

MODELLERING VAN DE IMPACT VAN THERMISCHE ENERGIE UIT OPPERVLAKTEWATER (TEO) OP ECOLOGIE VERKENNING VAN DE EFFECTEN VAN EEN TEO-INSTALLATIE IN EEN VIRTUELE CASE VAN EEN ONDIEP MEER



RAPPORT

2023
29

MODELLERING VAN DE IMPACT VAN THERMISCHE ENERGIE UIT
OPPERVLAKTEWATER (TEO) OP ECOLOGIE
VERKENNING VAN DE EFFECTEN VAN EEN TEO-INSTALLATIE IN EEN
VIRTUELE CASE VAN EEN ONDIEP MEER

RAPPORT

2023

29

ISBN 978.94.6479.022.1



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS dr. Sven Teurlincx, NIOO-KNAW Nederlands Instituut voor Ecologie, AKWA Aquatisch

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Ronald Gylstra, Waterschap Rivierenland
Jasper Stroom, Waternet
Marcel van den Berg, Rijkswaterstaat
Marco van Schaik, STOWA
Jacqueline Laumans, STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast

FOTO OMSLAG Ronald van der Heide

STOWA STOWA 2023-29

ISBN 978.94.6479.022.1

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

MEER INZICHT IN INDIRECTE EFFECTEN TEO OP KLEINE PLAS

De winning van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) brengt veranderingen teweeg in de aquatische ecologie. Voor een klein, ondiep, geïsoleerd meer blijkt dat zowel de afkoeling als het passeren van de installatie aanzienlijke effecten kunnen hebben. Welk effect de overhand heeft, hangt onder andere af van de voedselrijkdom in het water. Bij afkoeling van meer dan 5 graden zullen waterplanten verdwijnen. Als het water troebel is, kan de juiste mate van filtering juist helpen om het water helderder te maken en daarmee plantengroei te stimuleren. Bij grotere wateren en wateren die in contact staan met andere wateren, zullen de effecten anders en veel minder duidelijk zijn.

Met deze ecologische modelstudie wilden we achterhalen hoe de directe effecten van inname en afkoeling doorwerken in de waterkwaliteit en het voedselweb. De modelstudie toont aan dat deze effecten zowel positief als negatief kunnen zijn. Dit biedt handvatten voor het beperken van negatieve effecten bij voedselarme wateren en zicht op kansen om de kwaliteit van troebele wateren te verbeteren.

De directe effecten van een TEO-installatie zijn afkoeling van het oppervlaktewater en mogelijk ook schade aan micro-organismen door het passeren van de TEO-installatie. Deze modelstudie berekende voor verschillende scenario's welke gevolgen deze directe effecten hebben voor de productie van bijvoorbeeld waterplanten en zoöplankton. Vervolgens berekende het model welke impact de veranderingen hadden op bijvoorbeeld chlorofyl-gehalten en vispopulaties. In totaal zijn er 1170 verschillende combinaties van temperatuur, nutriëntenbelasting, weerjaren, innamedebieten en troebele of juist heldere begintoestand doorgerekend.

Over hoeveel schade micro-organismen daadwerkelijk ondervinden als ze een TEO-installatie passeren, is op dit moment echter nog weinig bekend. Desondanks geeft de modellering duidelijke inzichten in de mogelijke effecten van TEO. Zodra praktijkonderzoek hierover meer kennis oplevert, kan het ecologische model verbeterd worden.

Het onderzoek vond plaats onder de vlag van onderzoeksprogramma WarmingUP. In het kader van dit onderzoeksprogramma is veel kennis ontwikkeld over de verspreiding en effecten van koudelozingen. De ecologische modellering van de doorwerking hiervan op het gehele aquatische ecosysteem vormt een passende afsluiting. Bij een juiste afweging kunnen negatieve effecten worden voorkomen en kunnen zelfs kansen worden benut om het ecosysteem te verbeteren.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

De opkomst van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) vormt een belangrijke stap in de duurzame energietransitie. De transitie naar groene energie is hoogst noodzakelijk om klimaatverandering te remmen en biodiversiteitsverlies tegen te gaan. Echter, lokale watersystemen en het leven hierin worden beïnvloed door de plaatsing van een TEO-installatie. De warmtewinning van een TEO-installatie gaat namelijk gepaard met lokale afkoeling van het oppervlaktewater. Daarnaast neemt een open TEO-installatie oppervlaktewater in, inclusief de micro-organismen die daarin leven. Vervolgens passeert het water diverse pompen, filters en een warmtewisselaar, die schade aan die micro-organismen kunnen veroorzaken. Dit noemen we de effecten van passage van de TEO-installatie. Deze ecologische modelstudie verkent hoe en in welke mate de effecten van afkoeling en passage doorwerken in de waterkwaliteit en het voedselweb.

Het ecologische model PCLake+ is toegepast op een ondiep, klein, geïsoleerd meer. Een dergelijk watertype is waarschijnlijk gevoelig voor de invloed van afkoeling. Ook passeert in korte tijd een groot deel van het watervolume de TEO-installatie. Hierdoor is ook de mogelijke impact van passage relatief groot.

De studie laat zien dat afkoeling van het water kan leiden tot verminderde plantengroei. Afkoeling van meer dan 5 graden kan in deze casus leiden tot het geheel verdwijnen van waterplanten. Waterplanten zijn in hun vroege levensstadia (ontkiemen, opgroeien) sterk afhankelijk van temperatuur, waarbij een lagere temperatuur leidt tot latere ontkieming en tragere groei in het voorjaar.

Bij omstandigheden met lage voedselrijkdom zijn de effecten van afkoeling van grotere invloed dan de effecten van passage van de TEO-installatie. Onder meer voedselrijke situaties worden de effecten van passage juist belangrijker. De passage van de TEO-installatie kan leiden tot helderder water, vooral bij hoge innamedebieten. Hierdoor krijgen waterplanten meer licht en kunnen ze beter groeien. Vooral in troebele wateren kunnen TEO-systemen dus mogelijk helpen om plantengroei in het water te stimuleren.

Wanneer veel water de installatie passeert, kan dit echter wel gepaard met negatieve effecten voor vissen. Jonge vissen en vislarven kunnen beschadigd raken en ook is er mogelijk minder voedsel aanwezig doordat het zoöplankton schade ondervindt. De verhoudingen tussen innamedebieten en het watervolume van het oppervlaktewater en de natuurlijke waterverversing zijn daarom van belang.

De uitkomsten van deze studie zijn verkennend, maar laten wel zien dat de TEO-installaties naar alle waarschijnlijkheid leiden tot veranderingen in watersystemen. Deze veranderingen kunnen als een systeem zich in een goede toestand bevindt de waterkwaliteitsdoelen negatief beïnvloeden. Echter, wanneer wateren zich in een slechte toestand bevinden, biedt de TEO-installatie ook kansen voor herstel van het watersysteem.

Verder laat deze studie zien dat effecten op de korte termijn (1 jaar na ingebruikname) anders kunnen zijn dan die op de lange termijn (30 jaar na ingebruikname). Om kennis over deze effecten uit te breiden is het nodig de modellen te valideren met langjarig veldonderzoek. Ook uitbreiding naar andere watertypen leidt tot meer inzicht in de lokale impact van de inzet van TEO.

Een belangrijk aandachtspunt is de onzekerheid in de ecologische modellen. Zo zijn er aannames gedaan over de schade die organismen ondervinden in een TEO-installatie. Deze aannames moeten onderbouwd worden. Ook is het aan te bevelen de impact van TEO in samenhang met uitdagingen op het vlak van energietransitie, klimaatverandering en de biodiversiteit te onderzoeken. Deze kennis is nodig om lokale, regionale en globale effecten van TEO-installaties te kunnen afwegen.

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

MODELLERING VAN DE IMPACT VAN THERMISCHE ENERGIE UIT OPPERVLAKTEWATER (TEO) OP ECOLOGIE

VERKENNING VAN DE EFFECTEN VAN EEN TEO-INSTALLATIE IN EEN VIRTUELE CASE VAN EEN ONDIEP MEER

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INTRODUCTIE	1
	1.1 Ecologische impact van TEO-installaties	1
	1.2 Doelstelling en aanpak	2
2	METHODEN	3
	2.1 Beschrijving van het proefmeer	3
	2.2 Weerjaren	3
	2.3 Modelleren van de effecten van een TEO-systeem	5
	2.3.1 PCLake+: het ecologische model	5
	2.3.2 Eigenschappen van het TEO-systeem	5
	2.3.3 Effecten van temperatuurverandering door TEO in PCLake+	6
	2.3.4 Aanpak modellering	7
3	RESULTATEN	9
	3.1 Kritische grenzen voor nutriëntenbelasting van het meer	9
	3.2 Generiek inzicht in mogelijke invloed van TEO	11
	3.2.1 Invloed van temperatuur op de ecologie	11
	3.2.2 Respons van consumenten	15
	3.3 Invloed van passage TEO-installatie op de ecologie	19
	3.3.1 De basis van het voedselweb	19
	3.3.2 Respons van consumenten	22
	3.4 Invloed van afkoeling en passage TEO-installatie op de ecologie	25
	3.4.1 Langjarige effecten voor verschillende scenario's	25
	3.4.2 Effecten van TEO door de tijd	28

4	DISCUSSIE EN CONCLUSIES	30
4.1	Veranderingen in ecologie door temperatuurverlaging	30
4.2	Veranderingen in ecologie door passage van de TEO-installatie	31
4.3	Voedselweb interacties	31
4.4	Relevantie voor andere wateren	32
4.5	Metten in het veld	33
4.6	Specifiek vervolgonderzoek	33
4.7	Relevantie voor beleid	34
4.8	Generiek vervolgonderzoek: een integrale aanpak	35
	REFERENTIES	37
APPENDIX A	SCENARIO PLOTS VANUIT TROEBELE STARTCONDITIES	40

1

INTRODUCTIE

Nederland staat voor een aantal belangrijke uitdagingen. De energiecrisis vraagt om een snelle transitie naar lokale opwek van energie, en is ook sterk verbonden met de klimaatcrisis. Om de klimaatdoelen voor Nederland te halen zal een groot deel van deze energie hernieuwbaar en duurzaam moeten zijn. Op hetzelfde moment staat Nederland ook voor forse uitdagingen op het gebied van natuur, beleidsdoelen zoals vastgesteld in het kader van Europese wetgeving zoals Natura2000 en de Kader Richtlijn Water (KRW). De winning van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) is een voorbeeld van een vorm van duurzame energieopwekking waarbij mogelijk neveneffecten optreden op de leefomgeving van mens, dier en plant (Harezlak, 2021).

1.1 ECOLOGISCHE IMPACT VAN TEO-INSTALLATIES

TEO-installaties kunnen op een drietal schaalniveaus mogelijk leiden tot ecologische effecten: bij de winning van materialen voor de installatie, in het oppervlaktewater waar het water ingenomen en/of geloosd wordt en op landschappelijk niveau.

De schade in gebieden waar materialen worden gewonnen worden veelal meegenomen in een Life Cycle Assessment (LCA) van een technologie (van der Meide et al., 2022).

De lokale effecten op het oppervlaktewater kunnen optreden in het water waar de TEO-installatie zijn water uit onttrekt en in het water waar de installatie zijn water loost. Dit kan hetzelfde water zijn, maar dit kunnen ook twee verschillende wateren betreffen. Deze effecten ontstaan door de afkoeling van het oppervlaktewater waarmee warmtewinning gepaard gaat (De Groot-Wallast & Vlijm, 2022) en doordat bij een open TEO-installatie het water wordt ingenomen en vervolgens filters en een warmtewisselaar passeert (de Fockert & Harezlak, 2022). De filters en warmtewisselaars en drukverschillen in een TEO-installatie kunnen schade toebrengen aan verschillende organismen in het aquatische ecosysteem. Afkoeling leidt tot een vertraging van vele ecologische processen zoals groei van organismen (Barko & Smart, 1981), afbraak van organisch materiaal (Fernandes et al., 2009) en ontwikkeling naar andere levensstadia (Calero et al., 2009).

Er is al onderzoek uitgevoerd naar hoe het afgekoelde water zich mengt met het ontvangende water en naar de directe effecten van afkoeling en het passeren van de TEO-installatie op soorten of soortgroepen (de Groot-Wallast & Vlijm, 2022; Harezlak, 2021, de Jong & Dionisio Pires, 2022). Er zijn modellen opgezet om de temperatuurverandering in beeld te brengen, maar de ecologische effecten van die temperatuurverandering zijn tot op heden enkel via literatuuronderzoek inzichtelijk gemaakt. Ook de effecten van passage van water door een TEO-installatie zijn in de literatuur onderzocht. Veldmetingen aan TEO-installaties zijn tot op heden beperkt.

Lokale invloeden van zowel temperatuur als passage van de TEO-installatie hebben mogelijk ook uitstraling op de landschapsschaal, namelijk doordat het water dient als voedingsbron voor organismen van buitenaf of omdat organismen uit het water invloed hebben op nabijgelegen ecosystemen. Dergelijke meta-ecosysteem dynamiek is een opkomend veld in het wetenschappelijk ecologisch onderzoek. Echter, praktische toepassing ervan is tot op heden onderbelicht (Gounand et al., 2022). Deze studie beperkt zich dan ook tot de ecologische invloed van TEO-installaties in het betreffende waterlichaam.

1.2 DOELSTELLING EN AANPAK

Deze studie richt zich op de lokale effecten van de werking van een TEO-installatie. We onderzoeken de effecten van afkoeling en de effecten van passage van de TEO-installatie op de aquatische ecologie. Onder de noemer 'passage' bekijken we zowel de effecten van mogelijke sterfte van micro-organismen door filters, warmtewisselaars en temperatuur- en drukverschillen als naar de effecten van terugspoeling van die beschadigde micro-organismen in het oppervlaktewater.

Als casus bestuderen we een virtueel, klein, geïsoleerd, ondiep meer. Allereerst bekijken we de effecten van afkoeling en passage afzonderlijk. Met deze generieke analyse krijgen we inzicht in de omvang van de te verwachten effecten van afkoeling en passage op de ecologie. Omdat de nutriëntenbelasting van groot belang is voor de toestand van het ecosysteem, worden effecten beschouwd voor verschillende niveaus van nutriëntenbelasting. Vervolgens worden verschillende scenario's doorgerekend met verschillende combinaties van temperatuurverandering en innamedebieten om inzicht te krijgen in de gecombineerde invloed van deze effecten. Omdat het weer ook van invloed kan zijn, rekenen we de verschillende scenario's door voor verschillende weerjaren. Hierbij is gekozen voor de weerjaren 2014, 2018 en 2021. Dit zijn respectievelijk een gemiddeld, goed en slecht jaar voor de ontwikkeling van ondergedoken waterplanten. Na analyse van de resultaten volgt een reflectie op de betekenis hiervan voor monitoring, beleid en noodzakelijk vervolgonderzoek.

2

METHODEN

2.1 BESCHRIJVING VAN HET PROEFMEER

In deze studie is uit gegaan van een klein, geïsoleerd ondiep meer (Tabel 1). We verwachten dat een dergelijk systeem erg kwetsbaar is voor afkoeling en passage van een TEO-installatie van water omdat er geen verversing optreedt van buitenaf. De opwarming van water komt dus enkel door zoninstraling. Indien organismen schade ondervinden door passage van de TEO-installatie komt vernieuwing enkel uit de in het meer aanwezige productie en niet uit externe aanvoer. Een dergelijk systeem vertegenwoordigt dus een casestudie waarin de impact van TEO zeer uitgesproken zal zijn.

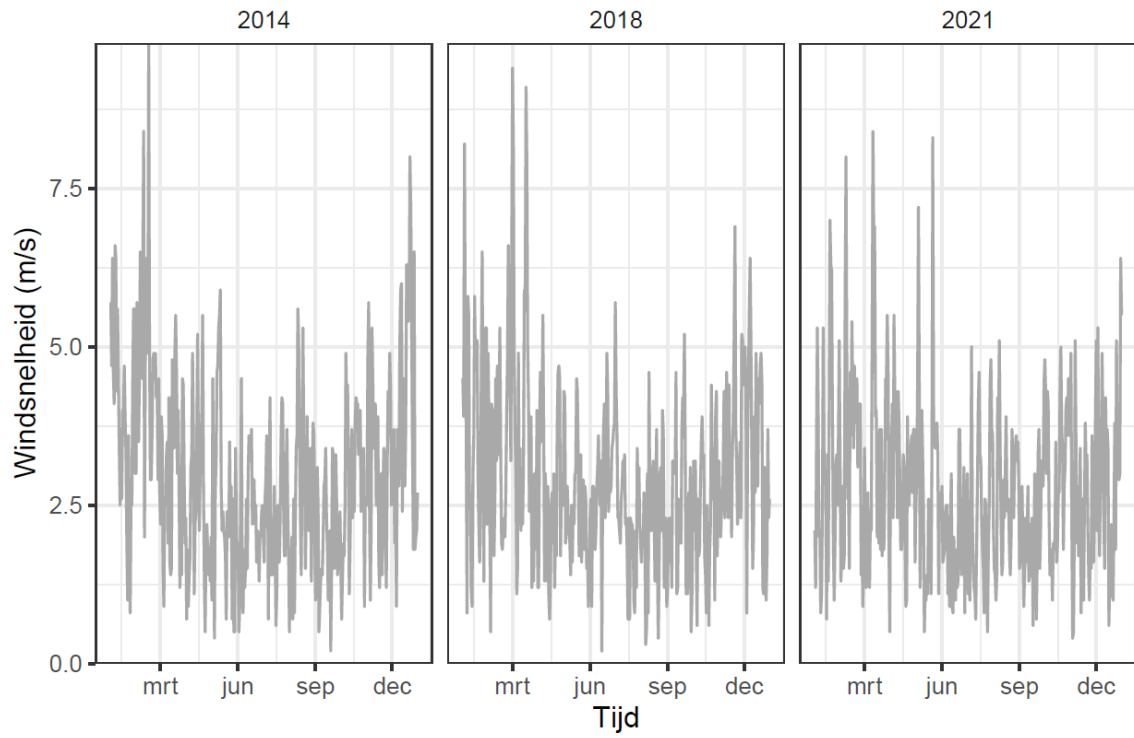
TABEL 1 EIGENSCHAPPEN VAN HET FICTIEVE MEER GEBRUIKT IN DEZE MODELSTUDIE

Meereigenschappen	Waarde	Eenheid
Lengte	150	m
Breedte	150	m
Diepte	2	m
Oppervlakte	22500	m ²
Instream debiet	0	m ³ /dag
P belasting	0,01; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,25; 1,50; 2,00	mgP/m ² /dag
N belasting	Gekoppeld aan P belasting met N:P = 7 (g/g)	mgN/m ² /dag
TEO systeem aan	15 mei	-
TEO systeem uit	16 oktober	-

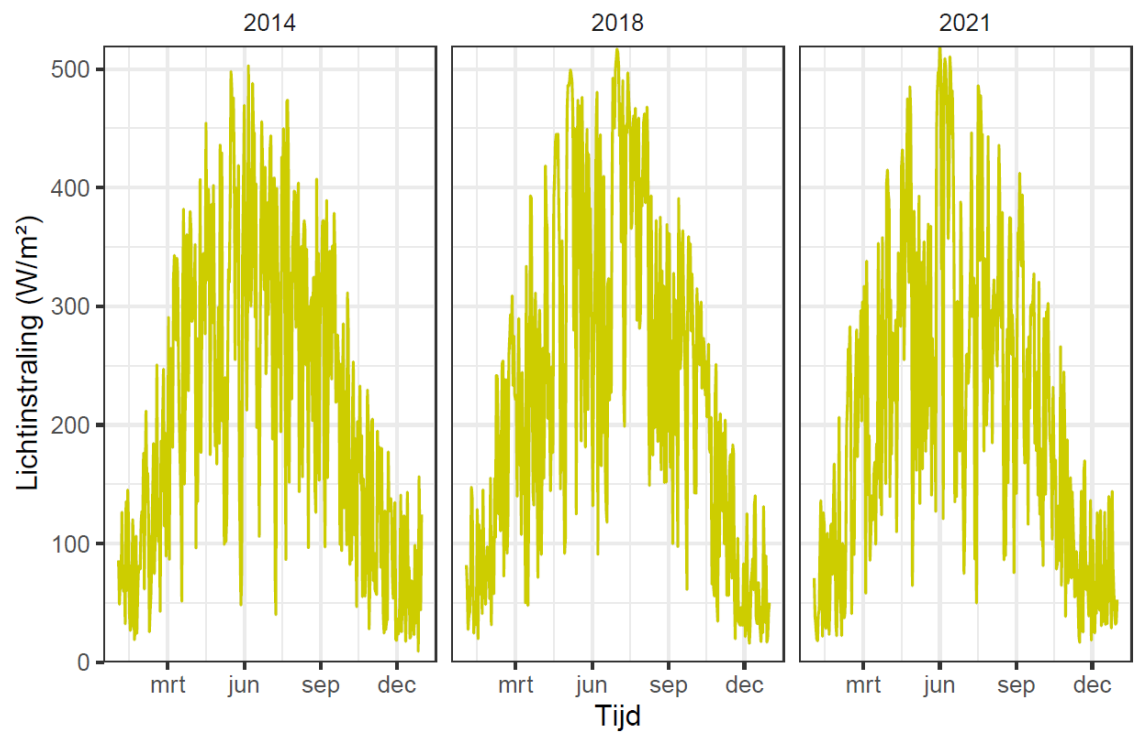
2.2 WEERJAREN

Tussen weerjaren kunnen grote verschillen bestaan die invloed hebben op de ontwikkeling van de ecologie in een meer. Planten reageren sterk op temperatuur, zeker vroeg in het groeiseizoen als signaal om te ontkiemen en te gaan groeien. Daarnaast is de ontwikkeling van planten gedurende het groeiseizoen afhankelijk van licht voor de groei. Ook fytoplankton wordt beïnvloed door licht en temperatuur. De primaire productie, de omzetting van anorganisch koolstof tot organische vormen van koolstof, wordt dus sterk beïnvloed door verschillende weerjaren. De primaire productie door fytoplankton en waterplanten vormt de basis van het voedselweb, en veranderingen daarin zullen doorwerken op andere organismen in het ecosysteem. Weerjaren verschillen in temperatuur en instraling en oppervlaktewateren zullen daarmee ook anders kunnen reageren op onttrekking van warmte, wat op zijn beurt weer door kan werken in de ecologie. In dit onderzoek wordt daarom onderscheid gemaakt tussen een basisjaar (2014, een redelijk gemiddeld weerjaar) en twee meer extreme jaren (2018, 2021). 2018 wordt gekenmerkt door een relatief warme lente, waardoor planten vroeg kunnen gaan groeien terwijl 2021 juist relatief lang koud bleef in het voorjaar. Verschillen tussen de jaren voor de variabelen gebruikt in deze studie zijn weergegeven in Figuur 1, Figuur 2 en Figuur 3.

FIGUUR 1 WINDSNELHEID IN DE VERSCHILLENDE WEERJAREN (2014, 2018, 2021)



FIGUUR 2 LICHTINSTRALING IN DE VERSCHILLENDE WEERJAREN (2014, 2018, 2021)



2.3 MODELLEREN VAN DE EFFECTEN VAN EEN TEO-SYSTEEM

Om eerste inzicht te krijgen in de mogelijke ecologische impact van TEO, zowel van de afkoeling als van de passage van de installatie, bieden aquatische ecosysteemmodellen uitkomst. Aquatische ecosysteemmodellen hebben zich de afgelopen tientallen jaren sterk ontwikkeld, zowel wetenschappelijk als in de praktijk (zie bijv. Janssen et al., 2015; Hülsmann et al., 2019; Mooij et al., 2019).

2.3.1 PCLAKE+: HET ECOLOGISCHE MODEL

In deze studie wordt gebruik gemaakt van het model PCLake+ (Janssen et al., 2019), een extensie van het model PCLake (Jansse en van Liere (1995). PCLake+ is een ecosysteemmodel dat zowel nationaal als internationaal wordt ingezet in waterbeheer. Het model onderscheidt zich van veel andere modellen doordat het een simpel voedselweb modelleert waarin ondergedoken vegetatie een belangrijke rol kan spelen. Het model is in staat om de plotselinge omslag van een helder, plantenrijk ecosysteem naar troebel, fytoplankton (algen en blauwalgen) gedomineerd ecosysteem onder invloed van eutrofiëring na te bootsen. Deze sterk niet-lineaire respons op overmatige toevoer van voedingsstoffen is kenmerkend voor meren en sloten (Scheffer et al., 2003). Het PCLake+-model is gebruikt om inzicht te krijgen in verschillende beheerstrategieën zoals terugdringen van eutrofiëring, maaien van waterplanten en biomanipulatie van vis (Kuiper et al., 2017; Janssen et al., 2019). Het verkennen van de effecten van TEO sluit goed aan bij dergelijke vraagstukken. Het model beschrijft een meer als een enkel gemengde eenheid (0D) met één vaste diepte waarin ecologische processen zich afspelen tussen organismen en hun abiotische omgeving. Het model bevat fytoplankton (groenalgen, blauwalgen en diatomeeën), ondergedoken waterplanten, zoöplankton, planktivore vis, bentivore vis en piscivore vis.

2.3.2 EIGENSCHAPPEN VAN HET TEO-SYSTEEM

Voor deze studie wordt een TEO-systeem gemodelleerd met een aantal aangenomen eigenschappen Tabel 2. Allereerst is het systeem in staat tot een maximale wateronttrekkingsdebiet van 300 m³/uur waarbij maximaal een warmteonttrekking van 10 graden plaats vindt. De TEO-installatie staat aan tussen half mei en half september. De effecten die passage van de TEO-installatie hebben op organismen worden als geheel meegenomen in het model. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt in de verschillende onderdelen van de installatie. In deze studie wordt per organismegroep een enkele sterftefractie opgelegd aan alle organismen die de installatie ingezogen worden. De sterftecijfers voor organismen in TEO-installaties zijn tot op heden beperkt bekend. In deze studie wordt gebruik gemaakt van inschattingen op basis van het literatuuronderzoek van de Jong en Dionisio Pires (2022). Hierbij wordt aangenomen dat de grotere vissen in het model (bentivore vis en piscivore vis) geen directe schade ondervinden van filters. Verder wordt aangenomen dat alle organismen die dood gaan terugkomen als dood organisch materiaal (detritus) in het watersysteem en filters dus niet schoon gemaakt worden buiten het watersysteem. Doordat het TEO-systeem zowel onttrekt als loost in hetzelfde water maakt het niet uit of organismen sterven op het filter, of verderop in het TEO-systeem aangezien ze allemaal in dezelfde bak met water terugkomen (ofwel door reiniging van filters, dan wel doordat ze door het systeem bij het lozingspunt weer terugvloeien).

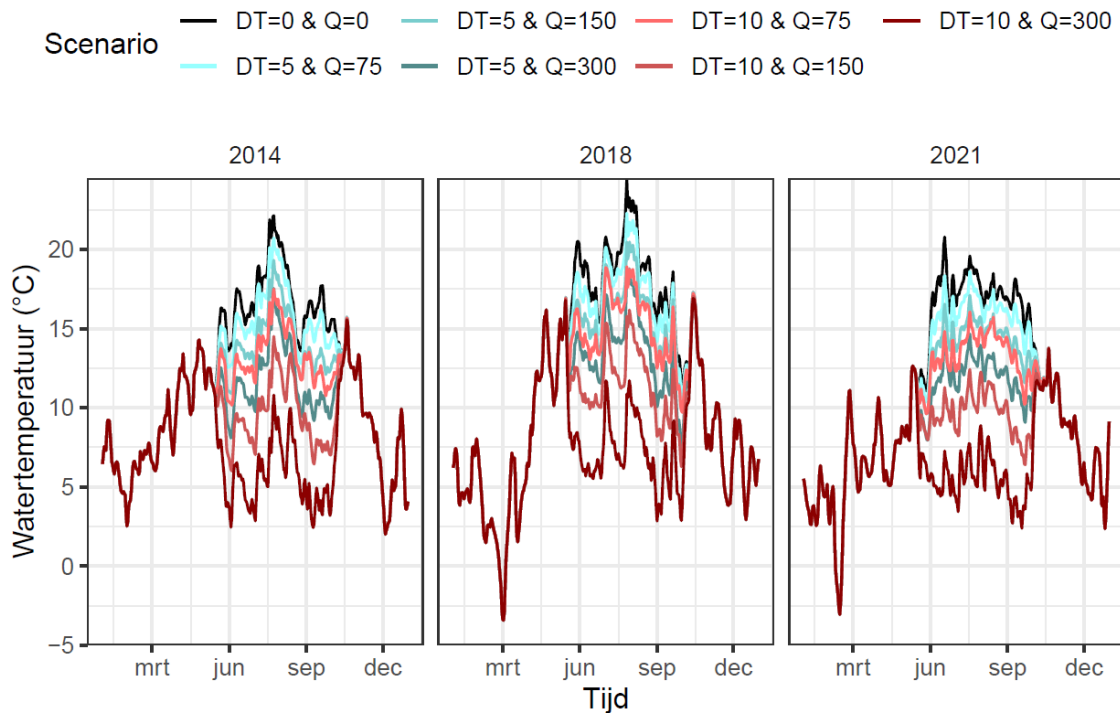
TABEL 2 EIGENSCHAPPEN VAN DE TEO-INSTALLATIE IN HET MODEL

Eigenschap	Waarde	Eenheid
TEO onttrekkingsdebiet (Q)	0 tot 300	m ³ /uur
TEO temperatuurverschil (DT)	0 tot 10	°C
Mortaliteit van vegetatie	0	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van groenalgen	21	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van blauwalgen	21	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van diatomeeën	21	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van zoöplankton	15	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van planktivore vis	15	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van bentivore vis	0	% van organisme in ingenomen water
Mortaliteit van piscivore vis	0	% van organisme in ingenomen water

2.3.3 EFFECTEN VAN TEMPERatuurVERANDERING DOOR TEO IN PCLAKE+

Om de effecten op temperatuur van de TEO-installatie in PCLake+ te modelleren is een extra tussenstap nodig. PCLake+ is geen fysisch model waarbij watertemperatuur berekend wordt aan de hand van instraling en luchttemperatuur. Watertemperatuur wordt normaliter opgegeven door de gebruiker. Om de temperatuursverandering van verschillende weerjaren te modelleren is gebruik gemaakt van DELFT3D, een 3D fysisch model (Van der Linden & Harezlak, 2023). De uitkomsten worden gemiddeld over de gehele waterdiepte en oppervlak van het meer per dag waarmee een referentiesituatie verkregen wordt voor de watertemperatuur in verschillende weerjaren Figuur 3. Die referentie wordt gebruikt in PCLake+.

FIGUUR 3 WATERTEMPERatuur VOOR DE VERSCHILLENDE WEERJAREN (2014, 2018, 2021) WEERGEGEVEN VOOR DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S VAN TEO ONTTREKKING (COMBINATIE VAN WARMTEONTTREKKING [DT] IN °C EN WATERONTTREKKINGDEBIET [Q] IN M³/H). IN ZWART DE REFERENTIESITUATIE ZONDER ONTTREKKING (BOVENSTE LIJN), IN BLAUW VERSCHILLENDE WATERONTTREKKINGSDABIETEN MET EEN WARMTEVERSCHIL VAN 5 °C EN IN ROOD WATERONTTREKKINGSDABIETEN MET EEN WARMTEVERSCHIL VAN 10 °C. DE TEO INSTALLATIE STAAT AAN TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER



Met DELFT3D is vervolgens ook de watertemperatuur voor verschillende scenario's van afkoeling en passage van de installatie doorgerekend Figuur 3. In deze berekeningen zijn het inlaatpunt en het lozingspunt van de TEO aan de verschillende zijden van het meer geplaatst. De uitkomsten van DELFT3D zijn wederom gemiddelden over het gehele meer per dag en worden gebruikt als temperatuurscenario's in PCLake+.

2.3.4 AANPAK MODELLERING

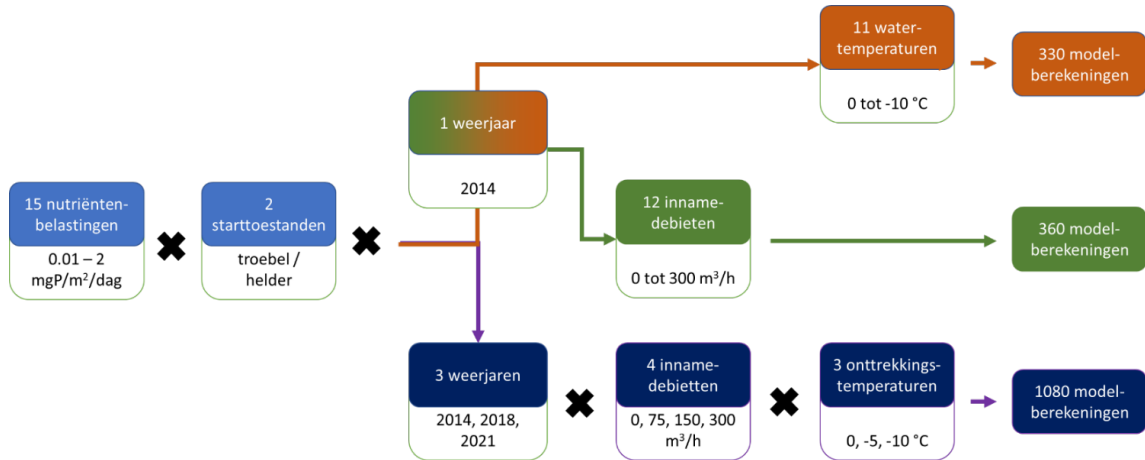
Allereerst is het belangrijk om vast te stellen dat ecologische effecten verschillend tot uiting komen gegeven de toestand van het meer. De toestand van het meer wordt bepaald door nutriëntenbelasting, maar ook door de initiële toestand (helder of troebel) waarin het meer zich bevond. Om deze reden worden alle modelscenario's berekend langs een gradiënt van nutriënten en vanuit twee verschillende begintoestanden (helder en troebel). Om te verkennen in welke evenwichtstoestand het ecosysteem op termijn terecht zou kunnen komen, zijn de berekeningen uitgevoerd voor een periode van 30 jaar. Hiermee vertegenwoordigen verkregen resultaten dus een situatie waarin 30 jaar lang de desbetreffende condities jaar na jaar aanwezig zijn geweest. Deze aanpak geeft inzicht in waar het systeem langjarig heen beweegt.

De modellering van de effecten van TEO wordt op twee manieren inzichtelijk gemaakt: via generieke verkenning van de effecten van afkoeling en passage van de TEO-installatie en via modellering van semi-realistische scenario's. In de generieke verkenning wordt gekeken naar de effecten van temperatuurverlaging of innamedebiet op de ecologische waterkwaliteit. Door te variëren in de watertemperatuur (tussen 0 en 10 graden temperatuurverschil) en het innamedebiet (van 0 tot 300 m³/uur) wordt inzicht verkregen in de mogelijke effecten op organismengroepen en ecologie van het water.

Voor de temperatuurgradiënt wordt aangenomen dat de referentie temperatuur (2014) in de periode dat de TEO aan staat met 1 tot 10 graden wordt verminderd. Bij de berekeningen aan het innamedebiet blijft temperatuur gelijk maar wordt voor een breed scala aan innames berekend wat de effecten op ecologie zijn. Het doel van dergelijke analyses is generiek begrip van de twee componenten van TEO, temperatuurverandering en filtering, op de ecologie. De specifieke scenario's zijn opgesteld om een aantal mogelijke onttrekkingen te verkennen, waarbij de focus ligt op het begrijpen van het relatief belang van gecombineerde effecten van afkoeling en passage van de TEO-installatie ten opzichte van de individuele effecten van filtering of koeling. Bij deze scenario's wordt de watertemperatuur bepaald aan de hand de warmteonttrekking en het weerjaar zoals voortgekomen uit de DELFT3D modellering. Innamedebieten zijn 75, 150 of 300 m³/uur. In totaal worden 6 scenario's (DT=5 & Q=75, DT=5 & Q=150, DT=5 & Q=300, DT=10 & Q=75, DT=10 & Q=150, DT=10 & Q=300) en een referentiescenario (DT=0 & Q=0) doorgerekend voor de drie weerjaren (2014, 2018, 2021).

FIGUUR 4

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE VERSCHILLENDE COMPONENTEN VAN DE MODELBEREKENINGEN. ELKE MODELBEREKENING BESTAAT UIT EEN COMBINATIE VAN NUTRIËNTENBELASTING EN EEN STARTTOESTAND. DE MODELBEREKENINGEN DIE INDIVIDUELE EFFECTEN VAN TEMPERATUUR OF PASSAGE VAN DE TEO-INSTALLATIE BESCHOUWEN GEBRUIKEN EEN ENKEL WEERJAAR EN EEN AFNAME IN WATERTEMPERATUREN OF VERANDERING IN INNAMEDEBIET. VOOR DE GECOMBINEERDE EFFECTEN VAN TEO WORDT GEBRUIK GEMAAKT VAN VERSCHILLENDE WEERJAREN, VERSCHILLENDE INNAMEDEBIETEN EN VERSCHILLENDE TEMPERATUUR-ONTTREKKINGEN. IN TOTAAL ZIJN 1770 VERSCHILLENDE COMBINATIES DOORGEREKEND



3

RESULTATEN

De resultatensectie behandelt de gezamenlijke en afzonderlijke effecten van afkoeling en passage van de TEO-installatie van water op het virtuele proefmeer. In deze analyses speelt de overgang van een helder naar een troebel water of vice-versa een belangrijke rol. Wanneer een meer over gaat van een helder, plantenrijk water naar een troebel water verandert het gehele ecosysteem in termen van aanwezige soorten, ecologisch functioneren en waterkwaliteit. De nutriëntenbelasting is een belangrijke stuurknop voor deze omslag. De hoeveelheid nutriëntenbelasting waarop een watersysteem omklapt, heet de kritische grens. Deze kritische grens is afhankelijk van de ecologische toestand waarin een water zich bevindt (helder of troebel), maar wordt ook beïnvloed door de geomorfometrie (diepte, strijklengte) en door beheer. Als de inzet van TEO een effect heeft op de kritische grenzen kan dat bepalend zijn voor het wel of niet vergunnen ervan, omdat het in een heldere toestand houden van een meer veelal een basisvereiste is voor het behalen van de waterkwaliteitsdoelstellingen.

Allereerst wordt in deze resultatensectie gekeken naar de kritische grenzen onder invloed van verschillende weerjaren zonder invloed van TEO. Vervolgens wordt voor een referentiejaar (2014) gekeken naar de invloed van TEO langs een gradiënt van afkoeling van watertemperatuur en toename van innamedebiet. Hiervoor worden verschillende ecologische componenten bekeken onder helderen en troebele startcondities. Aangezien het meer anders zal reageren onder andere nutriëntenbelastingen wordt voor een scala aan nutriëntenbelastingen gekeken wat het effect is van de TEO. De kritische grenzen zijn daardoor ook in deze plots duidelijk zichtbaar als een plotselinge verandering van bijv. vegetatiebiomassa, zwevend stof of primaire productie. Daarnaast zijn veranderingen langs de gradiënten van temperatuur of innamedebiet zichtbaar.

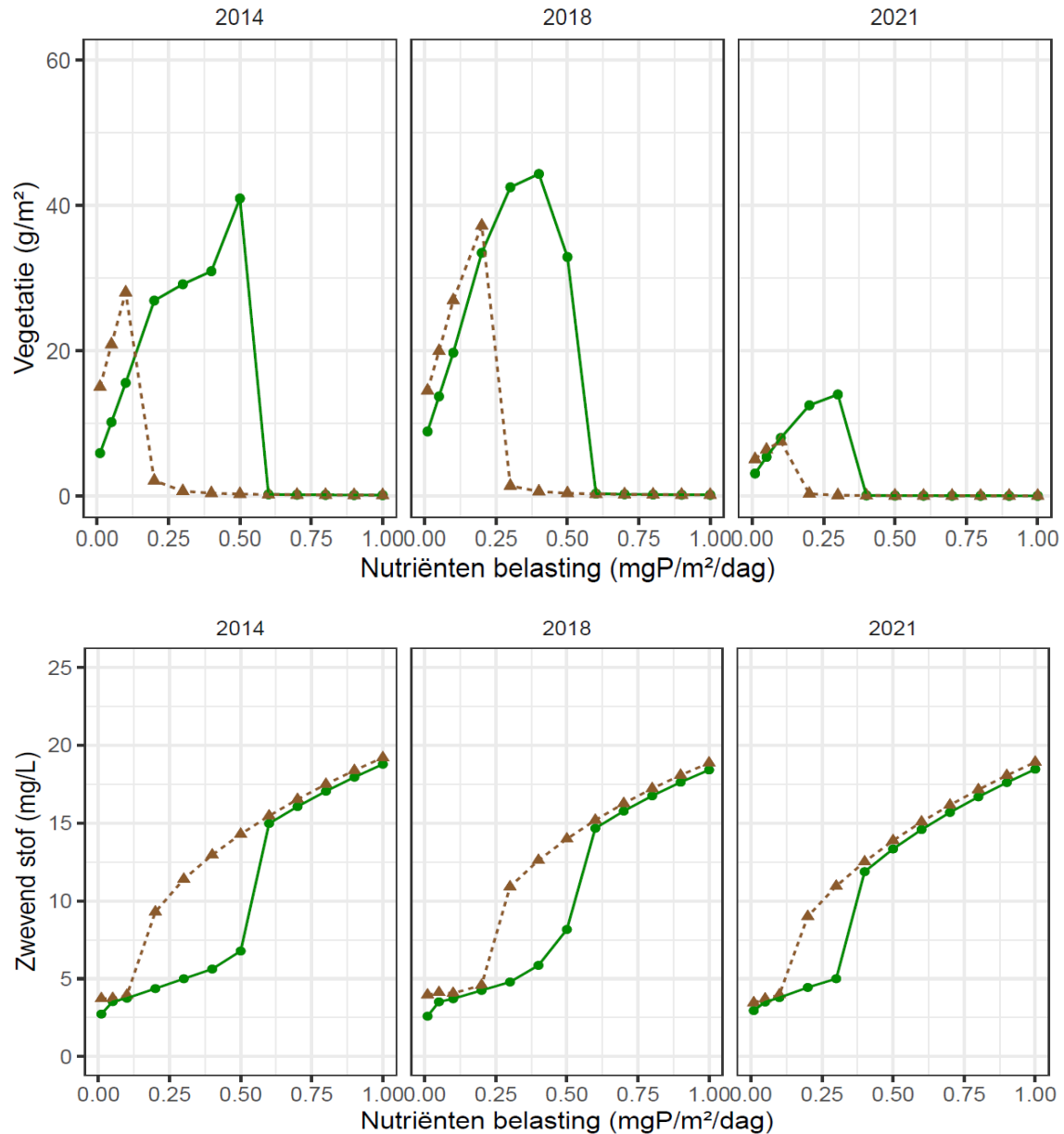
Vervolgens worden analyses van de gecombineerde effecten (afkoeling en schade door passage van de TEO-installatie) van TEO gepresenteerd. Deze effecten worden afgezet tegen individuele effecten van afkoeling of passage om zo inzicht te krijgen in omstandigheden waarin de een of de andere, of juist de combinatie van de twee effecten sterk bepalend is voor de ecologische uitkomst.

3.1 KRITISCHE GRENZEN VOOR NUTRIËNTENBELASTING VAN HET MEER

Allereerst zijn voor het proefmeer onder invloed van verschillende weerjaren de responsen van zwevend stof (fytoplankton en dood organisch materiaal in het water) en ondergedoken planten op nutriëntenbelasting doorgerekend (Figuur 5) zonder invloed van de TEO-installatie. Deze analyse laat zien wanneer een meer omslaat van troebel naar helder en vice versa onder invloed van toenemende of afnemende nutriëntenbelasting. Uit Figuur 5 blijkt dat de kritische grenzen, zijnde de plotselinge toename in zwevend stof of afname van ondergedoken vegetatie, verschillen tussen de weerjaren. De overgang van helder naar troebel in 2014 en 2018 ligt op $0.6 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$, terwijl in 2021 deze overgang al plaatsvindt op $0.4 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ (Figuur 5, groene lijnen). De overgang van een troebele toestand terug

naar een heldere ligt in 2014 en 2021 ligt op $0.1 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$, terwijl in 2018 duidelijk eerder ligt, namelijk $0.2 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ (Figuur 5, bruine lijnen). Verder is ook duidelijk, kijkend naar de gemiddelde vegetatiebiomassa (g/m^2) in de verschillende weerjaren, dat 2021 duidelijk een minder geschikt jaar was voor ondergedoken waterplanten dan 2018, en 2014 daar tussenin zit. Dit beeld bevestigt de gekozen weerjaren als gemiddeld (2014), heel geschikt (2018) en minder geschikt voor vegetatieontwikkeling (2021), voortkomend uit de resulterende watertemperatuur en lichtinstraling behorende bij deze weerjaren.

FIGUUR 5 RESPONSE VAN ZWEVEND STOF (BOVEN) EN WATERPLANTEN (ONDER) OP NUTRIËNTENBELASTING, BEGINNEND VANUIT EEN HELDERE TOESTAND (GROEN, CIRKELS) EN EEN TROEBELE TOESTAND (BRUIN, DRIEHOEKEN). WEERGEGEVEN WAARDEN ZIJN GEMIDDELDEN VAN HET ZOMERSEIZOEN (APRIL/M SEPTEMBER)



3.2 GENERIEK INZICHT IN MOGELIJKE INVLOED VAN TEO

In deze sectie worden de resultaten gepresenteerd van de generieke modelanalyses gebruikmakend van weerjaar 2014. Hierbij wordt eerst de invloed van een watertemperatuurgradiënt op het ecosysteem van het meer onderzocht. Vervolgens wordt een innamedebiet, oftewel een toenemende invloed van mogelijke schade door passage van de TEO-installatie, onderzocht. Beide gradiënten zijn onafhankelijk van elkaar, oftewel het innamedebiet blijft gelijk (=0) bij de watertemperatuurgradiënt en de watertemperatuur blijft gelijk bij de innamegradiënt (conform weerjaar 2014 zonder koeling door TEO). Qua interpretatie is de temperatuurgradiënt dus een goede weergave van de impact van TEO op ecologie wanneer het effect van passage van de TEO-installatie heel klein wordt geacht (bijv. laag innamedebiet). De innamegradiënt geeft juist een goed beeld van de impact van TEO als de invloed van koeling zeer beperkt blijft in het watersysteem (bijv. kleine koudepluim) en het mogelijke effect van passage door de TEO-installatie groot is.

3.2.1 INVLOED VAN TEMPERAATUUR OP DE ECOLOGIE

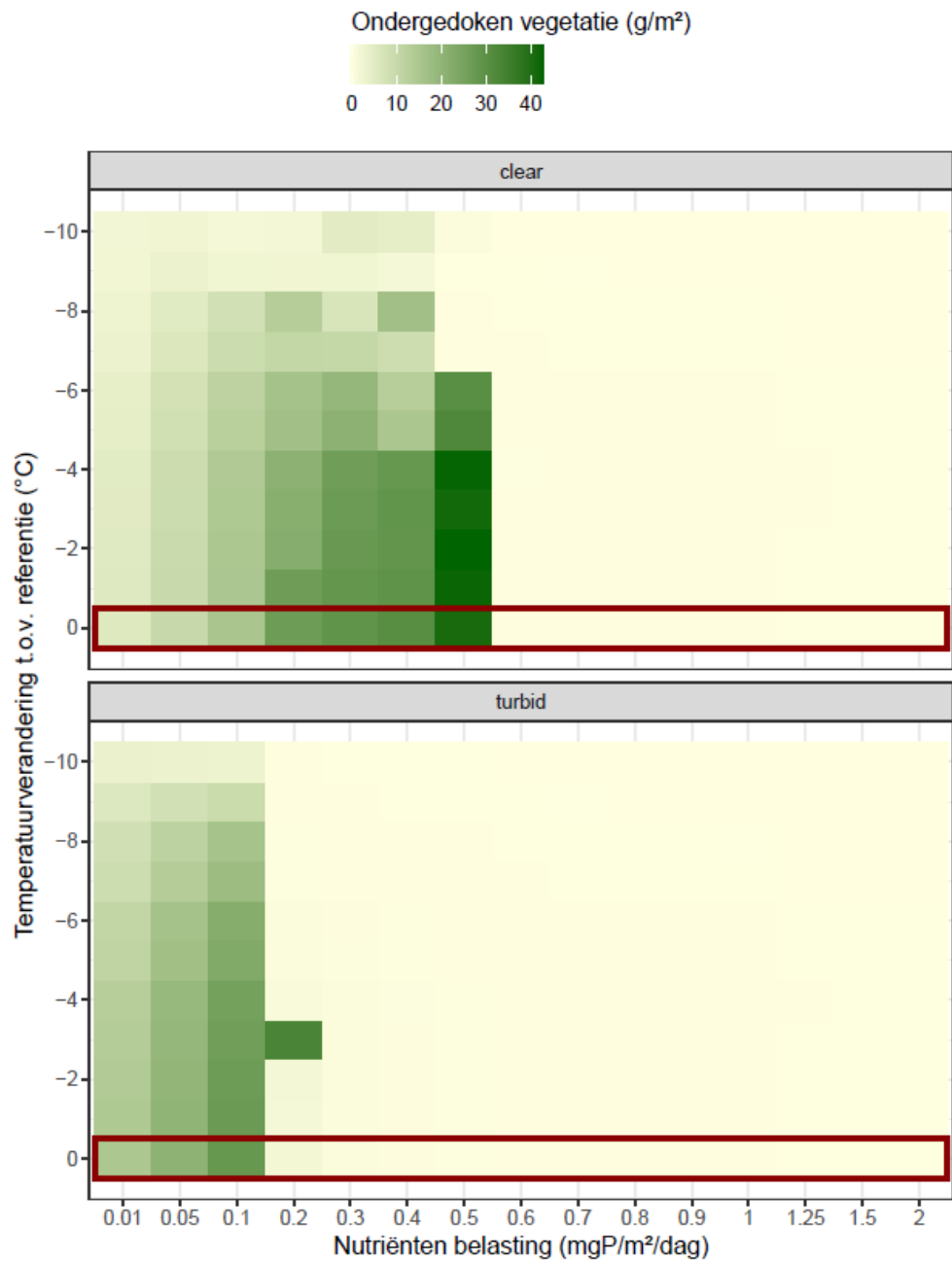
De basis van het voedselweb

Een afname van de temperatuur t.o.v. de referentietoestand laat duidelijke patronen zien in de ontwikkeling van ondergedoken vegetatie (Figuur 6). Langs de nutriënten-as (x-as) neemt de ondergedoken vegetatie (groene kleur) toe, tot op het moment dat het water omslaat naar een troebel systeem waarbij planten niet meer voor kunnen komen (gele kleur). De omslag van helder naar troebel (Figuur 6, bovenste paneel) treedt bij grote verandering in watertemperatuur (6 graden afkoeling of meer) eerder op, waardoor de veerkracht van het meer afneemt. Het totaal verdwijnen van vegetatie treedt bij een P-belasting van 0.5 mgP/m²/dag op bij temperatuurverlaging van meer dan 6 graden. Ook wordt bij P-belastingen onder de kritische grens (0.5 mgP/m²/dag) duidelijk minder vegetatie gevonden bij een grotere afname van de temperatuur t.o.v. de referentiesituatie zonder TEO (rood omrand). Dit wordt ook gereflecteerd in de hoeveelheid zwevend stof (Figuur 7) waarbij bij 0.5 mgP/m²/dag duidelijk hogere concentraties zwevend stof zichtbaar zijn als de temperatuur meer dan 5.5 graden afneemt t.o.v. de referentiesituatie.

De overgang van troebel naar helder (Figuur 6, onderste paneel) lijkt beperkt beïnvloed te worden. Hier is zelfs mogelijkheid voor gunstige veranderingen (zie 3 graden afname bij 0.2 mgP/m²/dag), waarbij duidelijk een hogere hoeveelheid vegetatie zichtbaar is dan in de referentiesituatie. Naast verandering in de kritische grenzen is echter vooral duidelijk dat de referentiesituatie over het algemeen leidt tot de grootste hoeveelheid ondergedoken planten (Figuur 6). Dit is af te leiden uit de toenemende kleurintensiteit langs de y-as van -10 naar 0 graden voor iedere categorie van de nutriëntenbelasting (tot de kritische grens voor de vegetatie). Een soortgelijk patroon is bij de hogere belastingen (boven de kritische grens voor planten) zichtbaar in het zwevendstofgehalte (Figuur 7) waarbij een duidelijke afname zichtbaar is van de referentiesituatie naar -10 graden afkoeling. De overgang van een helder door planten gedomineerd meer naar een troebel water met fytoplankton is ook duidelijk zichtbaar in de primaire productie (Figuur 8). Ook de primaire productie laat duidelijk een afname zien van productiviteit met toenemende afkoeling. Primaire productie is dan ook een goede geïntegreerde maat om veranderingen aan de basis van het voedselweb mee te illustreren.

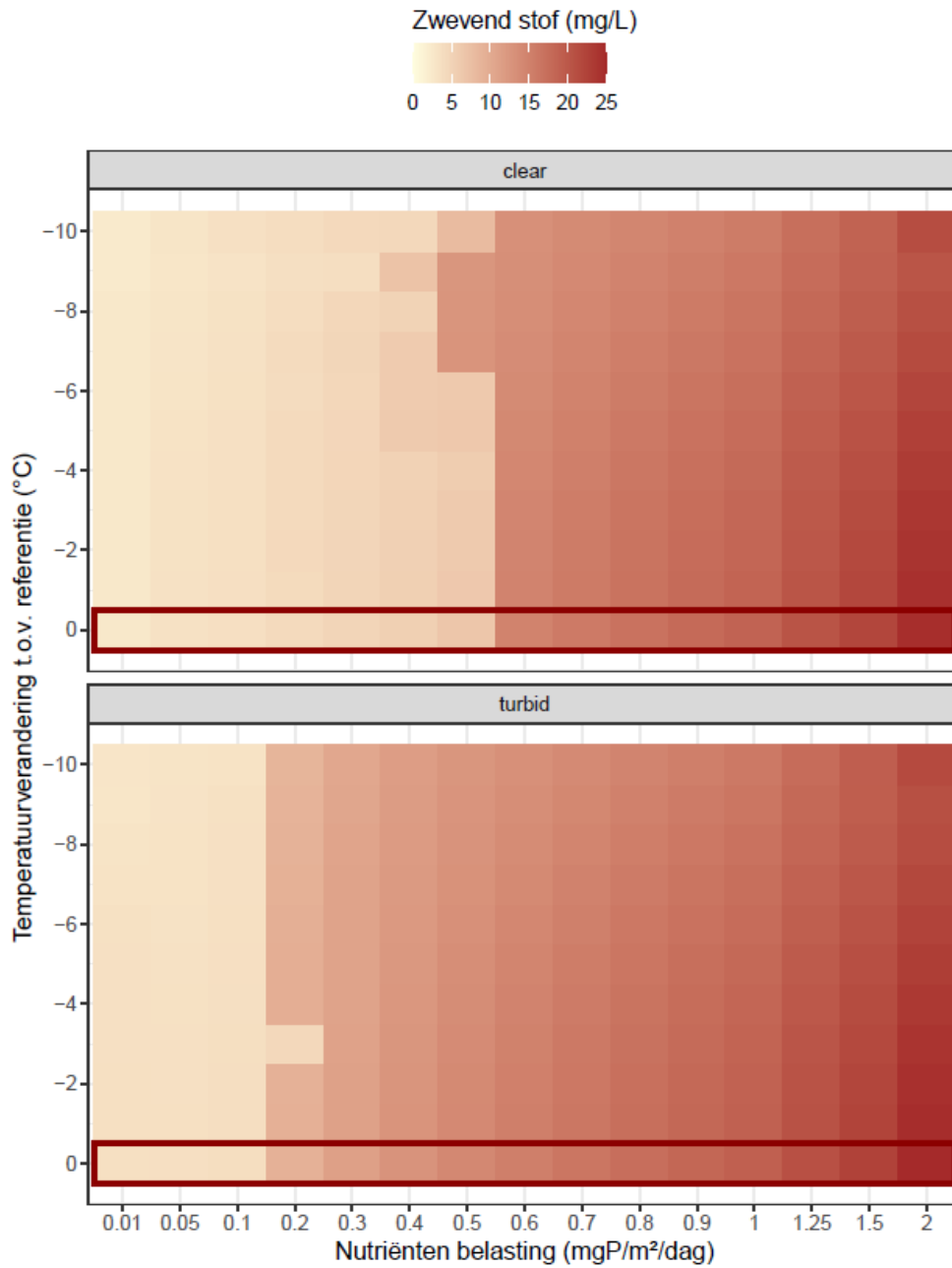
FIGUUR 6

GRID MET DE BIOMASSA AAN ONDERGEDOKEN VEGETATIE (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN TEMPERatuurVERANDERING. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND, EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER VANUIT EEN TROEBELE SITUATIE START. DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE TEMPERatuurVERANDERING VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



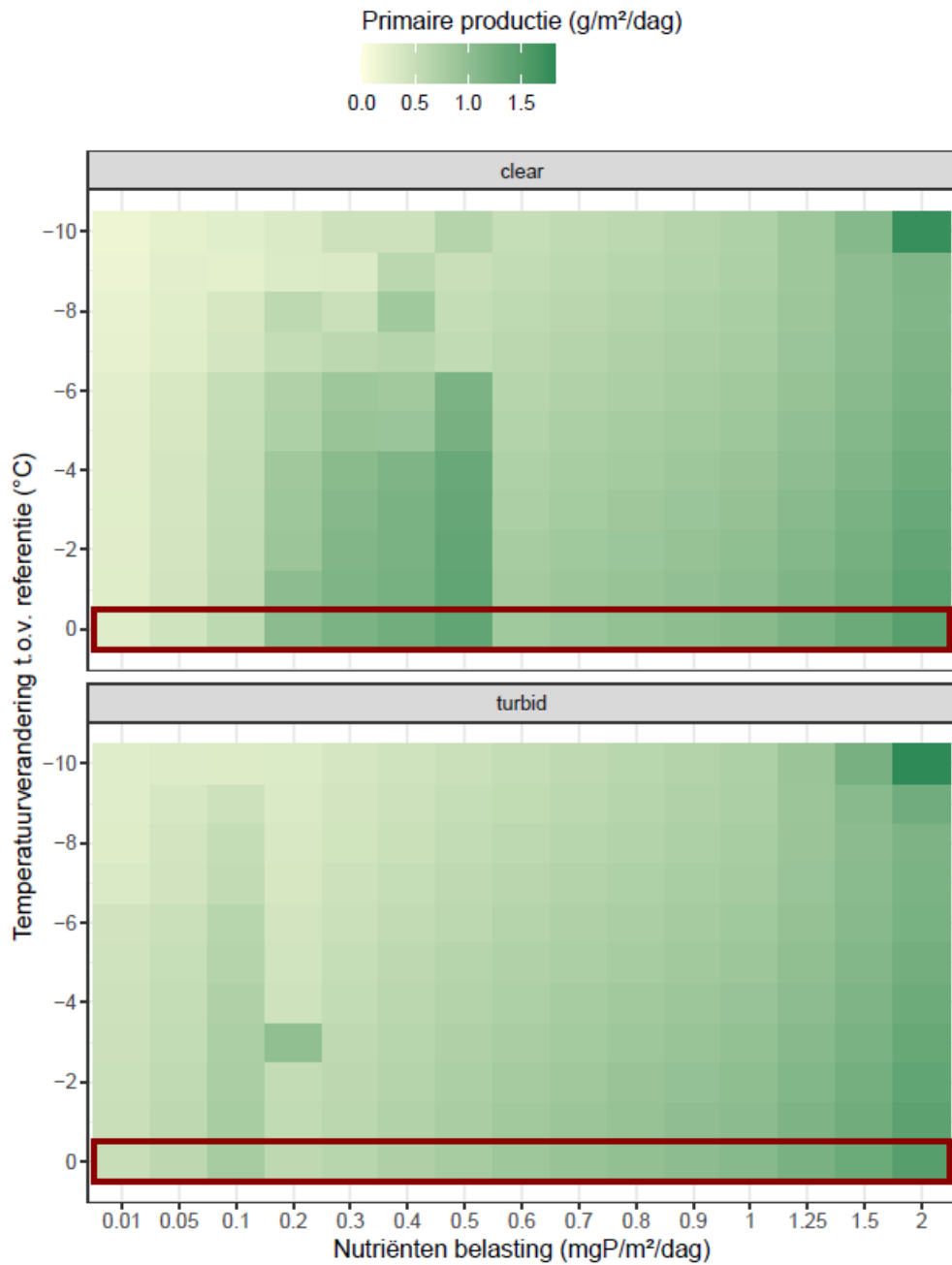
FIGUUR 7

GRID MET DE HOEVEELHEID ZWEVEND STOF (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN TEMPERatuurVERANDERING. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND, EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER START IN EEN TROEBELE SITUATIE. DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE TEMPERatuurVERANDERING VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



FIGUUR 8

GRID MET PRIMAIRE PRODUCTIE VAN ZOWEL ONDERGEDOKEN WATERPLANTEN ALS FYTOPLANKTON (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN TEMPERatuurVERANDERING. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND (CLEAR), EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER START IN EEN TROEBELE SITUATIE (TURBID). DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE TEMPERatuurVERANDERING VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



3.2.2 RESPONS VAN CONSUMENTEN

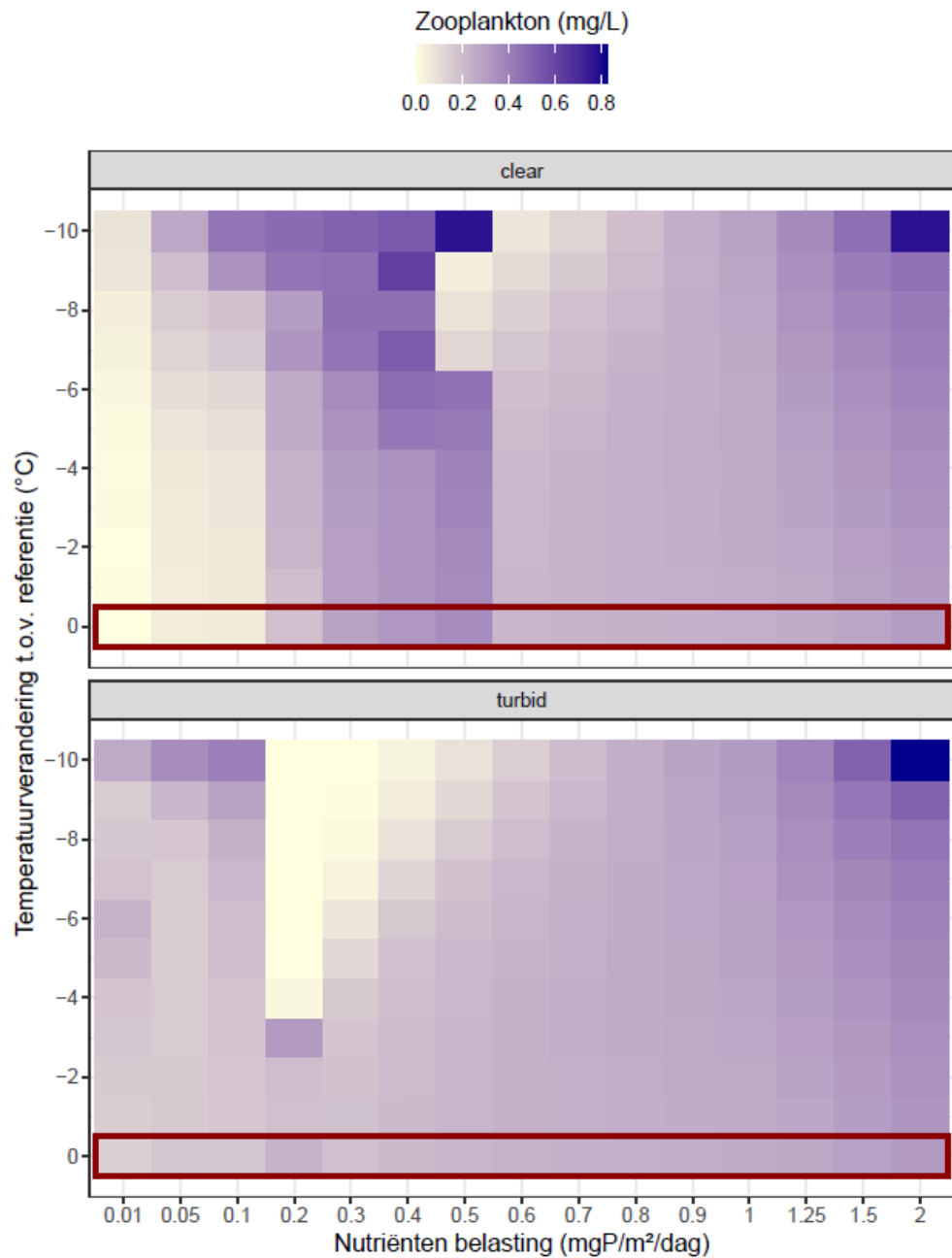
Als het ecosysteem verandert in de basis zullen hogere organismen ook reageren, zowel direct doordat zij ook gevoelig zijn voor temperatuur, als ook indirect doordat de leefomgeving en voedselbronnen veranderen. Kijkend naar zoöplankton, een belangrijke schakel tussen de primaire producenten en vissen, zien we duidelijk de omslag van het ecosysteem langs een nutriëntenas (Figuur 9). Daarnaast lijkt de respons van zoöplankton op watertemperatuurverlaging complexer te zijn dan die van de primaire producenten. Bij hele lage belastingen ($0.1 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$) en hele hoge belastingen ($>1 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$) neemt de hoeveelheid zoöplankton toe met afnemende watertemperatuur. Vanaf de $0.6 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ (heldere start) en $0.3 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ (troebele start) tot $1 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ is een licht negatieve response zichtbaar van de zoöplankton op temperatuur. In de overige zone lijkt het zeer contextspecifiek per temperatuur hoe zoöplankton zich ontwikkelt.

Een mogelijke verklaring voor deze contextafhankelijke response kan gezocht worden in predatie. Door te kijken naar de consumenten van zoöplankton, de planktivore vis (Figuur 10), wordt duidelijk dat deze groep niet heel sterk reageert op de temperatuurverandering. De sterkste veranderingen zijn terug te vinden bij combinaties van belasting en nutriënten waar zoöplankton veel aanwezig is. Dat suggereert dat de vis voornamelijk profiteert van de hogere biomassa van zoöplankton, maar niet bepalend is voor de toe- of afnames ervan.

Gegeven dat predatie niet bepalend lijkt voor de patronen blijft een verandering in het voedsel van het zoöplankton over als verklaring. Doordat het meer afkoelt zal de samenstelling van de fytoplanktongemeenschap, maar ook de relatieve opname van voedingsstoffen binnen fytoplanktongroepen veranderen. Deze veranderingen kunnen leiden tot een betere voedselkwaliteit voor zoöplankton, en daarmee een verhoogde groei. Een hoge relatieve assimilatiesnelheid betekent dat relatief veel biomassa dat gegeten wordt, omgezet wordt in nieuwe zoöplankton biomassa, wat alleen mogelijk is als de voedselkwaliteit goed is. De relatieve assimilatiesnelheid van zoöplankton (Figuur 11) laat duidelijke verhoging zien van de assimilatie bij sterk verlaagde temperaturen (5 tot 9 graden) en een belasting van $0.4 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ onder heldere condities, maar ook duidelijke verlaging bij minder heftige temperatuurafname. Bij iets hogere belasting $0.5 \text{ mgP/m}^2/\text{dag}$ is juist bij hoge afkoeling (6-9 graden) een duidelijke afname te zien in relatieve assimilatie. Dit hangt samen met het verlies van de heldere toestand bij deze combinatie van belasting en koeling (zie Figuur 6). Dergelijke patronen duiden dus op een verschuiving in de voedselkwaliteit die sterk afhankelijk is van temperatuur, maar ook van de nutriëntenbelasting en ecologische toestand van het water.

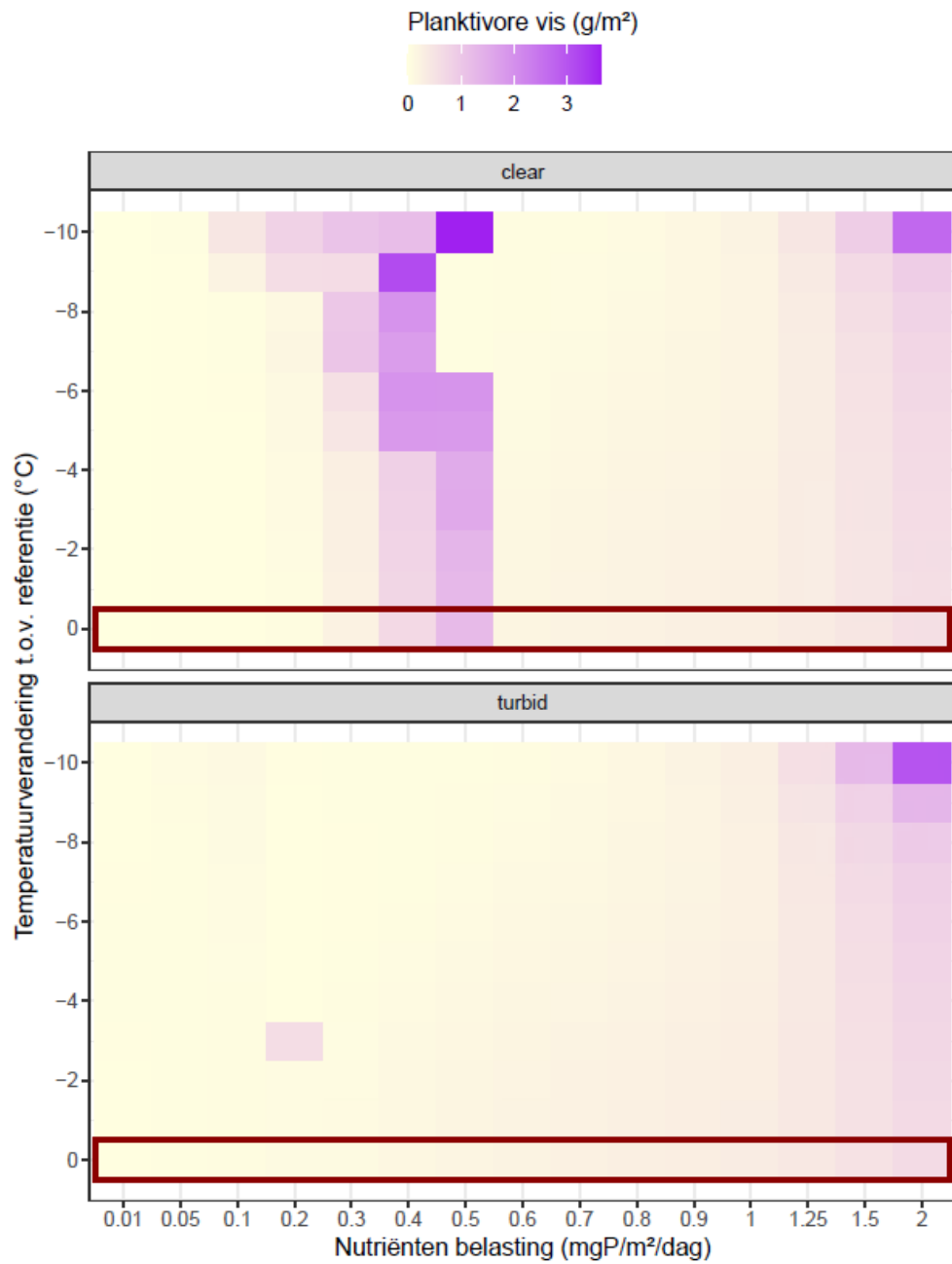
FIGUUR 9

GRID MET DE BIOMASSA AAN ZOÖPLANKTON (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN TEMPERatuurVERANDERING. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND (CLEAR), EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER START IN EEN TROEBELE TOESTAND (TURBID). DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE TEMPERatuurVERANDERING VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



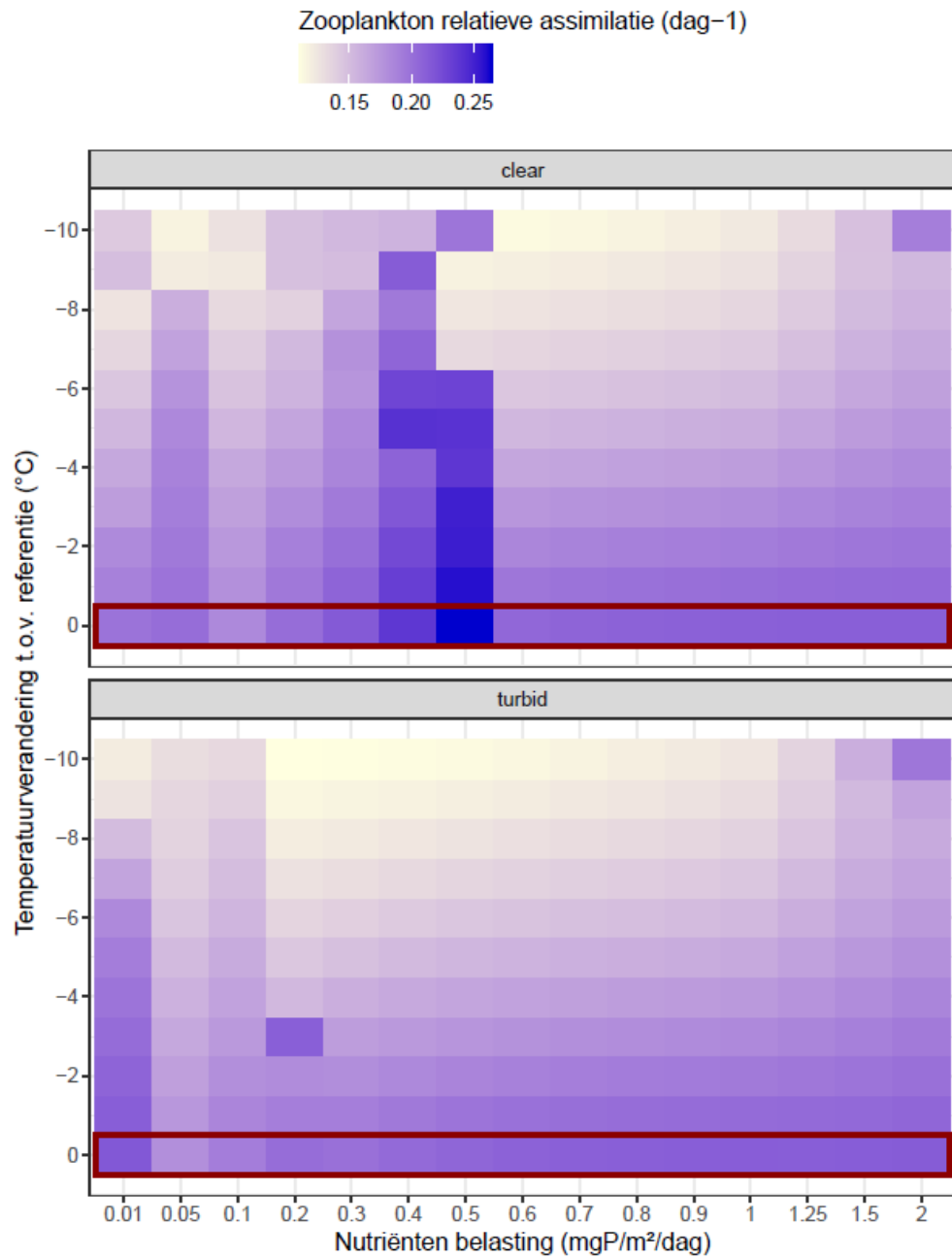
FIGUUR 10

GRID MET BIOMASSA VAN PLANKTIVORE VIS (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN TEMPERATUURVERANDERING. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND (CLEAR), EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER START IN EEN TROEBELE TOESTAND (TURBID). DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO-INSTALLATIE. DE TEMPERATUURVERANDERING VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



FIGUUR 11

GRID MET DE ASSIMILATIESNELHEID VAN ZOÏPLANKTON (DE OMZETTING VAN VOEDSEL NAAR EIGEN BIOMASSA) (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN TEMPERatuurVERANDERING. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND (CLEAR), EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER START IN EEN TROEBELE TOESTAND (TURBID) . DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE TEMPERatuurVERANDERING VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



3.3 INVLOED VAN PASSAGE TEO-INSTALLATIE OP DE ECOLOGIE

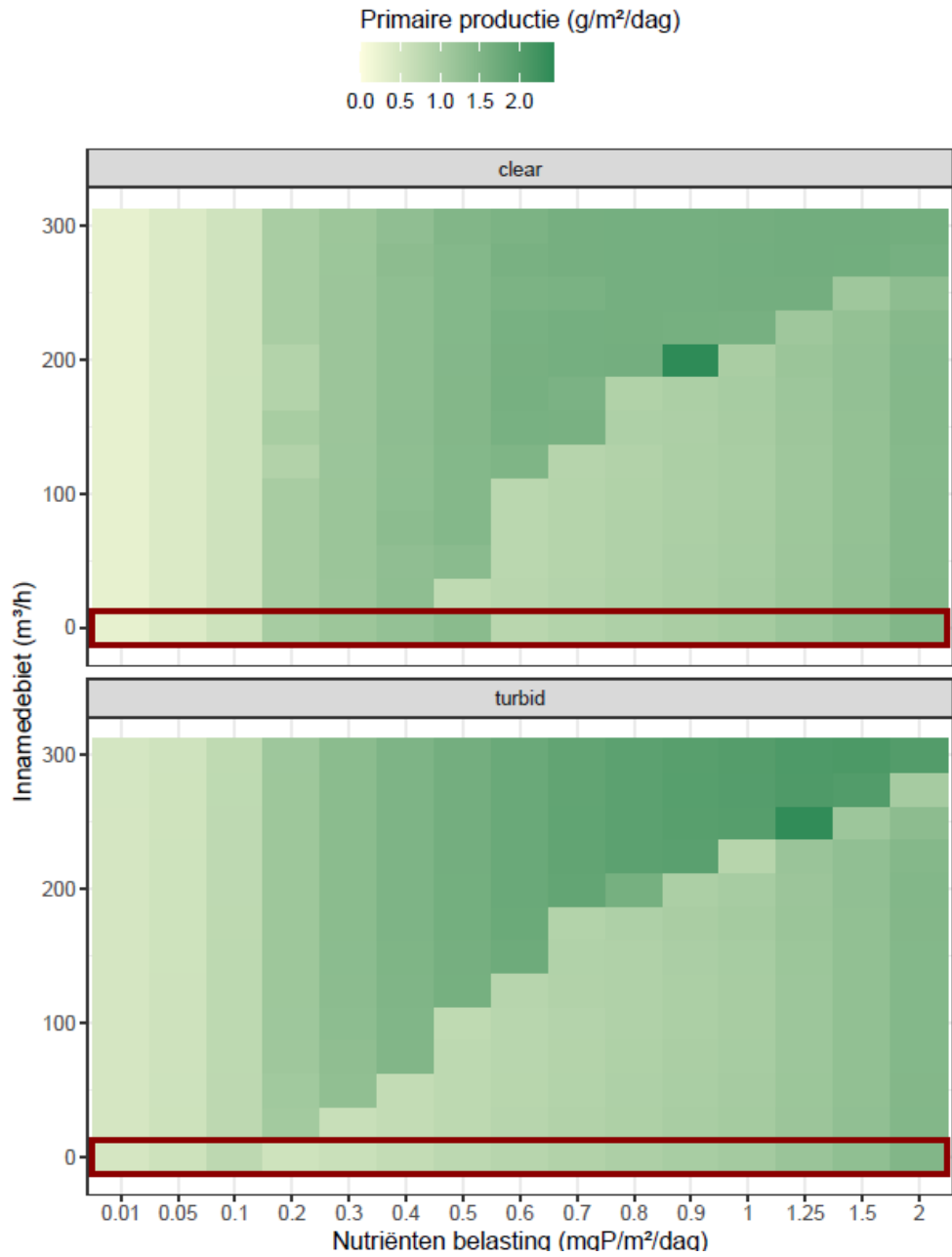
3.3.1 DE BASIS VAN HET VOEDSELWEB

Net als bij de temperatuurgradiënt laat het toenemen van het debiet dat de TEO-installatie passeert bij verschillende belastingen een duidelijk effect zien op de primaire productie (Figuur 12). Bij een toenemend innamedebiet slaat het systeem over van een troebel naar een helder systeem. In Figuur 13 is dit duidelijk te zien aan de chlorofyl-a, waarbij een hogere waarde (groen) een teken is van een troebel systeem terwijl een afwezigheid van chlorofyl-a duidt op een helder water (geel). Bij toenemende innamedebieten neemt de hoeveelheid geel in het figuur toe, dus de kritische grens verschuift. Alleen bij een heldere start en een belasting van $0.5\text{mgP/m}^2/\text{dag}$ is bij een inname van $25\text{m}^3/\text{uur}$ het andere effect te zien, zijnde een omslag van een helder systeem in de referentietoestand (rood omljnd) naar een troebel systeem bij toegenomen onttrekking.

Buiten de verschuiving van de kritische grenzen is ook duidelijk dat toenemende inname een effect heeft op het aantal deeltjes in het water (chlorofyl-a en detritus concentraties, resp. Figuur 13 en Figuur 14). Chlorofyl-a neemt af bij toenemende inname, althans wanneer belasting zodanig hoog is dat er duidelijke vertroebeling van het water is. Echter, het water wordt als geheel niet helderder, aangezien de passage van de TEO-installatie en mogelijke sterfte van organismen en omzetting daarvan in organisch materiaal zorgt voor toename van de zwevendstofconcentraties. Doordat fytoplankton afneemt, maar detritus toeneemt is het lichtklimaat voor groei van primaire producenten over de innamegradiënt redelijk gelijkend en treedt dus geen duidelijk effect op in de primaire productie onder situaties waarin het water zich in een troebele toestand bevindt (duidelijk aanwezige chlorofyl). Wanneer planten het systeem overheersen en het water helder is (bij lagere nutriëntenbelastingen), is geen duidelijk patroon zichtbaar in detritus concentraties langs de inname gradiënt (Figuur 14, kijkend binnen een categorie van belasting en langs de y-as). In situaties dat ondergedoken vegetatie abundant aanwezig is, ontstaat met verhoogde inname ook meer sterfte en komt dus meer detritus in het systeem, maar doordat de planten filterend werken wordt de waterkolom niet vertroebeld.

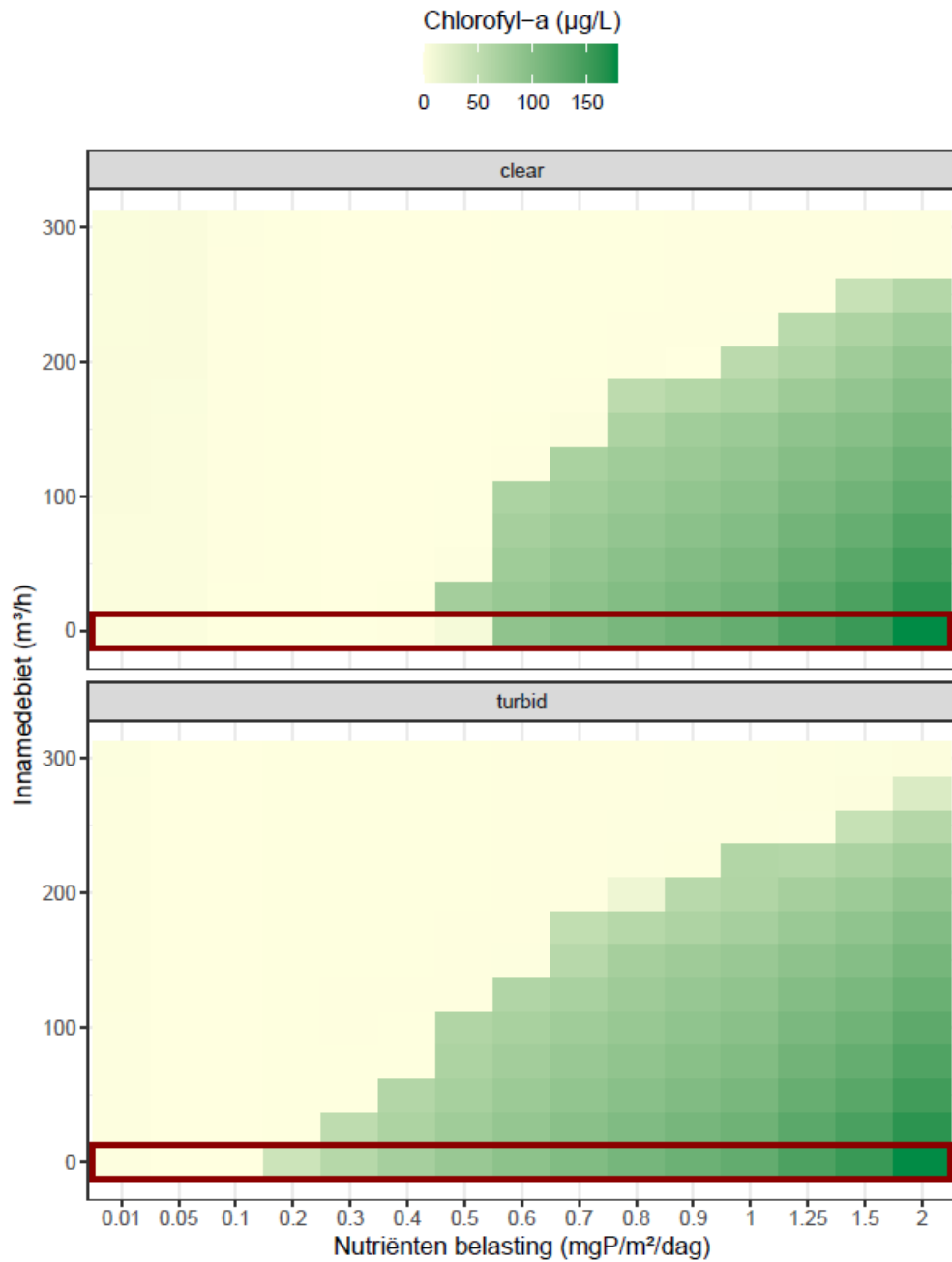
FIGUUR 12

GRID MET DE PRIMAIRE PRODUCTIE (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN DEBIET DAT DE TEO-INSTALLATIE PASSEERT. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND (CLEAR), EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER START IN EEN TROEBELE TOESTAND (TURBID). DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE INNAME VAN WATER VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



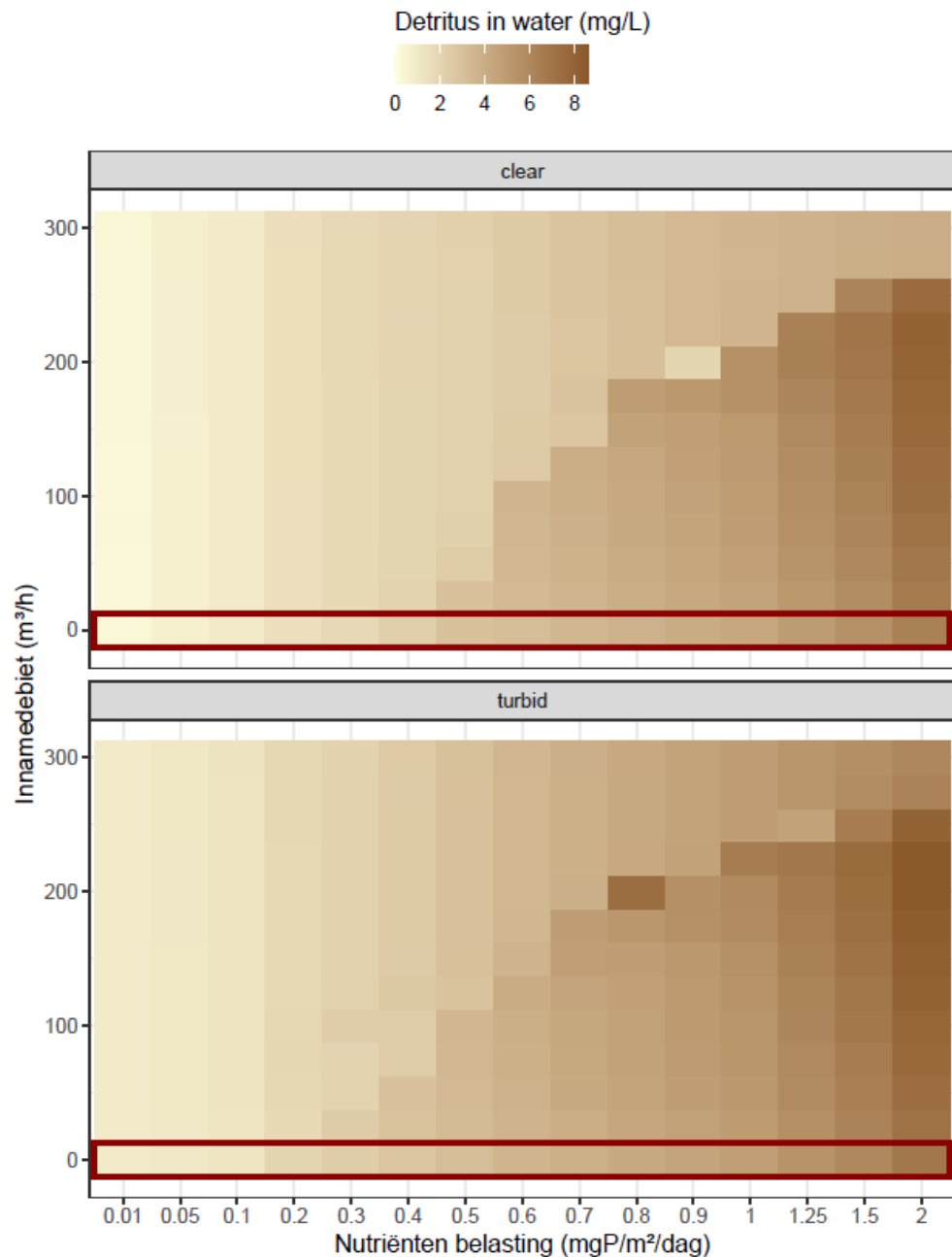
FIGUUR 13

GRID MET DE CHLOROFYL-A CONCENTRATIE (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN DEBIET DAT DE TEO-INSTALLATIE PASSEERT. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND, EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER ZICH IN EEN TROEBELE STARTSITUATIE BEVOND. DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE INNAME EN FILTERING VAN WATER VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



FIGUUR 14

GRID MET DE DETRITUS CONCENTRATIE IN WATER (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN HET DEBIET DAT DE TEO-INSTALLATIE PASSEERT. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELLERE TOESTAND, EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER ZICH IN EEN TROEBELE STARTSITUATIE BEVOND. DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE INNAME VAN WATER VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



3.3.2 RESPONS VAN CONSUMENTEN

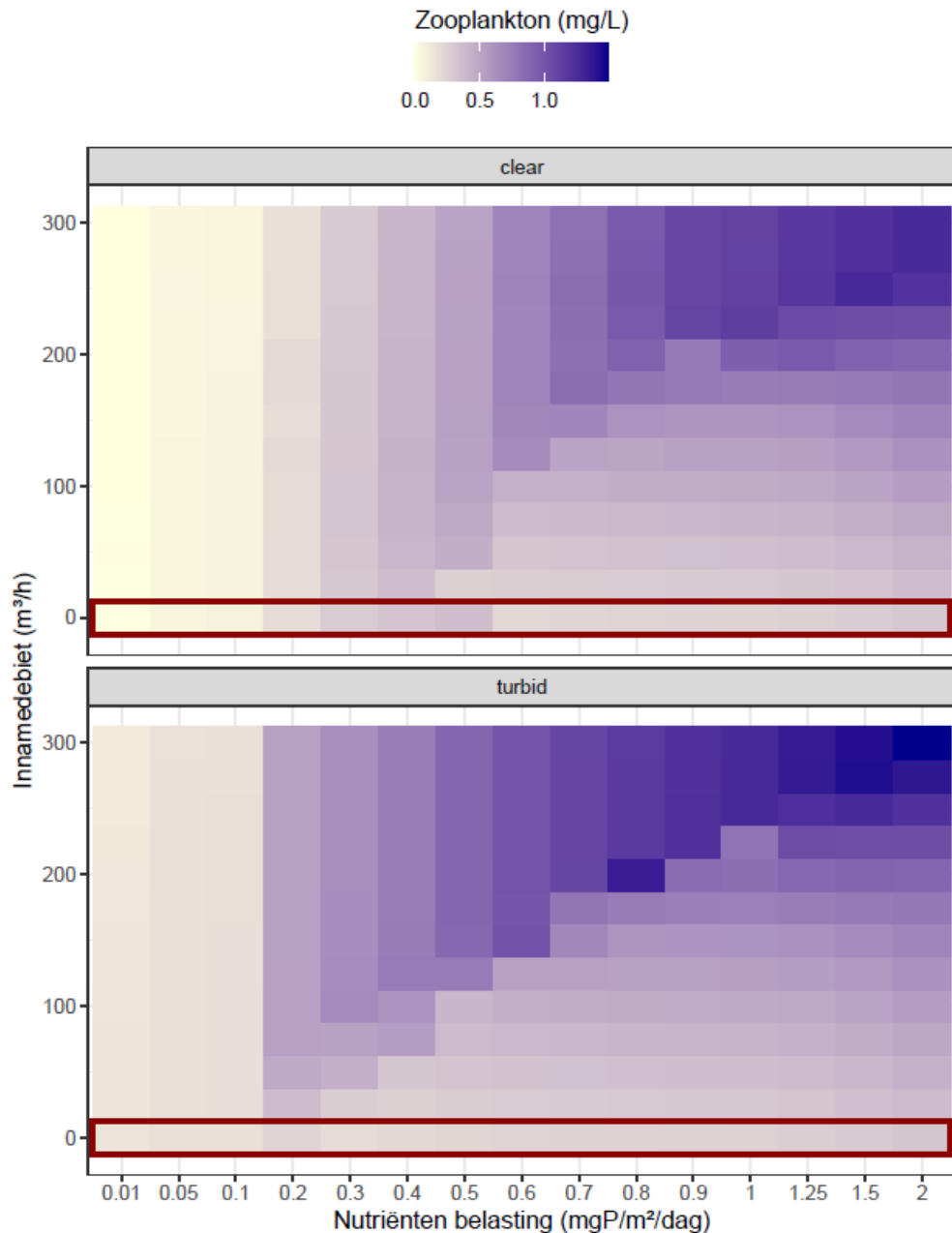
Het zoöplankton laat in de zone waarin het ecosysteem eindigt in een troebele toestand een toename zien langs een gradiënt van innamedebiet (Figuur 15). Dit komt waarschijnlijk wederom door een verandering van voedselkwaliteit door het veranderende lichtklimaat, nutriëntenbeschikbaarheid voor fytoplankton en detritus als voedselbron. Op het moment dat het water helder is, is geen response zichtbaar op toenemend innamedebiet. De sterfte van zoöplankton door filtering lijkt dus niet zodanig te zijn dat deze leidt tot populatieafname. Oftewel, de regeneratie van zoöplankton is in dit geval voldoende om de sterfte te compenseren. Langs de grens van combinaties van nutriëntenbelasting en innamedebiet

waarop het systeem net wel of net niet helder is, zijn toe- en afnames van zoöplankton biomassa zichtbaar die niet passen in het hierboven geschetste beeld. Een blik op de planktivore vis biomassa (Figuur 16) laat zien dat deze groep langs deze zone tussen helder en troebel hoge biomassa heeft bij lage zoöplankton biomassa en vice versa. Dit suggereert dat predatie door vissen dus een bepalende factor is voor de verklaring van dit patroon.

Opvallend is dat de planktivore vis, met uitzondering van het patroon in de overgangszone tussen helder en troebel voornamelijk een afname laat zien in biomassa ten opzichte van de referentie. Ook dit leidt waarschijnlijk tot de toename in zoöplankton. De mogelijke schade van passage van de TEO-installatie op planktivore vis is dus niet verwaarloosbaar, de regeneratie van kleine planktivore vis is niet toereikend om de populatie op niveau te houden.

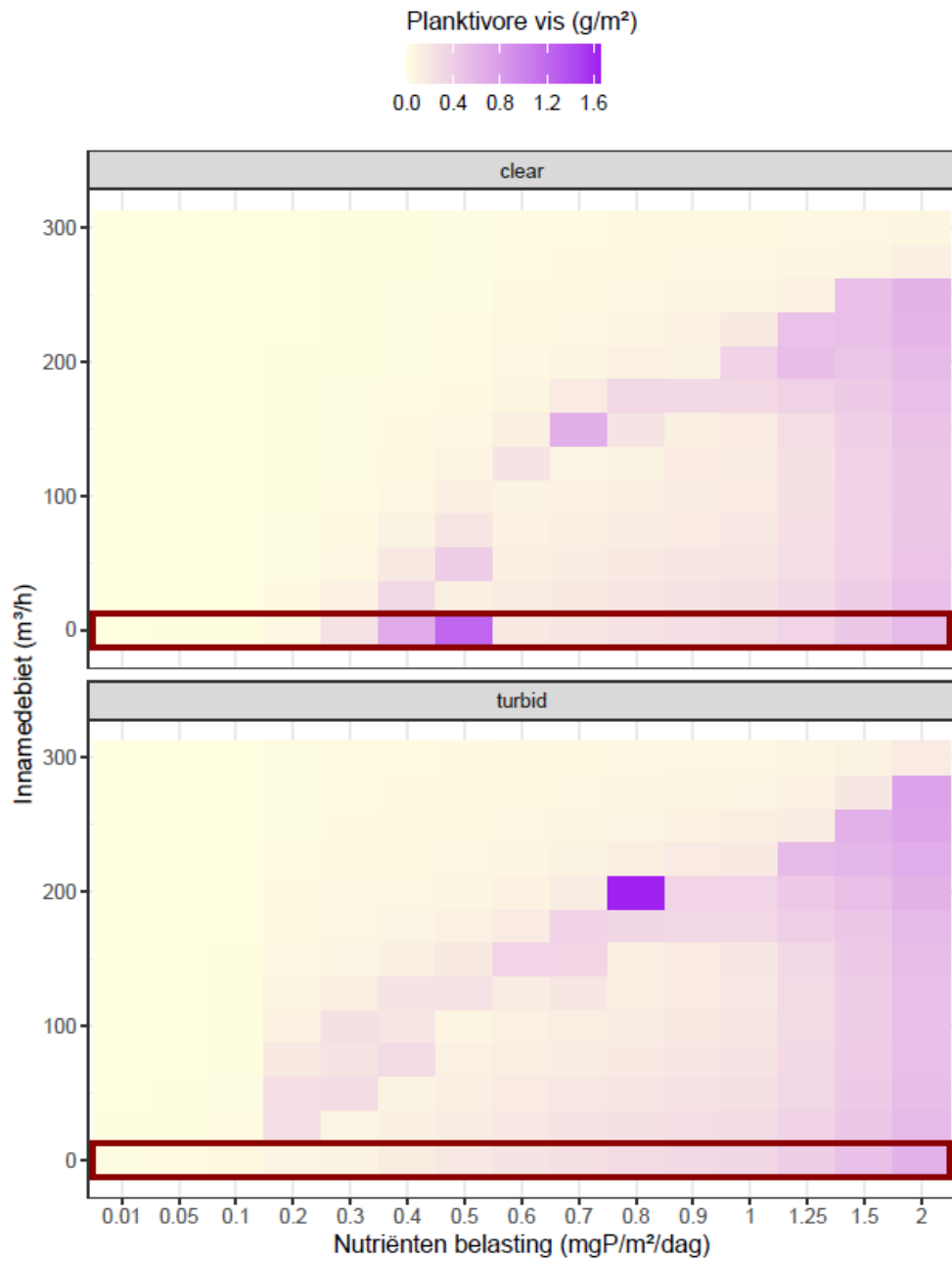
FIGUUR 15

GRID MET DE ZOÖPLANKTON BIOMASSA (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN DEBIET DAT DE TEO-INSTALLATIE PASSEERT. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HELDERE TOESTAND, EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER ZICH IN EEN TROEBELE STARTSITUATIE BEVOND. DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE INNAME VAN WATER VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



FIGUUR 16

GRID MET DE PLANKTIVORE VIS BIOMASSA (KLEUR) LANGS EEN AS VAN NUTRIËNTENBELASTING EN DEBIET DAT DE TEO-INSTALLATIE PASSEERT. HET BOVENSTE PANEEL TOONT DE SITUATIE WANNEER HET MEER BEGINT IN EEN HEDERE TOESTAND, EN HET ONDERSTE PANEEL ALS HET MEER ZICH IN EEN TROEBELE STARTSITUATIE BEVOND. DE REFERENTIESITUATIE IS ROOD OMLIJND EN BETREFT WEERJAAR 2014 ZONDER IMPACT VAN DE TEO INSTALLATIE. DE INNAME EN FILTERING VAN WATER VINDT PLAATS TUSSEN HALF MEI EN HALF SEPTEMBER, WANNEER DE TEO GEACHT WORDT AAN TE STAAN



3.4 INVLOED VAN AFKOELING EN PASSAGE TEO-INSTALLATIE OP DE ECOLOGIE

3.4.1 LANGJARIGE EFFECTEN VOOR VERSCHILLENDE SCENARIO'S

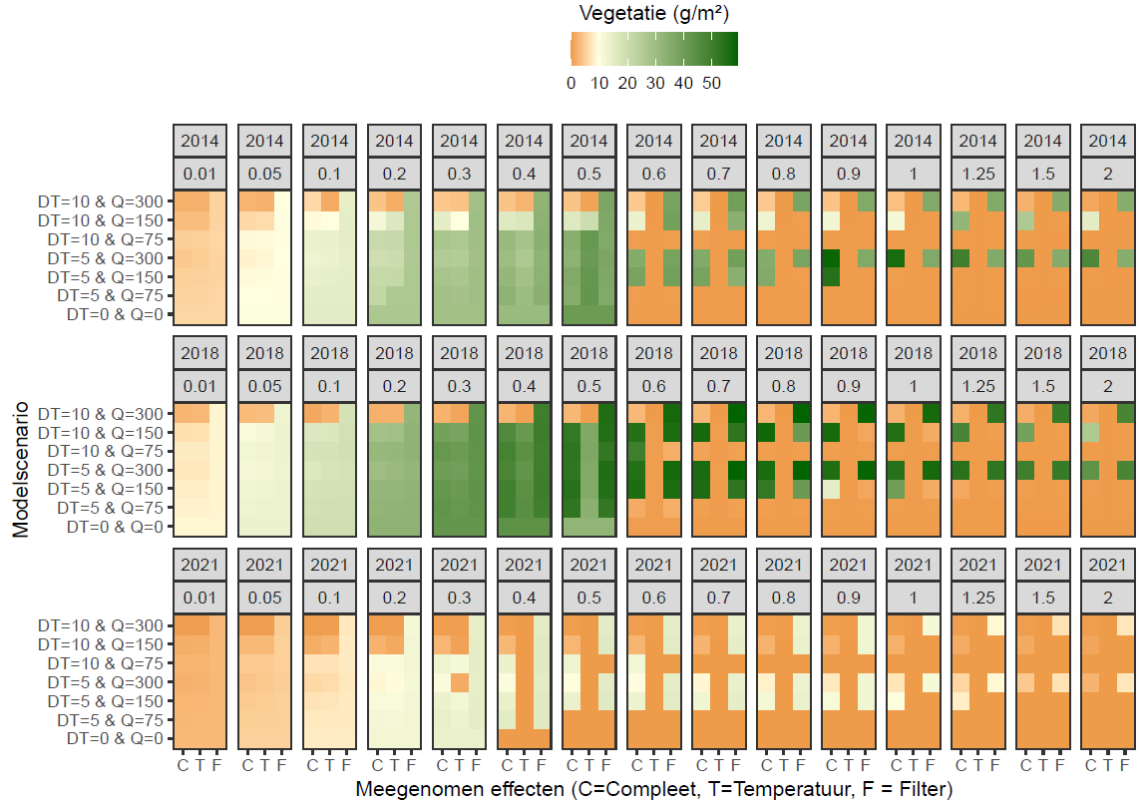
Om inzicht te krijgen in de gezamenlijke effecten van afkoeling en passage is gebruik gemaakt van een aantal realistische scenario's. In deze scenario's zijn de afkoeling en pasasage gekoppeld via een combinatie van inname-debiet (Q) en afkoeling (DT). In Figuur 17 en Figuur 18 zijn de effecten op vegetatie en zoöplankton weergegeven voor de combinatie van filters en temperatuurverandering, en de individuele effecten waarbij het model gestart is vanuit een heldere situatie. In Appendix 1 zijn de plots opgenomen waarbij het meer begint in een troebele situatie. De hieronder beschreven patronen zijn op hoofdlijnen vergelijkbaar tussen de twee startsituaties, in gedachte houdende dat vegetatie bij minder hoge belastingen pas tot uiting komt. Door de patronen van de drie verschillende scenario's te vergelijken binnen een weerjaar wordt duidelijk hoe gecombineerde effecten zich verhouden tot individuele effecten van TEO. Oftewel, wanneer is temperatuur sterk bepalend voor ecologische uitkomsten, en wanneer juist de passage van de TEO-installatie. Door naar verschillende weerjaren te kijken wordt beter inzicht gegeven in de voorspelbaarheid van de impact van TEO.

Figuur 17 en Figuur 18 tonen dat effecten van de gecombineerde druk van afkoeling en passage van de TEO-installatie veelal lijken op de effecten van passage, of van temperatuur. Bij lage nutriëntenbelasting is temperatuur sterk bepalend voor het uiteindelijke effect van de TEO op de ecologie en lijkt het patroon van beide effecten sterk op dat van alleen temperatuureffecten. Bij hogere nutriëntenbelastingen is het patroon van beide juist sterk overeenkomstig met dat van het effect van enkel passage van de TEO-installatie.

Alleen bij scenario's met een warmtevraag van 10 graden ($DT=10$) en een hoog inname-debiet ($Q=150$ of $Q=300$) zijn effecten minder duidelijk toe te schrijven aan temperatuur of passage maar treden gecombineerde effecten op. Deze gecombineerde effecten wijzen niet consistent dezelfde richting op, ter illustratie zie jaar 2014, nutriëntenbelasting 1.25. In scenario $DT=10$ & $Q=150$ is een duidelijke toename in vegetatie te zien t.o.v. de referentie in een situatie met koeling en filtering (C), maar is geen effect zichtbaar met enkel koeling of enkel filtering. De combinatie is dus positief voor vegetatie. Echter, bij scenario $DT=10$ & $Q=300$ is de toename van vegetatie veel sterker onder invloed van enkel passage van de TEO-installatie, dan wanneer passage en afkoeling beide invloed hebben. Het samenspel tussen de effecten van afkoeling en filtering speelt dus vooral een rol wanneer beide effecten groot zijn. De exacte invloed van de TEO zal dan sterk afhangen van eigenschappen van het watersysteem.

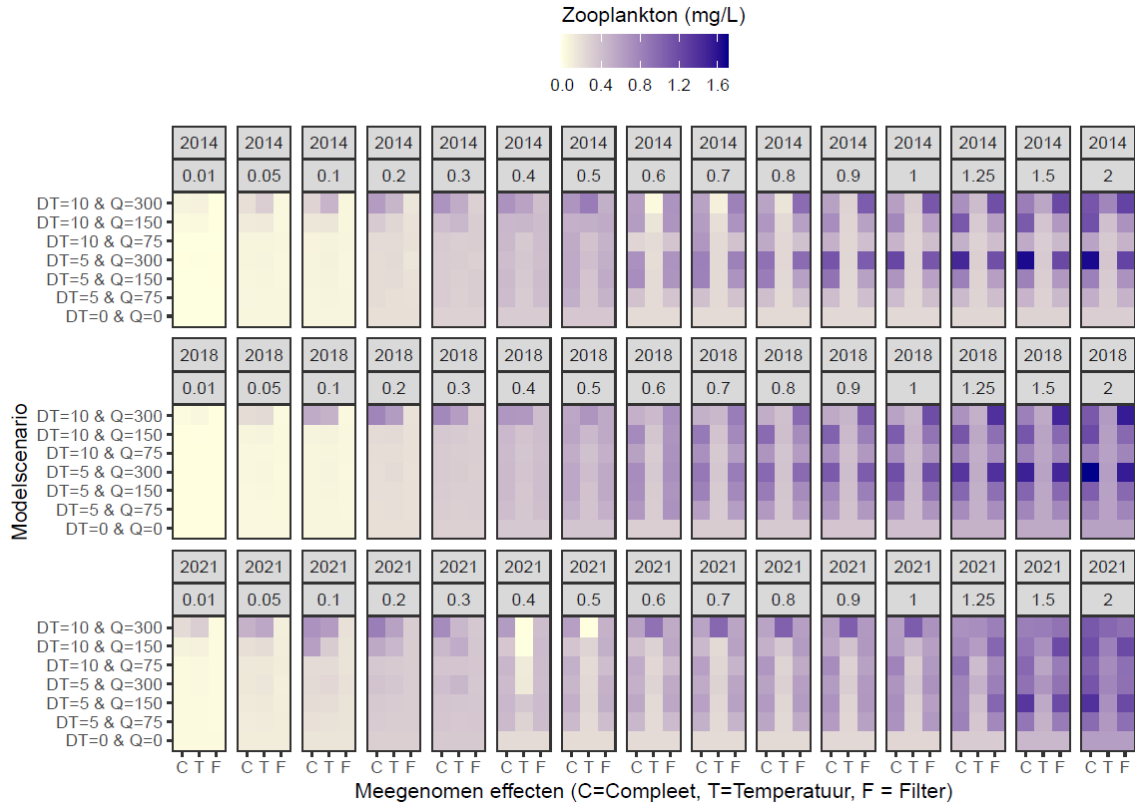
FIGUUR 17

GRIDS MET DAARIN DE VEGETATIEBIOMASSA (KLEUR) VOOR VERSCHILLENDE WEERJAREN (RIJEN VAN PANELEN), VERSCHILLENDE NUTRIËNTBELASTINGEN (KOLOMMEN VAN PANELEN, IN MGP/M²/DAG). VOOR ELK PANEEL ZIJN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S WEERGEGEVEN (DT IN °C & Q IN M³/UUR) MET ONDERAAN DE REFERENTIESITUATIE (DT=0 & Q=0) OP DE Y AS. OP DE X AS STAAN PER PANEEL DRIE RIJEN MET ZOWEL DE COMBINATIE VAN DE EFFECTEN VAN PASSAGE VAN DE TEO-INSTALLATIE ALS TEMPERATUUR (C), DE EFFECTEN VAN ALLEEN TEMPERATUUR (T) EN DE EFFECTEN VAN ENKEL PASSAGE (HIER 'F=FILTER'). DE WEERGEGEVEN WAARDEN BETREFFEN ZOMERGEMIDDELDEN WAARDEN VAN HET LAATSTE JAAR VAN EEN 30-JARIGE MODELBEREKENING GESTART VANUIT EEN HELDERE TOESTAND



FIGUUR 18

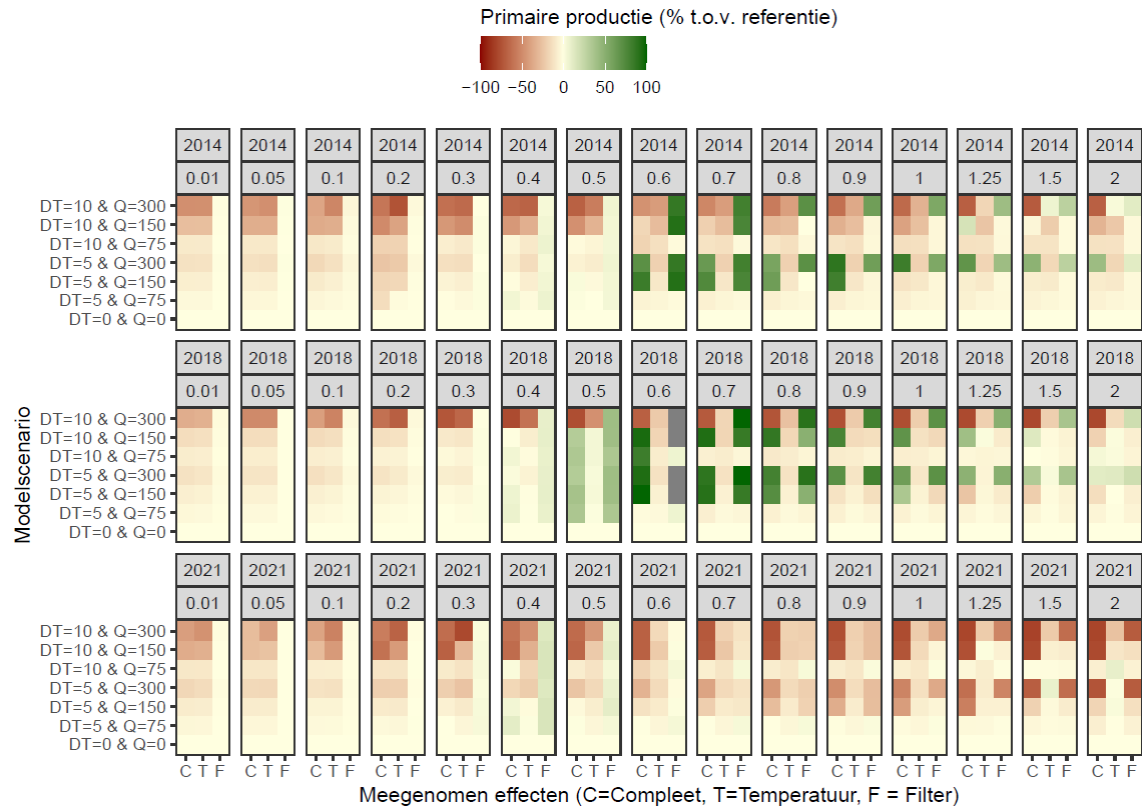
GRIDS MET DAARIN DE ZOÖPLANKTON BIOMASSA (KLEUR) VOOR VERSCHILLENDE WEERJAREN (RIJEN VAN PANELEN), VERSCHILLENDE NUTRIËNTENBELASTINGEN (KOLONNEN VAN PANELEN, IN $\text{MGP}/\text{M}^2/\text{DAG}$). VOOR ELK PANEEL ZIJN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S WEERGEGEVEN (DT & Q) MET ONDERAAN DE REFERENTIESITUATIE (DT=0 & Q=0) OP DE Y AS. OP DE X-AS STAAN PER PANEEL DRIE RIJEN MET ZOWEL DE EFFECTEN VAN FILTERS ALS TEMPERatuur (C), DE EFFECTEN VAN ALLEEN TEMPERatuur (T) EN DE EFFECTEN VAN ENKEL PASSAGE (HIER 'F=FILTER'). DE WEERGEGEVEN WAARDEN BETREFFEN ZOMERGEMIDDELDEN WAARDEN VAN HET LAATSTE JAAR VAN EEN 30-JARIGE MODELBEREKENING GESTART VANUIT EEN HEDERE TOESTAND



In Figuur 19 is de relatieve verandering in primaire productie weergegeven ten opzichte van de referentie. Primaire productie schaal goed tussen referentiesituaties en scenario's doordat bij een omslag van een helder naar een troebel systeem er nog steeds productie plaatsvindt (alleen door andere groepen). Hierdoor blijft relatieve primaire productie een nuttige indicator over een brede range van scenario's en nutriëntenbelastingen. De primaire productie volgt de eerder beschreven patronen qua belang van afkoeling bij lage belastingen, passage van de TEO-installatie bij hoge belastingen en sterk context afhankelijke respons bij grote temperatuurverandering en grote innamedebieten, vooral bij de wat hogere belastingen. Daarnaast laat de relatieve primaire productie heel duidelijk het verschil tussen weerjaren zien. In 2014 en 2018 is bij hogere belastingen een forse toename in de primaire productie waar te nemen onder sommige scenario's. In 2021 neemt de productie slechts heel beperkt toe, voornamelijk bij een belasting van $0.4 \text{ mgP}/\text{m}^2/\text{dag}$. Het meest extreme scenario (DT=10 & Q=300) leidt in de gecombineerde invloed van afkoeling en passage tot afname van de primaire productie in alle weerjaren.

FIGUUR 19

GRIDS MET DAARIN DE RELatieve PRIMaIRE PRODUCTIE T.O.V. DE REFERENTIESITUATIE (KLEUR) VOOR VERSCHILLENDE WEERJAREN (RIJEN VAN PANELEN), VERSCHILLENDE NUTRIËNTENBELASTINGEN (KOLOMMEN VAN PANELEN, IN MGP/M²/DAG). VOOR ELK PANEEL ZIJN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S WEERGEGEVEN (DT & Q) MET ONDERAAN DE REFERENTIESITUATIE (DT=0 & Q=0) OP DE Y AS. OP DE X AS STAAN PER PANEEL DRIE RIJEN MET ZOWEL DE EFFECTEN VAN FILTERS ALS TEMPERATUUR (C), DE EFFECTEN VAN ALLEEN TEMPERATUUR (T) EN DE EFFECTEN VAN ENKEL PASSAGE (HIER 'F=FILTER'). DE WEERGEGEVEN WAARDEN BETREFFEN ZOMERGEMIDDELDEN WAARDEN VAN HET LAATSTE JAAR VAN EEN 30-JARIGE MODELBEREKENING GESTART VANUIT EEN HELDERE TOESTAND

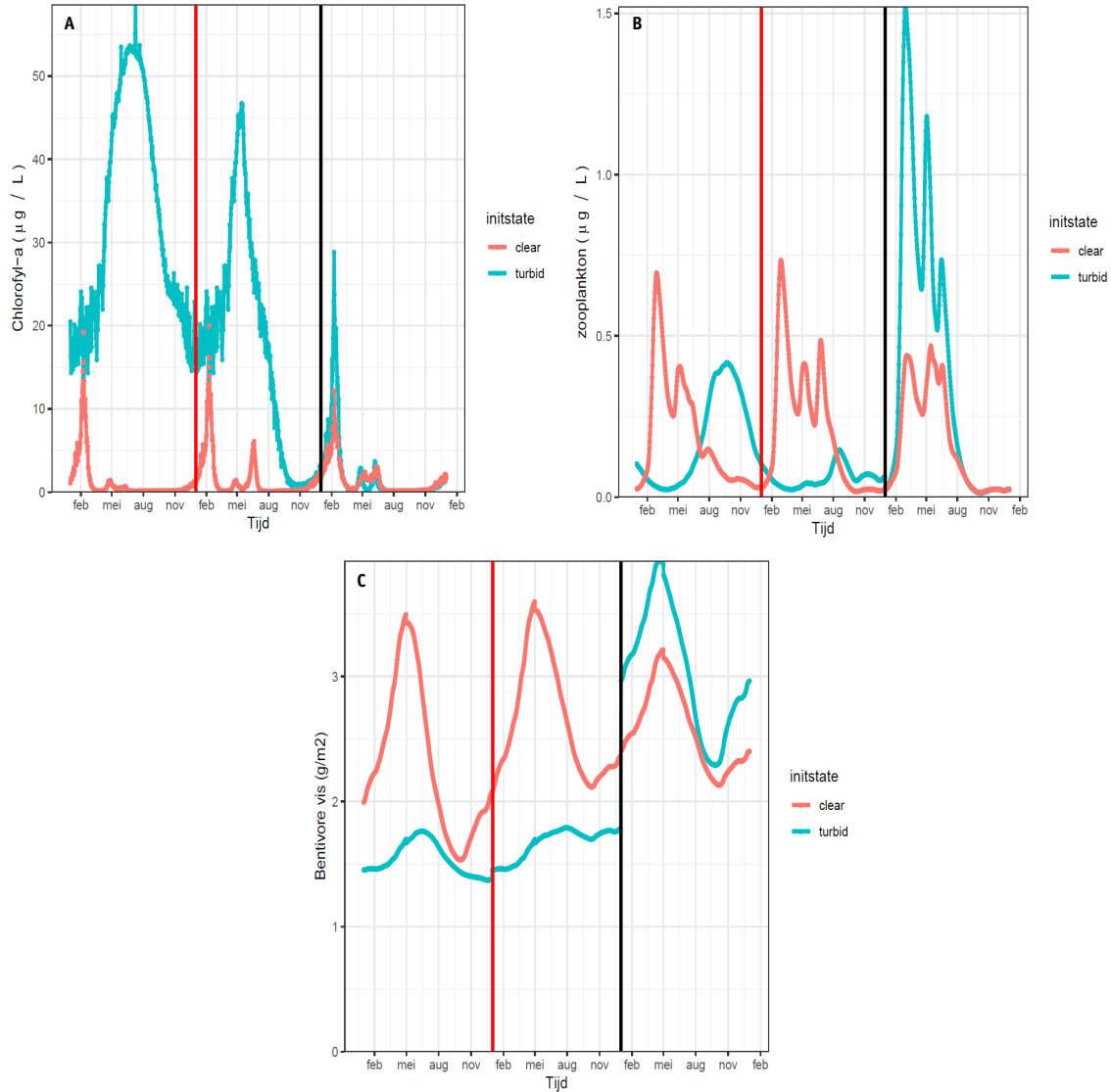


3.4.2 EFFECTEN VAN TEO DOOR DE TIJD

Deze studie heeft tot nu toe de focus gelegd op de langjarige ecologische effecten van TEO. Deze effecten zijn niet altijd direct zichtbaar nadat de TEO in het veld in gebruik genomen wordt. Om deze effecten in perspectief te zetten zijn in Figuur 20 het jaar voordat de TEO in gebruik gaat, één jaar na de ingebruikname en 30 jaar na ingebruikname weergegeven voor verschillende ecologische indicatoren. Deze effecten kunnen verschillen voor verschillende scenario's, belastingen en watertypen en zijn dus puur illustratief. Figuur 20a illustreert dat een daling van ecologische indicatoren verder door kan zetten over tijd, en sterk afhankelijk is van de ecologische toestand waarin het water zich bevond voordat de TEO in werking ging. In Figuur 20b is te zien dat korte- en langetermijneffecten sterk wisselend kunnen zijn, waarbij de TEO initieel leidt tot vermindering van zoöplankton maar op lange termijn juist leidt tot een verhoging onder troebele omstandigheden. Als laatste is duidelijk dat de impact van TEO ook doorwerkt op soorten die niet direct schade ondervinden van het systeem zelf (Figuur 20c, bentivore vis). Al deze effecten laten zien dat op korte termijn waargenomen effecten en langetermijneffecten sterk kunnen verschillen, en conclusies gebaseerd op één of enkele jaren monitoring altijd gezien moeten worden in dit perspectief.

FIGUUR 20

GRAFIEKEN VAN DRIE JAAR VAN MODELRESULTATEN VOOR EEN SCENARIO MET EEN TEO MET EEN WARMTEVRAAG VAN 5 GRADEN EN EEN INNAMEDEBIET VAN 300 M³/UUR BIJ EEN NUTRIËNTENBELASTING VAN 0.2 MGP/M²/DAG. HET EERSTE JAAR (VOOR DE RODE LIJN) BETREFT HET JAAR VOORDAT DE TEO WORDT INGESCHAKELD, HET MIDDELSTE JAAR (TUSSEN DE RODE EN DE ZWARTE LIJN) IS ÉÉN JAAR NA DE INSCHAKELING VAN DE TEO EN HET LAATSTE JAAR (NA DE ZWARTE LIJN) BETREFT JAAR 30 VAN DE MODELBEREKENING NA INSCHAKELING VAN DE TEO. WEERGEGEVEN ZIJN A) DE CONCENTRATIE CHLOROFYL-A IN HET WATER, B) DE ZOÖPLANKTONBIOMASSA, EN C) DE BIOMASSA BENTIVORE VIS MET IN BLAUW MODELBEREKENINGEN GESTART VANUIT TROEBELE TOESTAND EN IN ROOD VANUIT HELDERE TOESTAND



4

DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Het doel van deze studie is om inzicht te krijgen in de impact van TEO op zoetwater-ecosystemen, waarbij specifiek gekeken is naar een ondiep meer. Binnen deze modelstudie is een duidelijk effect van TEO installaties op de ecologische waterkwaliteit zichtbaar. Effecten zijn sterk afhankelijk van de mate van afkoeling van het water, de hoeveelheid water die de TEO-installatie die passeert en de combinatie van die twee. Daarbij zijn ook de randvoorwaarden van zowel het watersysteem als het TEO-systeem sterk bepalend voor de ecologische einduitkomst. Uit dit onderzoek blijkt ook duidelijk dat weerjaren verschillend reageren op de inzet van TEO-systemen in termen van ecologische waterkwaliteit. Ook de mate van nutriëntentoevoer naar het meer is sterk bepalend voor de respons van de ecologische waterkwaliteit op een TEO-systeem. Daarbij zal de mate van recirculatie van een meer door een TEO, ofwel in hoeveel dagen het meer volledig door de TEO-installatie wordt gepompt, sterk bepalend zijn voor de impact van mogelijke schade door filters. Deze sterke mate van contextafhankelijkheid is kenmerkend voor ecologische systemen die veelal niet lineair reageren op een verandering in de externe omgeving (bijvoorbeeld nutriëntenbelasting). Een belangrijke conclusie is dat de plaatsing van een TEO-installatie niet zonder impact is op de ecologie van een watersysteem. Zelfs bij een relatief beperkte TEO (zie bijvoorbeeld het scenario met een warmtevraag (DT) van 5°C en een innamedebiet (Q) van 75 m³/uur) werden onder bepaalde nutriëntenbelastingen al veranderingen gevonden. Belangrijk is echter wanneer deze veranderingen op gaan treden en of deze positief of negatief zijn.

4.1 VERANDERINGEN IN ECOLOGIE DOOR TEMPERATUURVERLAGING

Het verlagen van de temperatuur in het water leidt vooral tot een verlaging van de primaire productie doordat de ontwikkeling van vegetatie wordt beïnvloed. Bekend is dat ondergedoken waterplanten sterk afhankelijk zijn van de watertemperatuur voor hun ontwikkeling (Barko & Smart, 1981; Carr et al., 1997). De invloed van temperatuurafkoeling door TEO-installaties lijkt vooral belangrijk te zijn bij lagere nutriëntenbelastingen. Een dergelijk patroon wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat bij lagere belastingen de ontwikkeling van ondergedoken planten in het voorjaar sterk bepalend is voor het ecosysteem. Wanneer planten goed tot ontwikkeling komen zijn ze in staat om licht weg te nemen en deeltjes uit het water te laten bezinken, waardoor het water helder blijft. Echter, bij grotere afkoeling zal de vegetatieontwikkeling op achterstand raken, met als gevolg dat in de meest extreme condities deze zelfs niet goed meer ontwikkelt. Hiermee wordt de robuustheid van het meer om om te gaan met nutriëntenbelasting aangetast, waardoor het systeem bij minder belasting al omkapt naar een troebel watersysteem. Dit laatste is zeker niet wenselijk en het beperken van de temperatuurverlaging is dan ook te adviseren. Voor het gebruikte meer lag deze grens op een verlaging van temperatuur met maximaal 5 graden, een getal dat goed aan lijkt te sluiten bij de momenteel gehanteerde 4 graden afkoeling in het STOWA beoordelingskader koudelozingen.

De invloed van weerjaren kan bepalend zijn voor de invloed van afkoeling. De resultaten van deze studie laten zien dat de voorjaarstemperatuur sterk bepalend is voor de ontwikkeling van vegetatie, en dat een te grote verlaging van de temperatuur door TEO de ontwikkeling van vegetatie in gevaar kan brengen. Een weerjaar met een koud voorjaar (zoals 2021) is hier gevoeliger voor dan een weerjaar met een warm voorjaar (2018). Hierbij is het belangrijk om op te merken is dat verschillende plantensoorten en vegetatiegemeenschappen andere temperatuur optima en grenzen hebben waarbij ze tot ontwikkeling komen en het toegepaste model een soort gemiddelde vegetatie van een Nederlands meer hanteert. Idealiter wordt in de afweging bij het plaatsen van de TEO-installatie rekening gehouden met gewenste vegetatiegemeenschappen.

4.2 VERANDERINGEN IN ECOLOGIE DOOR PASSAGE VAN DE TEO-INSTALLATIE

Het debiet dat de TEO-installatie passeert, en daarmee de impact die mogelijke sterfte van micro-organismen kan hebben op de ecologie van het meer, is vooral sterk bepalend bij de wat hogere nutriëntenbelastingen. Bij toenemende belasting zal een steeds groter deel van de productie van het ecosysteem bestaan uit plankton. Deze organismen ‘worden ingezogen’ en ondervinden mogelijk schade (fyto- en zoöplankton). Dit terwijl de vegetatie niet wordt ingezogen. Bij hogere innamedebieten leidt dit tot helder water bij toenemende belastingen. Echter, een extreme verhoging van het innamedebiet leidt weer tot een steeds troebeler water doordat de mogelijke sterfte van micro-organismen leidt tot hogere concentraties van dood organisch materiaal. Het heldere water is bij hele hoge innamedebieten dus niet per se een indicatie van een goed ontwikkeld ecologisch systeem, maar eerder van een watersysteem waarin weinig leven aanwezig is.

Wanneer gekeken wordt naar de combinatie afkoeling en passage van de TEO-installatie komt een genuanceerder beeld naar voren, waarbij vooral situaties met beperkte afkoeling en hogere debieten een ontwikkeling van vegetatie en toename van de primaire productie ten opzichte van de referentie laten zien. Dergelijke effecten verhogen de ecologische potentie in het proefmeer. Hoge debieten in combinatie met een sterke verlaging van temperatuur leiden tot duidelijk negatieve ecologische impact: het verlies van plantengroei, toename van vertroebeling in het water en sterfte van organismen zoals zoöplankton. Het vaststellen van grenswaarden voor innamedebieten is lastig aangezien nog onduidelijk is wat het effect is van de passage van de TEO-installatie op micro-organismen. De gebruikte getallen in de modelstudie zijn een schatting op basis van de kennis die voorhanden is, maar zouden in de praktijk sterk verschillend kunnen zijn afhankelijk van het gebruikte TEO-ontwerp en de samenstelling van gemeenschappen van organismen in het water.

4.3 VOEDSELWEB INTERACTIES

Het instandhouden van organismen in het voedselweb is belangrijk om niet enkel helder, maar ook ecologisch gezond water te houden. Zoöplankton is een treffend voorbeeld van een organismegroep die verschillend reageert op afkoeling en passage van de TEO-installatie. In het geval van passage loopt de planktivore vis, de vis die zoöplankton opeet, mogelijk direct schade op in de TEO-installatie. Hierdoor is er minder vis, minder predatie op zoöplankton en dus meer zoöplankton. Bij afkoeling is het juist de voedselbron van het zoöplankton, het phytoplankton, die een verandering in voedselkwaliteit laat zien. Hierdoor wordt voedsel voor zoöplankton voedzamer bij lagere temperaturen, wat leidt tot een grotere groei van zoöplankton. Deze verschillende mechanismen worden aangeduid als *bottom-up* (gedreven

door de onderkant van het voedselweb, temperatuurseffecten van TEO) en *top-down* (gedreven door hogere organismen in het voedselweb, passage van TEO). Dergelijke verschillende mechanismen zijn belangrijk voor het begrip van hoe de TEO-installatie de ecologie gaat beïnvloeden. Het beperken van de directe invloed van TEO op jonge vissen hangt sterk samen met de kracht waarmee water aangezogen wordt (zie Clough et al., 2004).

Het sturen op ontwikkeling van vegetatie, fytoplankton en een gezonde zoöplankton gemeenschap hangt samen met de mate van koeling van het oppervlaktewater. Ook zijn de randvoorwaarden van het watersysteem van belang. Voedselkwaliteit van fytoplankton is sterk afhankelijk van de ratio tussen stikstof en fosfor waarmee het water gevoed wordt (Ger et al., 2014). Lichtbeschikbaarheid is sterk bepalend voor de ontwikkeling van planten, waarmee de aanwezigheid van ondiepe zones in het meer bepalend kan zijn voor het wel of niet ontwikkelen van vegetatie (Penning et al., 2008). Om het ontwerp van een TEO-installatie voor de ecologische uitkomst optimaal te krijgen zal dus altijd de context van het waterlichaam meegenomen moeten worden (bijv. mate van belasting, diepteprofiel, verversing).

4.4 RELEVANTIE VOOR ANDERE WATEREN

Deze studie heeft de focus gelegd op een klein ondiep meer zonder externe aanvoer van water. Daarmee is een systeem getest dat sterk drijft op lokale ecologische processen, en amper wordt gedreven door invloeden van buiten (m.u.v. weer en nutriëntenbelasting). De verwachting is dat een dergelijk systeem zeer gevoelig is voor zowel afkoeling als passage van de TEO-installatie. Er kan namelijk thermische kortsluiting – inname van reeds afgekoeld water - plaatsvinden door het beperkte volume oppervlaktewater. Ook is er geen aanvoer van organismen van buitenaf om mogelijke sterfte van micro-organismen te compenseren. De resultaten van deze studie dienen beschouwd te worden in deze context. Systemen waarbij extern transport heel bepalend is (beken, rivieren) zullen niet gedomineerd worden door de lokale ecologische processen, maar ook door processen die bovenstrooms plaatsvinden. Doordat de externe aanvoer van zowel warmte als organismen groter is, mag verwacht worden dat effecten minder sterk zijn. Voor wateren met een relatief grote verblijftijd van het water (dagen tot maanden) mag verwacht worden dat de effecten zoals hier beschreven in generieke termen standhouden. Echter, elk systeem is specifiek en heeft zijn eigen randvoorwaarden. Hierdoor zullen kritische grenzen van helder naar troebel sterk verschillend zijn. De resultaten van deze studie dienen dan ook niet als leidend gezien te worden, maar het concept dat een helder systeem anders reageert op temperatuur en passage van de TEO-installatie dan een troebel systeem wel. Hierbij geldt dat in een troebel systeem de mogelijke schade aan micro-organismen veelal leidt tot meer zwevend stof, maar minder algen en bij grote mate innamedebieten planten mogelijk tot ontwikkeling kunnen komen. Daling van temperatuur laat altijd een verlaging van de primaire productie zien, maar die is vooral negatief in een heldere toestand, waarbij vegetatie verdwijnt en het water troebel wordt. In een troebel systeem kan de afkoeling positief uitpakken voor de voedselkwaliteit voor zoöplankton, wat een wat helderder systeem tot gevolg kan hebben. Het gevolg is dat temperatuureffecten vooral bepalend zijn bij een lage nutriëntenbelasting, terwijl effecten van passage van de TEO-installatie belangrijker worden bij hogere belastingen. Bij relatief kleine onttrekkingen lijkt het aannemelijk dat effecten duidelijker optreden naarmate het innamedebiet groter wordt (bij wat hogere belastingen). Dit omdat er bij kleinere onttrekkingen weinig afkoeling plaats vindt op de schaal van het waterlichaam en de mogelijke schade door passage van de TEO-installatie een grotere rol speelt in watersystemen met meer ecosysteem productiviteit.

4.5 METEN IN HET VELD

De huidige studie biedt inzicht in processen en mechanismen die aan de basis liggen van de ecologische veranderingen onder invloed van de ingebruikname van een TEO-installatie. Het model biedt daarmee een waardevol denkkader, maar heeft ook validatie en kalibratie met velddata. Metingen aan ecosystemen onder invloed van TEO-installaties in het veld kunnen twee doelen dienen: 1) een onderzoeksdoel gericht op het beter begrijpen van de interactie tussen het technische TEO-systeem en het ecologische watersysteem en 2) een beleidsmatig doel gericht op het monitoren van het voldoen en blijven voldoen aan de gestelde ecologische toestand. Beide doelen zijn gebaat bij een goede meting van de ecologische toestand voor en na de ingebruikname. Hiervoor zijn idealiter meerdere jaren metingen voorafgaand aan de inzet van de TEO beschikbaar, gezien het effect van verschillende weerjaren. Na de ingebruikname zal de TEO gedurende meerdere jaren gevolgd moeten worden, gezien dat kortetermijn- en langetermijneffecten sterk verschillend kunnen zijn. Wat er gemeten dient te worden is een afweging tussen de gestelde wettelijke of beleidsmatige doelen voor het water (bijv. Natura2000 doelsoorten, KRW maatlaten) en kosten die gemoeid zijn met de monitoring.

Ecosysteem-geïntegreerde metingen zoals primaire productie bieden wellicht een uitkomst. Ontwikkelingen in hoogfrequente sensortechnologie en modellen laten het toe om het ecosysteemmetabolisme af te leiden met hoogfrequente zuurstofmetingen in het veld (Staehr et al, 2010). Hiermee wordt inzicht verkregen in bruto primaire productie, ecosysteem respiratie en netto ecosysteem productie. Dit zijn indicatoren die een integraal beeld bieden van veranderingen in het watersysteem zonder dat individuele groepen gemeten hoeven te worden. Primaire productie is in deze studie de gebruikte indicator, en deze laat duidelijk verschillen zien bij de overgang van helder naar troebel water, maar is ook gevoelig voor veranderingen in watertemperatuur en innamedebiet. Dergelijke uit meetgegevens afgeleide eigenschappen die de totaalrespons van een meer reflecteren zouden een waardevolle monitoring kunnen zijn om veranderingen in het veld vroeg te detecteren.

Deze studie laat zien dat een simpele respons in toestand van een organismegroep (meer zoöplankton) in relatie tot TEO voort kan komen uit verschillende processen (voedselkwaliteit, predatie). Dergelijke processen zijn in een modelsetting te herleiden omdat alle mechanismen en de data bekend zijn, maar zullen in het veld nooit allemaal gemeten kunnen worden. Voor het vergroten van begrip over de impact van TEO op ecologie is een koppeling tussen veldmetingen en modellen dan ook van groot belang. In de aanpak van de watersysteemanalyse is dit verankerd (zie bijvoorbeeld de Ecologische Sleutel Factoren systematiek van STOWA). Metingen zullen dus niet enkel gericht moeten zijn op de huidige toestand van het water, maar ook op de randvoorwaarden van deze toestand (bijv. water- en stofstromen, weer).

4.6 SPECIFIEK VERVOLGONDERZOEK

Om meer en beter inzicht te krijgen in de lokale impact van TEO-installaties op ecologie in wateren geeft deze studie een aantal duidelijke aanknopingspunten. De grootste onzekerheid binnen dit onderzoek is de impact van de installatie op mortaliteit van organismen. De gemaakte aannames in mortaliteit, variërend van 15 tot 21%, dienen betrouwbaarder te worden afgeleid door metingen aan actieve TEO-installaties, zodat specifieke mortaliteit kan worden opgegeven aan het model. Daarnaast gaat het model nu uit van een vaste sterfte per organismegroep over het volledige TEO-systeem, terwijl in de praktijk verschillende onder-

delen van het technische systeem op verschillende wijze kunnen leiden tot stress, mortaliteit en schade aan organismen. Voor verschillende componenten van de installatie vaststellen wat de sterfte is, geeft inzicht in welke onderdelen technische aanpassing nodig hebben ten behoeve van de ecologie. Hiermee wordt meer natuur-inclusief ontwerp van TEO-installaties mogelijk. Verschillende sterfte is in het huidige model al door te rekenen, maar de informatie over hoe groot de sterfte is voor verschillende organismen ontbreekt. Dergelijke proeven zijn het meest haalbaar om uit te voeren in samenwerking met de bedrijven die TEO-installaties produceren en installeren, zowel in gecontroleerde (lab) als ongecontroleerde condities (veld). Lab experimenten met bekende hoeveelheden van organismen die verschillende fysieke (druk, stroming) en thermische krachten moeten weerstaan zijn goed uitvoerbaar, waarbij de krachten afgeleid kunnen worden uit verschillende ontwerpen van TEO-installaties. Veldexperimenten zijn gelimiteerd tot de in gebruik zijnde TEO-installaties in specifieke wateren. Hierbij is er weinig controle op de ingenomen organismen, en ook minder variatie mogelijk in ontwerp van de installatie. Echter, de installaties hebben wel een breed scala aan mogelijke organismen die ingenomen worden, en ecologische effecten op het watersysteem kunnen in beeld gebracht worden. Door de verbeterde waarden voor sterfte uit lab- en veldproeven te combineren met modellen van specifieke TEO- en watersystemen kunnen de modellen gevalideerd worden aan de hand van veldmetingen. Als modellen in staat zijn om de waargenomen effecten te reproduceren kunnen ze meer generiek worden toegepast.

4.7 RELEVANTIE VOOR BELEID

Beleid op het gebied van TEO-installaties raakt meerdere aspecten. In essentie betreft het een afweging tussen ecologische doelen, overige gebruiksfuncties en opwekking van groene energie. Zowel de KRW- als Natura2000-wetgeving bevatten variaties op behoud of herstel van ecologische kwaliteit, welke op landelijk niveau verankerd is in de afname van habitat (N2000, Habitatrichtlijn) of afname van soorten (N2000, Vogelrichtlijn) en de afname van EKR scores (KRW). Geen afname van ecologische kwaliteit betekent vrij vertaald dat als het systeem in een goede ecologische toestand is, het systeem daarin dient te blijven. Dus een helder, plantenrijk water blijft een helder plantenrijk water met geen tot weinig verandering in de hoeveelheden van de verschillende ecologische groepen. Kijkend naar de resultaten van deze modelstudie, in een klein meer, is een criterium van 'geen verandering' niet haalbaar wanneer forse temperatuurverlagingen optreden (>4 graden) en/of hoge innamedebieten (150m³/uur). Lagere innamedebieten van meer dan 75m³/uur leiden tot ecologische veranderingen, maar deze lijken algemeen gezien eerder een positief dan een negatief effect te hebben. Wel relevant is om hierbij te zorgen voor beperkte schade voor grotere organismen met langzamere groei/reproductie, zoals vissen. Beperking van innamedebiet, maar ook instroomsnelheden zijn daarbij relevant. Ook dienen innamedebieten beschouwd te worden in relatie tot het volume van het meer en de verversing van het water in het meer.

Kritische grenzen, wanneer een meer omslaat van helder naar troebel en weer terug, liggen aan de basis van het denkkader van de watersysteemanalyse. Wanneer de nutriëntenbelasting (actuele belasting) van een water onder de kritische belasting zit is deze helder, de wenselijke toestand. Om kritische grenzen af te leiden worden watersysteemanalyses uitgevoerd. Deze watersysteemanalyses vormen veelal de basis voor het nemen van maatregelen om dichterbij het behalen van de KRW doelen te komen. TEO-installaties beïnvloeden de kritische grenzen van een watersysteem. Bij een beperkte koeling (<4 °C) is de kritische grens van helder naar troebel nooit lager dan die in een situatie zonder afkoeling door TEO. Het

water is dus even robuust of robuuster tegen een omslag naar een troebele toestand dan zonder de TEO-installatie. Dat betekent dat het plaatsen van de TEO verantwoord is wanneer de actuele nutriëntenbelasting van het watersysteem onder de kritische grens van het watersysteem zonder TEO ligt. Met deze aanpak wordt ook een veiligheidsmarge voor de mogelijk positieve effecten van filters ingebouwd, zijnde de verschuiving van de kritische grenzen bij toenemende inname. Gebruik van een dergelijk criterium voor toestaan van een TEO met beperkte koeling zou als volgt werken. Een kritische grens en actuele belasting voor het waterlichaam waarop de TEO geplaatst gaat worden zijn bekend uit een watersysteemanalyse. De actuele belasting van het water ligt onder de kritische grens, het water is dus in een heldere toestand. De TEO-installatie koelt niet meer dan 4 °C. De koelingseffecten van de TEO zullen niet tot een verschuiving naar een troebele toestand leiden. Vervolgens rest dan nog het vaststellen van een criterium voor de toelaatbare schade door filters. Hierbij dienen debieten niet al te hoog te worden ten opzichte van het watersysteem en de regeneratiesnelheid van kwetsbare organismen.

Wanneer een systeem niet in een goede ecologische toestand is of deze binnen bereik is, kan een TEO-installatie wellicht positief bijdragen aan het behalen van ecologische waterkwaliteitsdoelen. In het geval dat een water momenteel of te voorzien niet voldoet aan een goede ecologische kwaliteit of met redelijke zekerheid niet gaat voldoen in de toekomst is het nemen van maatregelen een noodzaak om de waterkwaliteit te verbeteren. In een dergelijk geval is de vraag of er in het gebied behoefte is aan warmtewinning middels TEO. Zo ja, dan kan de TEO-installatie gelijkend aan andere waterkwaliteitsmaatregelen behandeld worden in een analyse en plan voor herstel van de waterkwaliteit. De TEO-installatie zal hierin dan afgewogen dienen te worden ten opzichte van andere kansrijke maatregelen voor systeemherstel. Een kader voor de afweging van de te nemen van herstelmaatregelen is onderdeel van de implementatie van zowel de natuurdoelanalyses (landschaps-ecologische systeemanalyse) als de stroomgebiedsbeheerplannen (watersysteemanalyse).

4.8 GENERIEK VERVOLGONDERZOEK: EEN INTEGRALE AANPAK

De conclusies en implicaties van deze studie zijn gericht op lokale ecologische impact op het oppervlaktewater. De toepassing van TEO in oppervlaktewateren in Nederland is echter geen puur lokale ecologische afweging. Immers, wanneer we geen energietransitie doormaken zal de ecologische kwaliteit wereldwijd sterk afnemen door klimaatverandering. Daarbij is ook de toepassing in lokale wateren niet vrij van impact op nabijgelegen ecosystemen. Een groot aantal aquatische organismen heeft ook terrestrische levensstadia, en door water te koelen zou er een potentiële mismatch kunnen ontstaan tussen organismen en hun habitat of voedselbronnen. Daarbij dient het aquatische milieu ook als een voedingsbron voor andere organismen zoals vogels. Dus zowel lokaal, in de omgeving als wereldwijd zijn er mogelijk positieve en negatieve impacts op ecologie door het al dan niet toepassen van TEO. Zeker als er opschaling van het aantal TEO-installaties komt. Deze impacts zullen integraal afgewogen moeten worden om een verantwoorde beslissing te nemen over de inpassing van TEO in Nederlandse oppervlaktewateren. Hiervoor is van essentieel belang dat een dergelijke afweging niet enkel het ecologische systeem beschouwt. Immers, TEO heeft ook impact op mensen, het sociale systeem, zowel doordat sommige ecologische diensten wellicht niet goed combineerbaar zijn met TEO (bijvoorbeeld zwemmen) maar ook doordat de toegang tot thermische energie via TEO een uitkomst kan bieden voor hun duurzame energievraag. Ook het TEO-systeem zelf, het technologische systeem, speelt een belangrijke rol aangezien de techniek volop in ontwikkeling is en meer natuur-inclusief design hier tot de oplossingen

behoort. De koppeling tussen sociale-ecologische-technologische systemen (McPhearson et al., 2022) is van groot belang om een integraal begrip te ontwikkelen van de toepassing van TEO in het halen van zowel klimaat- als waterkwaliteitsdoelen. Dit vraagt om onderzoek dat verschillende disciplines en stakeholders verbindt en verschillende ruimtelijke schaalniveaus beschouwt. Dit draagt bij aan een maximalisering van de synergie tussen duurzame energie en gezond water voor mens en natuur.

REFERENTIES

- Barko, J. W., & Smart, R. M. (1981). Comparative influences of light and temperature on the growth and metabolism of selected submersed freshwater macrophytes. *Ecological monographs*, 51(2), 219-236.
- Calero, S., Colom, W., & Rodrigo, M. A. (2015). The phenology of wetland submerged macrophytes related to environmental factors. *Limnetica*, 34(2), 425-438.
- Carr, G. M., Duthie, H. C., & Taylor, W. D. (1997). Models of aquatic plant productivity: a review of the factors that influence growth. *Aquatic Botany*, 59(3-4), 195-215.
- Clough, S., Lee-Elliott, I., Turnpenny, A., Holden, S., & Hinks, C. (2004). Swimming speeds in fish: Phase 2. Reports. https://scholarworks.umass.edu/fishpassage_reports/674
- De Jong, A., Dionisio Pires, M. (2022). Effecten van filters en warmtewisselaars op het aquatische ecosysteem een literatuurstudie. Rapport STOWA 2022-38. Uitgevoerd onder WarmingUp.
- De Groot-Wallast, I. Vlijm, R. (2022). Modelleren van verspreiding van koude in oppervlaktewater door TEO-installaties (een aanbeveling van WarmingUp)
- De Fockert, A., Harezlak, V. (2022). Ontwerphandreiking Aquathermie-TEO. WarmingUp werkpakket 3C. Rapport Deltares, uitgevoerd onder WarmingUP.
- Fernandes, I., Uzun, B., Pascoal, C., & Cássio, F. (2009). Responses of aquatic fungal communities on leaf litter to temperature-change events. *International Review of Hydrobiology*, 94(4), 410-418.
- Ger, K. A., Hansson, L. A., & Lürling, M. (2014). Understanding cyanobacteria-zooplankton interactions in a more eutrophic world. *Freshwater Biology*, 59(9), 1783-1798.
- Gounand, I. E. Harvey, C. J. Little, and F. Altermatt, (2022). “Meta-Ecosystems 2.0: Rooting the Theory into the Field,” *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 33, no. 1, pp. 36–46, doi: 10.1016/j.tree.2017.10.006.
- Harezlak, V., (2021). Effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van oppervlaktewater-systemen. Rapport Deltares, uitgevoerd onder WarmingUP.
- Hülsmann, S., Sušnik, J., Rinke, K., Langan, S., van Wijk, D., Janssen, A. B., & Mooij, W. M. (2019). Integrated modelling and management of water resources: The ecosystem perspective on the nexus approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 40, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.07.003>

Janse, J. H., & van Liere, L. (1995). PCLake: A modelling tool for the evaluation of lake restoration scenarios. *Water Science and Technology*, 31(8), 371–374. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00392-Z](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00392-Z)

Janssen, A. B. G., Arhonditsis, G. B., Beusen, A., Bolding, K., Bruce, L., Bruggeman, J., Couture, R.-M., Downing, A. S., Alex Elliott, J., Frassl, M. A., Gal, G., Gerla, D. J., Hipsey, M. R., Hu, F., Ives, S. C., Janse, J. H., Jeppesen, E., Jöhnk, K. D., Kneis, D., ... Mooij, W. M. (2015). Exploring, exploiting and evolving diversity of aquatic ecosystem models: A community perspective. *Aquatic Ecology*, 49(4), 513–548. <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9544-1>

Janssen, A. B. G., Teurlinckx, S., Beusen, A. H. W., Huijbregts, M. A. J., Rost, J., Schipper, A. M., Seelen, L. M. S., Mooij, W. M., & Janse, J. H. (2019). PCLake+: A process-based ecological model to assess the trophic state of stratified and non-stratified freshwater lakes worldwide. *Ecological Modelling*, 396, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.006>

Janssen, A. B., van Wijk, D., van Gerven, L. P., Bakker, E. S., Brederveld, R. J., DeAngelis, D. L., .. & Mooij, W. M. (2019). Success of lake restoration depends on spatial aspects of nutrient loading and hydrology. *Science of the Total Environment*, 679, 248-259.

Kuiper, J. J., Verhofstad, M. J., Louwers, E. L., Bakker, E. S., Brederveld, R. J., van Gerven, L. P., .. & Mooij, W. M. (2017). Mowing submerged macrophytes in shallow lakes with alternative stable states: battling the good guys?. *Environmental Management*, 59, 619-634.

Van der Linden, A. en Harezlak, V., (2023) Ecologische modellering effecten koudelozingen door TEO-installaties, Deltares

McPhearson, T., Cook, E. M., Berbés-Blázquez, M., Cheng, C., Grimm, N. B., Andersson, E., Barbosa, O., Chandler, D. G., Chang, H., Chester, M. V., Childers, D. L., Elser, S. R., Frantzeskaki, N., Grabowski, Z., Groffman, P., Hale, R. L., Iwaniec, D. M., Kabisch, N., Kennedy, C., ... Troxler, T. G. (2022). A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services. *One Earth*, 5(5), 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.007>

Mooij, W. M., van Wijk, D., Beusen, A. H., Brederveld, R. J., Chang, M., Cobben, M. M., DeAngelis, D. L., Downing, A. S., Green, P., Gsell, A. S., Huttunen, I., Janse, J. H., Janssen, A. B., Hengeveld, G. M., Kong, X., Kramer, L., Kuiper, J. J., Langan, S. J., Nolet, B. A., ... Teurlinckx, S. (2019). Modeling water quality in the Anthropocene: Directions for the next-generation aquatic ecosystem models. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.10.012>

Penning, W. E., Mjelde, M., Dudley, B., Hellsten, S., Hanganu, J., Kolada, A., .. & Ecke, F. (2008). Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes. *Aquatic ecology*, 42, 237-251.

Scheffer, M., Szabó, S., Gragnani, A., van Nes, E. H., Rinaldi, S., Kautsky, N., Norberg, J., Roijackers, R. M. M., & Franken, R. J. M. (2003). Floating plant dominance as a stable state. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(7), 4040–4045. <https://doi.org/10.1073/pnas.0737918100>

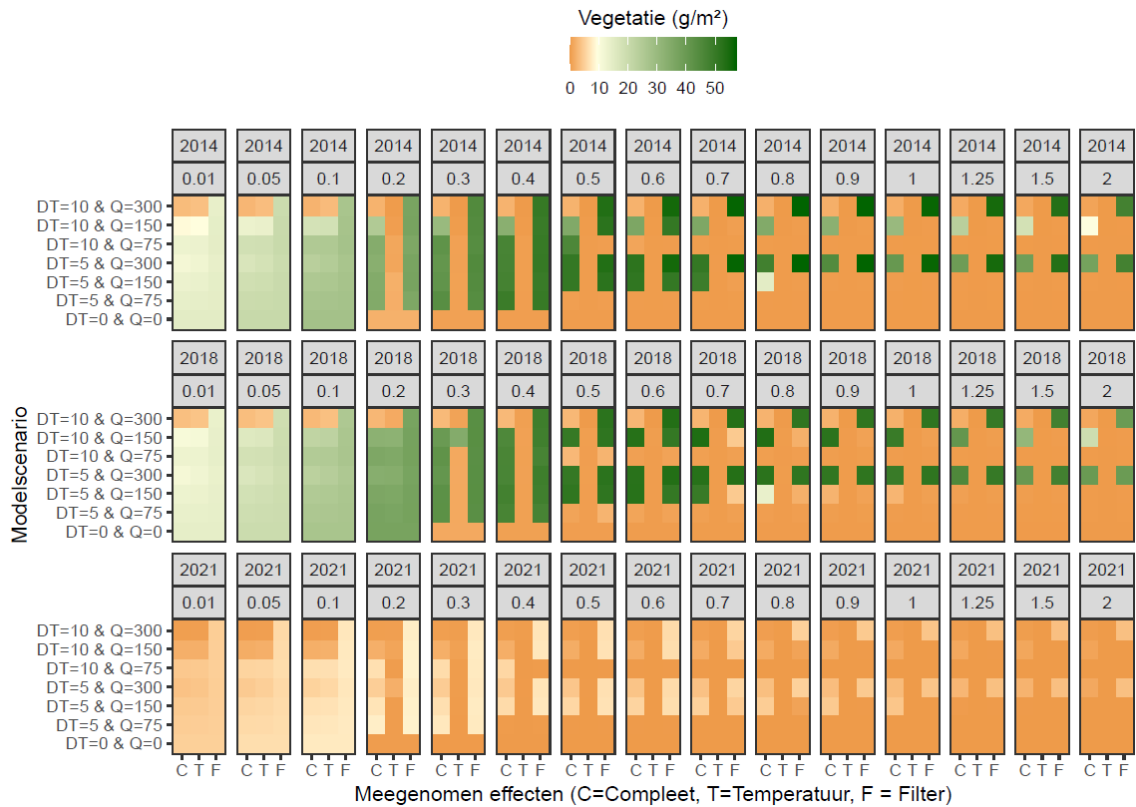
Staeher, P. A., Bade, D., Van de Bogert, M. C., Koch, G. R., Williamson, C., Hanson, P., Cole, J. J., & Kratz, T. (2010). Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(11), 628 – 644. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.0628>

van der Meide, M., Harpprecht, C., Northey, S., Yang, Y., & Steubing, B. (2022). Effects of the energy transition on environmental impacts of cobalt supply: A prospective life cycle assessment study on future supply of cobalt. *Journal of Industrial Ecology*, 26(5), 1631-1645.

APPENDIX A

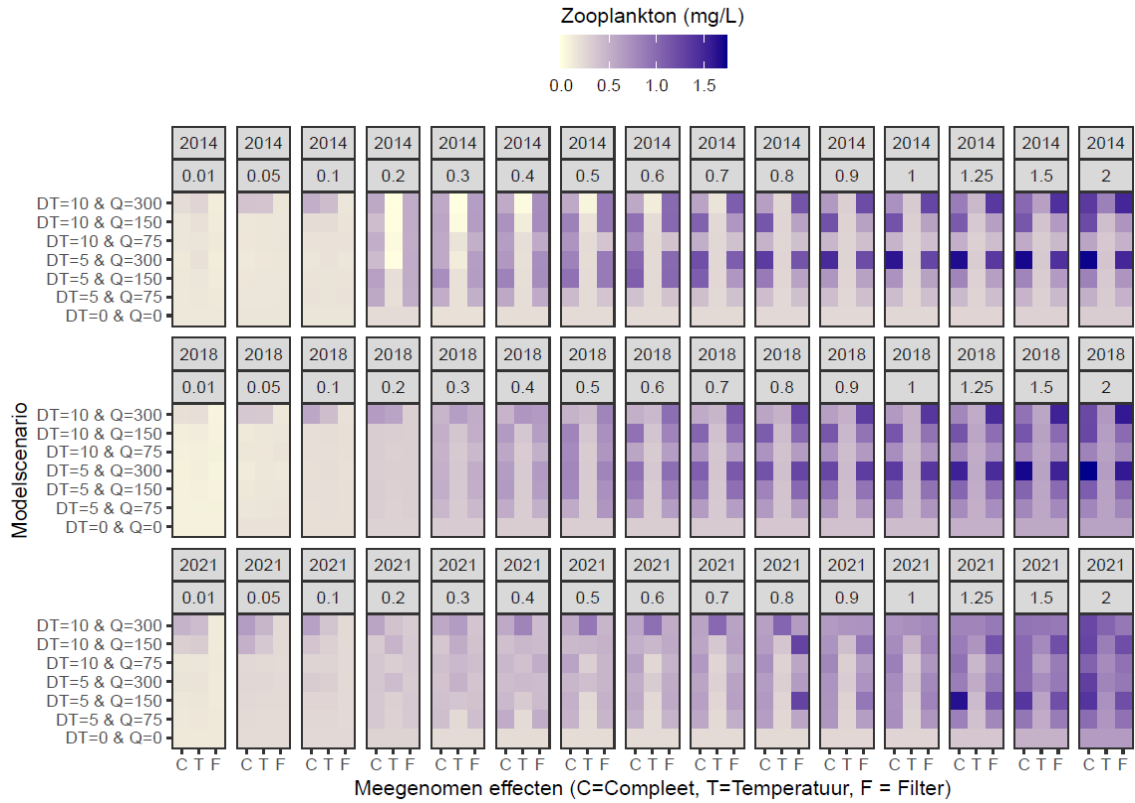
SCENARIO PLOTS VANUIT TROEBELE STARTCONDITIES

FIGUUR 14 GRIDS MET DAARIN DE VEGETATIEBIOMASSA (KLEUR) VOOR VERSCHILLENDE WEERJAREN (RIJEN VAN PANELEN), VERSCHILLENDE NUTRIËNTBELASTINGEN (KOLOMMEN VAN PANELEN, IN MGP/M²/DAG). VOOR ELK PANEEL ZIJN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S WEERGEGEVEN (DT & Q) MET ONDERAAN DE REFERENTIESITUATIE (DT=0 & Q=0) OP DE Y AS. OP DE X AS STAAN PER PANEEL DRIE RIJEN MET ZOWEL DE EFFECTEN VAN FILTERS ALS TEMPERatuur (C), DE EFFECTEN VAN ALLEEN TEMPERatuur (T) EN DE EFFECTEN VAN ENKEL FILTERS (F). DE WEERGEGEVEN WAARDEN BETREFFEN ZOMERGEMIDDELDEN WAARDEN VAN HET LAATSTE JAAR VAN EEN 30-JARIGE MODELBEREKENING VANUIT EEN TROEBELE STARTCONDITIE



FIGUUR 15

GRIDS MET DAARIN DE ZOOPLANKTON BIOMASSA (KLEUR) VOOR VERSCHILLENDE WEERJAREN (RIJEN VAN PANELEN), VERSCHILLENDE NUTRIËNTENBELASTINGEN (KOLOMMEN VAN PANELEN, IN MGP/M²/DAG). VOOR ELK PANEEL ZIJN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S WEERGEGEVEN (DT & Q) MET ONDERAAN DE REFERENTIESITUATIE (DT=0 & Q=0) OP DE Y AS. OP DE X AS STAAN PER PANEEL DRIE RIJEN MET ZOWEL DE EFFECTEN VAN FILTERS ALS TEMPERATUUR (C), DE EFFECTEN VAN ALLEEN TEMPERATUUR (T) EN DE EFFECTEN VAN ENKEL FILTERS (F). DE WEERGEGEVEN WAARDEN BETREFFEN ZOMERGEMIDDELDEN WAARDEN VAN HET LAATSTE JAAR VAN EEN 30-JARIGE MODELBEREKENING VANUIT EEN TROEBELE STARTCONDITIE



FIGUUR 16 GRIDS MET DAARIN DE RELatieve PRIMAIRE PRODUCTIE T.O.V. DE REFERENTIESITUATIE (KLEUR) VOOR VERSCHILLENDE WEERJAREN (RIJEN VAN PANELEN), VERSCHILLENDE NUTRIËNTENBELASTINGEN (KOLOMMEN VAN PANELEN, IN MGP/M²/DAG). VOOR ELK PANEEL ZIJN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S WEERGEGEVEN (DT & Q) MET ONDERAAN DE REFERENTIESITUATIE (DT=0 & Q=0) OP DE Y AS. OP DE X AS STAAN PER PANEEL DRIE RIJEN MET ZOWEL DE EFFECTEN VAN FILTERS ALS TEMPERATUUR (C), DE EFFECTEN VAN ALLEEN TEMPERATUUR (T) EN DE EFFECTEN VAN ENKEL FILTERS (F). DE WEERGEGEVEN WAARDEN BETREFFEN ZOMERGEMIDDELDEN WAARDEN VAN HET LAATSTE JAAR VAN EEN 30-JARIGE MODELBEREKENING VANUIT EEN TROEBELE STARTCONDITIE

