van de methode. Voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar de literatuur (Aardema et al., 2019; Hughes et al., 2018; Kromkamp et al., 2012.; Silsbe et al., 2015; Wijsman, 2019).

10.1.1. FRRF – meten activiteit fotosysteem II.

Hieronder volgt een vereenvoudigde uitleg hoe met behulp van fluorescentie de efficiëntie van fotosysteem 2 wordt bepaald. Een volledige uitleg kan worden gevonden in onder andere Dau (1994) en Genty et al., (1989).

Licht geabsorbeerd door fotosysteem 2 kan voor drie verschillende mogelijkheden worden gebruikt, namelijk fotosynthese (P), warmte (H) en fluorescentie (F).

Q_A is de eerste stabiele elektronenacceptor en bepaald of een fotosysteem een ladingsscheiding (= fotosynthese) kan uitvoeren. Bij een 'open' fotosysteem is Q_A geoxideerd en kan het een elektron accepteren dat bij ladingsscheiding vrijkomt (Q_A wordt gereduceerd). P is in dit geval maximaal, en H en F zijn minimaal. De parameters worden in dit geval aangeduid met een 'o' van open (H_o , F_o).

Bij een 'gesloten' fotosysteem er is al een elektron aanwezig op Q_A (Q_A is gereduceerd) en kan ladingscheiding niet succesvol worden uitgevoerd. P is in dit geval nul, en H en F zijn maximaal. Deze krijgen een 'm' (van maximaal) als subscript (H_m en F_m).

De verhouding tussen H en F is hetzelfde bij open en gesloten fotosystemen, dus $H_o/F_o = H_m/F_m$

Bovenstaand gegevens kunnen worden gecombineerd om P van open fotosystemen te berekenen:

Open fotosysteem

$1 = P + H_o + F_o$, waarbij 1 alle energie is die door fotosysteem 2 is geabsorbeerd

Dit kan worden omschreven als

$$P = 1 - H_o - F_o \quad (1)$$

Gesloten fotosysteem

$1 = H_m + F_m$

Dit kan worden omschreven als

$$H_m = 1 - F_m \quad (2)$$

Uit de verhouding F en H

$$H_o = F_o H_m / F_m \quad (3)$$

F_o kan worden gemeten met fluorescentie.

H_o kan worden uitgedrukt in F_o en F_m door (2) en (3) te combineren:

$$H_o = (F_o - F_o F_m) / F_m = F_o / F_m - F_o \quad (4)$$

H_o in (1) kan nu worden vervangen door (4):

$$P = 1 - F_o / F_m - F_o + F_o = 1 - F_o / F_m = F_m / F_m - F_o / F_m = (F_m - F_o) / F_m \quad (5)$$

P is nu compleet uitgedrukt in fluorescentie parameters die kunnen worden gemeten.

In het donker zijn alle fotosystemen 'open' en kan met een zwak meetlichtje F_o worden gemeten.

Om alle fotosystemen te sluiten wordt een serie sterkere lichtpulsjes gegeven, terwijl fluorescentie met hetzelfde zwakke meetlichtje als bij F_o wordt gemeten. Op het moment dat alle fotosystemen zijn gesloten wordt F_m bepaald.

P is de efficiëntie van fotosysteem 2, en is officieel de quantum yield van fotosysteem 2, oftewel het aantal elektronen geproduceerd per foton geabsorbeerd. Voor donker geadapteerde algen heet deze parameter F_v / F_m (v van variabele fluorescentie).

Als de algen licht krijgen is een gedeelte van de fotosystemen gesloten. Alle parameter krijgen in dit geval een ' om aan te duiden dat deze in het licht zijn gemeten.

De fractie die open is kan worden uitgedrukt als:

$$\text{Fractie open} = F_m' - F_t / F_m' - F_o' \quad (6)$$

F_t is de actuele fluorescentie (t van tijd)

Efficiëntie van fotosynthese heet in dit geval F_q' / F_m' , en is de efficiëntie van de open fotosystemen vermenigvuldigd met de fractie open fotosystemen:

$$F_q' / F_m' = (F_m' - F_o') / F_m' * F_m' - F_t / F_m' - F_o' = (F_m' - F_t) / F_m' \quad (7)$$

Bovenstaand nomenclatuur wordt zoveel mogelijk consequent gebruikt in dit rapport. In de wetenschappelijke literatuur worden verschillend afkortingen gebruikt voor dezelfde parameters. Dit is historisch gegroeid en afhankelijk van de 'school' en de gebruikte fluorometer.

Bij iedere individuele meting van F_v / F_m dan wel F_q' / F_m' wordt eerst F_o dan wel F_t gemeten en vervolgens worden door een serie snelle en kort lichtflitsjes alle fotosystemen gesloten om F_m dan wel F_m' te kunnen meten. Vanwege deze wijze meten (serie snelle korte lichtflitsjes) heet de techniek 'Fast Repetition Rate'.

10.1.2. Elektronen transport

De FRRF-methode maakt gebruik van het fluorescentie signaal om de snelheid van elektronen transport vanuit fotosysteem 2 te bepalen. Er zijn verschillende algoritmes beschikbaar om fotosysteem 2 elektronen transport te berekenen vanuit het fluorescentie-signaal. In het huidige rapport wordt gebruik gemaakt van het

zogenaamde absorptie algoritme. Uit verschillende onderzoeken is naar voren gekomen dat dit algoritme goed voldoet (Kromkamp, 2020; Oxborough et al., 2012; van Oevelen et al., 2021; Wijsman, 2019).

De FRRF berekent volumetrisch elektronen transport (JV_{PII}) oftewel het aantal elektronen per volume per tijdseenheid (bv elektronen per kubieke meter per uur). JV_{PII} wordt berekend uit de lichtintensiteit (E), het gedeelte van het licht dat wordt opgevangen door alle fotosysteem 2 eenheden per volume (a_{LHCII}) en de efficiëntie waarmee het opgevangen licht wordt gebruikt om elektronen de elektronen-transportketen in te sturen (F_q/F_m'). Als formule ziet dit er als volgt uit:

$$JV_{PII} = E * a_{LHCII} * F_q/F_m' \quad (8)$$

E is de lichtintensiteit in fotonen per vierkante meter per seconde. a_{LHCII} is de absorptie van licht door fotosysteem 2 per volume, dus van alle fotosysteem 2 eenheden per volume. Deze wordt berekend uit fluorescentie parameters vermenigvuldigd met een constante factor (K_A). Deze factor is specifiek voor het gebruikte type fluorometer, in dit geval de FRRF. K_A is bepaald tijdens een FRRF kalibratie workshop bij het Nederlands Instituut voor ecologie in Yerseke in 2012 (Kromkamp et al., 2012). In § 10.1.3 staan de formules om a_{LHCII} te berekenen. F_q/F_m' is de efficiëntie van fotosysteem 2, met andere woorden het aantal elektronen dat per opgevangen foton (licht deeltje) de elektronen transport keten in wordt gestuurd.

Gebruik makend van het absorptie algoritme (Kromkamp, 2020; Oxborough et al., 2012) levert de FRRF de resultaten in mol elektronen $m^{-2} dag^{-1}$. Om tot een voor een ecosystemen relevante eenheid te komen worden de getallen omgerekend naar koolstofeenheden door aan te nemen dat 5 elektronen nodig zijn om 1 koolstof vast te leggen en worden dezelfde eenheden verkregen als de ^{14}C -techniek, namelijk $g C m^{-2} dag^{-1}$.

10.1.3. Absorptie algoritme

Deze beschrijving van het absorptie algoritme is overgenomen uit Kromkamp (2020).

Het fotosynthetisch elektronen transport wordt berekend met het absorptie algoritme (eq. 9). Het absorptie algoritme berekent het volumetrisch elektronentransport uit het product van de fotosynthese kwantum efficiëntie (F_q'/F_m'), de absorptiecoëfficiënt van alle PSII-eenheden in $1 m^{-3}$ water en de lichtintensiteit (E). De factor 3600 zorgt voor een conversie van seconden naar uur. In formule:

$$JV_{PII} \text{ (in } \mu\text{mol electrons } m^{-3} h^{-1}\text{)} = \frac{F_q'}{F_m'} * a_{LHCII} * E * 3600 \quad (9)$$

Waarbij a_{LHCII} wordt berekend als:

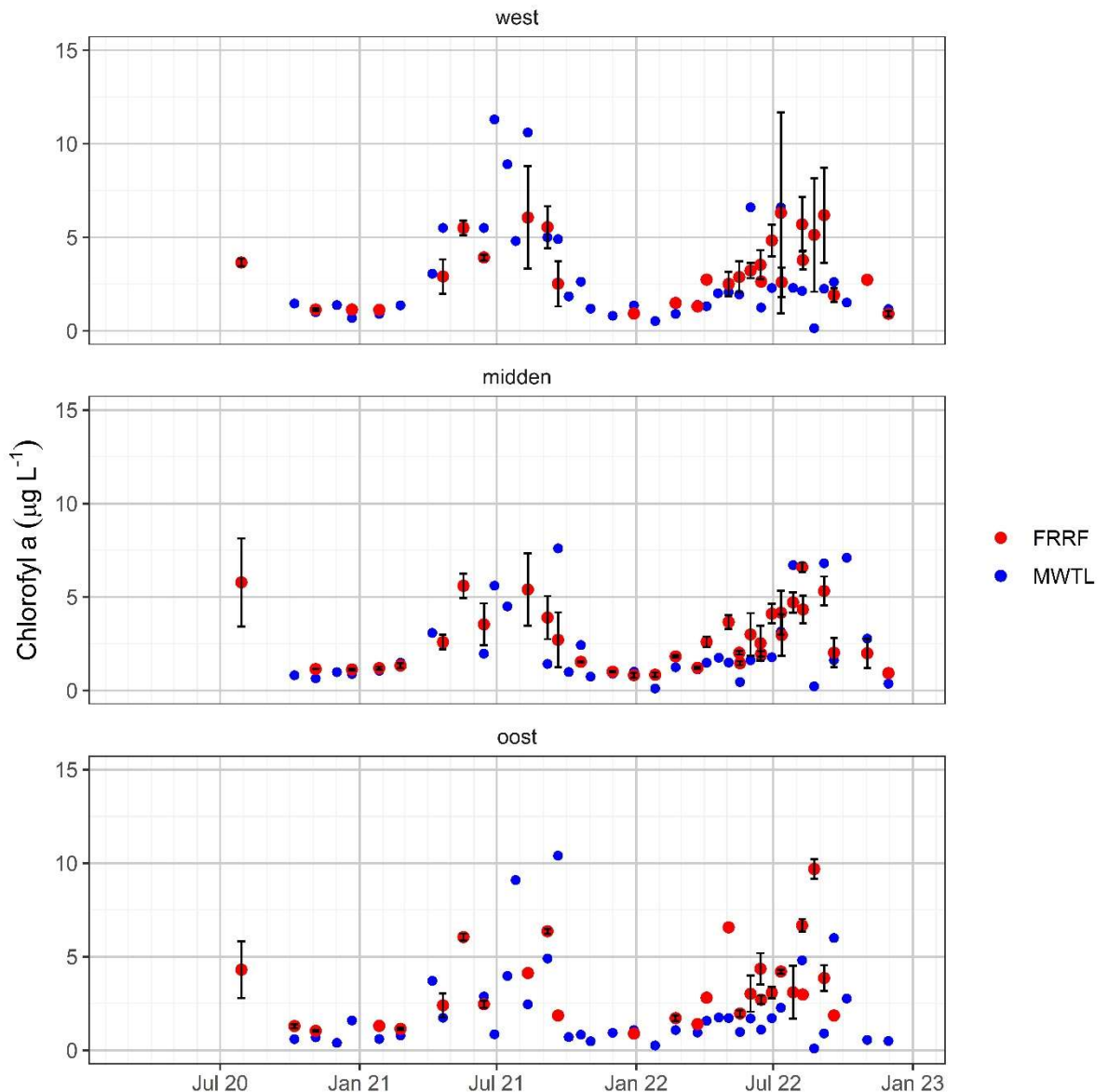
$$a_{LHCII} \text{ (in } m^{-1}\text{)} = \frac{F' * F_{mI}}{F_m' - F'} * \frac{K_A}{10^6} \quad (10)$$

K_A ($11800 m^{-1}$) is een type FRRF afhankelijke factor nodig voor de berekening van a_{LHCII} en de concentratie aan reactiecentra II-eenheden ($[RCII]$). Door JV_{PII} te delen door het chlorofyl a gehalte wordt een chlorofyl a genormaliseerde fotosynthese snelheid verkregen (Kromkamp, 2020; Oxborough et al., 2012; Silsbe et al., 2015)

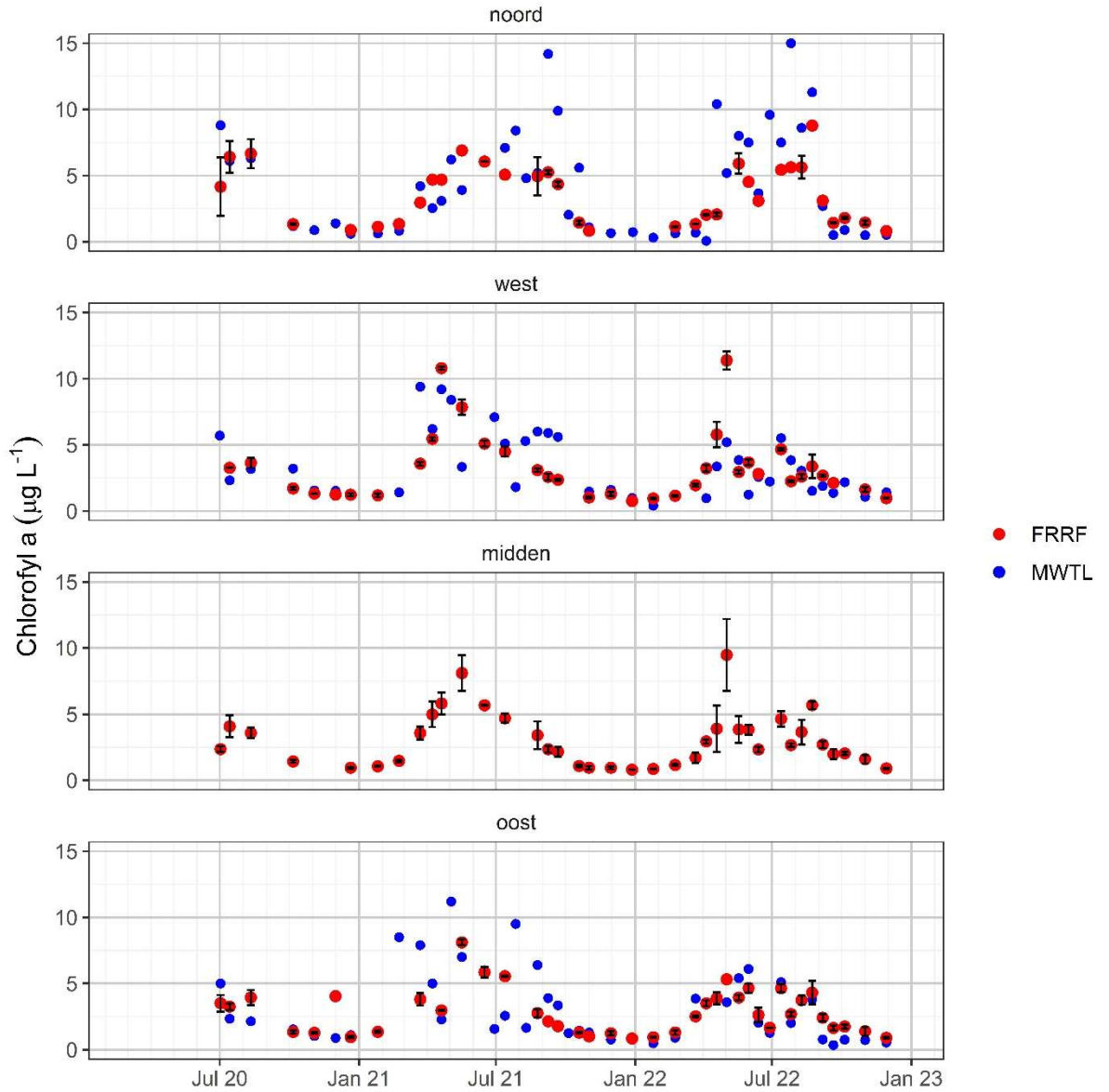
10.2. Bijlage 2 Chlorofyl a vergelijking analytisch gemeten vs schatting FRRF

Vergelijking voor MWTL analytisch gemeten chlorofyl a concentratie versus de uit de fluorescentie van de FRRF berekende waarde. De gegevens zijn opgesplitst per waterlichaam en deelgebied. De getallen van de FRRF zijn het gemiddelde per deelgebied. Als een MWTL-meetpunt in het deelgebied valt zijn deze gegevens toegevoegd.

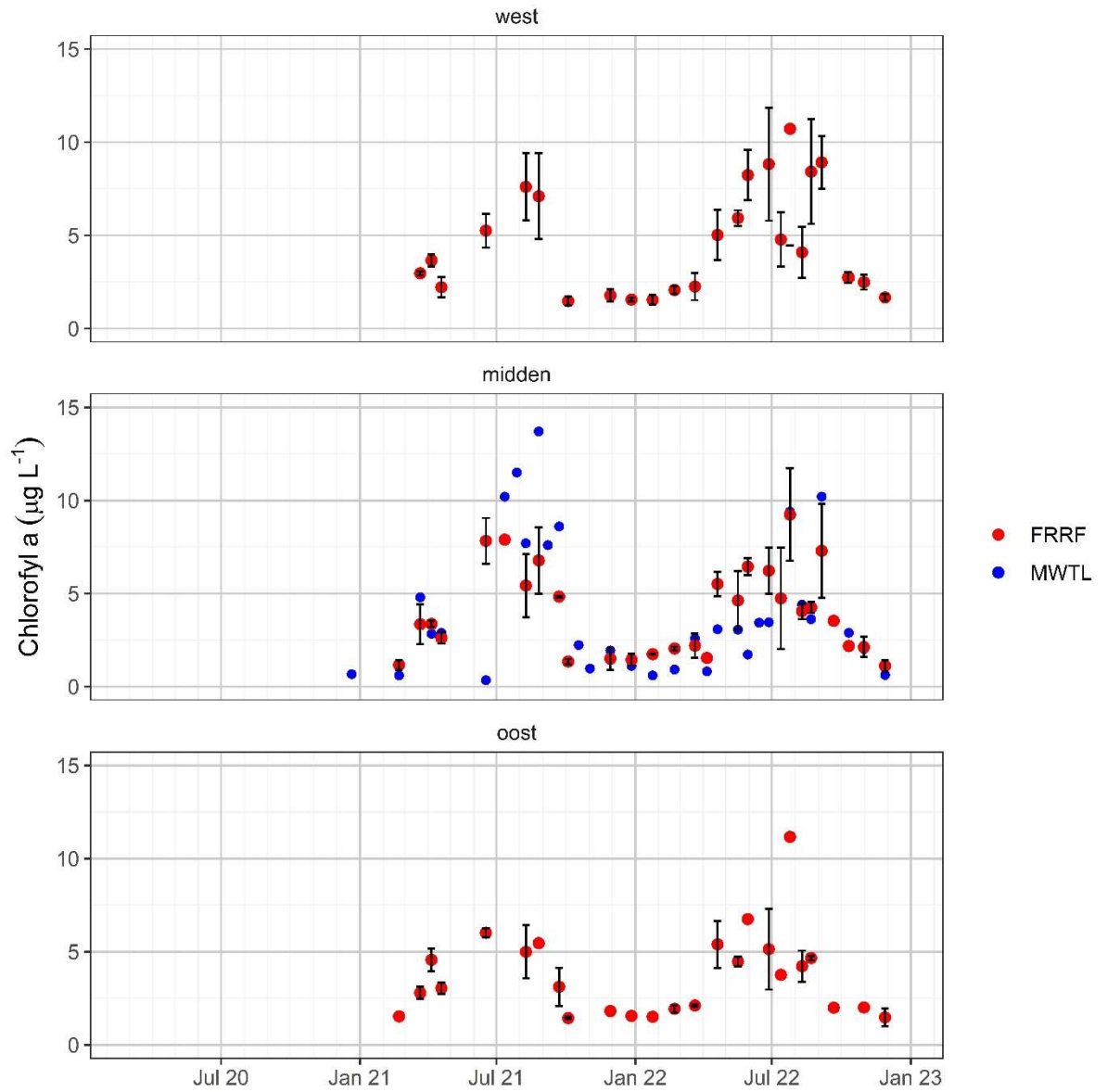
10.2.1. Grevelingenmeer



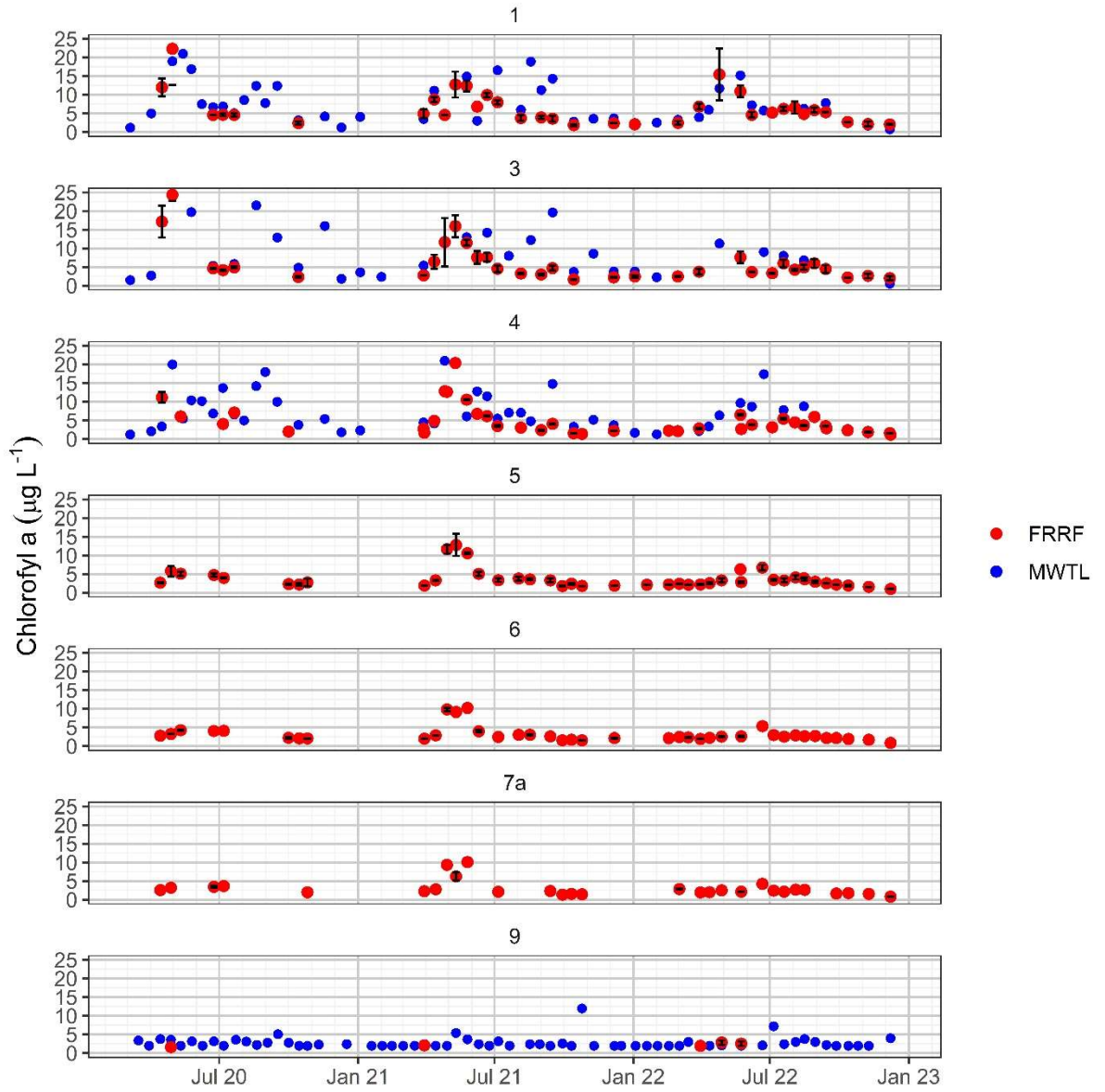
10.2.2. Oosterschelde



10.2.3. Veerse Meer

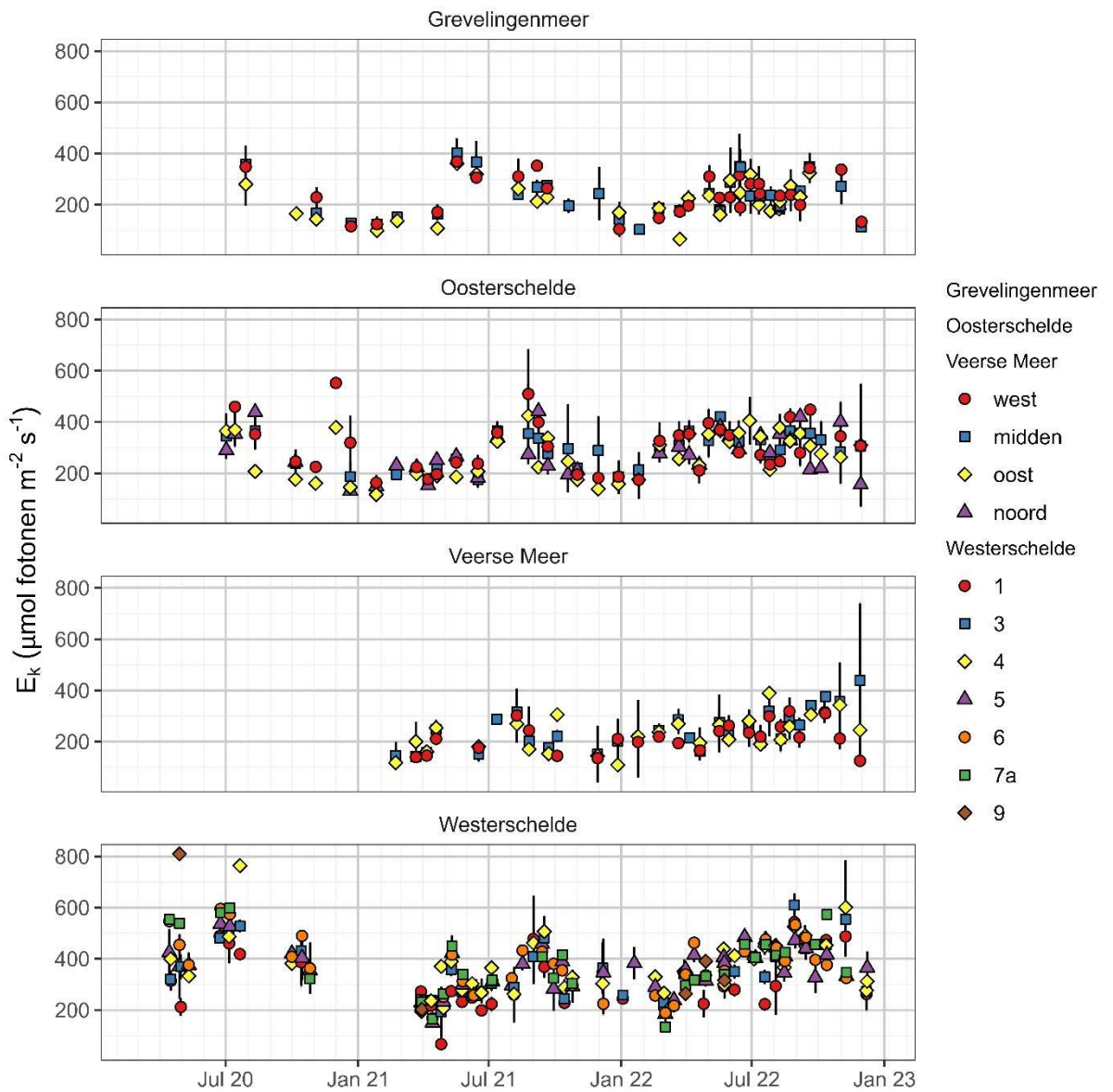


10.2.4. Westerschelde



10.3. Bijlage 3 P-E parameters

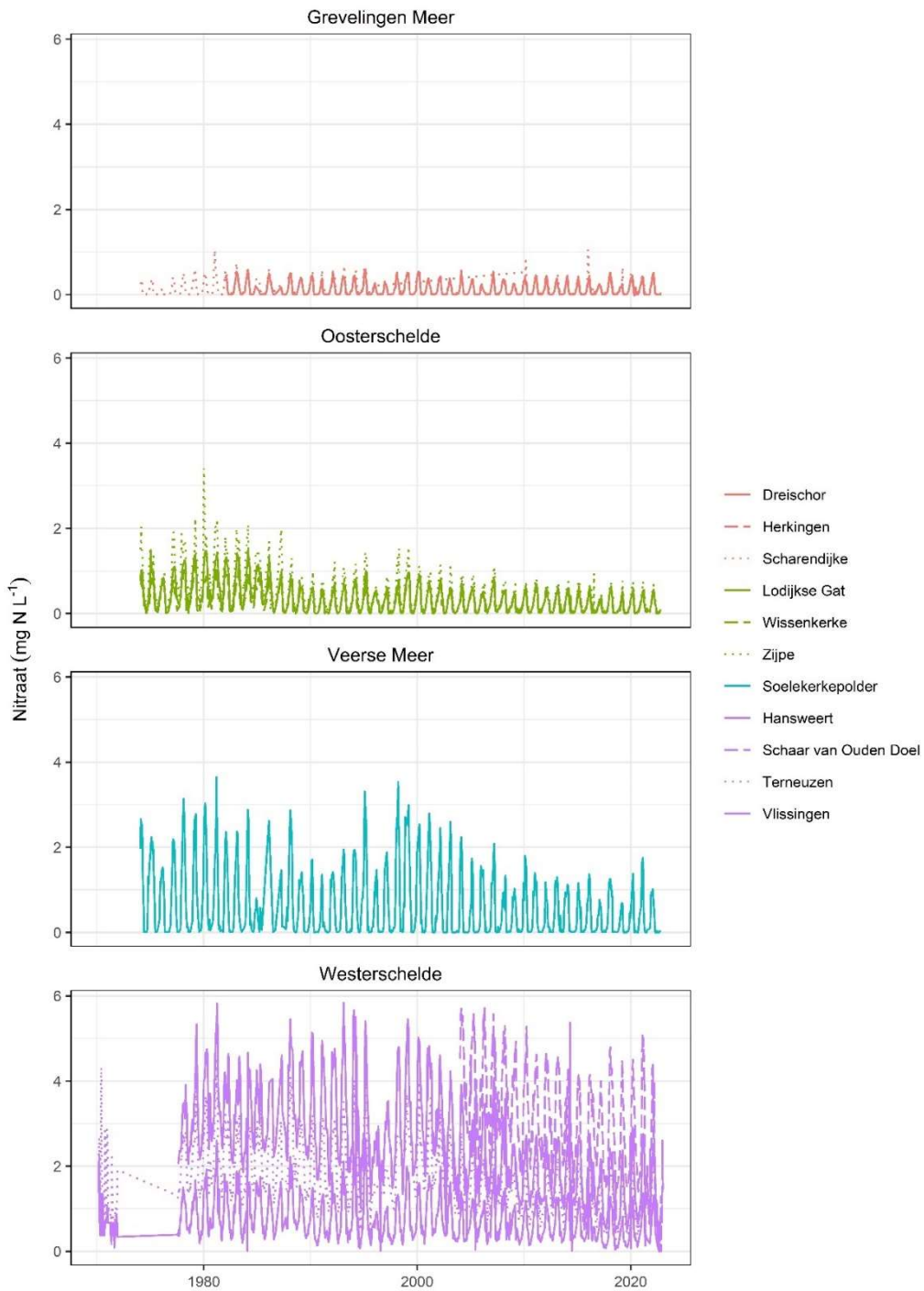
Lichtverzadigings-parameter E_k .



10.4. Bijlage 4 Nutriënten

bron: Waterinfo.nl aangevuld met gegevens uit het Laboratory Information Management System CIV)

Nitraat



Orthofosfaat

