

Primaire Productie Grote wateren

Een vergelijking van model- en meetmethoden en de relatie met ecologische draagkracht



Primaire Productie Grote wateren

Een vergelijking van model- en meetmethoden en de relatie met ecologische draagkracht

Auteur(s)

Tineke Troost

Annelotte van der Linden

Nicole Dijkman (RWS-CIV)

Marcel van den Berg (Aeres)

Amanda Holdt (RWS)

Primaire Productie Grote wateren

Een vergelijking van model- en meetmethoden en de relatie met ecologische draagkracht

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Marieke de Lange
Referenties	-
Trefwoorden	-

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	11-04-2025
Projectnummer	11210349-005
Document ID	11210349-005-ZWS-0001
Pagina's	65
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Tineke Troost Annelotte van der Linden Nicole Dijkman (RWS-CIV) Marcel van den Berg (Aeres) Amanda Holdt (RWS)	

Samenvatting

Primaire productie vormt de basis van het voedselweb. Kennis over de primaire productie is belangrijk, o.a. om te beoordelen of de doelen voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) en Natura2000 behaald worden. Procesfluxen zoals primaire productie zijn lastiger meetbaar dan grootheden zoals chlorofyl-a of biomassa, maar inmiddels zijn er een aantal meetmethodes beschikbaar en komen er steeds meer meetdata beschikbaar.

In dit project vergelijken we drie gangbare methodes om primaire productie te bepalen: o.b.v. zuurstofmetingen, o.b.v. FRFF metingen, en o.b.v. proces-gebaseerde modellen (in dit geval DWAQ-BLOOM). We lichten de methoden toe o.b.v. flowdiagrammen en bespreken in hoeverre ze overlappen in hun onderliggende aannames en resultaten, of ze uitwisselbaar of juist complementair zijn, en wat hun voordelen of beperkingen zijn.

Het tweede deel van dit rapport gaat over de 'waarde' van primaire productie: Wat zegt de hoeveelheid primaire productie over het ecosysteem-functioneren, oftewel: Wanneer is het genoeg? En zijn maatregelen van de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) –die vaak lokaal zijn- te vertalen naar een verandering in de productie van een heel ecosysteem? Hiertoe schetsen we een kader van hoe de bestaande regelgeving (Natura2000, KRW) zich verhoudt tot primaire productie. Vervolgens worden deze zaken meer concreet uitgewerkt voor het Markermeer, waarbij er wordt ingegaan op de lokale situatie en beperkende factoren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Onderzoeksvragen	8
1.3	Aanpak en leeswijzer	8
2	Primaire productie	9
2.1	Wat is primaire productie?	9
2.1.1	Fotosysteem I en II en de donkerreactie	9
2.2	Kwaliteit versus kwantiteit	10
3	Methodes primaire productie bepaling	11
3.1	Fast Repetition Rate Fluorometrie (FRRF)	11
3.2	O ₂ -Fourier methode	11
3.3	BLOOM model	12
4	Beschikbaarheid data	14
5	Conceptuele vergelijking methodes	17
5.1	Flow diagrammen	17
5.2	Vergelijkbaarheid en complementariteit	22
5.2.1	Algemene vergelijking	22
5.2.2	Vergelijking meetmethodes (FRRF vs. O ₂ -Fourier)	22
5.2.3	Vergelijking model vs. metingen (BLOOM vs. O ₂ & FRRF)	23
6	Kwantitatieve vergelijking methodes	24
6.1	Primaire productie	24
6.2	Andere (tussen)variabelen	26
6.3	Algensamenstelling	28
7	Conclusies o.b.v. de vergelijkingen tussen de methoden	31
7.1	Leiden de methodes tot vergelijkbare resultaten?	31
7.2	Wanneer welke methode toepassen?	31
7.3	Het belang van andere metingen	32
7.4	Kennisleemtes en aanbevelingen	32
8	Kader/advies relatie primaire productie en ecosysteem-functioneren	34
8.1	Wat is draagkracht?	34
8.2	Relatie voedingstoffen en draagkracht	35

8.2.1	'Bottom up' benadering	38
8.2.2	'Top down' benadering	40
8.2.3	Conclusie	41
8.3	De draagkracht vergroten met maatregelen	42
8.3.1	Natuurlijke toevoer voedingsstoffen vergroten	42
8.3.2	Verondiepen	43
8.3.3	Vergelijking van maatregelen die de productiviteit vergroten in het Markermeer	44
8.3.4	Conclusie	46
9	Literatuur	47
A	Overzicht relevante projecten	49
B	Meetgegevens Markermeer	51
B.1	Kd	51
B.2	MWTL – LIMS	53
B.3	Resultaten Flowcytometer Markermeer 2021	55
B.4	Gegevens uit Aquadesk	62

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Primaire productie vormt de basis van het voedselweb, want het is de bron van al het organische koolstof dat in het voedselweb wordt gebruikt. Dit project focust met name op pelagische productie, oftewel de productie van het fytoplankton. Zeker in diepere wateren zijn deze algen veruit de belangrijkste primaire producenten van de rijkswateren. Kennis over de hoeveelheid algen en de productie ervan is belangrijk, o.a. om te beoordelen of de doelen voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) en Natura2000 behaald worden. De doelen voor Natura2000 zijn voor bijvoorbeeld vogels uitgedrukt in aantallen per soort en per gebied. Voor een deel van deze soorten is de draagkracht via primaire productie mogelijk te kwantificeren.

Procesfluxen zoals primaire productie zijn lastiger meetbaar dan grootheden zoals chlorofyl-a of biomassa. Dit verklaart waarom er in het verleden nauwelijks in-situ data van beschikbaar waren. Wel waren er algenmodellen (zoals bv BLOOM) beschikbaar waarmee de primaire productie kon worden berekend, maar de gemodelleerde productieflex kon, vanwege het gebrek aan metingen, niet rechtstreeks worden gevalideerd.

Er bestaan meerdere methodes om de primaire productie te kunnen bepalen:

- Incubatie methoden
 - CO₂ incubatie
 - ¹⁴C fixatie
 - ¹³C fixatie
 - O₂ incubatie
 - ¹⁸O incubatie
- In-situ methoden
 - CO₂-eddy correlatie
 - O₂/Ar ratio bepaling
 - O₂-Fourier methode
 - Variabele fluorescentie (FRRF-PAM)

De verschillende incubatie en in-situ methodes zijn beschreven en vergeleken in Wijsman et al., 2019. Inmiddels worden een aantal van deze meetmethodes toegepast en zijn er ook daadwerkelijk verschillende meetcampagnes uitgevoerd in een aantal Nederlandse grote wateren (o.a. Oosterschelde en Markermeer, zie Tabel 4-1). Dit zijn met name de O₂-Fourier methode (op basis van continue O₂ metingen) en Fast Repetition Rate Fluorometrie (FRRF), waarbij het elektronentransport in fotosysteem II (PSII) wordt gemeten.

1.2 Onderzoeksvragen

Dit project richt zich op twee deelvragen:

- Methodes van productie-schattingen vergelijken: Er zijn inmiddels drie gangbare methodes om primaire productie te bepalen: o.b.v. zuurstofmetingen, o.b.v. FRFF metingen, en o.b.v. proces-gebaseerde modellen (bv BLOOM). In dit project gaan we deze methodes met elkaar vergelijken: in hoeverre overlappen hun onderliggende aannames en resultaten, zijn ze uitwisselbaar of juist complementair? Wat zijn hun voordelen of beperkingen? Wat is voor welke situatie geschikt?
- De tweede vraag gaat over de 'waarde' van primaire productie: Wat zegt de hoeveelheid primaire productie over het ecosysteem-functioneren, oftewel: Wanneer is het genoeg? En hoe verhoudt primaire productie zich tot biomassa van algen? En zijn maatregelen van de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) –die vaak lokaal zijn- te vertalen naar een verandering in de productie van een heel ecosysteem?

1.3 Aanpak en leeswijzer

Na een uitleg over primaire productie (Hoofdstuk 2) volgt een toelichting op de verschillende methoden (Hoofdstuk 3). Daarna inventariseren er welke meet- en modeldata er inmiddels (of binnenkort) beschikbaar zijn voor primaire productie in de grote wateren zoals de Oosterschelde en het Markermeer (Hoofdstuk 4).

Voor de vergelijking van de drie methodes beginnen we met een conceptuele vergelijking (Hoofdstuk 5), waarin we focussen op de verschillen of overeenkomsten in invoerdata, aannames, conversies en beperkingen. De resultaten zullen worden weergegeven middels een aantal flowdiagrammen. Daarna volgt een kwantitatieve vergelijking (Hoofdstuk 6) waarin we de resultaten van de drie methodes naast elkaar leggen. Hiervoor gebruiken we bestaande resultaten, welke voor minstens twee van de drie methodes beschikbaar moeten zijn op dezelfde locaties en momenten. In Hoofdstuk 7 trekken we conclusies op basis van bovenstaande vergelijkingen.

De vraag hoe primaire productie vertaald kan worden naar ecosysteem-functioneren is een complexe vraag waarvoor het lastig is om met een generiek antwoord te komen. Wel kunnen we een kader schetsen van hoe de bestaande regelgeving (Natura2000, KRW) zich verhoudt tot primaire productie (Hoofdstuk 8). Vervolgens werken we deze zaken meer concreet uit voor het Markermeer, waarbij we in gaan op de lokale situatie en beperkende factoren.

Er zijn meerdere projecten die relevant zijn voor bovenstaande vragen. Om zoveel mogelijk synergie te creëren tussen deze projecten, zullen we hiervoor een overzicht opstellen (Bijlage A).

2 Primaire productie

2.1 Wat is primaire productie?

Primaire productie is de aanmaak van organische verbindingen door producenten, middels fotosynthese of chemosynthese. Planten, algen en sommige bacteriën kunnen via fotosynthese een deel van de zonne-energie omzetten in chemische energie, die in de cel gebruikt kan worden voor de productie van suikers, aminozuren en eiwitten.

De producenten gebruiken een deel van deze bruto primaire productie (BPP) zelf voor hun eigen ademhaling en stofwisseling. Wat overblijft stapelt het organisme op in de vorm van biomassa, wat zich uit in groei en ontwikkeling. De toename in biomassa is de netto primaire productie (NPP). Alle biomassa bij de consumenten en de reducenten komt rechtstreeks of via een omweg van deze netto primaire productie.

2.1.1 Fotosysteem I en II en de donkerreactie

Bij de lichtreacties van fotosynthese zijn twee zogenaamde fotosystemen betrokken, fotosysteem I en II (afgekort: PSI en PSII, zie een schematische weergave hiervan in Figuur 2-1). Een fotosysteem is in staat om lichtenergie om te zetten in chemische energie, die wordt vastgelegd in chemische bindingen tussen atomen van de elementen koolstof, waterstof, en zuurstof, die daarmee samen een glucose-molecuul vormen.

De lichtreactie van de fotosynthese begint in **Fotosysteem II (PSII)**. Daarbij wordt de energie van de fotonen opgevangen en getransporteerd in de vorm van aangeslagen elektronen. Ondertussen spelen er ook nog andere reacties af, die ervoor zorgen dat watermoleculen worden omgezet in elektronen, protonen en zuurstofgas. Dit wordt ook wel de fotolyse (lichtsplitsing) van water genoemd.

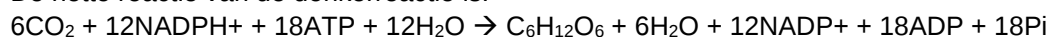
In **Fotosysteem I (PSI)** worden de elektronen gebruikt voor het creëren van NADPH. NADPH is de belangrijkste reductor in cellen en levert een bron van elektronen voor diverse andere reacties.

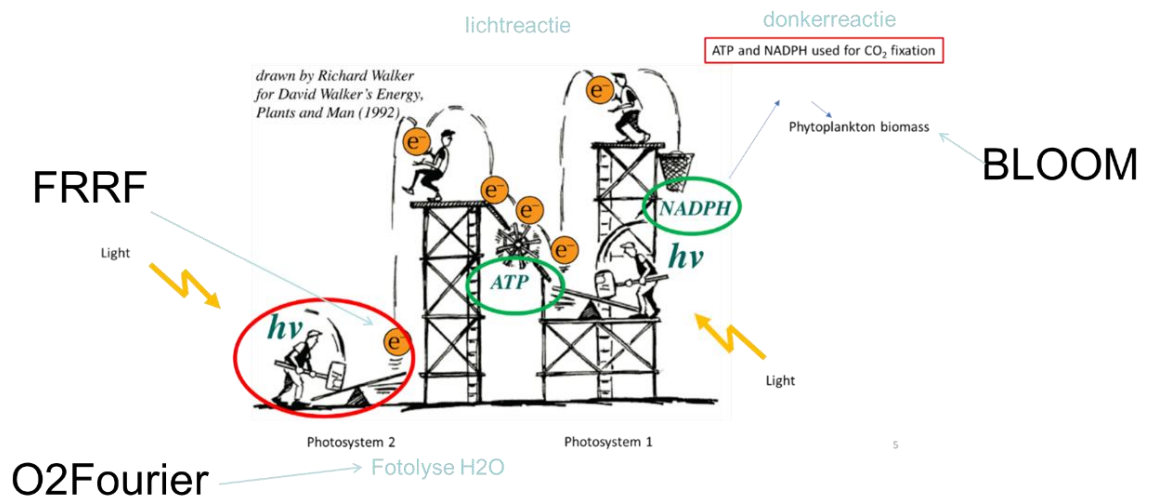
De netto reactie van de totale lichtreactie is:



De ATP en NADPH die geproduceerd worden met fotosynthese leveren energie voor diverse biochemische processen. In planten is de belangrijkste hiervan de calvincyclus waarbij koolstofdioxide wordt omgezet in ribulose (en vervolgens andere suikers). Deze reacties worden ook wel de donkerreacties genoemd omdat ze geen licht nodig hebben (dus niet omdat ze voornamelijk in het donker zouden plaatsvinden).

De netto reactie van de donkerreactie is:





Figuur 2-1 Schematische weergave van fotosysteem I en II. In het diagram is ook aangegeven op welke onderdelen de verschillende methodes focussen (lichtblauwe pijlen). Deze figuur is bewerkt op basis van Walker (1992).

2.2 Kwaliteit versus kwantiteit

De netto primaire productie wordt uitgedrukt in de eenheden $\text{gC/m}^2/\text{dag}$ of $\text{gC/m}^2/\text{jaar}$. Hierin staat de hoeveelheid koolstof dus centraal, als een maat voor de *kwantiteit* van de primaire productie.

Echter, de organische verbindingen van biomassa bestaan ook uit andere atomen waaronder waterstof, zuurstof, fosfor en stikstof. De verhouding waarin deze atomen voorkomen (stoichiometrie) ligt niet vast, maar verschilt tussen organen, individuen, en soorten. Consumenten hebben voor hun metabolisme, groei en ontwikkeling een bepaalde hoeveelheid koolstof nodig, maar ook hebben ze andere elementen nodig en met name voldoende stikstof en fosfor. Daarom zijn ze ook afhankelijk van de samenstelling van de primaire producenten. Naast hun verschillen in stoichiometrie zijn sommige producenten ook meer of minder eetbaar (bv vanwege hun afmetingen of beschermingsmechanismen). Deze aspecten vallen onder de *kwaliteit* van de primaire productie.

3 Methodes primaire productie bepaling

3.1 Fast Repetition Rate Fluorometrie (FRRF)

Dit is de meest directe en geavanceerde in situ methode onder beschouwing, die echter uitsluitend betrekking heeft op pelagische productie door fytoplankton. Bij Fast Repetition Rate Fluorometrie wordt aan de hand van fluorescentie de fotosynthese-snelheid gemeten als volumetrisch elektronentransport (JVPII), oftewel het aantal elektronen per liter per uur. De fluorescentie die gemeten wordt is gelinkt aan het elektronentransport van PSII van het fotosynthese proces (Wijsman et al., 2019, Dijkman, 2023). Fotosynthese-snelheid wordt gemeten tijdens een serie stapsgewijs oplopende lichtintensiteiten zodat een productie – lichtintensiteit (P-E) curve kan worden opgesteld. De metingen worden uitgevoerd met een Fast Repetition Rate fluorometer die automatisch ca. elke 20 minuten een P-E curve meet. Zo kunnen er tijdens een meetcampagne vaak meerdere P-E curves per gebied worden gemaakt, wat een goede ruimtelijke dekking oplevert.

Om tot een voor een ecosystemen relevante eenheid te komen wordt fotosynthese-snelheid omgerekend naar koolstofeenheden in gC/L/uur, ofwel koolstof-fixatie per volume per tijdseenheid. Hiervoor wordt aangenomen dat 5 elektronen nodig zijn om 1 koolstofatoom vast te leggen. Voor de omrekening van elektronen per koolstofatoom zijn literatuurgegevens beschikbaar (Kromkamp, 2016, Kromkamp et al., 2017, Lawrenz et al., 2013). Daarnaast wordt de omrekening vaak gecontroleerd en eventueel aangepast aan hand van P-E curves bepaald met de ^{14}C fixatiemethode (Dijkman, 2023, Wijsman et al., 2019). Zowel de FRRF als de ^{14}C P-E curves zijn gefit aan hand van het model van Eilers en Peeters (Eilers & Peeters, 1988).

Om de bruto primaire productie per oppervlakte per tijdseenheid te bepalen wordt de beschikbaarheid van licht onder water berekend op basis van de instraling op het wateroppervlak en lichtuitdoving onder water. Hieruit volgt voor elke diepte een lichtintensiteit die met behulp van de gemeten P-E curves om kan worden gezet naar een fotosynthese - snelheid op elke diepte. Sommeren over de diepte levert productie per oppervlak per tijdseenheid. Afhankelijk van de instralingsdata is dit vaak per uur, dus gC/m²/uur is. Onder de aanname dat biomassa concentratie en P-E karakteristieken niet veranderen gedurende de dag kan ook de productie per dag bepaald worden (gC/m²/dag). Een gedetailleerd beschrijving van de FRRF - methode is te vinden in Dijkman (2023) waar voor de Zeeuwse wateren dezelfde methode is toegepast. Vaak wordt tegelijkertijd met de FRRF metingen ook metingen met de flowcytometer uitgevoerd. Deze metingen worden gebruikt om via de sideward scatter (SWS) de benodigde extinctie rate (Kd) te kunnen benaderen, en/of om de fytoplankton samenstelling te achterhalen (zie ook Bijlage B.3).

3.2 O₂-Fourier methode

Een andere in-situ methode is de bepaling van primaire productie aan de hand van zuurstofconcentraties. Door zuurstofveranderingen over de dag op een bepaalde diepte in de waterkolom te analyseren kan de bruto primaire productie en respiratie van de aanwezige community worden bepaald. In ondiep water betreft dit, anders dan bij de vorige methode, eventueel niet alleen de primaire productie door fytoplankton, maar ook door waterplanten en perifyton. Veranderingen in zuurstof worden bovendien niet alleen bepaald door productie en respiratie. Ook lucht-water uitwisseling, watertransport (bijv. getij) en turbulente menging zijn van invloed.

Cox et al. (2015) hebben een methode ontwikkeld, de O₂-Fourier methode, waarbij bruto primaire productie wordt afgeleid uit hoogfrequente zuurstofmetingen met behulp van Fourieranalyse. De methode is gebaseerd op de aanname dat de processen die van invloed zijn op de primaire productie op verschillende tijdschalen actief zijn en een specifiek signaal achterlaten in de zuurstof-tijdserie. Met Fourieranalyse kan de zuurstof-tijdserie ontleed worden in een som van sinus- en cosinus functies om zo de verschillende processen te identificeren.

Bij de O₂-Fourier methode wordt de bruto primaire productie bepaald met behulp van de onderstaande formule:

$$\overline{\text{GPP}}(t) \approx 2\omega_1 \frac{\sin\theta - \theta\cos\theta}{\theta - \frac{1}{2}\sin 2\theta} A_{O_2} \quad (\text{eq. 1})$$

Met

$$\theta = \pi f_{DL}$$

f_{DL} is het relatieve aandeel daglicht over een periode van 24 uur is, ω_1 de dagelijkse frequentie en A_{O_2} is de amplitude. Bij toepassing van deze formule worden de volgende aannames gedaan:

- Het zuurstofverbruik verandert niet gedurende de daglichtperiode Dagelijkse variaties in horizontale en verticale transport fluxen op de meetlocatie zijn verwaarloosbaar.
- De meetlocatie is volledig gemengd.
- Bruto primaire productie kan benaderd worden met een afgetopte sinusoïde.

Een volledige beschrijving van de methode is te vinden in Cox et al. (2015) en R scripts om de methode toe te passen zijn online beschikbaar via Github:

(<https://github.com/tomjcox/GPPFourier>).

Deze in-situ monitoringsmethode is relatief goedkoop en geeft een gedetailleerd beeld over de verandering in de bruto primaire productie over tijd op een vaste locatie. De temporele resolutie is dus hoog maar de ruimtelijke dekking is beperkt en gebonden aan meetlocaties waar hoogfrequente zuurstofmetingen beschikbaar zijn.

3.3 BLOOM model

De primaire productie kan ook worden bepaald met behulp van proces-gebaseerde modellen, welke gebaseerd wordt op basis van de eigenschappen van een beperkt aantal dominante soorten algen en/of waterplanten. D-Water Quality (DWAQ) is een veelgebruikte software om proces-gebaseerde waterkwaliteitsmodellen op te zetten. Het kan worden aangesloten op verschillende hydrodynamische modellen (bijv. SOBEK, Delft3D4, en DELFT3D-Flexible Mesh), en dus ook gebruikt worden in 1D, 2D en 3D toepassingen. Met behulp van de deelmodule BLOOM kunnen processen met betrekking tot fytoplankton berekend worden; productie, respiratie, sterfte en competitie van algensoorten. Deze processen worden berekend op basis van temperatuur, lichtklimaat en beschikbaarheid van nutriënten in de waterkolom. In BLOOM wordt de optimale samenstelling van de algensoorten berekend om de maximale netto groeisnelheid van totale fytoplankton biomassa te bereiken onder de beschikbare hoeveelheid nutriënten en licht (Los en Brinkman, 1988). Hiervoor wordt de optimalisatie techniek lineaire programmering toegepast. Deze deelmodule zorgt dus voor consumptie van nutriënten (N, P, Si) door algen en productie van zuurstof en organisch materiaal afhankelijk van beschikbaar licht.

Het lichtprofiel in de waterkolom wordt bepaald door de uitdoving van licht als gevolg van fytoplankton biomassa, detritus, opgeloste organische stof, zwevend stof, en eventuele andere componenten die kunnen worden meegenomen als een 'achtergrondsextinctie'. Het detritus is afkomstig van algen, vegetatie en organisch afval. De primaire productie wordt berekend in $\text{gC/m}^2/\text{dag}$ voor de totale fytoplankton community.

4 Beschikbaarheid data

Tabel 4-1 geeft een overzicht van de beschikbare FRRF data van beschikbare zuurstofmetingen en Tabel 4-2 geeft een overzicht van de beschikbare waterkwaliteitsmodellen bij Deltares.

Voor wat betreft de FRRF data zijn er metingen beschikbaar voor vrijwel alle grote wateren, waarbij de metingen als trajectmeting elke twee weken of elke vier weken worden uitgevoerd. In sommige wateren is slechts incidenteel één of enkele dagen gemeten. Al deze metingen zijn genomen in of na het jaar 2020.

Wat betreft de modelbeschikbaarheid: Rijkswaterstaat heeft op dit moment slechts een paar officiële waterkwaliteits-modelschematisaties in beheer (zie [Modelschematisaties | Informatiepunt Leefomgeving](#)). Dit gaat om het Volkerak, het Veerse meer en de Grevelingen, dus allen gelegen in de Zeeuwse Delta, en allen betreffen oudere jaren waarvoor geen meetdata beschikbaar zijn. Wel wordt er op dit moment gewerkt aan het opzetten van waterkwaliteitsmodellen voor verschillende andere wateren (Veluwemeer, IJsselmeer, Markermeer, en Oosterschelde) en voor recente jaren. Voor het Veluwemeer en IJsselmeer zijn de eerste testresultaten daarvan inmiddels beschikbaar; maar deze zijn nog niet goed gekalibreerd en gevalideerd. Voor het Markermeer en Oosterschelde zijn nog geen resultaten beschikbaar. Voor verschillende van deze watersystemen bestaan er wel oudere modellen, maar deze hebben geen formele status, en dekken ook enkel oudere jaren af.

Voor de O₂-Fourier methode zijn hoogfrequente zuurstofmetingen nodig. Wanneer er continue metingen beschikbaar zijn, van bijv. een vaste meetpaal, kan deze methode dus worden toegepast. Dit is bijvoorbeeld het geval in het Markermeer. Hier zijn meerdere meetlocaties beschikbaar, Marker wadden (4 locaties; februari 2024 – juli 2024), Markermeer midden (me 2017 - heden) en Trintelzand (2024 – heden), welke gebruikt zijn primaire productie af te leiden m.b.v. fourieranalyse (Holdt, 2024 en lopend project door Bureau Waardenburg). Voor het IJsselmeer (Vrouwezand, 2017 - heden) en Oosterschelde (Yerseke bank, 2018-heden) zijn ook continue metingen van zuurstof beschikbaar. Waarschijnlijk kunnen er nog meer locaties aan deze lijst worden toegevoegd maar die zijn tijdens dit project niet aan het licht gekomen.

Al met al blijkt dat het aantal model- en meetresultaten dat zowel in tijd als in ruimte met elkaar overlapt vooralsnog nog erg beperkt is.

Tabel 4-1 Overzicht beschikbaarheid primaire productie metingen o.b.v. FRRF en Flowcytometer (FCM) data.

gebied	jaar	FRRF	FCM	Traject- meting	Opmerking
Markermeer	2020	X	X	X	Ca juni gestart met meten, 4-wekelijks
Markermeer	2021	X	X	X	4-wekelijks
Markermeer	2022	X	X	X	2 dagen, vergelijking met IJsselmeer
Markermeer	2023 - heden	X	X	X	April gestart met meten, 4-wekelijks
Marker Wadden	2024 -heden	X	X		Losse monster, doorgemeten in laboratorium
Oostvaardersdiep	2024 - heden	X	X		Testdag 2024, echte metingen 2025
IJsselmeer	2021	X	X	X	2 dagen
IJsselmeer	2022	X	X	X	2 dagen
IJsselmeer	2023	X	X	X	4 dagen
IJsselmeer	2024	X	X	X	2 dagen
Randmeren	2023	X	X	X	1 ronde, Turbiditeits-sensor werkte niet goed
Grevelingenmeer	2020 - heden	X	X	X	Zomer 2-wekelijks, winter 4-wekelijks
Oosterschelde	2020 - heden	X	X	X	Zomer 2-wekelijks, winter 4-wekelijks
Veerse Meer	2021 - heden	X	X	X	Zomer 2-wekelijks, winter 4-wekelijks
Westerschelde	2020 - heden	X		X	2016-2019 door NIOZ, gedeeltelijk niet bruikbaar vanwege vervuiling FRRF, 2- wekelijks

Tabel 4-2 Overzicht beschikbaarheid hoogfrequente zuurstofmetingen geschikt voor O₂-fourier analyse.

gebied	locatie zuurstofmeter	jaar	Opmerking
Markermeer	Marker Wadden (4 locaties)	2024	Gebruikt voor primaire productie bepaling (Holdt, 2024). Resultaten gebruikt voor kwantitatieve vergelijking in dit project.
Markermeer	Markermeer midden	2017 - heden	Gebruikt voor primaire productie bepaling (Holdt, 2024). Resultaten gebruikt voor kwantitatieve vergelijking in dit project. Meetpaal staat in open water zonder waterplanten.
Markermeer	Trintelzand	2024	Wordt gebruikt voor primaire productie bepaling tijdens project Bureau Waardenburg (2024-2025). Meetpaal staat in open water zonder waterplanten.
IJsselmeer	Vrouwezand	2017 - heden	Meetpaal staat in open water zonder waterplanten.
Oosterschelde	Yerseke bank	2018- heden	Zuurstofmeter geplaatst door NIOZ

Tabel 4-3 Overzicht beschikbaarheid waterkwaliteitsmodellen voor de Nederlandse grote wateren.

gebied	simulatiejaar	Formele status?	Opmerking
Markermeer inclusief Marker Wadden	2021	Ja	In ontwikkeling
Markermeer inclusief Marker Wadden	2016	Nee	Model gebruikt i.h.k.v. werkgroep Levend Markermeer (Troost 2020)
IJsselmeer	2022	Ja	In ontwikkeling
Randmeren	Juli 2022-juli 2023	Ja	In ontwikkeling
Veerse meer	2011-2013	Ja	Zie factsheet iplo.nl In 2025 wordt dit model geüpdatet naar recentere jaren
Oosterschelde	2016, 2020-2022	Ja	In ontwikkeling
Oosterschelde	2002	Nee	Troost 2013
Grevelingenmeer	2017	Ja	Zie factsheet iplo.nl
Volkerak	2014-2016	Ja	Zie factsheet iplo.nl
Eems Dollard	2012-2013	Nee	Stolte et al 2015

5 Conceptuele vergelijking methodes

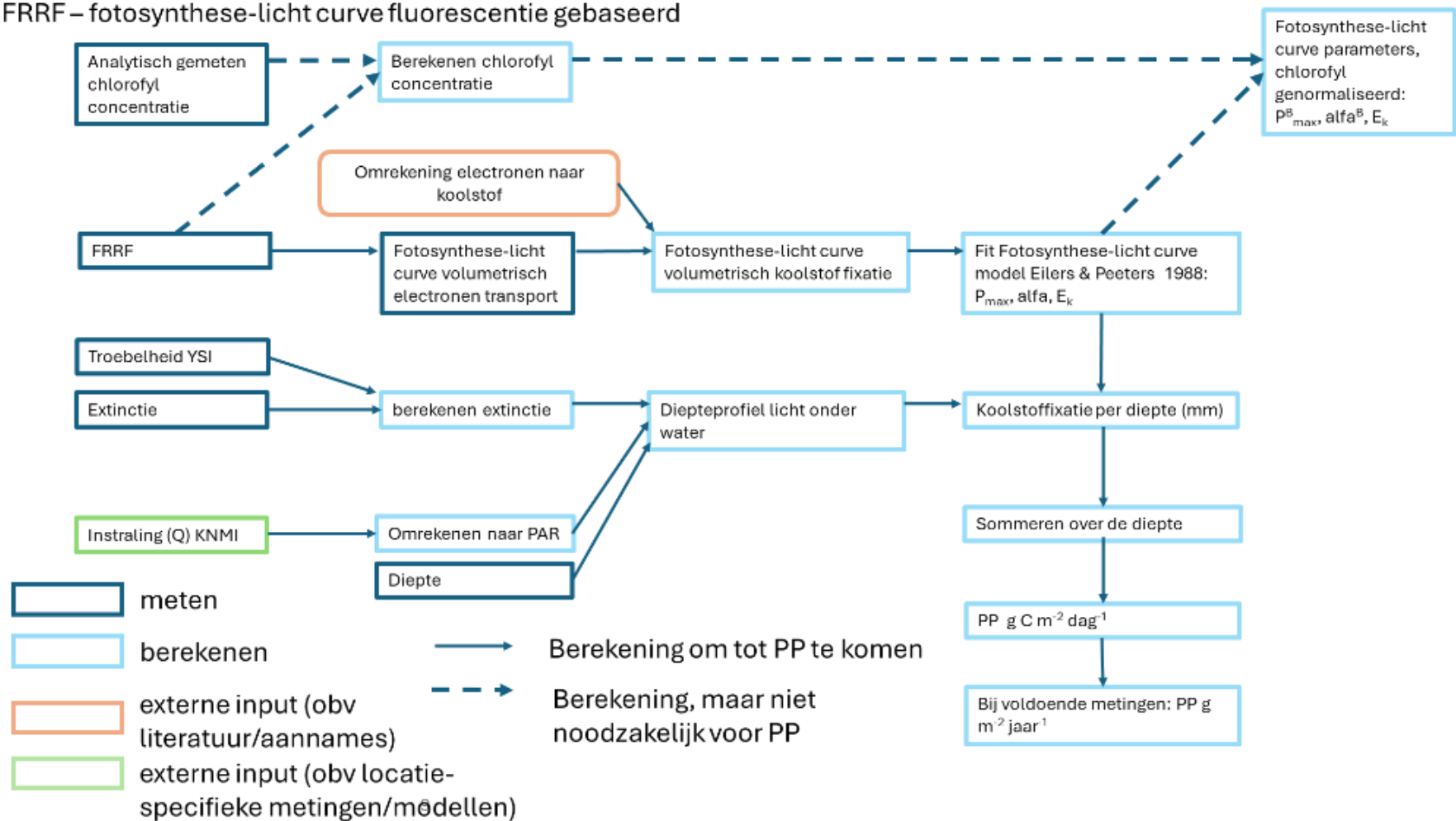
Voor de conceptuele vergelijking zijn alle methoden omgezet in flowdiagrammen waarin alle stappen van de bepaling worden weergegeven. Bij de verschillende stappen is een onderscheid is gemaakt tussen berekende waarden en invoergegevens. Deze invoergegevens kunnen bestaan uit gemeten invoergegevens (die specifiek ten behoeve van de bepaling zijn gemeten en dus expliciet onderdeel zijn van de FRRF of O2-Fourier methoden) en externe invoer. Bij deze externe invoergegevens maken we onderscheid tussen algemeen geldende invoerdata (o.b.v. literatuur of aannames), en meer locatie-specifieke metingen of modeluitvoer.

Door het weergeven van de methoden in dit soort flowdiagrammen en ze met elkaar te vergelijken, worden de onderlinge verschillen en overeenkomsten duidelijk.

5.1 Flow diagrammen

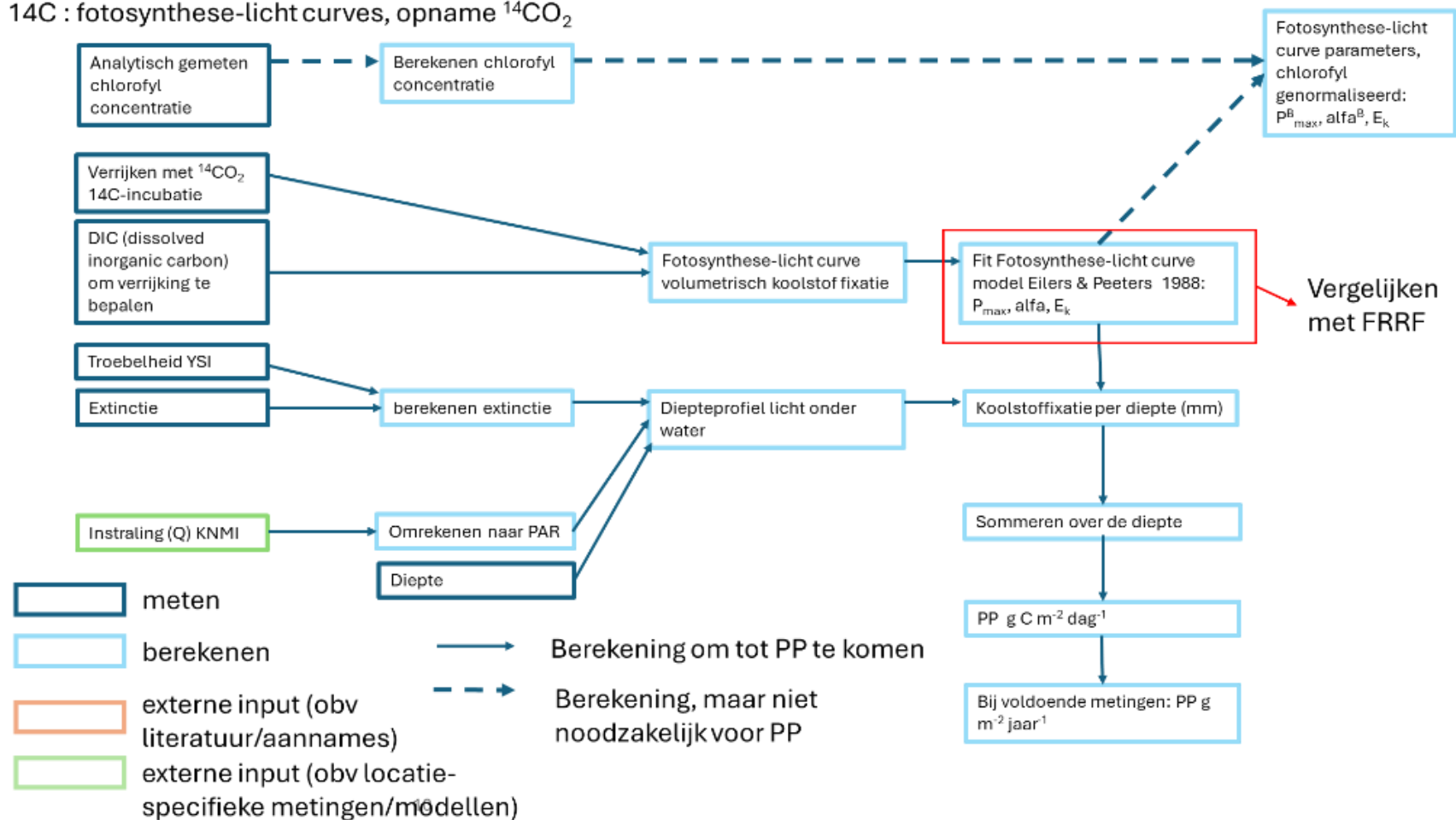
Zie de flowdiagrammen voor de verschillende methodes (FRRF, 14C, BLOOM en Fourier) in Figuur 5-1 t/m Figuur 5-4 op de volgende pagina's.

FRRF – fotosynthese-licht curve fluorescentie gebaseerd



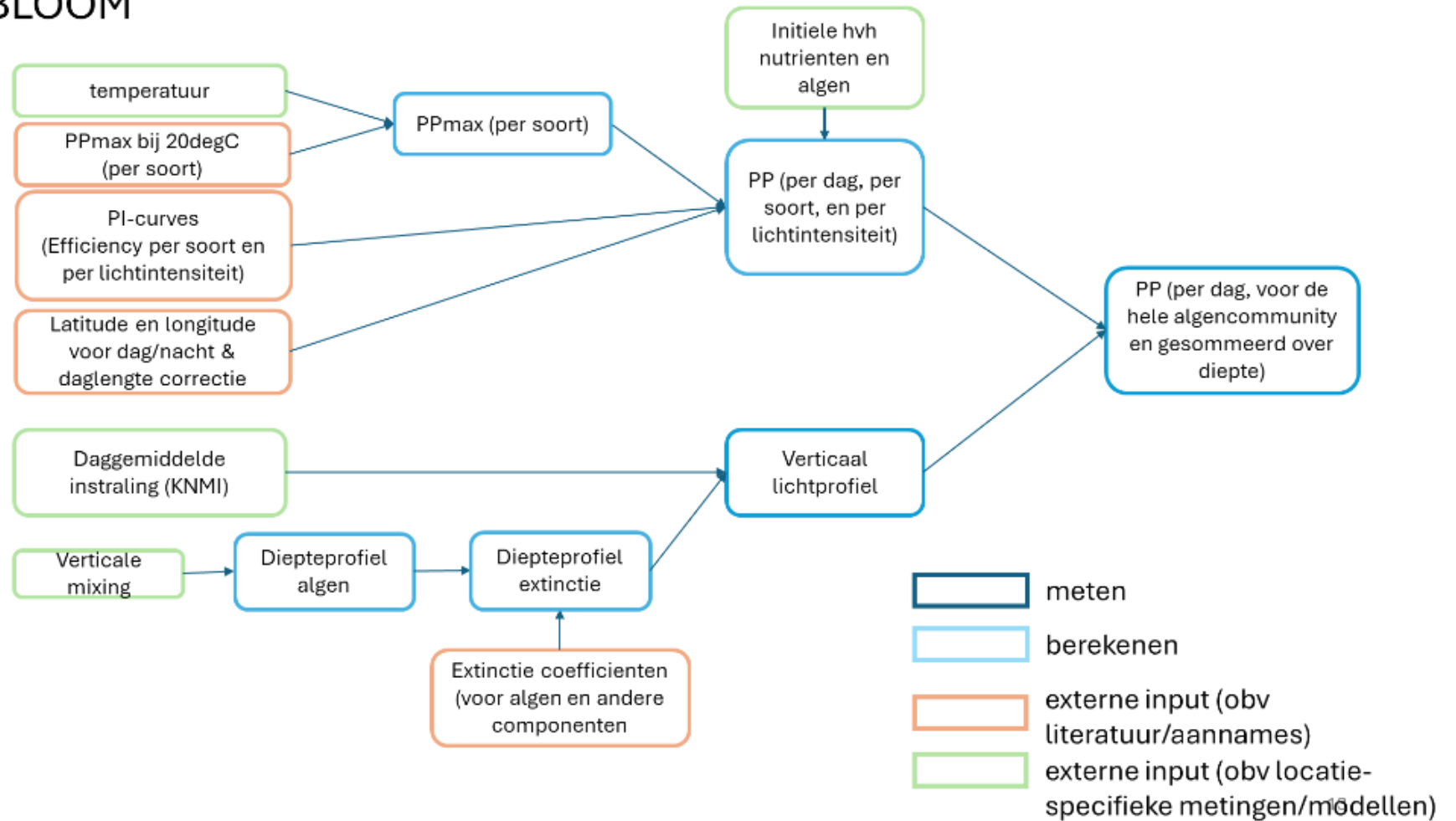
Figuur 5-1 Conceptueel flowdiagram van de FRRF methode om de primaire productie te bepalen.

14C : fotosynthese-licht curves, opname $^{14}\text{CO}_2$



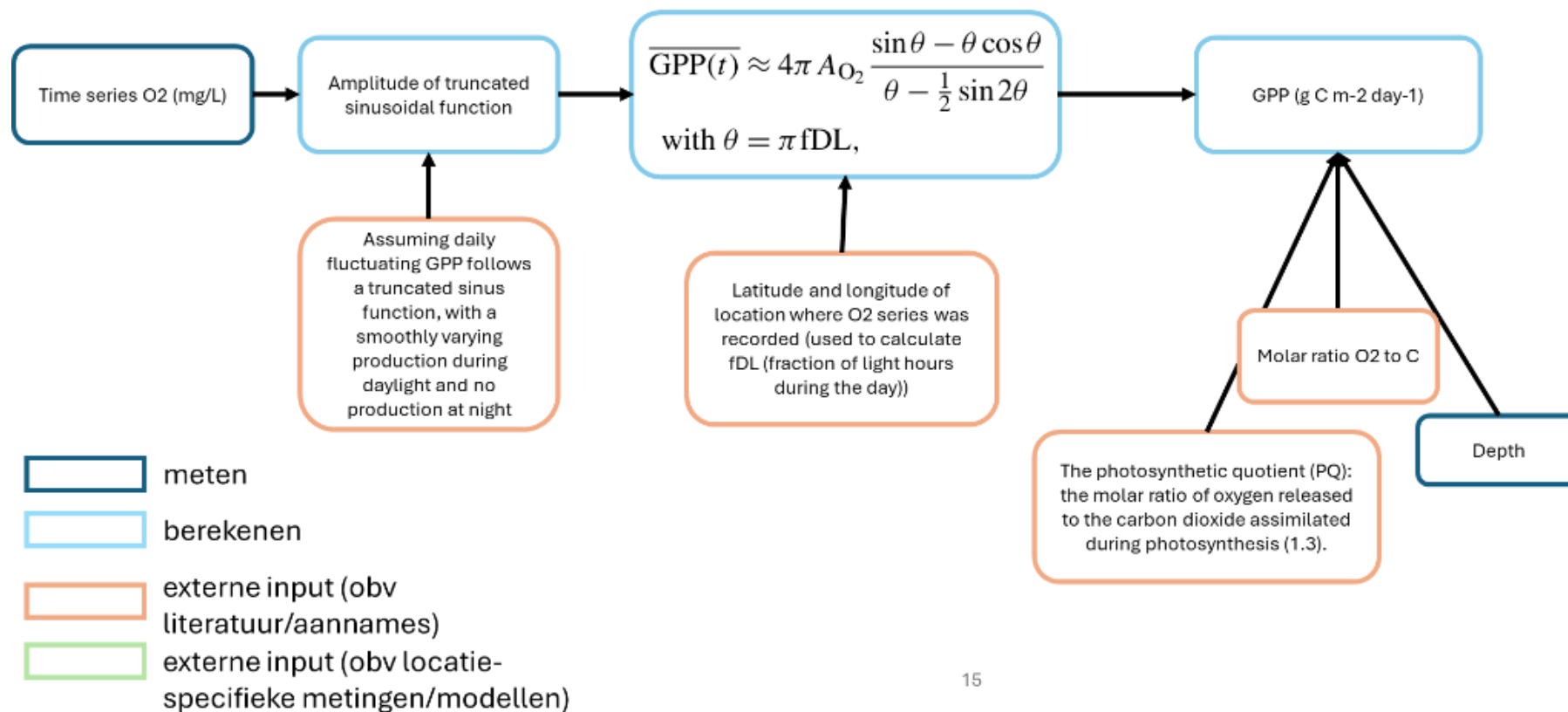
Figuur 5-2 Conceptueel flowdiagram van de $^{14}\text{CO}_2$ methode om de primaire productie te bepalen.

BLOOM



Figuur 5-3 Conceptueel flowdiagram van het BLOOM model om de primaire productie te bepalen.

Fourier method estimating GPP from high-frequency O2 series



15

Figuur 5-4 Conceptueel flowdiagram van de O₂-Fourier methode om de primaire productie te bepalen.

5.2 Vergelijkbaarheid en complementariteit

5.2.1 Algemene vergelijking

Overeenkomst

In alle drie methodes wordt de primaire productie uitgedrukt in dezelfde eenheid (gC/m²/dag). Dit betekent dat in alle methodes koolstof centraal staat en dat er expliciet wordt meegenomen dat de primaire productie varieert over de dag en over de diepte. Dit maakt dat de uitkomsten van de drie methodes in principe goed vergelijkbaar zijn.

De methoden berekenen allen een gemiddelde primaire productie per dag. Hiertoe worden in alle methoden de aanname gedaan dat het systeem gedurende die dag niet significant verandert (op de dag- en nachtcyclus van het licht na). In de FRRF meting wordt één monster (sample) genomen wat wordt getest bij verschillende lichtintensiteiten, waaruit de primaire productie per dag wordt afgeleid. In de O₂-Fourier methode wordt op basis van de dag/nachtpatronen in zuurstofconcentraties een cosinus afgeleid waarmee vervolgens een daggemiddelde primaire productie wordt berekend.

En in BLOOM wordt, op basis van de gemiddelde hoeveelheid licht per etmaal, één oplossing (algenbiomassa en algensamenstelling) per dag berekend.

Al deze methodes zijn dus niet zomaar toepasbaar op hoog-dynamische systemen (zoals estuaria), waarin er tijdens de dag veel sprake is van in- of uitstroom of andere factoren die variëren. Voor elk van de methodes zijn hier (deel)oplossing voor te vinden, maar deze vergen extra aanpassingen, aannames, of berekeningen.

NB: de meetmethoden bepalen de **bruto** primaire productie. Het BLOOM model bepaalt in principe de netto primaire productie; de bruto productie kan worden verkregen door het erbij optellen van de respiratie.

5.2.2 Vergelijking meetmethodes (FRRF vs. O₂-Fourier)

Overeenkomsten:

- De FRRF en O₂-methodes zijn beiden gebaseerd op gemeten activiteit van PSII.

Verschillen:

- De O₂-Fourier neemt zowel benthische als pelagische algen en waterplanten mee, FRRF alleen pelagische algen. Dit komt omdat O₂-Fourier zich baseert op O₂ concentraties, die door alle primaire producenten worden beïnvloed.
- De O₂-Fourier methode biedt over het algemeen veel metingen in de tijd, maar minder in de ruimte. Dit komt omdat er continue metingen nodig zijn voor de O₂-Fourier methode, die over het algemeen worden gemeten met een meetpaal. Als de meetpaal eenmaal ergens staat, levert deze data over deze ene specifieke locatie maar wel over een langere periode (één of meerdere jaren).
- De FRRF metingen zijn intensiever om uit te voeren, maar flexibeler inzetbaar op verschillende locaties. Dit omdat ze worden uitgevoerd in een meetcampagne van een of meerdere dagen, waarbij de vaarroute naar wens kan worden aangepast.
- Om o.b.v. de FRRF metingen de primaire productie te bepalen, worden er ook andere variabelen gemeten, zoals doorzicht en evt. soortensamenstelling. Dit biedt, naast de primaire productie metingen, dus ook inzicht in andere lokale factoren.

5.2.3 Vergelijking model vs. metingen (BLOOM vs. O₂ & FRRF)

Overeenkomsten:

- De methodes van FRRF en BLOOM vertonen veel overeenkomsten. Beide bepalen eerst een verticaal lichtprofiel, waarvoor vergelijkbare invoerdata nodig zijn (instraling over de dag, en doorzicht/extinctie). Ook bepalen ze hoe de algen reageren op verschillende lichtintensiteiten m.b.v. een P-E-curve. Vervolgens brengen ze beide elementen samen om zo de primaire productie over de dag en over de diepte te bepalen. De overlap tussen de twee methodes is terug te vinden in de flowdiagrammen (zie Figuur 5-1 en Figuur 5-2). Het voordeel van deze overlap is, dat er naast de primaire productie ook de andere variabelen kunnen worden vergeleken.

Verschillen

- De meetmethodes en het model baseren zich op een verschillend aspect van fotosynthese. Zo meten FRRF en O₂-Fourier de activiteit van PSII, terwijl BLOOM zich focust op de toename van biomassa, welke plaatsvindt in de donkerreactie (zie Figuur 5-1). Hoewel de licht- en donkerreacties natuurlijk met elkaar verbonden zijn, is hun snelheid niet identiek. Dit komt omdat er tussen het begin van de lichtreactie (het aanslaan van de elektronen) en het einde van de donkerreactie (het vormen van organisch materiaal) nog het een en ander kan gebeuren. Vaak gaat dit om regulatie om schade te voorkomen.

Zo kunnen elektronen en suikers voor andere doelen worden ingezet dan structurele groei/biomassa, of de geproduceerde suikers kunnen worden uitgescheiden (exudatie). Dat laatste kan o.a. plaatsvinden als er een tekort aan nutriënten is. Het terugvallen van aangeslagen elektronen wordt overigens wel meegenomen in de (verlaagde) efficiëntie van PSII (elektron per exciton).

- De FRRF en O₂-Fourier methodes bepalen de actuele primaire productie o.b.v. in-situ metingen van relevante indicatoren, terwijl het BLOOM model de primaire productie bepaalt op basis van aannames en omgevingscondities. Die omgevingscondities kunnen zijn gebaseerd op metingen (uitgevoerd door anderen), of op modelberekeningen. Een verschil tussen de 'gemeten' en gemodelleerde primaire productie kan dus aan de specifieke modelvergelijkingen m.b.t. primaire productie liggen, maar ook aan een omgevingsconditie die niet in overeenstemming is met de in-situ situatie. In andere woorden: BLOOM richt zich dus nooit enkel op de primaire productie, maar richt zich op een breder systeembegrip.
- De FRRF en O₂-Fourier methode veronderstellen in principe een homogene menging van het systeem, BLOOM kan rekening houden met verticale verschillen (bv in het geval van stratificatie). In de FRRF bepaling kan dat ook, maar dat vergt een aantal extra stappen in de berekening.

6 Kwantitatieve vergelijking methodes

Hieronder laten we zien in hoeverre de resultaten van de verschillende methodes kwantitatief met elkaar overeenkomen. Zoals al bleek in Hoofdstuk 4 is het aantal model- en meetresultaten dat zowel in tijd als in ruimte met elkaar overlapt erg beperkt.

Om toch een kwantitatieve vergelijking te kunnen maken, is er enerzijds gekozen om de beschikbare testresultaten van de nog in ontwikkeling zijnde modellen (Veluwemeer en IJsselmeer) te tonen. Deze modellen en resultaten moeten nog worden gekalibreerd, dus zullen waarschijnlijk nog verbeterd worden.

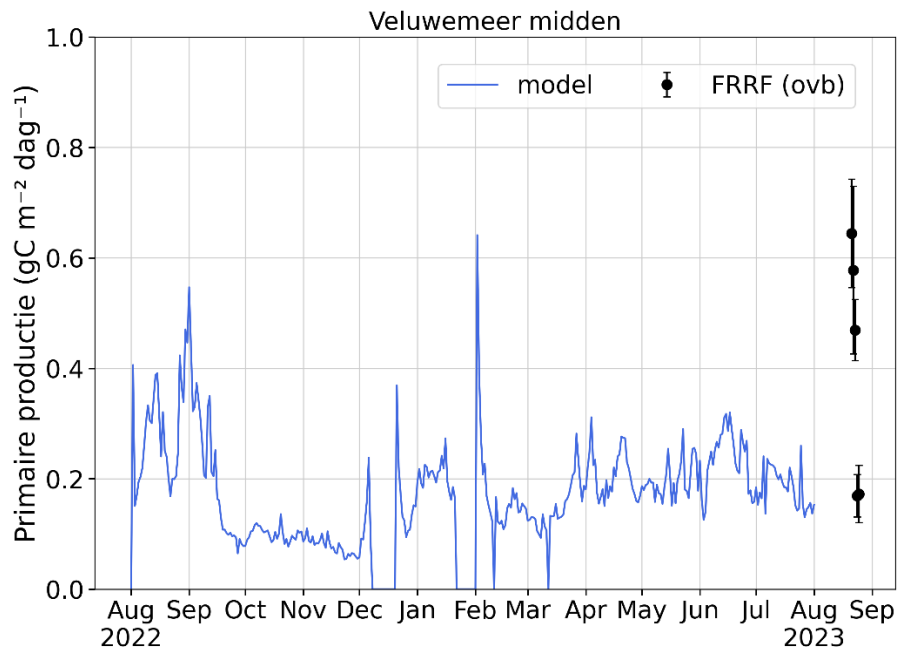
Anderzijds maken we een vergelijking met het oude Markermeer-model. Dit model heeft geen formele status, maar is toch gedraaid, voor een redelijk recent jaar. Daarnaast zijn er voor dit systeem jaarrond zowel FRRF als O₂-metingen beschikbaar om de primaire productie te bepalen, zijn er relatief veel aanverwante gegevens beschikbaar voor het Markermeer (zie Bijlage B), en wordt dit watersysteem ook als casus gebruikt bij het tweede deel van onderliggend rapport ook goed bekend met dit watersysteem (Hoofdstuk 8). Aangezien bekend is dat de resultaten van dit model met betrekking tot de algen niet overeenkomen met de geobserveerde patronen, zien we deze vergelijking als een pilot om te onderzoeken hoe de primaire productie en aanverwante metingen kunnen helpen bij modelkalibratie.

6.1 Primaire productie

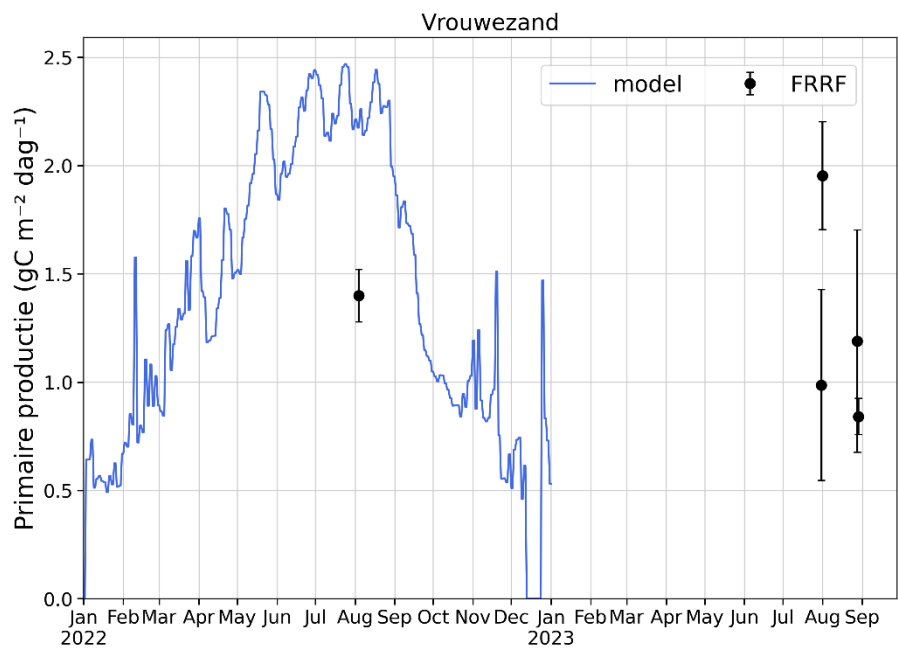
Figuur 6-1 en Figuur 6-2 tonen de primaire productie in het Veluwemeer en het IJsselmeer zoals gemodelleerd met de (nog niet gekalibreerde) waterkwaliteitsmodellen, alsmede op basis van de FRRF metingen. Figuur 6-3 toont de primaire productie voor het Markermeer op basis van alle drie de methoden. Let op, de FRRF metingen die getoond worden betreffen daggemiddelden van alle punten langs het vaartraject.

De resultaten van FRRF en O₂-Fourier methodes in het Markermeer komen goed overeen. De gemodelleerde waarde ligt in dit systeem echter duidelijk te hoog. Voor het Veluwemeer en IJsselmeer lijken de overeenkomsten tussen gemeten en gemodelleerde primaire productie beter.

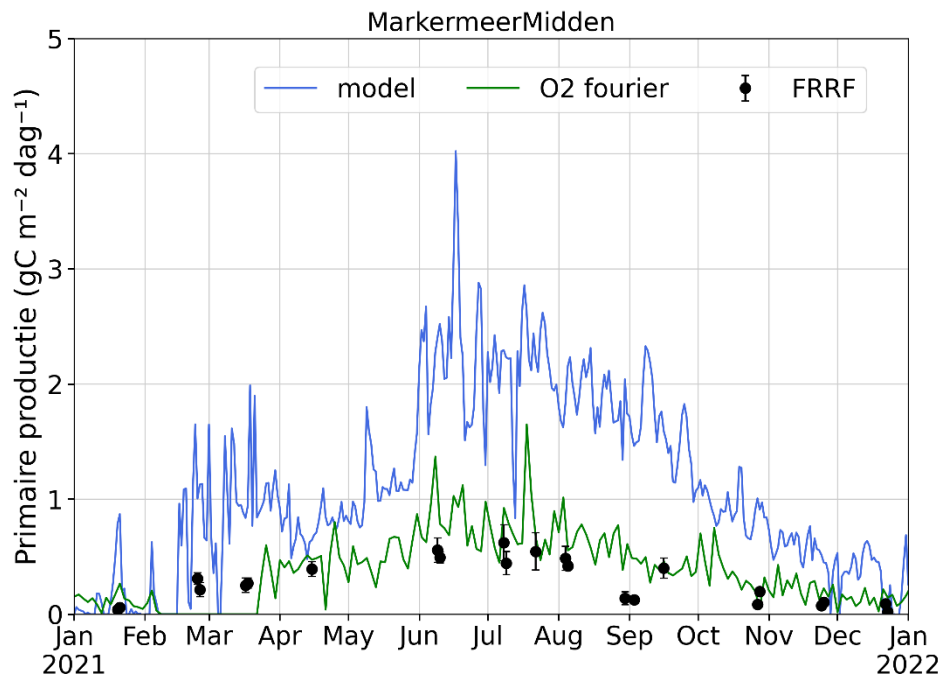
Hoewel de absolute waarden van model en metingen in het Markermeer uiteen lopen, laten ze allen wel een vergelijkbaar seizoenspatroon zien met lage primaire productie in de winter en hoge primaire productie in de zomer. Dit is interessant omdat de gemeten *chlorofyl*concentraties een merkwaardige winterpiek (januari) laten zien in het Markermeer (zie Figuur 6-4). Deze piek is dus niet terug te zien in de primaire productie.



Figuur 6-1 Primaire productie in het Veluwemeer zoals bepaald o.b.v. FRRF metingen en met het (nog niet gekalibreerde) Veluwemeer-model. Let op, de FRRF metingen die getoond worden zijn nog onder voorbehoud en betreffen daggemiddelden van alle punten langs het vaartraject.



Figuur 6-2 Primaire productie in het IJsselmeer zoals bepaald o.b.v. FRRF metingen en met het (nog niet gekalibreerde) IJsselmeermmodel. Let op, de FRRF metingen die getoond worden betreffen daggemiddelden van alle punten langs het vaartraject.



Figuur 6-3 Primaire productie in het Markermeer zoals bepaald o.b.v. FRRF metingen, de O₂-Fourier methode, en met een oude niet-formele versie van het Markermeermodeel. Let op, de FRRF metingen die getoond worden betreffen daggemiddelden van alle punten langs het vaartraject.

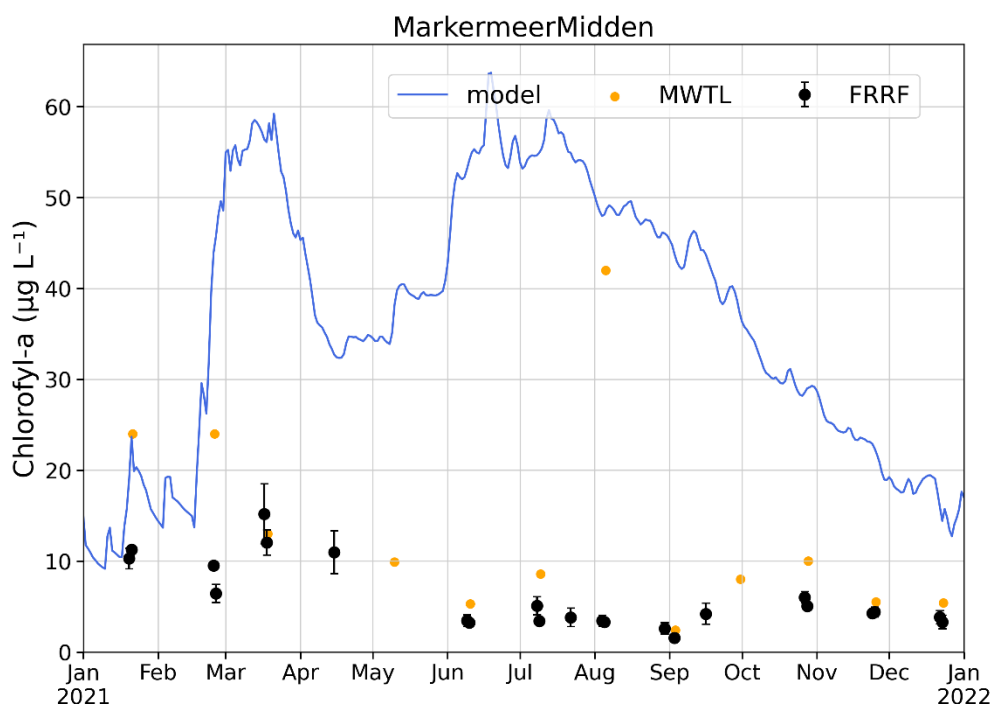
6.2 Andere (tussen)variabelen

Een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde primaire productie kan laten zien dat beide overeenkomen, maar kunnen ook een verschil laten zien. In dat laatste geval is het waardevol om uit te kunnen zoeken waar dat verschil vandaan komt. Zoals eerder al toegelicht is het modelresultaat namelijk niet alleen afhankelijk van de primaire productie berekening zelf, maar ook van meerdere (meestal gemodelleerde) omgevingscondities. De andere gemeten (tussen)variabelen kunnen daarbij helpen. Dit zijn met name de P-E-curve, de temperatuur, extinctie coëfficiënt (door bijdrage van verschillende stoffen), en de chlorofyl concentratie.

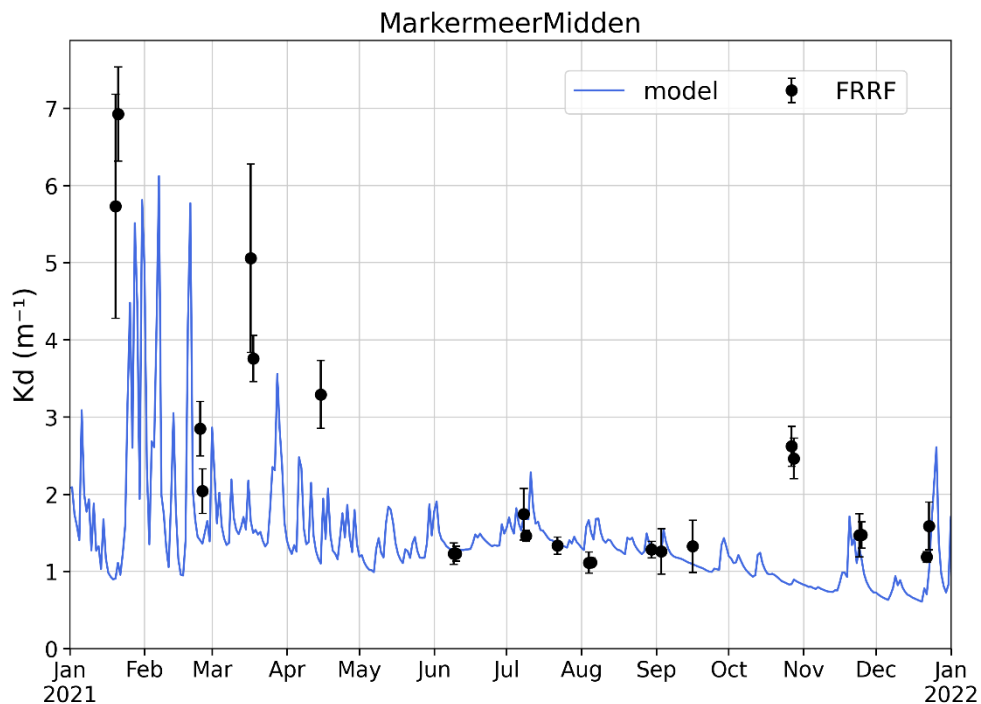
Als voorbeeld laten we hieronder een vergelijking zien van de chlorofyl (Figuur 6-4) en de extinctie (Figuur 6-5) in het Markermeer. De figuren laten zien dat de gemodelleerde extinctie in de goede (gemeten) orde-grootte ligt, terwijl de gemodelleerde chlorofylconcentratie duidelijk te hoog is. Ook zijn er verschillen in de patronen te zien: zo laten de gemeten extinctiewaarden een voorjaarspiek zien die samenvalt met de voorjaarspiek van de algen, die niet in de gemodelleerde extinctiewaarden te zien is. Uit deze resultaten kan worden geconcludeerd dat de productie per chlorofyl-a goed zit, maar dat de hoeveelheid algen te groot is, en dat de gemodelleerde algen te weinig bijdragen aan de extinctie in het model (zelfs nu er te veel algen worden gemodelleerd!). Dit kan wellicht verholpen worden door de extinctie-coëfficiënt van de algen op te hogen, wat via meer 'self-shading' tot een kleinere algenbiomassa leidt. De oorzaak van deze mismatch zou kunnen liggen in de observatie dat sommige algen in het Markermeer d.m.v. exudatie een slijm laag vormen die hun (biomassa-specifieke) licht-extinctie vergroot. Een dergelijke vergelijking biedt dus direct handvaten tot modelverbetering.

Helaas bleek het niet mogelijk om de PE-curves (zoals afgeleid in de FRRF methode en de die zoals gebruikt in het BLOOM model) met elkaar te vergelijken. Dit kwam doordat beide curves verschillende eenheden gebruiken.

Zo wordt de curve (en dus ook de Pmax) in de FRRF methode uitgedrukt in absolute en bruto productiesnelheden (gC/m³/d) terwijl BLOOM met een biomassa-specifieke en netto groeisnelheid werkt (1/d). Om deze in elkaar om te zetten is het nodig om te weten hoeveel algen er op dat moment aanwezig zijn. Deze hoeveelheid wordt echter niet gemeten, en de gemodelleerde waarde kan afwijken van de realiteit. Ook representeert de PE-curve van de FRRF de gehele algengemeenschap, terwijl BLOOM een PE-curve per algensoort gebruikt. Op basis van de gemodelleerde algensamenstelling kan hieruit een gemeenschaps-gemiddelde PE-curve worden afgeleid, maar ook de gemodelleerde samenstelling van de algen kan afwijken van de realiteit. Kortom, de PE-curves kunnen alleen worden vergeleken na omrekening op basis van de gemodelleerde hoeveelheid en samenstelling van de algen, maar het resultaat daarvan geeft dan geen uitsluitel meer over de PE-curves en waar de eventuele verschillen vandaan komen. Een interessantere optie zou zijn om de algenbiomassa in één of meerdere FRRF samples te meten en dan de PE-curve van de FRRF methode op basis daarvan te converteren naar een biomassa-specifieke versie.



Figuur 6-4 Gemeten en gemodelleerde chlorofyl concentratie in het Markermeer. De chlorofyl concentratie van de FRRF methode is berekend uit de door de FRRF gemeten waarde gekalibreerd met de MWTL gegevens.



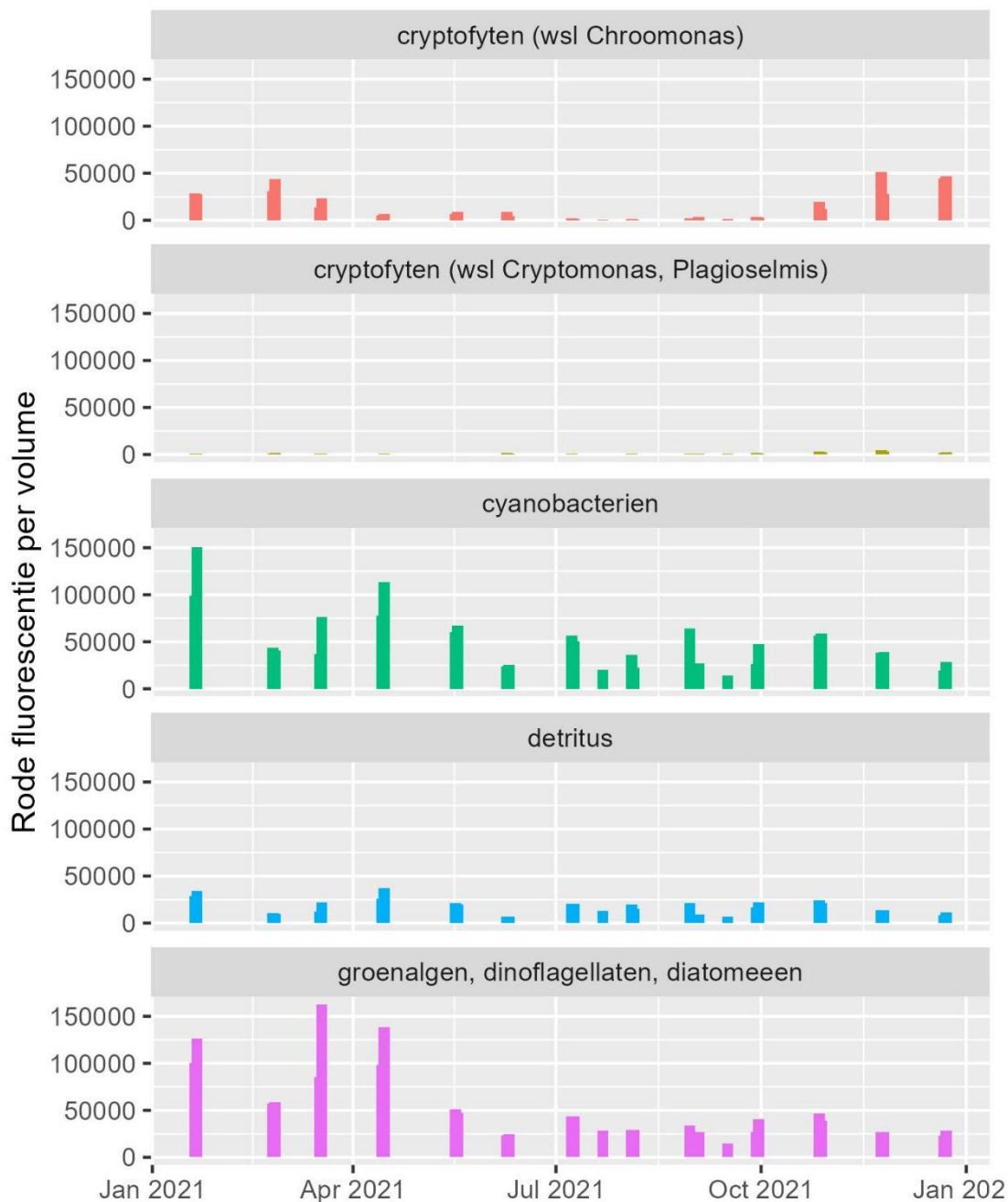
Figuur 6-5 Gemeten en gemodelleerde extinctie coëfficiënt in het Markermeer. Voor de FRRF methode wordt de extinctie coëfficiënt berekend uit met een YSI-Exo gemeten troebelheid (zie Bijlage B.1)

6.3 Algensamenstelling

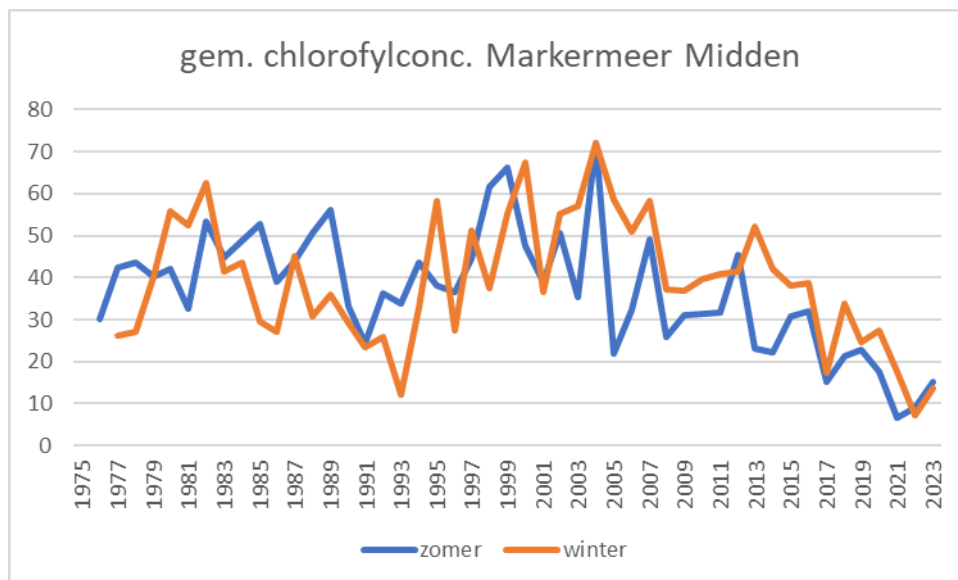
Naast de primaire productie en andere (tussen)variabelen, kan ook de algensamenstelling helpen bij het verklaren van een mismatch in de gemeten en gemodelleerde primaire productie. Verschillende soorten algen hebben namelijk verschillende eigenschappen, en hun patronen geven inzicht in het systeem- en modelfunctioneren.

Figuur 6-6 laat een voorbeeld zien van de gemeten algensamenstelling in het Markermeer op basis van flowcytometer-metingen (zie ook Bijlage B.3). Deze metingen laten zien dat cyanobacteriën een piek hebben in het voorjaar en ook in herfst belangrijk zijn. Groenalgen leveren in het voorjaar de grootste bijdrage en minder in zomer en herfst. Cryptofyten hebben weliswaar een lage concentratie, maar leveren in de wintermaanden een belangrijke bijdrage aan rode fluorescentie. Detritus levert ook een behoorlijke bijdrage aan rode fluorescentie omdat dit (onder andere) ook gaat om samengeklonterde deeltjes.

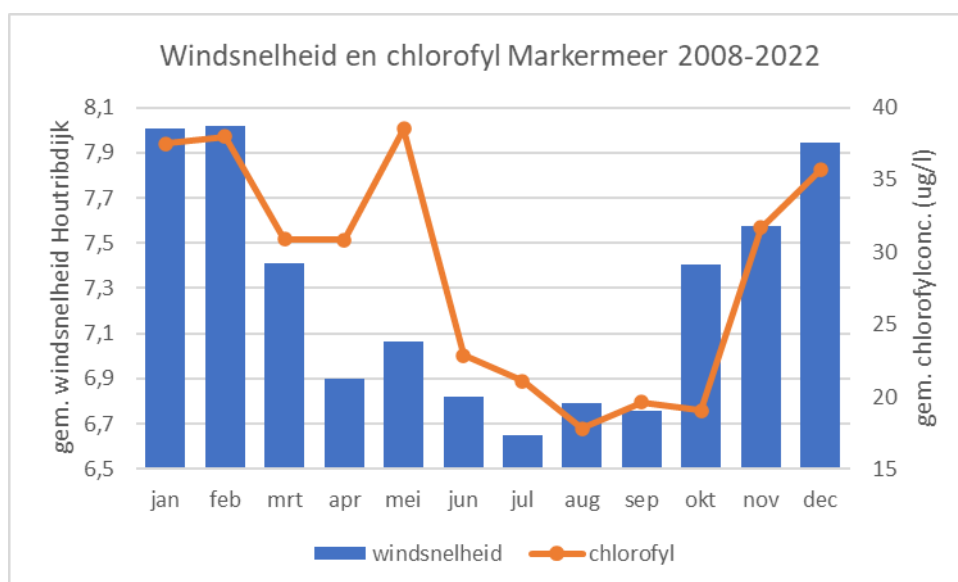
Zoals al eerder benoemd, treden er in het markermeer merkwaardig hoge chlorofyl concentraties op in de winter; sinds 2000 zijn de winterconcentraties hoger dan de zomerconcentraties (zie Figuur 6-7). Een mogelijke verklaring is dat er in de winter een specifieke algensoort opkomt die aangepast is op de wintercondities (b.v. *Tetrastrum komarekii*). De resultaten van de flowcytometer laten echter zien dat er verschillende algengroepen (cyanobacteriën en groenalgen) aanwezig zijn in de winter. Dit past niet goed in de verklaring dat er één enkele speciale algensoort de winterpiek veroorzaakt. Daarmee in lijn is dat de abundantie van *Tetrastrum komarekii* in recente jaren is teruggezaakt. Een andere mogelijke verklaring is opwerveling van algen van de bodem in de winter door hogere windsnelheden (zie Figuur 6-8). Alleen tijdens de voorjaarsbloei in mei en in oktober wijken de patronen onderling af. Mogelijk is de mismatch in oktober te verklaren met het feit dat chlorofyl slechts maandelijks gemeten wordt, met een systematische verschuiving over de maand.



Figuur 6-6 Algensamenstelling in het Markermeer, geobserveerd met de flowcytometer.



Figuur 6-7 Gemiddeld winterchlorofyl versus gemiddeld zomerchlorofyl in Markermeer Midden.



Figuur 6-8 Gemiddelde windsnelheid gemeten bij de Houtribdijk versus de gemiddelde chlorofylconcentratie gemeten in Markermeer Midden. Beide data series behelzen de periode 2008-2022.

7 Conclusies o.b.v. de vergelijkingen tussen de methoden

7.1 Leiden de methodes tot vergelijkbare resultaten?

De resultaten van de drie methodes (FRRF, O₂-Fourier, en BLOOM) zijn onderling goed vergelijkbaar. Ze worden uitgedrukt in dezelfde eenheden (gC/m²/dag), en hebben eenzelfde interpretatie.

De twee meetmethodes (FRRF en O₂-Fourier) lijken allebei even bruikbaar voor het meten van primaire productie. Beiden geven vergelijkbare resultaten, al moet daarbij de kanttekening worden gemaakt dat deze conclusie is gebaseerd op de vergelijking van resultaten in één locatie (Markermeer Midden) in één enkel watersysteem (het Markermeer), waarvan we weten dat die even geschikt is voor beide methoden (het Markermeer is laagdynamisch en algengedomineerd). Hoewel er meerdere continue meetdata van zuurstofconcentraties beschikbaar zijn voor meerdere locaties, bleek het relatief veel moeite en tijd te kosten om deze data daadwerkelijk te pakken te krijgen. Het zou goed zijn om de vergelijking tussen de meetmethodes uit te breiden naar andere systemen.

De modelresultaten m.b.t. primaire productie komen in sommige modeltoepassingen overeen met de gemeten (orde grootte van de) primaire productie, maar in andere systemen niet. Wel komen de seizoenspatronen met elkaar overeen. Ook deze conclusies zijn slechts gebaseerd op een paar watersystemen, en op modeltoepassingen die nog niet gekalibreerd zijn. En ook hier is dus nog winst te boeken door de vergelijking uit te breiden naar meerdere systemen. Wel suggereren deze resultaten dat er geen structurele mismatch bestaat tussen de gemeten en de gemodelleerde waarden. Daaruit kan geconcludeerd worden dat de mismatches waarschijnlijk veroorzaakt worden door de (systeemspecifieke) omgevingscondities die het BLOOM model gebruikt als invoer. Hiermee wordt de modelverbetering dus ook een systeemspecifieke aangelegenheid.

Om uit te sluiten dat het BLOOM model zelf toch ook een rol speelt in de eventuele mismatches, zou het goed zijn om ook de gemeten en gemodelleerde PE-curves te vergelijken. Hiertoe zijn echter gemeten algenbiomassa's nodig in één of meerdere FRRF samples.

7.2 Wanneer welke methode toepassen?

Een relevant verschil tussen de drie methoden is dat ze een andere dekking in ruimte en tijd hebben. De FRRF methode is flexibeler inzetbaar in de tijd en ruimte, terwijl de continue zuurstof-metingen benodigd voor de O₂-Fourier methode over het algemeen worden uitgevoerd met een meetpaal, en daarmee beschikbaar zijn voor één locatie maar wel over langere tijdsperioden. Dit verschil zal leidend zijn bij de keuze tussen de ene of de andere methode: voor verkennende metingen, of voor het meten van ruimtelijke verschillen is de FRRF erg geschikt, terwijl voor locaties waarvoor monitoring over een langere periode nodig is een meetpaal voor de hand ligt. Bij het model zijn de ruimtelijke en temporele resolutie aan te passen naar wens, en is er voor die resolutie in principe volledig inzicht in alle concentraties en fluxen. Het opzetten en afregelen van een model is echter tijdsintensief.

Om tot meer systeembegrip te komen is de modelaanpak het meest geschikt, omdat deze het hele systeem en alle onderliggende relaties expliciet meeneemt.

Wel dient dit model dan weer gekalibreerd en gevalideerd te worden op basis van metingen. Dit gaat dan niet om enkel primaire productie metingen, maar ook om metingen van andere (tussen)variabelen.

Als er eenmaal een gevalideerde modeltoepassing is die voldoende overeenkomt met de metingen, kan dit model worden ingezet om de primaire productie metingen te inter- of extrapoleren over ruimte en tijd. Hiermee kunnen de effecten van toekomstige veranderingen of lokale ingrepen worden getest.

De drie methodes zijn allen beperkt in het bepalen van de primaire productie in hoogdynamische systemen. Met stratificatie kan wel rekening gehouden worden, maar dit vraagt om extra berekeningen of aanpassingen. In het geval van een waterplant-gedomineerd systeem kan in eerste instantie de voorkeur gegeven worden aan de O2-Fourier methode boven de FRRF methode, zodat de productie van waterplanten meegenomen wordt. Echter, zodra er voldoende is vastgesteld dat de twee meetmethodes overeenkomstige resultaten geven m.b.t. de pelagische productie, kan de combinatie van FRRF en O2-Fourier meerwaarde hebben, juist voor systemen met daarin ook waterplanten. Het verschil tussen de twee methodes geeft dan een indicatie voor het aandeel van pelagische versus benthische productie. Ook in dit geval zou een combinatie met een modelstudie ideaal zijn om te komen tot een volledig systeembegrip.

7.3 Het belang van andere metingen

Op basis van vergelijking van gemeten en gemodelleerde primaire producties kan worden bepaald of modellen en metingen overeenkomen. Maar bij een mismatch is het lastig om de oorzaak hiervan te duiden. Validatie van andere (tussen)variabelen kunnen hierbij helpen. Hierbij bieden de FRRF metingen en BLOOM model de meeste aangrijpingspunten, omdat ze eenzelfde aanvliegroute hebben. Zoals toegelicht op basis van het voorbeeld van het Markermeer-model, geeft een vergelijking van de tussenresultaten direct nieuwe inzichten in systeembegrip en suggesties voor de modelontwikkeling.

Naast (verdere) modelvalidatie en het vergroten van systeembegrip, zijn andere gegevens ook nodig om de *kwaliteit* van de primaire productie te duiden. Dit omdat kwantiteit alleen onvoldoende zegt over de geschiktheid van het geproduceerde materiaal voor de rest van het voedselweb. Algensoorten-samenstelling en stoichiometrie zijn hiertoe essentieel.

7.4 Kennisleemtes en aanbevelingen

Vooralsnog is er slechts beperkt vergelijkingsmateriaal voorhanden om de drie methoden goed te kunnen vergelijken. Om de overlap te vergroten moeten er (zowel FRRF als O2-Fourier) metingen uitgevoerd blijven worden, en moet er bij het opzetten van nieuwe modellen (en dan met name bij de selectie van het te modelleren jaar) rekening gehouden met beschikbare primaire productie data.

Om de primaire productie berekening in BLOOM model te kunnen valideren op meer dan enkel de resulterende primaire producties, zouden de gemodelleerde PE-curves moeten worden vergeleken met gemeten PE-curves. Hiervoor zijn gemeten algenbiomassa's nodig in één of meerdere FRRF samples.

De grootste mismatches tussen model en metingen lijken echter vooral te liggen in (omissies in) systeembegrip (waardoor de gemodelleerde tussenvariabelen niet kloppen), en niet in de gebruikte meet- of modelmethodiek om tot primaire productie te komen. Om hier vooruitgang in te brengen zijn er systeemspecifieke studies nodig waarin metingen en modellen gericht worden vergeleken.

Hierbij is het aan te bevelen om een standaard basisopzet van het model te gebruiken, en enkel aanpassingen aan het model te maken als het systeem daarom vraagt. Dit maakt het makkelijker om verschillende modellen van verschillende watersystemen onderling te vergelijken, en zijn de 'lessons-learned' in de verschillende modellen onderling makkelijker overdraagbaar.

8 Kader/advies relatie primaire productie en ecosysteem-functioneren

8.1 Wat is draagkracht?

Door Wijsman et al. (2019) worden een aantal definities genoemd van draagkracht met als voorbeeld de kwekerij van schelpdieren. Een citaat uit het rapport van Wijsman:

De term draagkracht is een veelgebruikte term binnen de schelpdier aquacultuur. Letterlijk geeft het aan hoeveel schelpdieren het systeem kan dragen. Het begrip kan echter op verschillende manieren worden geïnterpreteerd. Inglis et al. (2000) maken een onderscheid in vier verschillende categorieën:

- 1 **Fysieke draagkracht:** Hierbij gaat het om het areaal aan geschikte ruimte die er beschikbaar is in een gebied om schelpdieren te kweken. Hierbij zijn de randvoorwaarden om schelpdieren te kunnen kweken, zoals zoutgehalte, diepte, hydrodynamiek maar ook gebruik van het gebied voor andere functies (visserij, natuur, scheepvaart, enz.) van belang.
- 2 **Productie draagkracht:** Hierbij gaat het om hoeveel schelpdieren kunnen er in een systeem worden gekweekt zonder dat de kwaliteit van deze schelpdieren vermindert. De hoeveelheid voedsel die beschikbaar is, is hiervoor een belangrijke randvoorwaarde.
- 3 **Ecologische draagkracht:** Hierbij gaat het om de hoeveelheden schelpdieren die kunnen worden gekweekt in een systeem zonder dat er negatieve effecten op het ecosysteem optreden. Er wordt dus niet alleen naar de hoeveelheid en kwaliteit van de gekweekte schelpdieren gekeken, maar ook naar de andere componenten van het ecosysteem zoals overige schelpdieren, vissen en vogels.
- 4 **Sociale draagkracht:** Hierbij gaat het om de impact door schelpdierkweek die door de samenleving wordt geaccepteerd.

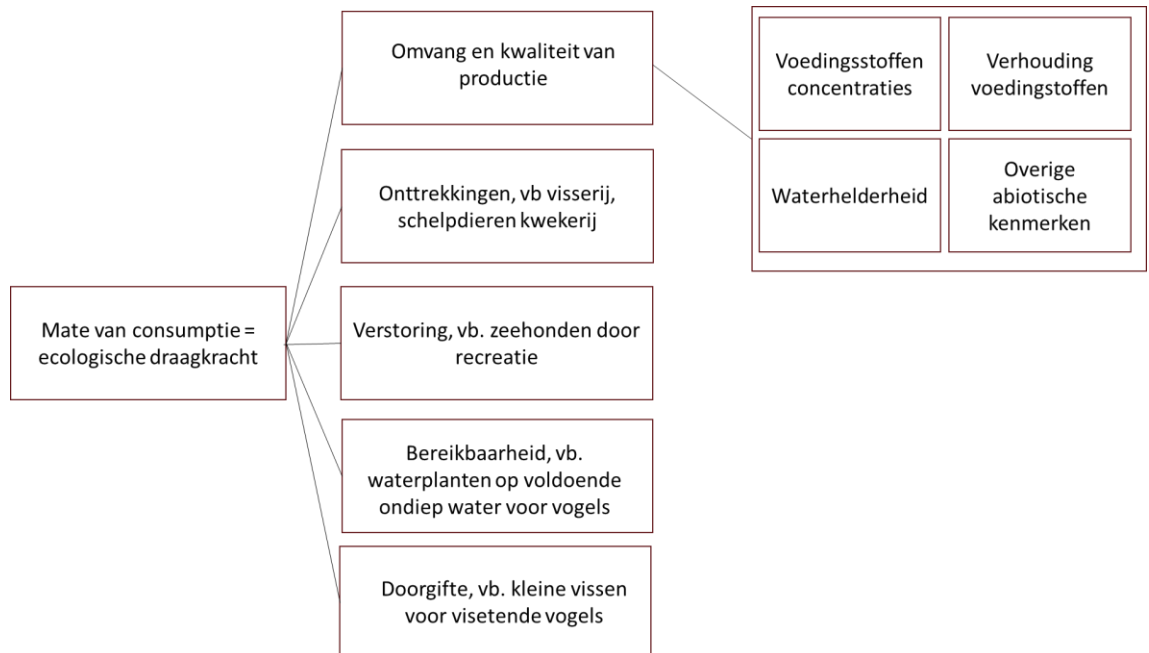
In dit rapport definiëren we ecologische draagkracht vergelijkbaar met definitie 3 van Wijsman. Ecologische draagkracht -zoals gebruikt in dit rapport- geeft de consumptie en/of potentie van de consumptie weer voor alle dieren in het watersysteem (zie vergelijking 2 hieronder). Dit is ook in lijn met de benadering van het veel gebruikte voedselweb model 'Ecopath' (www.ecopath.org), o.a. toegepast voor het Markermeer (Van den Berg, et al. 2023). De ecologische draagkracht van het hele voedselweb is een grove en robuuste indicator voor het gehele ecosysteem. Voor het bepalen van de ecologische draagkracht in het voedselweb model 'Ecopath' is veel informatie nodig van elke ingevoerde groep van organismen, zoals het dieet, consumptie, niet gebruikte consumptie en de productie.

$$\text{Ecologische draagkracht (ofwel consumptie potentie)} = \text{productie} + \text{netto aanvoer} - \text{onttrekking} \quad (\text{eq. 2})$$

Het is mogelijk de netto consumptie als maat voor draagkracht te vergelijken met de productie. In het voedselweb model 'Ecopath' wordt dit berekend door per groep de benodigde primaire productie te bepalen (voor consumptie) en te delen door de totale primaire productie.

In Figuur 8-1 is schematisch weergegeven welke factoren belangrijk zijn voor de ecologische draagkracht. Het type en hoeveelheid primaire producenten bepalen in belangrijke mate deze draagkracht. De omvang en kwaliteit van de productie wordt op zijn beurt door vele andere factoren bepaald, zoals de verhouding tussen voedingsstoffen in het water, de waterdiepte, helderheid en de temperatuur.

Naast de primaire producenten zijn ook andere factoren van belang die de draagkracht bepalen. Als visserij plaatsvindt, of schelpdierkwekerij dan wordt een deel van de voeding uit het voedselweb onttrokken, ofwel de ecologische draagkracht zal afnemen. De bereikbaarheid van voedsel is van belang voor bijvoorbeeld waterplant-etende watervogels die grondelen (en niet echt kunnen duiken), wat betekent dat het water niet te diep moet zijn. Verstoring van foeragerende vogels kan de benutbaarheid verminderen, en heeft dus indirect invloed op de draagkracht. In sommige gevallen is er veel biomassa beschikbaar van een bepaalde voedselbron maar kunnen exemplaren te groot zijn om te benutten door visetende vogels (bv. grote brasem).



Figuur 8-1 Ecologische draagkracht wordt door diverse systeemeigenschappen en menselijke gebruik bepaald.

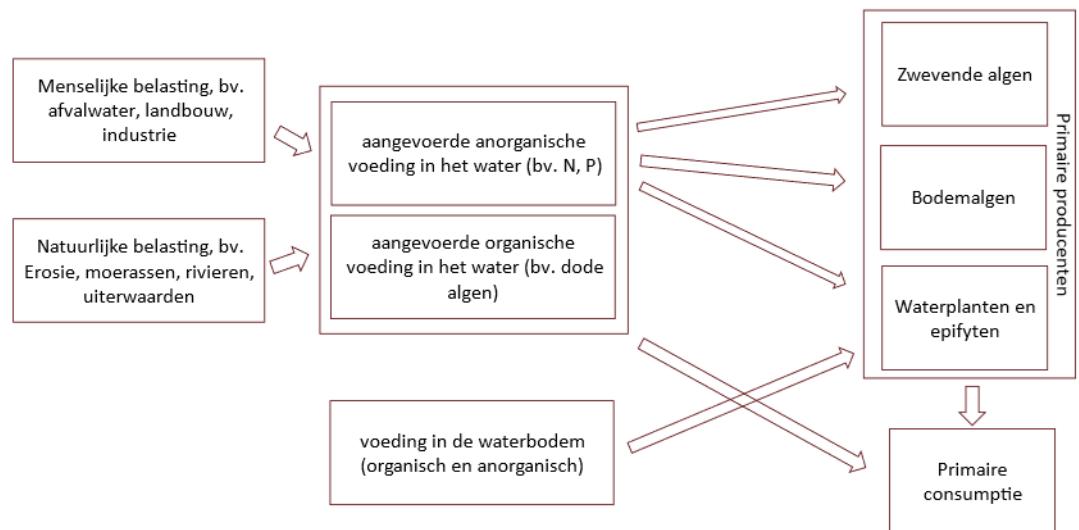
In sommige voedselwebben kunnen ook bacteriën primaire productie leveren uit chemische energie. Dit zou in sommige van de rijkswateren wel een rol kunnen spelen, zoals de zwavelbacteriën in het Markermeer en in een aantal zoute wateren. Hoewel de biomassa vrij hoog kan zijn (orde 100 gram per m², referenties in Van den Berg et al., 2023), zijn er in het geval van het Markermeer geen aanwijzingen dat deze chemische primaire producenten een belangrijke voedselbron zijn voor aanwezige dieren. Ook van een aantal zoute ecosystemen is bekend dat deze chemische productie slecht of niet goed doorgegeven wordt naar hogere trofische niveaus vanwege bv. verhoogde concentraties zwavelverbindingen die toxisch kunnen zijn. Omdat over chemische productie nog weinig kennis is -en zeker niet kwantitatief-, blijft deze groep buiten beschouwing. De nadruk ligt dus op de relatie tussen voedingsstoffen en de mate van draagkracht, en de rol van biologische primaire productie.

8.2 Relatie voedingsstoffen en draagkracht

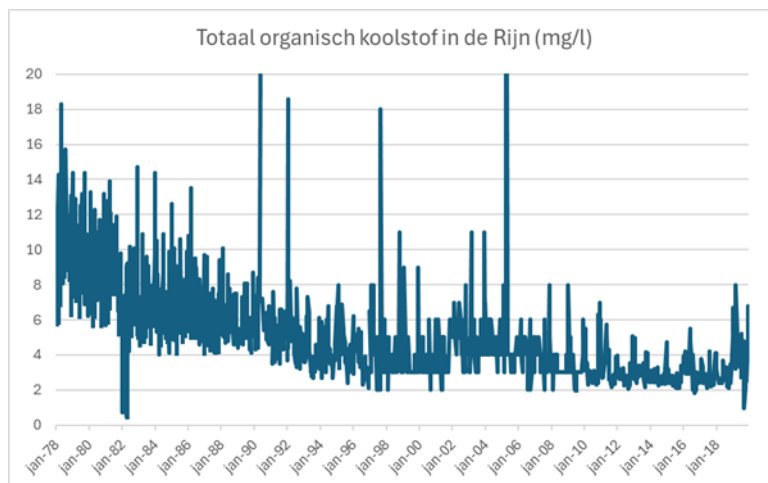
Omdat de productie van primaire producenten een belangrijke factor is voor de draagkracht zijn de limiterende factoren voor deze productie sturend voor de mate van de productie. Belangrijke anorganische stoffen voor primaire productie zijn opgeloste verbindingen van stikstof (nitraat of ammonium), fosfor (fosfaat) of koolstof (koolstofdioxide of bicarbonaat). Primaire producenten gebruiken deze anorganische stoffen om met behulp van zonlicht hun eigen voedingsstoffen te maken door fotosynthese.

Het fytoplankton is in zoete wateren meestal fosfor gelimiteerd en in de zeeën is de limiterende parameter doorgaans stikstof. Fytoplankton is een soortenrijke groep en verschillende soorten hebben diverse strategieën om met veel of juist weinig voedingsstoffen om te gaan. De cyanobacteriën zijn een bekend voorbeeld van zowel rijke omstandigheden (stikstoffixeerders die drijflagen kunnen vormen) als arme omstandigheden (kleine kolonies al dan niet in vlokken). De wortelende waterplanten kunnen naast voedingsstoffen uit het water ook de waterbodem gebruiken als bron. Bodemalgen zijn net als waterplanten in sterke mate afhankelijk van het hoeveelheid licht op de bodem, en dat lukt vooral goed als er minder algen in het water zijn. Is het water diep of zijn er te veel algen dan zal de productie door waterplanten en bodemalgen minimaal of zelfs afwezig zijn.

Voedingsstoffen kunnen ook organisch van aard zijn en aangevoerd worden door omliggende rietlanden of met aangevoerd water, en bevatten bijvoorbeeld dode algen of resten van dieren. Dit organische materiaal (detritus of organisch zwevend stof) kan direct door sommige dieren gebruikt worden als voedsel, zoals detritus afkomstig van bijvoorbeeld dode algen dat kan dienen als voedselbron voor muggenlarven of mosselen. De toevoer van organisch materiaal is de laatste decennia afgenomen (zie Figuur 8-3). Er zijn dus twee belangrijke bronnen van voedsel: de aanvoer van elders en de productie van producenten in het systeem (Figuur 8-2).

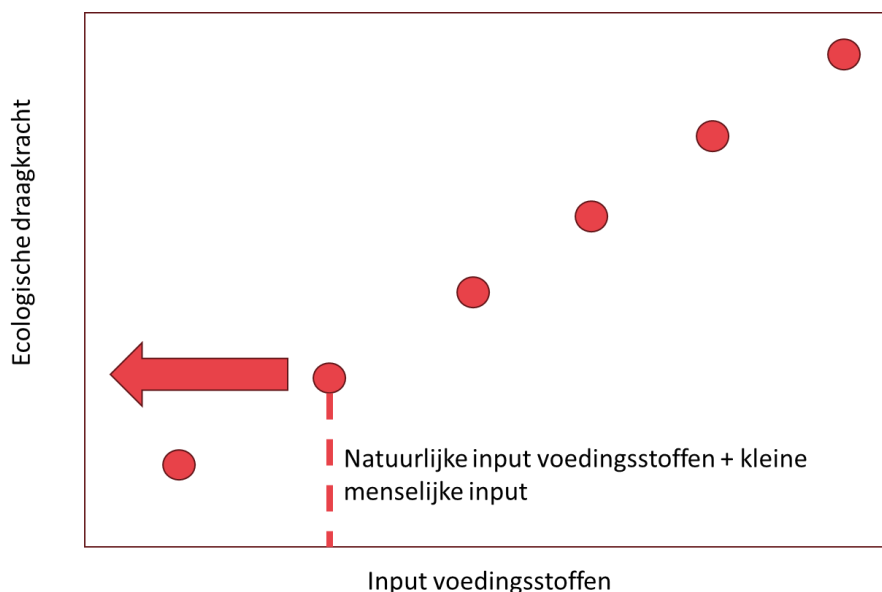


Figuur 8-2 Primaire producenten en primaire consumenten en hun voedingsbronnen.



Figuur 8-3 De aanvoer vanuit grote rivieren van organisch materiaal neemt met meer dan een factor twee af over de laatste decennia (data: waterinfo).

In veel gevallen zal de primaire productie afnemen als de nutriëntenbelasting lager is. In Figuur 8-4 is een lineair verband verondersteld. In werkelijkheid is de relatie tussen draagkracht en voedingsstoffen door allerlei biologische reacties en interacties complexer. In theorie kan deze relatie gebruikt worden om de draagkracht van een gezond systeem te bepalen, mits aanvoer en onttrekkingen een marginale rol spelen. Een gezonde toevoer van voedingsstoffen, zoals de normen in de KRW voor het betreffende watertype, kan hierbij als uitgangspunt genomen worden.



Figuur 8-4 Een theoretische relatie tussen ecologische draagkracht en toevoer van voedingsstoffen.

De Veluwerandmeren zijn een goed voorbeeld waar deze eenvoudige relatie tussen draagkracht en voedingsstoffen niet opgaat. In de periode met hoge nutriënten belasting waren de aantallen van watervogels uit alle voedselgroepen heel laag. In de laatste decennia is de belasting van voedingsstoffen lager dan ooit maar is de draagkracht voor vis, waterplanten en mossel-etende watervogels sterk toegenomen. In de eutrofe periode werd de productie door cyanobacteriën gedomineerd, wat hele goede concurrenten zijn maar langzame groeiers.

Ook de visstand was arm qua soorten en leeftijdsopbouw, en bijna de gehele visstand werd bepaald door grote brasem en was daarmee onbenutbaar voor viseters. In de laatste decennia zijn voedingsstoffen teruggedrongen, zijn blauwalgen bloeien verdwenen, zijn waterplanten en bodemalgen belangrijke producenten, en bevat het voedselweb veel meer consumenten en meer soorten consumenten.

Om de relatie tussen draagkracht en voedingsstoffen te bepalen om zodoende een gezonde draagkracht te verkennen zijn twee methoden getest met verschillende stappen. Deze zijn in de volgende paragraaf uitgewerkt.

Wanneer is primaire productie genoeg?

Om in te schatten welke productie van een ecosysteem voldoende is, is een aantal stappen onderscheiden en uitgewerkt met het Markermeer al voorbeeld. Voor het Markermeer is aangenomen de primaire producenten gelimiteerd worden door fosfor. De inschatting is gemaakt vanuit van twee kanten in het voedselweb:

- Bottom-up: vanuit de doelen voor eutrofiering uit de KRW
- Top-down: vanuit de draagkracht van Natura2000

In de bottom-up redenering wordt uitgegaan dat de draagkracht bij behalen van de Goede Toestand voor nutriënten van de KRW een goede basis zal zijn voor een gezonde of voldoende draagkracht. Omdat nutriëntenconcentraties verhoudingsgewijs kunnen afwijken van de belasting van het systeem is ook rekening gehouden met de relatie tussen belasting en concentraties.

Voor de doelen van vele Natura2000 gebieden wordt uitgegaan van de draagkracht die nodig is om een soort of soortgroep (bv. 1500 vogels) te faciliteren, en niet van het ecosysteem als geheel. De draagkracht van een soort of soortgroep is helaas niet direct te vertalen naar de benodigde draagkracht voor het hele ecosysteem, in elk geval niet met het model Ecopath. Dat komt omdat er veel parallelle dieetrelaties zijn en het model geen rekening houdt met competitie, dieetaanpassing of seizoenseffecten. Het is dus niet mogelijk om de draagkracht van een specifieke voedselgroep rekenkundig te vertalen naar benodigde nutriëntenconcentraties of belasting. Voor het hele voedselweb kan dat wel.

In een voorbeeld hieronder is uitgewerkt hoe vanuit de bottom-up en een top-down redenering een gezonde draagkracht is af te leiden. Omdat de twee benaderingen verschillen in hun uitgangspunten, kan de uitkomst van gezonde draagkracht ook verschillen. Deze verschillen zijn vooral te verwachten als de concentraties in het water in de periode van draagkrachtbepaling afwijken van de KRW norm concentraties voor de 'goede toestand'.

8.2.1 'Bottom up' benadering

Stap 1 Bepalen van de bijdrage van natuurlijke belasting van voedingsstoffen

In deze stap wordt de achtergrondbelasting bepaald. Voor het Markermeer is de totale belasting geschat door van der Geest et al. (2018) op 300kton fosfor per jaar voor het hele Markermeer gebied. De natuurlijke fractie is geschat met emissieregistratie op 15% van het totaal, en bedraagt daarmee 45 kton P.

Van nature is de interne belasting uit het omliggende meer door verbinding met moerassen en overstroombare gronden ook een belangrijke bron. Om de potentie hiervan te schatten is uitgegaan van de toevoer die Oostvaarders oevers zou kunnen hebben. Uit de preverkenning blijkt dat Oostvaarders Oevers 8 kton P per jaar kan leveren uit 2,8% moeras of overstroombaar land. Als dan ca. 20% overstroombaar areaal wordt aangenomen (vergelijkbaar met de Oder lagune) dan bedraagt de 'interne natuurlijke aanvoer' ca. 57 kton.

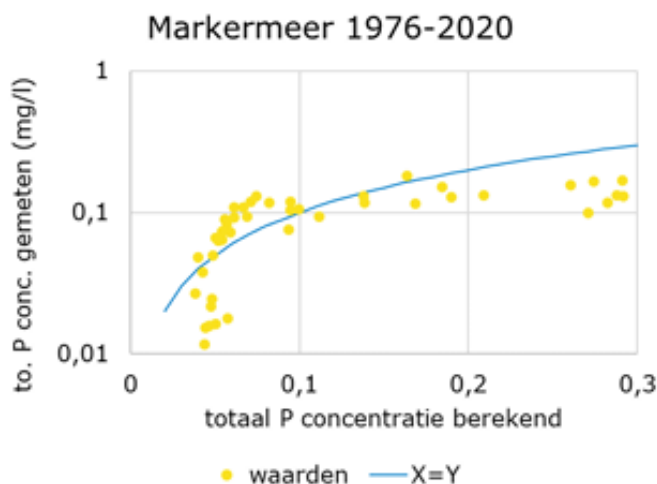
De totale natuurlijk aanvoer is hiermee geschat op $45+57 = 102$ kton P per jaar voor het hele Markermeer, ongeveer een derde van de huidige belasting.

Stap 2 Bepalen menselijke bijdrage aan belasting van voedingsstoffen

Het deel van de belasting dat niet van natuurlijke oorsprong is, is hier aangenomen volledig afkomstig te zijn van de mens. Het gaat dan om af- of uitspoeling van landbouwgronden, industrie en de afvalwaterzuiveringen als grootste bronnen. Dat betekent dat 66% van de 300kton = 198 kton P per jaar voor het hele Markermeer afkomstig is van de mens.

Stap 3 Check van belastingen met gemeten concentraties

Normaal gesproken is er een direct 1:1 verband tussen veranderingen in de belasting en concentratie in het water als aangenomen wordt dat de verblijftijd en diepte constant zijn. Op basis van data in Nederlandse meren zijn daar modellen voor gemaakt. Het is daarmee mogelijk om de gemeten concentratie te vergelijken met de berekende concentraties uit de belasting, rekening houdend met diepte en verblijftijd (Figuur 8-5). In de figuur is het verloop in de tijd te zien van rechts (jaren tachtig) naar links (>2000): In de jaren tachtig was de gemeten concentratie lager dan verwacht (waarschijnlijk door sedimentatie naar de waterbodem) maar met afnemende belasting kwam er een moment dat (waarschijnlijk via nalevering uit de waterbodem) de gemeten concentratie hoger werd. En in de laatste 10-15 jaar is er sprake van een scherpe daling van de gemeten concentratie, ondanks dat de belasting niet veel is veranderd. Hier spelen waarschijnlijk diepe putten een rol die als een stofzuiger fosfor gebonden aan slib en dode algen verzamelen (Noordhuis et al., 2023).



Figuur 8-5 Relatie tussen gemeten fosfor concentratie (zomergemiddeld) in de waterlaag en de berekende fosfor concentratie met belasting, verblijftijd en diepte (jaargemiddeld). De laatste 10 jaar is de concentratie rond de 0,02 mgP/l en is aanzienlijk lager dan de berekende concentratie op basis van diepte en verblijftijd (0,05 mgP/l), uit Noordhuis, et al., 2024.

Dat betekent dat de gemeten concentraties een factor 2 à 3 lager zijn dan verwacht op grond van de belasting. Ofwel de concentraties die primaire producenten in de waterlaag ervaren zijn een factor 2 à 3 lager dan de belasting zou doen vermoeden.

Stap 4 Check van concentraties op KRW normen

Om vanuit de Kaderrichtlijn water tot een gezonde productie te komen kan de concentratie in het water als uitgangspunt genomen worden. Immers, de normen van klasse 'goed' zullen een goede biologische toestand faciliteren zonder eutrofieringseffecten. Uit Tabel 8-1 blijkt dat de huidige concentratie tP zich in de klasse 'zeer goed' bevindt. Er zijn dus geen maatregelen nodig om de tP concentratie verder terug te dringen. Echter, de productiviteit van het Markermeer is lager dan gewenst en valt ruim buiten de klasse 'goed'.

Tabel 8-1 Weergave van tP concentraties in het water (zomergemiddelde in mg tP/l).

Huidige concentratie	KRW norm concentratie (G/M)	KRW referentie concentratie (ZG/G)	Aanname gezonde productie	Conclusie
0,02	0,09	0,04	0,04-0,09	Geen gezonde productie

Uit stap 3 blijkt dat de gemeten concentraties in het water aanzienlijk lager zijn dan verwacht op grond van de belasting en dat de verwachte concentraties in het water bij de actuele belasting wel in de klasse 'goed' bevinden. Dat betekent dat de huidige belasting naar het water toe een gezonde productie wel zou kunnen faciliteren, maar dat de concentraties in het water zelf dat niet kunnen.

8.2.2 'Top down' benadering

De 'top-down' redenering neemt het voedselweb als basis om van de top naar beneden in het voedselweb te bekijken of voldoende voedsel beschikbaar is. Ook dit onderdeel is een paar stappen uitgewerkt en start met het opstellen van een kwantitatief voedselweb.

Stap 1 Schatten van kwantitatieve voedselweb relaties met het model Ecopath

Voor het Markermeer is er een bestaande modelering met Ecopath voor de situatie jaren 80 en rond 2015, ook wel huidig genoemd (Van den Berg, et al., 2023). Voor de input van fytoplankton is een DWAQ model (inclusief de BLOOM module) toegepast voor beide periodes om zo goed mogelijk de verandering in de primaire productie te schatten. In het kort: het model Ecopath gebruikt gemeten biomassa's en geschatte producties van ca. 20 voedselgroepen. Het dieet en consumptie wordt ook per voedselgroep ingeschat. Ruimtelijke gegevens die verschillen worden gewogen gemiddeld per 1m².

Tabel 8-2 Overzicht van de benodigde primaire productie t.o.v. geschatte primaire productie (%) per voedselgroep per periode in het Markermeer.

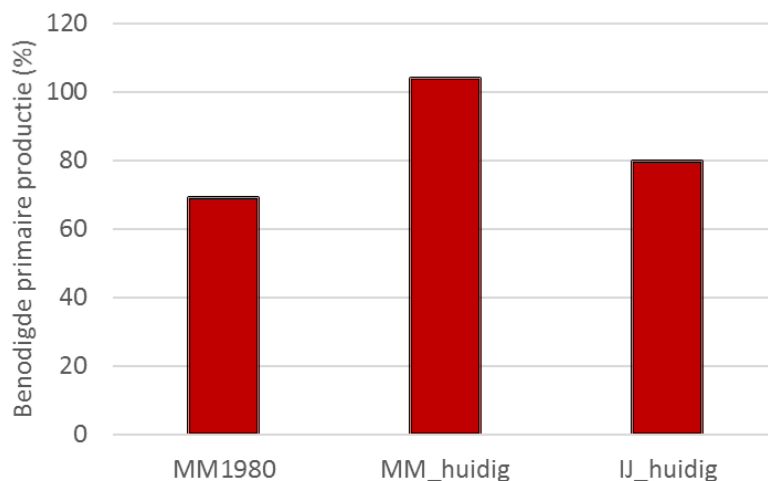
	Rond 1985	Rond 2015
Visetende vogels (gehele waterlaag)	0,9	2,4
Visetende vogels (toplaag)	0,7	0,6
Visetende vogels (bovenste waterlaag)	0,3	0,1
Visetende vis	16,1	19,6
Benthivore vogels	8,2	13,9
Benthivore vis	10,7	17,7
Planktivore vis	6,8	4,4
Herbivore vogels	0,1	0,1
Macrofauna overig	11,6	24,1
Mosselen	7,2	7,5
Zoöplankton	6,8	13,6
Totaal benodigde Primaire Productie (totaal %)	69,2	104,0

Stap 2 Benodigde productie vergelijken met verleden of andere systemen

De benodigde productie voor het hele voedselweb van het Markermeer is toegenomen van 69 naar 104% (Figuur 8-6). Er zijn wel verschillen tussen de voedselgroepen, zo is voor zoöplankton de behoefte gestegen van 7 naar 14% maar voor herbivore watervogels is er geen verandering (Tabel 8-2). Zoöplankton is een belangrijke schakel in het voedselweb voor vis en dus ook voor alle viseters.

Om tot een inschatting te komen welke draagkracht 'gezond' of 'voldoende' is kan de totale benodigde productie vergeleken worden met het gemiddelde van andere meren. Meren over de gehele wereld verspreid waarvoor Ecopath berekeningen beschikbaar zijn, blijken gemiddeld 60% van de primaire productie nodig te hebben (Sven Teurlincx, mondelinge mededeling). Het Markermeer is dus afwijkend omdat ook in de voedselrijke periode de gebruikte productie al wat hoger was. Ofwel, het criterium van 60% is niet goed bruikbaar, in elk geval niet voor het Markermeer.

Een andere goede mogelijkheid is het jaar of de periode bekijken dat de draagkracht nog net voldoende was. Dat zou in het voorbeeld van het Markermeer rond 2000 zijn, omdat voor deze periode de vogelaantallen zijn bepaald. Helaas zijn er voor rond 2000 geen berekeningen voor de primaire productie beschikbaar en ook niet voor Ecopath. Het is te verwachten dat de benodigde productie zal liggen tussen de 69 en 104%, en waarschijnlijk dichterbij 104 dan bij 69% omdat de nutriëntennutriënten al fors gedaald zijn voor het jaar 2000.



Figuur 8-6 Benodigde productie voor het hele voedselweb van het Markermeer afgeleid op basis van de beschreven top-down berekening.

8.2.3

Conclusie

Uit de top-down benadering kan (nog) geen kwantitatieve draagkracht berekend worden omdat deze methode veel kennis en informatie vraagt, en er voor de benodigde periode geen berekeningen beschikbaar zijn. Toch kan geconcludeerd worden dat het aannemelijk is dat de huidige (2015) draagkracht te laag is om de doelen voor Natura2000 vogelsoorten te bereiken. Immers, het aandeel benodigde primaire productie is fors toegenomen en is hoger dan 100%. Hetzelfde geldt voor bottom-up benadering: het is aannemelijk dat met de huidige concentraties fosfor de draagkracht lager is dan wanneer de concentraties zich in de 'goede toestand' zouden bevinden. Uit de bottom-up methode blijkt ook dat de externe belasting wel voldoet aan de hoeveelheid nutriënten die nodig zijn voor een gezonde draagkracht. Beide methoden zijn toepasbaar en komen tot een vergelijkbare eindconclusie.

8.3 De draagkracht vergroten met maatregelen

De ecologische draagkracht kan met verschillende maatregelen worden vergroot, zoals a) het vergroten van de (natuurlijke) toevoer van organisch en/of anorganisch voedingsstoffen b) het verondiepen van water om de kans op waterplanten of bodemalgen te vergroten en te zorgen voor een hogere watertemperatuur overdag. Deze maatregelen grijpen in op het vergroten van de primaire productie of van de aanvoer van al eerder gevormd organische materiaal. De verschillende maatregelen worden hieronder beschreven met opnieuw als voorbeeld het Markermeer. Daarna is het effect van maatregelen Oostvaardersoever en Marker Wadden vergeleken met het open water van het Markermeer. Daartoe is een mix gebruikt van resultaten uit het Levend Markermeer project (Van den Berg et al., 2023), metingen uit het KIMA2.0 project voor de effecten van de Marker Wadden (Holdt, 2024) en voorstudies van het project Oostvaardersoever (Van Leeuwen et al., 2024).

8.3.1 Natuurlijke toevoer voedingsstoffen vergroten

Maatregelen om de productiviteit te vergroten kunnen op verschillende manieren genomen worden. Het toestaan van extra lozingen van voedingsstoffen is daarbij niet aan de orde. De inmiddels verminderde voedingsstoffen zijn immers belangrijk om de waterkwaliteitsdoelstellingen te bereiken. Het doel is dus maatregelen te nemen die de natuurlijke productiviteit verhoogt of stimuleert of nieuwe verbindingen legt om op natuurlijke wijze de nutriëntenconcentraties te verhogen. Verondiepen zou hier een rol in kunnen spelen, omdat dit bijdraagt aan het omzetten van nutriënten in primaire en secundaire productie voordat de voedingsstoffen in de diepe putten verdwijnen.

Het project Oostvaardersoever beoogt het verbinden van Oostvaardersplassen met het Markermeer om zo voedingsstoffen en vissen te kunnen uitwisselen. Voor stoffen zijn inschatting gemaakt van de kwantiteit om een nog te ontwikkelen lagune (ca. 75 ha, 2,5 m diep, Tabel 8-3) in het Markermeer te voeden met water uit de Oostvaardersplassen of andere aangrenzende wateren. De concentraties van zowel organisch stof (vooral levende en dode algen) als fosfor (anorganisch en organisch) zijn erg hoog in de Oostvaardersplassen en aanliggende wateren. Voor de toevoer van droog organisch materiaal ofwel detritus is een schatting gemaakt van 420g DW per m² per jaar. Daarbij is aangenomen dat de volledige toevoer gebruikt wordt in de lagune, dus voordat het uit heeft kunnen spoelen met het water. De verblijftijd is beoogd op ca. 3 weken en het kan dus zijn dat een deel van het aangevoerde detritus uitspoelt en dat de netto aanvoer in de lagune lager is. Anderzijds kan afhankelijk van het aanvoer water ook een andere bron gekozen worden die tot meer dan een factor 10 hogere concentraties detritus bevat. Daarmee neemt het aangevoerde detritus in dezelfde hoeveelheid toe. De mogelijke betekenis van deze aanvoer voor de productie van de lagune en het Markermeer is verderop doorgerekend.

Tabel 8-3 Kwantitatieve inschatting van bijdrage van verbinding van Oostvaardersplassen naar een luwtegebied in het Markermeer. Ontwerp en data naar gegevens Peter Jesse dd. december 2024, Van Leeuwen et al., 2024, Noordhuis en Vonk, 2022 en ongepubliceerde data Waterschap Zuiderzeeland.

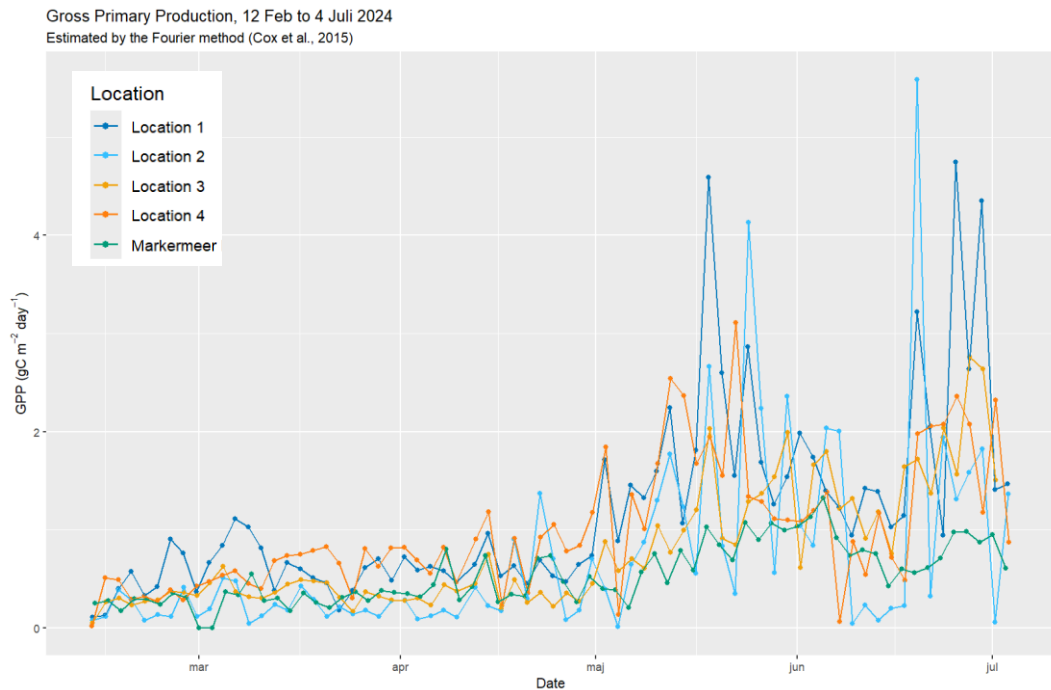
Kenmerk luwtegebied	Waarde	Min	Max	Eenheid
Debiet van aanvoer	1,25	1	1,5	m3/s
Oppervlak luwtegebied	750000	750000	1000000	m2
Verblijftijd	3	2	3	weken
Diepte	2,5			m
Detritus aanvoer concentratie Block of Oostvaardersplassen grote plas	8	5	150	mg/l
Hoeveelheid aanvoer detritus	864000			g/d
Detritusaanvoer per m2 luwtegebied	1,152			g/m2/d
Detritusaanvoer per jaar per m2 luwtegebied	420			g/m2/j
Verblijftijd correctie alles 'stroomt door'	0,058			
Verblijftijd correctie tussen 'stroomt door' en blijft aanwezig in luwtezone	0,529			
Detritusaanvoer bij "gemiddelde" verblijftijd	222			g/m2/j

8.3.2 Verondiepen

Het vergroten van ondiep areaal in de diepere systemen kan de productiviteit dus vergroten. Daarmee ontstaan er kansen voor waterplanten of bodemalgen. Wortelende waterplanten kunnen daarbij profiteren van de voedselrijke onderwater bodem, en is dus meestal niet fosfor of stikstof gelimiteerd. Wortelende waterplanten zijn doorgaans koolstof of licht gelimiteerd. Het open water heeft ook een belangrijke waarde, en daarom is deze maatregel enkel aan te bevelen als er minder ondiep areaal is dan in de natuurlijke omstandigheden, b.v. als ondiep areaal afneemt als gevolg van menselijke ingrepen. Het ondiepe water kan ook productiever zijn omdat het water er sneller opwarmt en daardoor producenten sneller kunnen groeien. Een aandachtspunt is dat aanleg van ondiep water ten koste kan gaan van water wat dieper is, maar nog steeds een belangrijke ecologische waarde herbergt.

Verondiepen vindt vaak plaats in combinatie met andere maatregelen, zoals de lagune van de Oostvaardersoever in het Markermeer en de aanleg van eilanden zoals de Marker Wadden. De effecten van verondiepen kunnen daardoor meestal niet los gezien worden van andere maatregelen of effecten.

De Marker Wadden zijn ongeveer voor de helft van de omvang een verondieping van het open water. Bovendien wordt het verondiepte water luw en er is veel meer land-water interactie. Op de Marker Wadden is op een viertal locaties de zuurstofproductie gemeten voor KIMA2, en een locatie buiten de Marker Wadden (Markermeer Midden). De vier locaties op de Marker Wadden verschillen in diepte, mate van isolatie en mate van waterplanten. Het blijkt dat verschillen tussen de locaties vooral door verschillen in de dagelijkse temperatuur komen. Dit heeft vooral te maken met het snel opwarmen en afkoelen van ondiepe plaatsen wat 5- 8 °C dagelijkse verschillen in temperatuur oplevert. Dat betekent dat de productie overdag snel kan toenemen met het opwarmen van het water, terwijl op dieper water de temperatuur aanzienlijk lager blijft. Bijna alle locaties laten een significant hogere productie (ca. factor 1-7) zien ten opzichte van de locatie buiten de Marker Wadden (Figuur 8-7, Holdt, 2024).

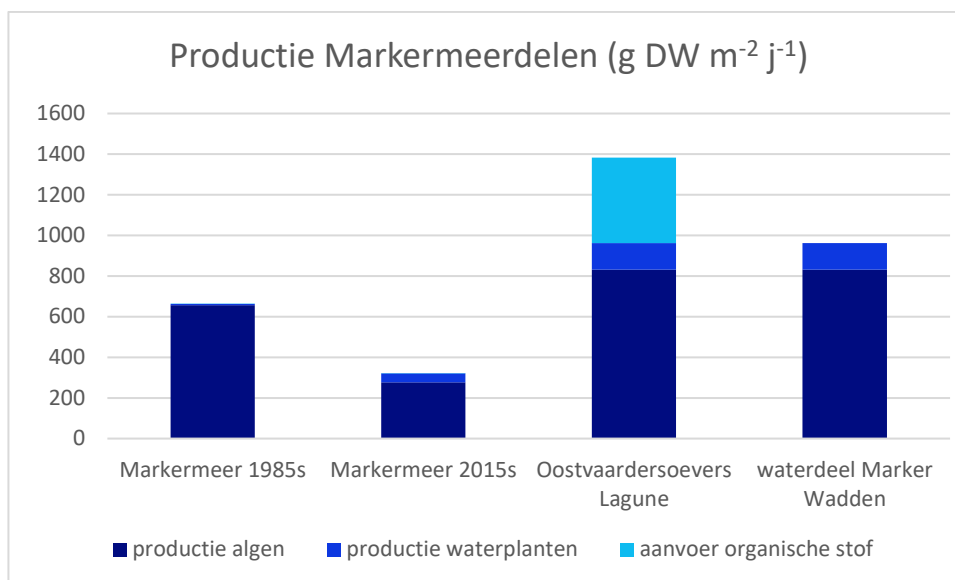


Figuur 8-7 Verloop van de primaire productie per dag op basis van 10minuten metingen van zuurstof concentraties op vier locaties binnen de Marker Wadden en een locatie er buiten (zie Holdt, 2024) in maart - juli 2024.

8.3.3 Vergelijking van maatregelen die de productiviteit vergroten in het Markermeer

Om de effecten voor de productiviteit te vergelijken van verschillende maatregelen kan worden gekeken naar de verandering in primaire productie ten opzichte van het open water, alles per m² per jaar. Voor het Markermeer zijn met het DWAQ-model (waarin de BLOOM module) berekeningen gemaakt om de primaire productie van fytoplankton te schatten van de jaren tachtig en rond 2015. Deze inschattingen zijn gebruikt om het voedselwebmodel Ecopath te voeden en kunnen dus nu gebruikt worden om de primaire productie te vergelijken. Ook is het mogelijk om rekening te houden met de toevoer van detritus van de verschillende maatregelen en het open water.

Voor het Markermeer is berekend met de waterbalans (Noordhuis & Vonk, 2022) en de gemiddelde concentraties organisch materiaal wat de toevoer is aan het Markermeer. Deze toevoer is eerder niet meegenomen in het model Ecopath en blijkt ook heel klein te zijn, orde grootte 1% en daarmee te verwaarlozen (Figuur 8-8). Wel blijkt er een afname te zijn van aanvoer van organisch materiaal (zie paragraaf relatie voedingsstoffen en draagkracht), zodat het zeker geen compensatie zal zijn van de afgenomen primaire productie in 2015. De toevoer aan de Marker Wadden is op netto 0 gesteld. De toevoer naar de lagune is hierboven berekend.



Figuur 8-8 De schatting van de jaarlijkse primaire productie en aanvoer van detritus per m² voor de Marker Wadden en de lagune van de Oostvaardersoevers en de productie van het open water rond 1985 en 2015.

De primaire productie in ondiep water binnen de Marker Wadden is gemeten en blijkt ca. een factor drie hoger te zijn dan het open water. Daarom is voor de lagune de productie van het open water 2015 vermenigvuldigd met een factor 3. De verdeling over de producenten is onbekend omdat het om totaal zuurstof metingen gaat. De locaties verschillen wel in waterplantbedekking maar er bleek geen eenduidig verband te bestaan met de productie. Daarom is de productie tussen fytoplankton en waterplanten naar evenredigheid verdeeld zoals de huidige situatie in het Markermeer is geschat.

Enerzijds is te verwachten dat de totale primaire productie hoger is in de lagune dan op de Marker Wadden vanwege de hogere concentraties beschikbare nutriënten (met name P). Anderzijds lager omdat de beoogde diepte van 2,5m dieper is dan de meeste meetlocaties op de Marker Wadden (0,40-1,80m), waardoor het stimulerende effect van temperatuur minder sterk zal zijn. Een betere schatting kan worden gemaakt als het ontwerp gemaakt is, waarmee belangrijke sturende factoren de hoeveelheid detritus in het aangevoerde water en waterdiepte bekend zijn.

De totale primaire productie in de lagune van de Oostvaarders Oevers zal naar verwachting relatief hoog zijn door de combinatie van ondiepte (analoog aan de Markerwadden) en de aanvoer vanuit de Oostvaardersplassen. Volgens bovenstaande berekening zal de totale productie in de lagune ca. een factor 4,5 hoger liggen dan in het open water, en ca. 50% hoger dan in de Marker Wadden. Het ontwerp van de lagune en ook de bron van toevoer zal echter een groot verschil maken in de uiteindelijke te verwachten productiviteit.

De maatregelen hebben een relatief groot effect vergeleken met het open water, maar hebben tegelijkertijd een kleine omvang ten opzichte van het open water. Daardoor is een effect op de primaire productie van het hele systeem gering. Toch kan de combinatie van meerdere projecten in ruimtelijke samenhang de dynamiek enigszins vergroten, vooral omdat vissen en vogels de mogelijkheid hebben om het landschap op systeemsschaal te gebruiken. Daarmee beïnvloeden ze ook de stofstromen. Bovendien kan de draagkracht voor vogels ook worden vergroot door nieuw habitat te bieden en beschutting, en daardoor meerdere functies in het gebied te combineren.

Wel gaat de aanleg van eilanden doorgaans gepaard met de aanleg van diepe putten waaruit zowel zand voor de markt als holocene materiaal uitgehaald wordt voor de aanleg van dergelijke eilanden.

De diepe putten zijn een belangrijke 'sink' voor fosfor en dat effect lijkt op systeemniveau effect te hebben (ca. 60% van de jaarlijkse toevoer van P, Noordhuis, et al., 2024). De aanleg van eilanden heeft dus een complexe interactie met de productiviteit van het Markermeer, omdat fosfor de primaire productie sterk limiteert.

8.3.4

Conclusie

De beschreven methodiek via een 'bottom up' en 'top down' benadering om een gezonde draagkracht te bepalen is verhelderend, en zou ook in andere rijkswateren toegepast kunnen worden. Dit vergt nog veel kennis en inzet omdat voedselweb data en modellen hierin voorwaardelijk zijn.

- Van den Berg, M., Platteeuw, M., Remmelzwaal, A., Garritsen, T., Postema, J., Tack, L., van Luijn, F., Schilder, J. & Kaffener, K. (2023). *Levenskansen van een hongerig Markermeer.*, RWS rapport.
- 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>
- Dijkman, N. (2023) *Pelagische primaire productie Grevelingenmeer, Oosterschelde, Veerse Meer en Westerschelde : primaire productie metingen met behulp van Fast Repetition Rate fluorometrie - Tussenrapportage resultaten 2020-2022*. RWS rapportnummer BM 23.38 (p47).
- Eilers, P. H. C. en Peeters, J. C. H. (1988) *A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton*. *Ecological modelling* 42: 199-215.
- Geest H.G. van der, Vonk J.A. & Ouboter M.R.L. 2018. Reconstructie water- en stoffenbalans Markermeer 1976-2015. Rapport. In opdracht van Rijkswaterstaat.
- Oktober 2018. Universiteit van Amsterdam & Waternet. Amsterdam.
- Holdt, A. 2024. *Primary production and plankton communities in Marker Wadden and lake Markermeer.*, Master Thesis Wageningen University.
- Iplo [Modelschematisaties | Informatiepunt Leefomgeving](https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/modelschematisaties/) <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/modelschematisaties/>
- Kramer, L., Los, H., Troost, T., Genseberger, M., Thiessen, M., & Boderie, P. (2016). *3D model van het Volkerak- Zoommeer voor waterkwaliteit en primaire productie*.
- Kromkamp J.C. (2016). *Primaire productie in de Westerschelde in 2016 bepaald m.b.v. de Fast Repetition Rate fluorometrie techniek* - MONEOS voortgangsrapport 2016.
- Kromkamp, J.; Capuzzo, E.; Philippart, C.J.M. (2017). *Measuring phytoplankton primary production: review of existing methodologies and suggestions for a common approach*. *EcApRHA Deliverable WP 3.2*.
- Lawrenz E, Silsbe G, Capuzzo E, Ylöstalo P, Forster RM, Simis SG, Prášil O, Kromkamp JC, Hickman AE, Moore CM, Forget MH, Geider RJ, Suggett DJ. *Predicting the electron requirement for carbon fixation in seas and oceans*. *PLoS One*. 2013;8(3):e58137. doi: 10.1371/journal.pone.0058137.
- C. H. A. Van Leeuwen, Janien van der Grefte & Daan van Bendegom (2024). *Verbrede blik op het voedselweb en het ecologisch functioneren van de Nederlandse grote wateren*. Deel III. Rapport 3366.
- Los, F. & Brinkman, J.J.. (1988). *Phytoplankton modelling by means of optimization: A 10-year experience with BLOOM II*. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 23. 790-795. 10.1080/03680770.1987.11899715.
- Noordhuis, R., & Vonk., A., (2022). *Stoffentransport Oostvaardersoever*. Deltares rapport 86pp.
- R. Noordhuis M. Genseberger & G. Pijcke (2024). *Kennis voor Zandwinstrategie IJsselmeergebied Accumulatie van voedingsstoffen in putten en tijdelijke effecten*

Rijkeboer, M., (2023). *Online monitoring van slib en fytoplankton dynamiek in Markermeer*. RWS MEM2023-34

Stolte, W., de Kluijver, A., & Smits, J. (2015). *Mud dynamics in the Ems Estuary Set-up of primary production model*. Deltares report 1205711-000.

Troost, T. A. (2013). *Draagkracht voor MZI's in de Oosterschelde*. Deltares report 1203038-002-ZKS-0002

Troost, T.A. 2020. *Primaire productie berekeningen Markermeer*. Deltares memo 11203697-033-BGS-0001 (p18).

Walker, D. (1992). *Energy, plants and man*. Oxygraphics Limited, Brighton (p257).

Weeber, M. P., Kramer, L., Genseberger, M., Tiessen, M. C. H., Troost, T. A., Eijsberg-Bak, C. I., & Nolte, A. J. (2018). *Data-analyse en modelvalidatie van het Volkerak-Zoommeer ecosysteem*. In *Deltares*. 1-169.

Wijsman, J. (2019). *Metten van primaire productie in de Oosterschelde, Grevelingenmeer en het Veerse Meer: Overzicht van methodieken en plan van aanpak voor monitoring*. (Wageningen Marine Research rapport; No. C022/19). Wageningen Marine Research. <https://doi.org/10.18174/472107>

A Overzicht relevante projecten

Project naam	Korte beschrijving	Focus-gebied(en)	Looptijd	Opdrachtgever	Uitvoerenden
PP t.b.v. PAGW	Vergelijking van verschillende methodes van productie-schattingen; en kader/advies over primaire productie versus biomassa i.h.k.v. een gezond systeem en de mogelijke invloed van PAGW projecten hierop	Oosterschelde en Markermeer	Juni 2024 – begin 2025	RWS-WVL (Marieke de Lange)	Deltares (Tineke Troost), Aeres (Marcel vd Berg), CIV (Nicole Dijkman)
Waterkwaliteits-schematisatie Oosterschelde	Opzetten van een waterkwaliteitsmodel voor de Oosterschelde o.b.v. Delft3D-software	Oosterschelde	2024	RWS-WVL (Yann Friocourt/ Muriel Heldrink)	Deltares (Luuk van der Heijden)
Waterkwaliteits-schematisatie IJsselmeergebied	Opzetten van een waterkwaliteitsmodel voor het IJsselmeergebied	IJsselmeer, Markermeer, Veluwemeer	2024-ntb	RWS-WVL (Yann Friocourt/ Muriel Heldrink)	Deltares (Menno Genseberger)
KIMA2.0	Schatten van de primaire productie van het Markermeer en de Marker Wadden	Markermeer	2023-2026	TKI Deltares en Natuurmonumenten	Idem Anne Ton/Sacha de Rijk, Ruurd Noordhuis, Marcel vd Berg
Trintelzand	Schatten van de primaire productie van het Trintelzand m.b.v. zuurstof metingen als onderdeel van de effecten van Trintelzand	Markermeer	2024-2025	RWS Ria Kamps	Bureau Waardenburg
Oostvaardersoevers	Optimaliseren van uitwisseling tussen Oostvaardersplassen en Markermeer en het inschatten van betekenis van Markermeer t.b.v. nutriënten- toevoer en productie i.s.m. configuratie luwtemaatregel in Markermeer	Markermeer/Oostvaardersplassen	2020-ntb	PAGW	PAGW projectteam Deltares

Project naam	Korte beschrijving	Focus-gebied(en)	Looptijd	Opdrachtgever	Uitvoerenden
BO verbrede blik voedselwebfunctioneren	Inzicht sturende factoren voedselwebfunctioneren NL grote wateren: meerjarige casestudie stofstromen IJsselmeergebied o.a. IJ-VechtDelta, OVO; kennismontage sturende factoren en draagkracht OS	IJsselmeergebied en Oosterschelde	2021-begin 2025	LNV – SKI	Wageningen Research: Ralf Verdonchot (PL), Joep de Leeuw; i.s.m. UVA
Vis en Vogels	(o.a.) Verbeteren kraamkamerfunctie Oosterschelde voor vis	Oosterschelde	2024-2025	PAGW	Mascha Dedert (RWS)

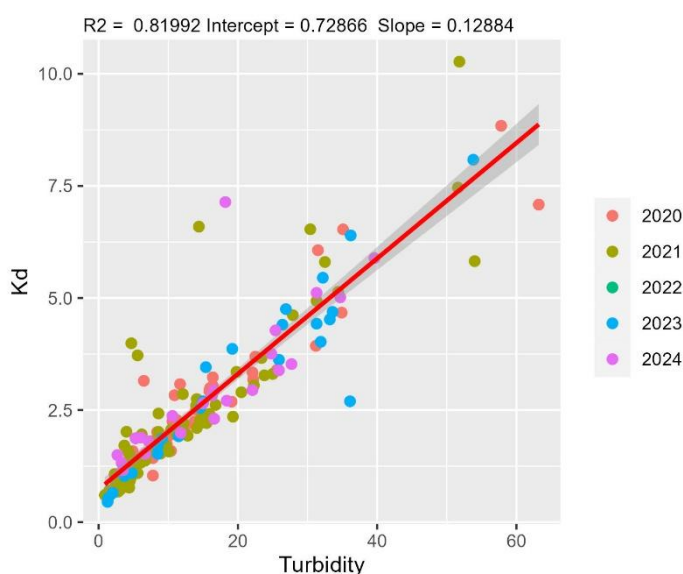
B Meetgegevens Markermeer

Een verzameling gegevens, relaties en resultaten die interessant kunnen zijn in het kader van het PAGW project.

B.1 Kd

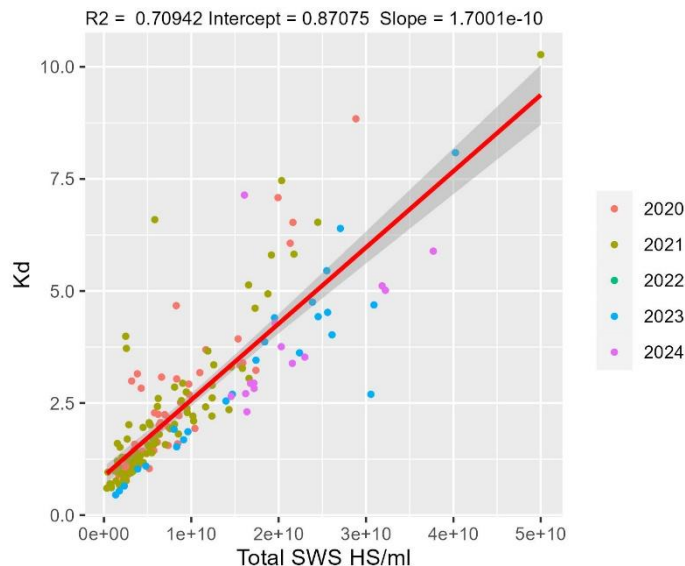
Uitdoving van licht onder water komt door absorptie en scatter (lichtverstrooiing) van deeltjes in het water (slib en fytoplankton) en door absorptie door het water zelf. Deze parameter is noodzakelijk om primaire productie te berekenen zowel bij de FRRF methode als de ^{14}C methode. K_d wordt gemeten op de MWTL meetpunten, maar is voor de berekeningen ook op tussenliggende punten noodzakelijk.

Troebelheid en K_d zijn gecorreleerd (Figuur B-1). Deze relatie wordt gebruikt om vanuit troebelheid voor elke FRRF meting K_d te bepalen.



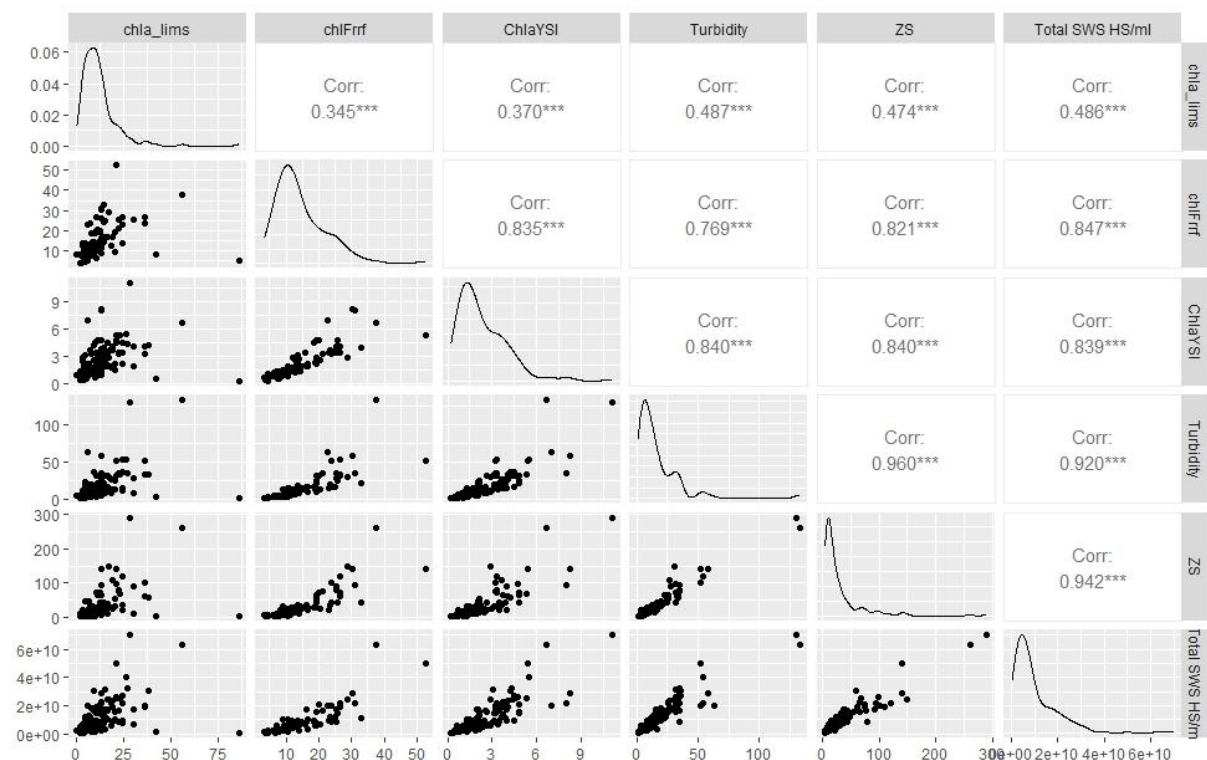
Figuur B-1 Relatie tussen troebelheid en K_d .

Een vergelijkbare relatie kan worden opgesteld voor sideward scatter (flowcytometer) en K_d (Figuur B-2). Deze relatie wordt gebruikt indien er geen metingen voor troebelheid zijn.



Figuur B-2 Relatie tussen total sideward scatter (SWS) en Kd.

Er zijn meer parameters die gerelateerd zijn en in ieder geval gedeeltelijk een oorzakelijk verband hebben. Voor een aantal van deze parameters is een pairs-plot opgesteld (Figuur B-3).

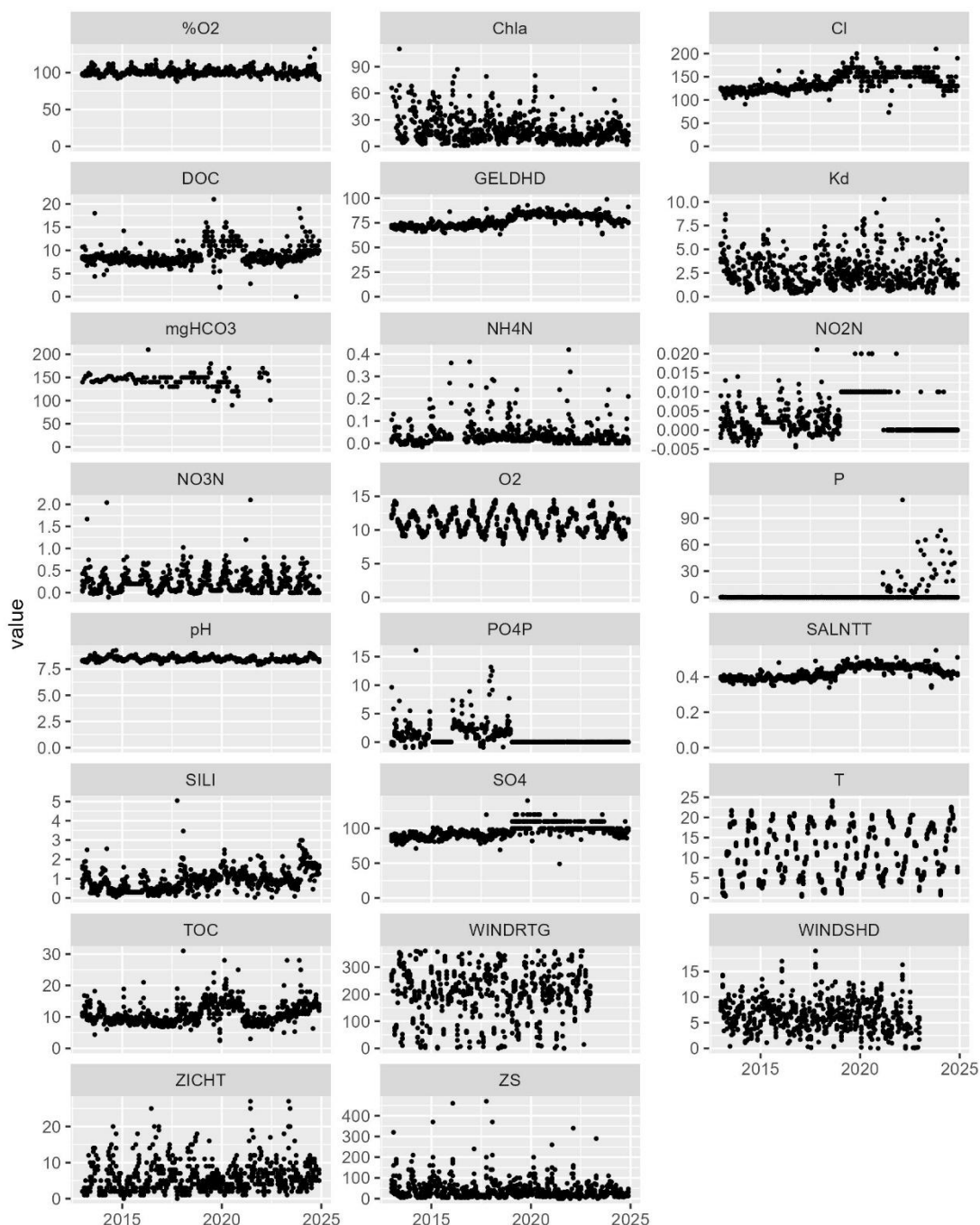


Figuur B-3 Relatie tussen troebelheid gerelateerde parameters (Turbidity, ZS = zevent stof, Total SWS (FCM) en chlorofyl gerelateerd parameters (chla_lims (analytisch gemeten), chlFrrf (fluorescentie gebaseerd FRRF) en ChlaYSI (fluorescentie gebaseerd (YSI/CTD))).

B.2 MWTL – LIMS

Voor het MWTL programma worden uiteenlopende metingen gedaan op meetpunt Markermeer – Midden.

Figuur B-4 toont een aantal relevante parameters sinds 2013. Deze gegevens zijn direct uit het LIMS (Laboratory Information Measurement System) en bedoeld als een snel overzicht. De meeste afkortingen spreken voor zich. Bij verder interesse of voor verdere analyse kunnen de officiële gegevens, inclusief correcte eenheden, via waterinfo.rws.nl worden opgehaald.

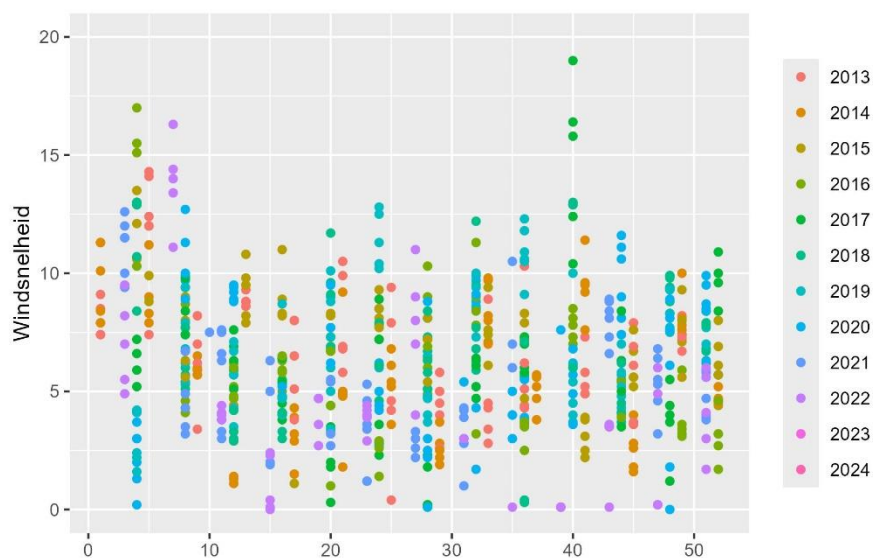


Figuur B-4 Markermeer-Midden MWTL metingen sinds 2013.

Hoge chlorofyl concentraties in de winter is een merkwaardig fenomeen dat optreedt in het Markermeer. Een mogelijke verklaring is opwervelen van algen van de bodem in de winter door hogere windsnelheden. Figuur B-5 toont chlorofyl concentraties per week voor alle beschikbare jaren en Figuur B-6 de windsnelheid op de dag van de meting. Let wel, dit is de windsnelheid op de dag van de metingen en toont dus niets van de wind op de voorafgaande dagen wat ook invloed kan hebben. Sinds 2023 wordt de windsnelheid niet meer vastgelegd. Chlorofyl is in de late zomer - vroege herfst het laagst, maar dan is wind niet lager dan de rest van het jaar/begin van de winter.



Figuur B-5 Chlorofyl concentratie.



Figuur B-6 Windsnelheid.

B.3 Resultaten Flowcytometer Markermeer 2021

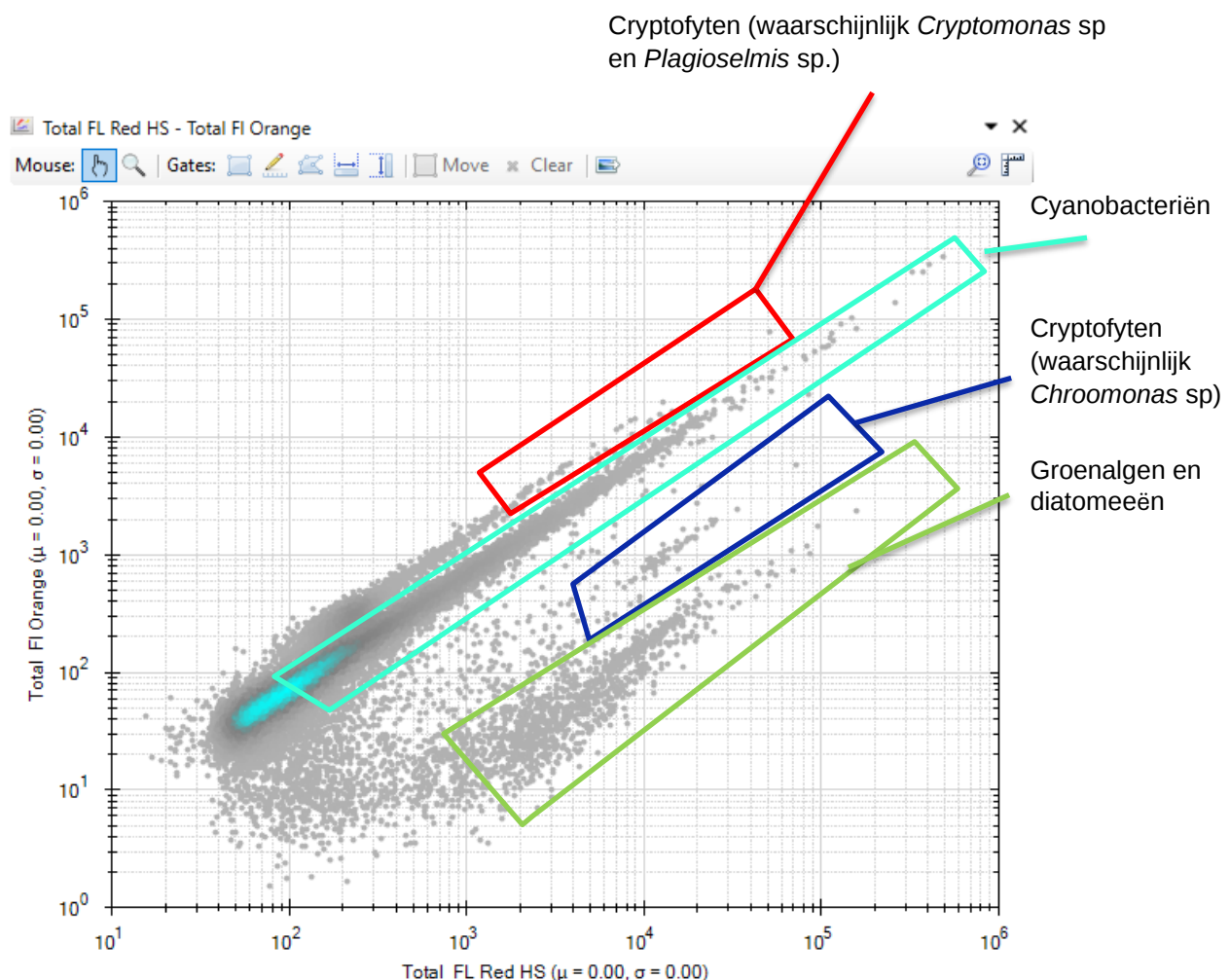
De flowcytometer gegevens van het Markermeer 2021 zijn uitgewerkt in Rijkeboer (2023).

Er wordt nogmaals een analyse uitgevoerd op dezelfde gegevens, met als doel de dynamiek van de verschillende aanwezige fytoplankton groepen zo gedetailleerd mogelijk te achterhalen. Deze analyse is nog niet voltooid, dus dit zijn voorlopige resultaten.

Het principe van de flowcytometer (CytoSense, CytoBuoy) in het kort:

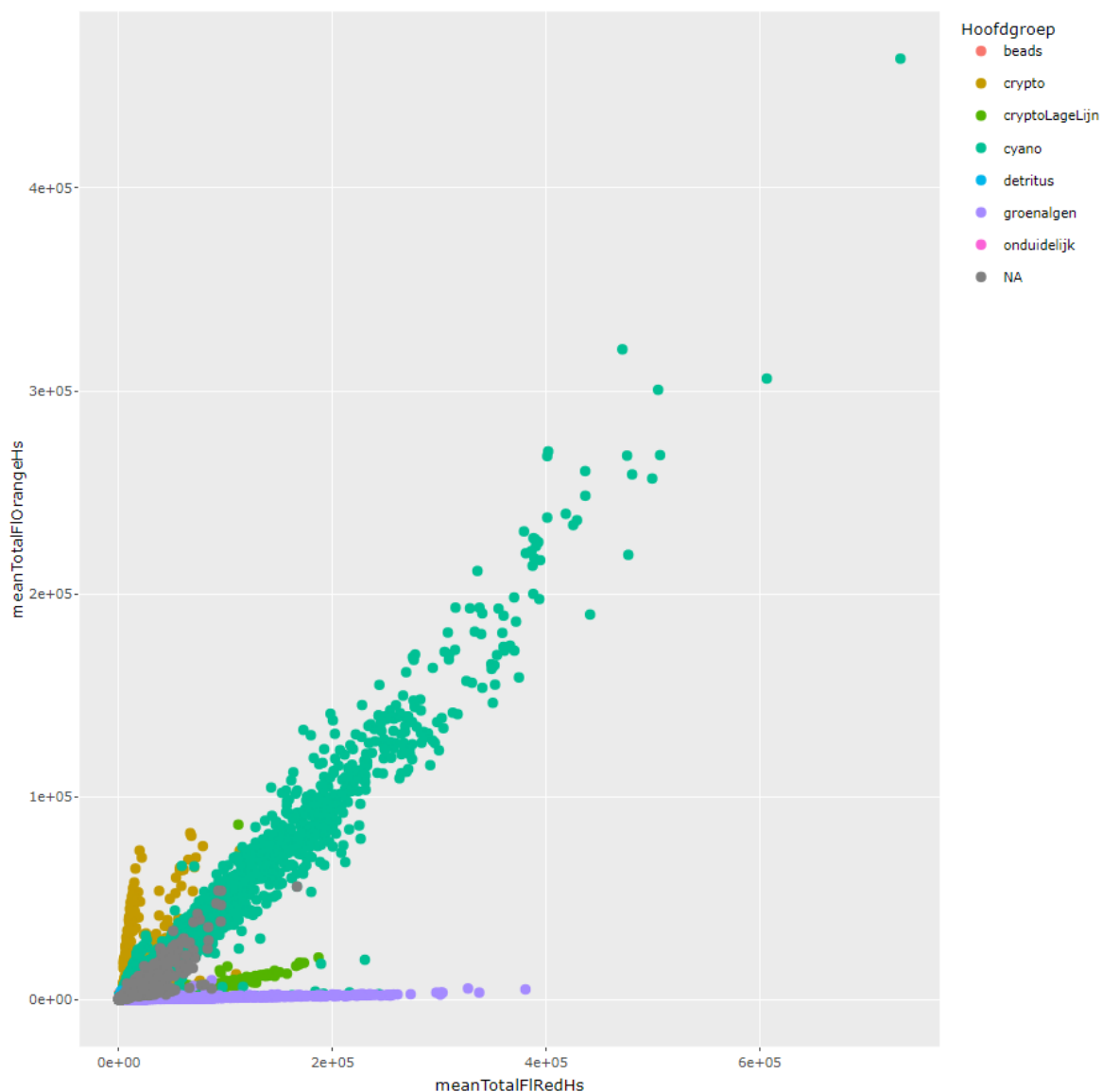
- Monster wordt opgezogen en meegenomen in een mantelvloeistof
- Deeltjes worden aangestraald door twee lasers en forward scatter, sideward scatter, rode, oranje en gele fluorescentie worden gemeten
- In principe worden deeltjes individueel gemeten
- Fytoplankton heeft altijd rode fluorescentie
- Cyanobacteriën en cryptofyten hebben daarnaast ook gele en oranje fluorescentie

Hieronder een voorbeeld van het Markermeer (Figuur B-7) waarbij oranje fluorescentie is uitgezet tegen rode fluorescentie en de belangrijkste groepen zijn aangegeven. Beide assen zijn logaritmisch



Figuur B-7 Voorbeeld scatterplot flowcytometer meting Markermeer.

Op een lineaire schaal zijn de verschillen tussen de groepen nog duidelijker (Figuur B-8). In dit geval worden reeds geclusterde gegevens van heel 2021 getoond, maar het principe blijft hetzelfde als bij de enkele meting hierboven in Figuur B-7.



Figuur B-8 Flowcytometer meting Markermeer 2021 op lineaire schaal.

Naast oranje en rode fluorescentie worden gele fluorescentie, forward scatter, sideward scatter en de lengte per deeltje gebruikt om de gegevens te clusteren.

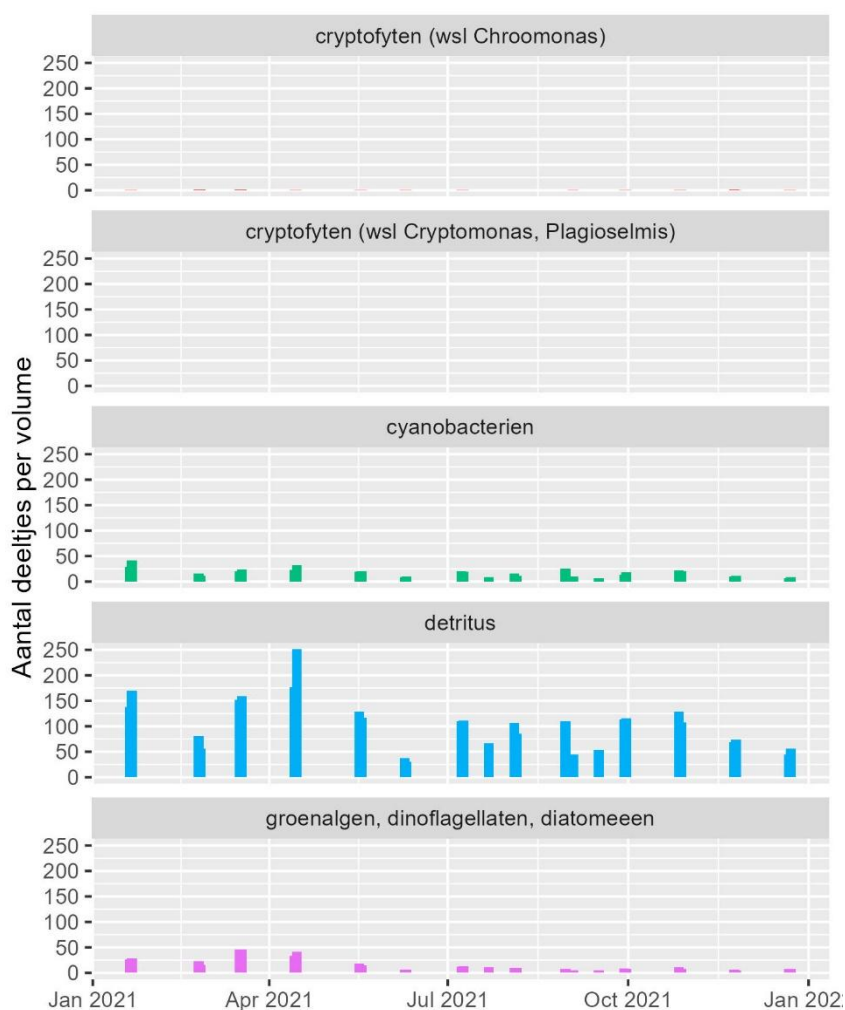
De getoonde resultaten die hierna volgens zijn gemeten met een protocol dat specifiek fytoplankton meet. Kleine deeltjes zonder fluorescentie, waaronder slib, worden niet meegenomen in deze meting. De gegevens zijn geclusterd voor de fytoplankton groepen en ingedeeld op hoofdgroepen.

Groenalgen omvat zowel groenalgen als diatomeeën. Ook dinoflagellaten maken ook deel uit van deze groep. De groep is hier aangeduid als groenalgen omdat die het meest talrijk zijn in deze groep.

Detritus zijn deeltjes (groot of klein) met heel weinig fluorescentie en zonder consistent patroon in uiterlijk en fluorescentie.

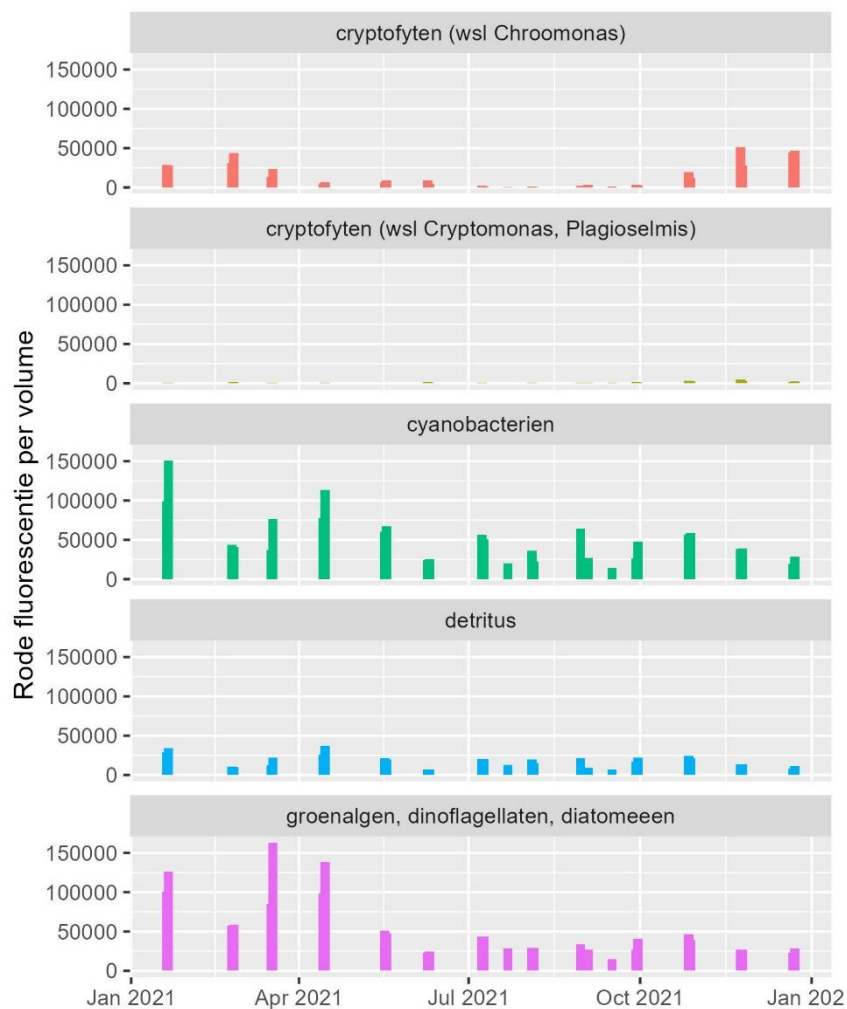
Hieronder worden de resultaten voor de hoofdgroepen op vier verschillende manieren getoond:

- Concentratie (deeltjes per volume, Figuur B-9)
- Rode fluorescentie per volume met dezelfde y-as voor elke hoofdgroep (Figuur B-10), rode fluorescentie is relevant omdat dit iets zegt over het aandeel per groep aan fotosynthese
- Rode fluorescentie per volume met individuele y-as per hoofdgroep (Figuur B-11). Hierdoor is de dynamiek per groep gedurende het jaar beter zichtbaar.
- Sideward scatter per volume (Figuur B-12). Dit zegt iets over de bijdrage van elke groep aan de troebelheid van het water.

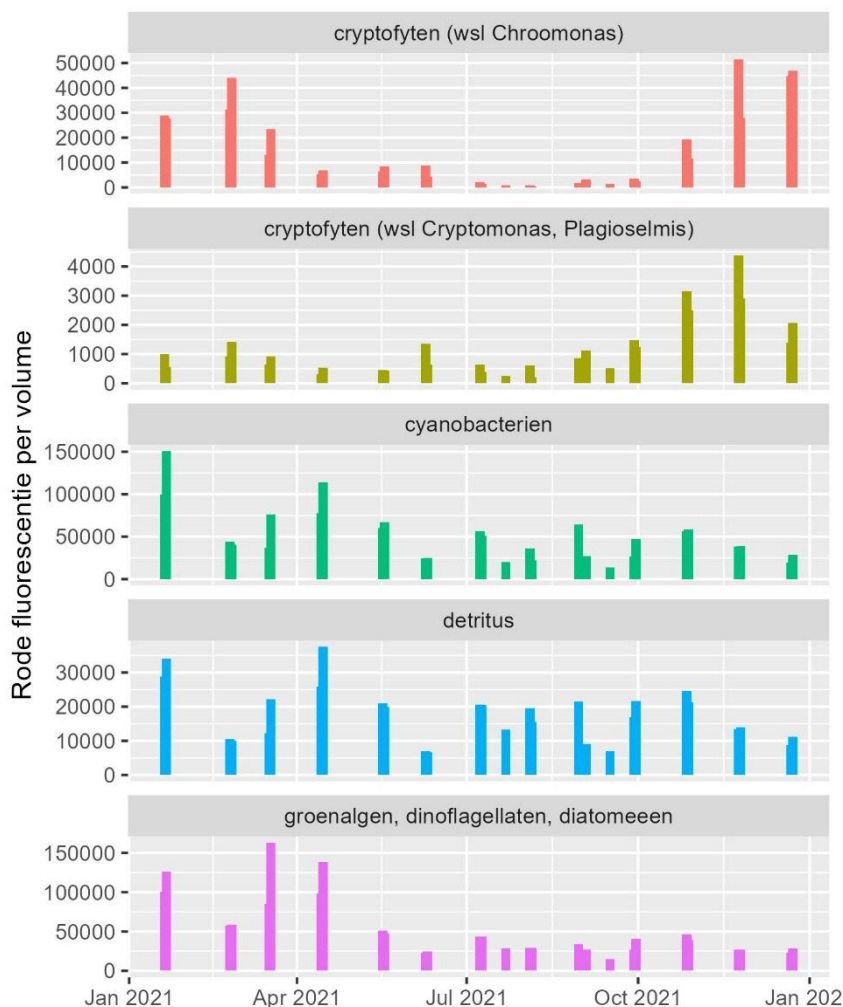


Figuur B-9 Concentratie als deeltjes per volume.

Detritus is erg talrijk.



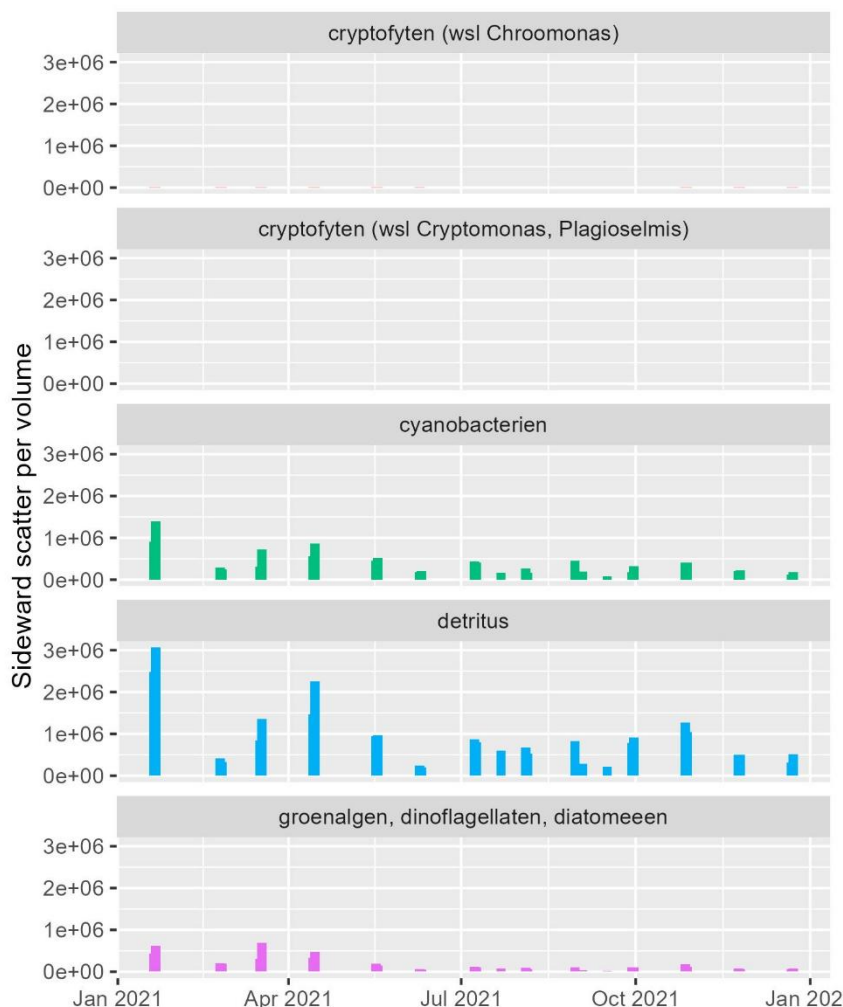
Figuur B-10 Rode fluorescentie, zelfde y-as voor elke groep.



Figuur B-11 Rode fluorescentie, individuele y-as per groep.

Cyanobacteriën hebben een piek in het voorjaar en zijn in herfst ook belangrijk. Groenalgen leveren in het voorjaar de grootste bijdrage en minder in zomer en herfst. Cryptofyten hebben weliswaar een lage concentratie, (Figuur B-9) maar leveren in de wintermaanden een belangrijke bijdrage aan rode fluorescentie.

Detritus levert ook een behoorlijke bijdrage aan rode fluorescentie omdat dit (onder andere) ook gaat om samengeklonterde deeltjes.

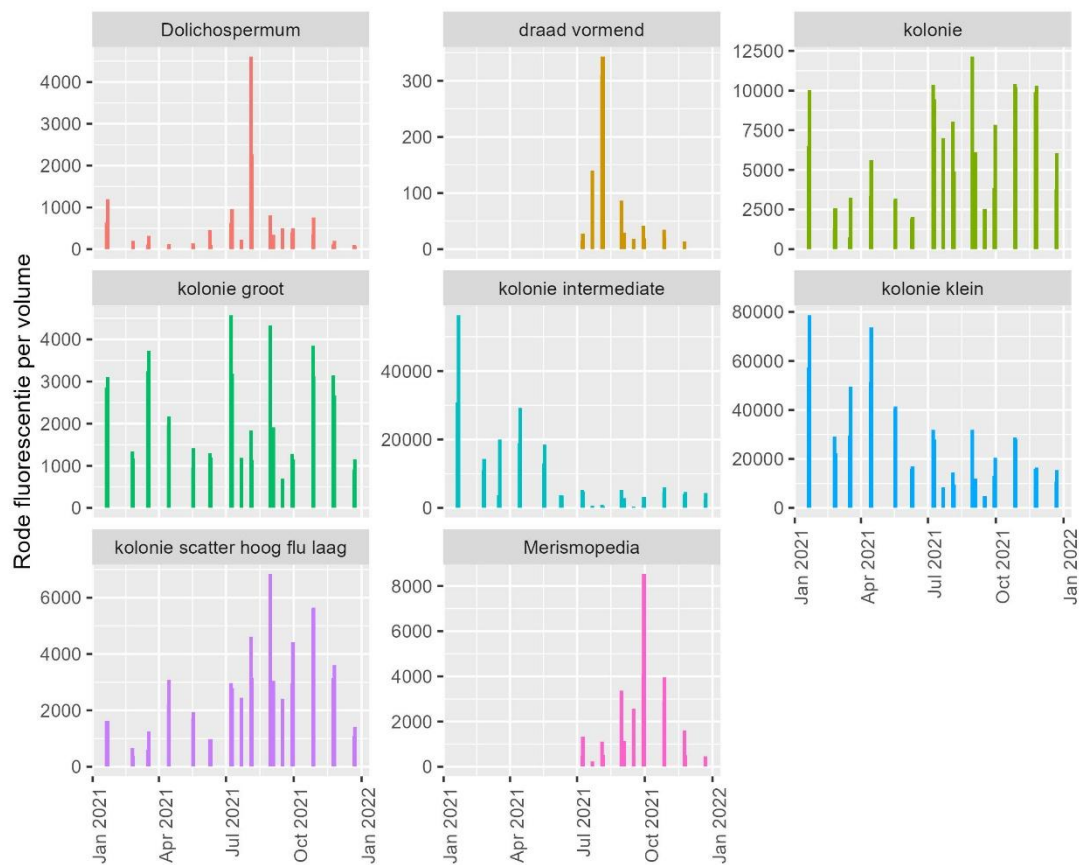


Figuur B-12 Sideward scatter

De bijdrage van cryptofyten aan sideward scatter is verwaarloosbaar. Vooral cyanobacteriën en detritus dragen bij aan sideward scatter.

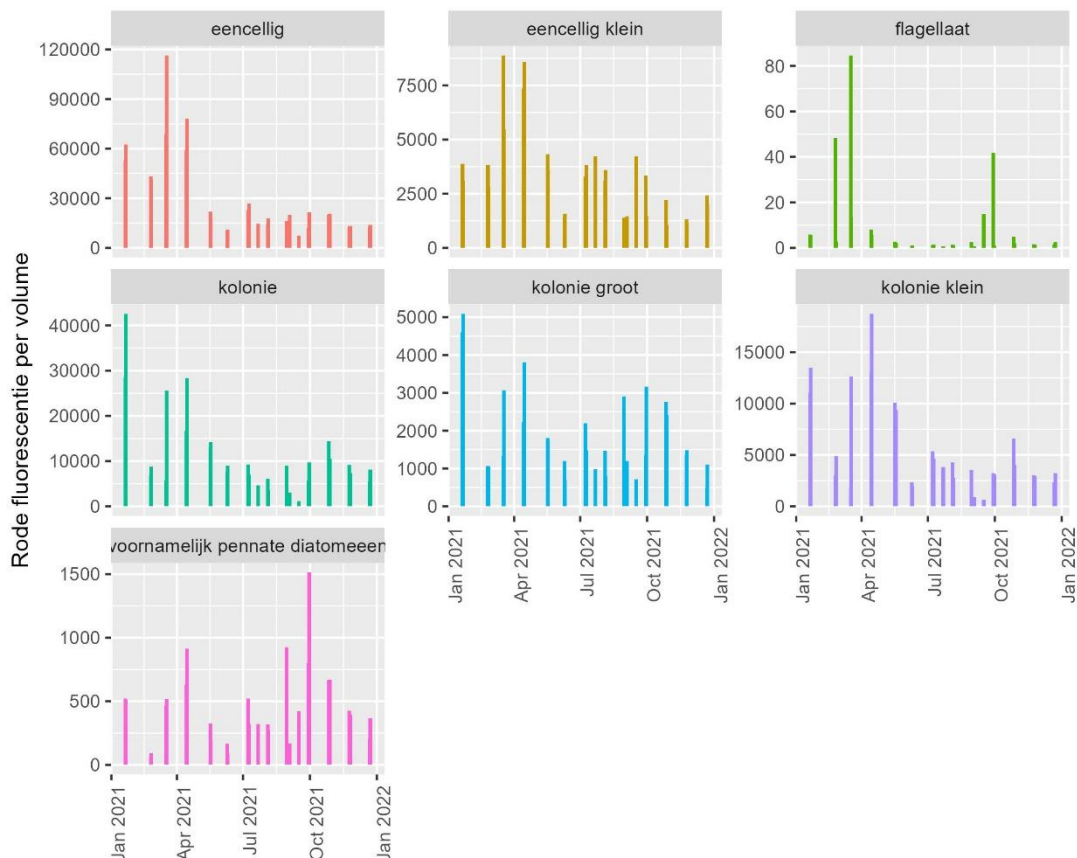
De gegevens kunnen ook op een meer gedetailleerd niveau worden bekeken, hier toegevoegd voor de cyanobacteriën en de groenalgen. Getoond is rode fluorescentie per volume, elke grafiek heeft een individuele schaal en alleen herkenbare clusters worden getoond.

Bij de cyanobacteriën (Figuur B-13) zijn enkele groepen met een duidelijke piek in het jaar (*Dolichospermum* (voormalig *Anabaena*), *Merismopedia* en draad vormende cyanobacteriën), groepen met een piek in het voorjaar (kolonie klein en kolonie intermediate) en groepen met het hoogste aandeel aan rode fluorescentie in de zomer en najaar (kolonie, kolonie groot en kolonie scatter hoog flu laag).



Figuur B-13 Rode fluorescentie van Cyanobacterien

Groenalgen wordt getoond in Figuur B-14. Deze groep omvat ook diatomeeën en dinoflagellaten. De groepen eencellig, eencellig klein en kolonie klein hebben een duidelijke piek in het voorjaar. De eencellige groepen omvatten zowel eencellige groenalgen als eencellige diatomeeën. Kolonie en kolonie groot hebben een piek in zowel het voorjaar als najaar. *Tetrastrum komarekii* is onderdeel van deze kolonie groepen. Flagellaten zijn in het vroege voorjaar en einde zomer als groep herkenbaar. Let wel op de schaal, deze groep levert slechts een heel geringe bijdrage aan rode fluorescentie. Pennate diatomeeën zijn met name in het najaar te onderscheiden als groep.



Figuur B-14 Rode fluorescentie van groenalgen

Alles bij elkaar tonen de flowcytometer gegevens patronen en variatie gedurende het jaar. Dit maakt het onwaarschijnlijk dat uitzakken in de zomer en opwervelen in de winter een sluitende verklaring kan zijn voor het merkwaardige chlorofyl patroon in het Markermeer.

B.4 Gegevens uit Aquadesk

Tijdens de zomermaanden worden er voor meetpunt Markermeer Midden microscopische tellingen aan het fytoplankton uitgevoerd. Deze gegevens worden opgeslagen in de Aquadesk database en zijn toegankelijk via de website live.aquadesk.nl.

Een aantal interessante gegevens worden in de figuur hieronder getoond als concentratie (deeltjes/mL).

De gegevens zijn opgehaald uit Aquadesk en vervolgens is R-package TWN gebruikt om de hogere taxonomische niveaus erbij te zoeken.

Kleur is bedrijf dat de analyse heeft uitgevoerd:

Rood = Eurofins-Aquasense

Blauw = Waardenburg Ecology (staat RWS bij omdat door RWS in Aquadesk geladen)

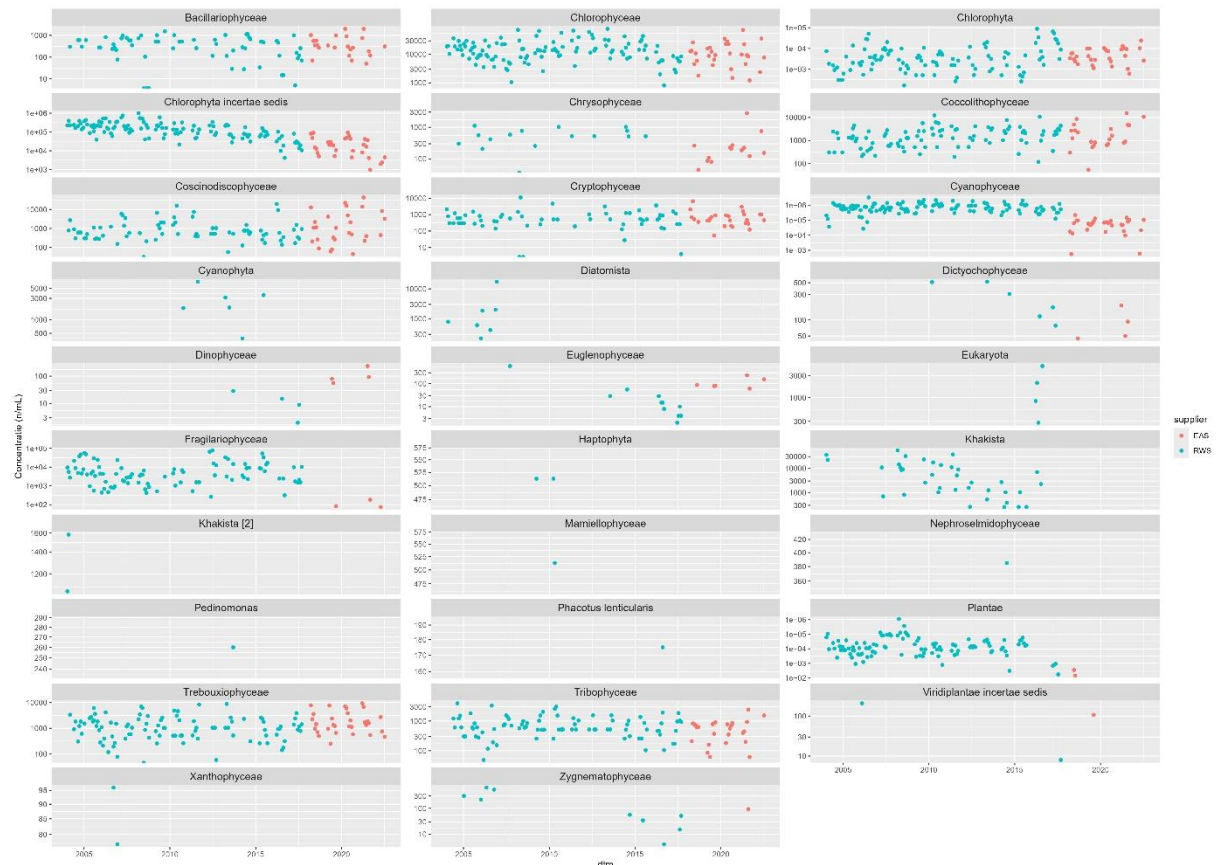
Let op, de schaal is logaritmisch.

Resultaten op niveau Phylum worden getoond in Figuur B-15 voor alle jaren dat deze metingen zijn uitgevoerd.

De schaal is individueel per grafiek

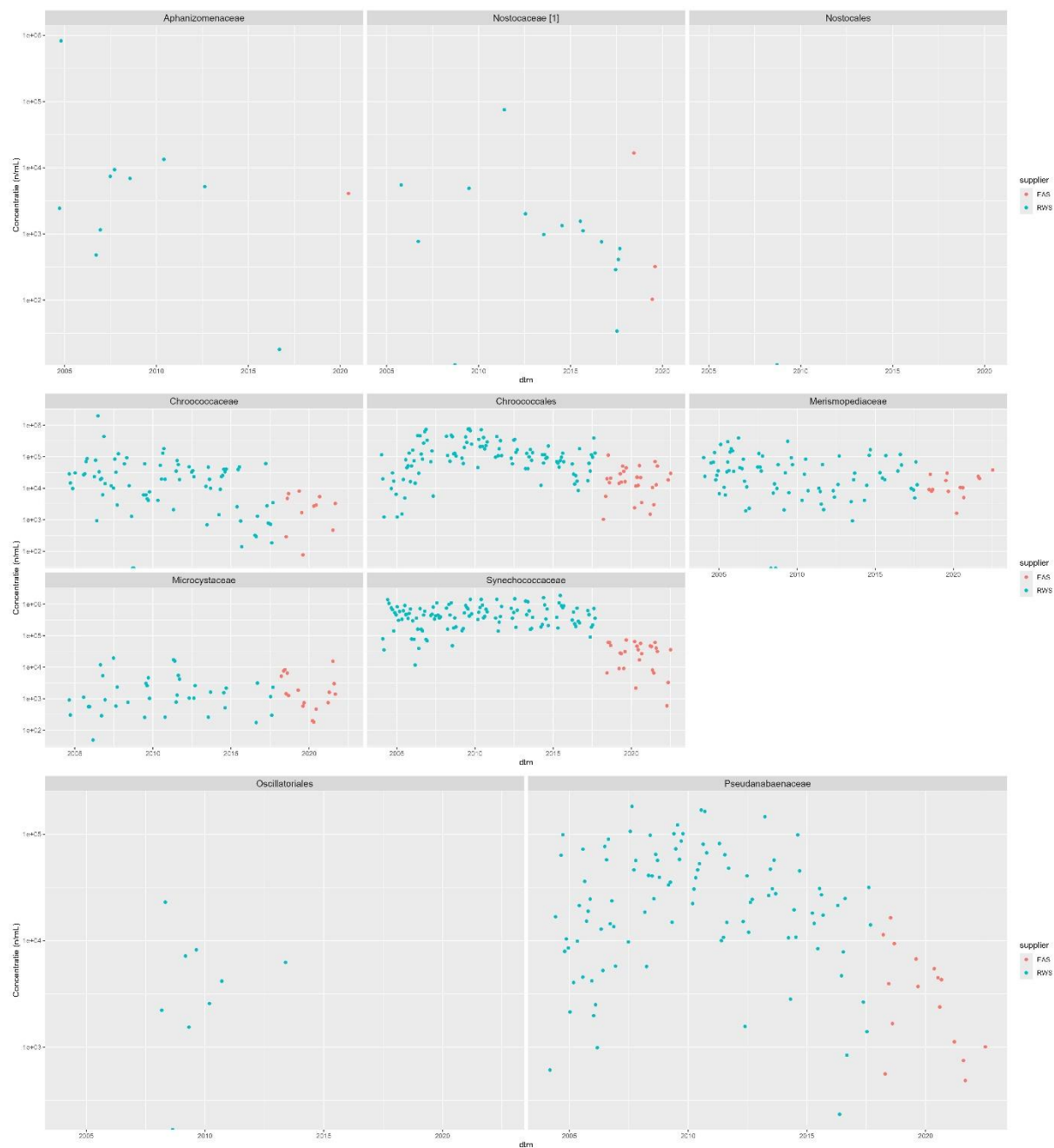
Bacillariophyceae, Coscinodiscophyceae en Fragilariophyceae zijn diatomeeën,
Chlorophyceae, Chlorophyta, Chlorophyta insertae sedis en Trebouxiophyceae zijn
groenalgen,
Cyanophyceae en Cyanophyta zijn cyanobacteriën
Flagellaten bevinden zich bij de Dinophyceae, Cryptophyceae, Coccolithophyceae en
groenalgen.

Het meest opvallend is de daling in Cyanopyceae en Chlorofyta insertae sedis. Deze laatste groep zijn groenalgen die niet nader op naam konden worden gebracht en een daling kan ook betekenen dat een groter gedeelte inmiddels tot op genus of soort worden gedetermineerd en dus nu in een van de andere groenalg groepen terecht zijn gekomen. Echter, er lijkt geen stijging van vergelijkbare grootte orde in de andere groepen te zijn.



Figuur B-15 Microscopische tellingen op Phylum niveau

De veranderingen zijn cyanobacteriën meer in detail op Familie – niveau weergegeven on Figuur B-16 met een duidelijke daling in een aantal Families.



Figuur B-16 Microscopische tellingen op Familie niveau

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

Deltares

www.deltares.nl