

Blauwalgen in het ecosysteem van het Volkerak-Zoommeer



Blauwalgen in het ecosysteem van het Volkerak-Zoommeer

Auteur(s)

Miguel Dionisio Pires

Blauwalgen in het ecosysteem van het Volkerak-Zoommeer

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Wouter Quist (ZD), Gerben Dekker (WVL)
Referenties	KPP Zuidwestelijke Delta (WR08)
Trefwoorden	Volkerak-Zoommeer, Microcystis, blauwalg, voedselweb, nutriënten, biodiversiteit

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	30-11-2021
Projectnummer	11206834-000
Document ID	11206834-000-ZKS-0024
Pagina's	28
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Miguel Dionisio Pires	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Miguel Dionisio Pires	Tineke Troost	Myra van der Meulen	
				

Samenvatting

In het Volkerak-Zoommeer zijn de chlorofylconcentraties in het water sinds 2008 afgenomen. De laatste jaren is er anekdotisch bewijs dat er weer een toename is, maar dat is niet statistisch aangetoond vanwege beperkte data en natuurlijke variatie. Desondanks zijn er ook in de recentere jaren problemen met blauwalgen geconstateerd, met name in relatie tot recreatie en innamestops door waterschappen. Of blauwalgen een negatief effect op het voedselweb van het Volkerak-Zoommeer hebben is onduidelijk.

In deze studie is gekeken of blauwalgen, en *Microcystis* in het bijzonder, mogelijk een effect hebben op het voedselweb in het Volkerak-Zoommeer door specifiek te zoeken naar literatuur over interacties tussen blauwalgen en biota die in het Volkerak-Zoommeer voorkomen. Daarnaast is er in dit rapport aandacht voor handelingsperspectief ten aanzien van het voorkomen van blauwalgen. Deze richt zich vooral op de nutriënten.

De conclusies van het rapport zijn:

- Uit de literatuur is bekend dat blauwalgen, inclusief *Microcystis*, nadelige effecten (vooral op overleving en reproductie) op de verschillende componenten van een ecosysteem kunnen hebben. Dat gaat door middel van toxineproductie, competitie om nutriënten en licht, vertroebeling van water, ontstaan van zuurstofloosheid, lage voedselkwaliteit en oneetbaarheid van kolonies.
- Ook voor veel in het Volkerak-Zoommeer voorkomende soorten zijn er in de literatuur negatieve effecten van blauwalgen beschreven. In het Volkerak-Zoommeer systeem zelf zijn vooralsnog geen aanwijzingen dat blauwalgen het voedselweb of het ecosysteem negatief beïnvloeden. Aanwijzingen zoals vis- of vogelsterfte, slecht doorzicht en ontbreken van ondergedoken waterplanten komen in het Volkerak-Zoommeer niet voor. De visstand is afgenomen, maar dat komt o.a. door een afname in nutriënten. Waterplanten, zoals *Zannichellia*, nemen toe terwijl dit soorten zijn die, vanwege het feit dat ze permanent ondergedoken zijn, niet zouden voorkomen bij hoge blauwalgenbiomassa. Het lijkt erop dat het effect van blauwalgen op de ecologie van het Volkerak-Zoommeer beperkt is maar nader onderzoek hiernaar is hiervoor nodig.
- Om beter inzicht te krijgen, zouden de volgende activiteiten uitgevoerd kunnen worden:
 - Blauwalgtoxines in het veld meten
 - Voedselwebcomponenten zoals het zoöplankton weer in Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands (MWTL) opnemen
 - Fitheid van soorten zoals zoöplankton, macrofauna en vis bepalen door middel van een combinatie van veld- en laboratoriumonderzoek.
- Ortho-fosfaat en opgelost stikstof in het Volkerak-Zoommeer zouden respectievelijk lager dan 0,050 mg P/L en 0,35 mg N/L moeten zijn om de kans op dominantie door *Microcystis* zo klein mogelijk te maken. Met name ortho-fosfaat is van belang. De huidige voorkomende concentraties balanceren soms rond deze grenzen.

- Uit de nutriëntenbalans (Weeber et al., 2021) blijkt dat de rivier de Dintel voor stikstof en fosfaat de grootste bron is, gevolgd door waterinlaat via de Volkeraksluizen. Het is niet bekend of met maatregelen in de Dintel de kritische nutriëntenconcentratie gehaald kan worden. Reductie kan via verlagen van de emissies aan de bron, of door het verlagen (of veranderen van de timing) van de hoeveelheid in te laten water.
- De bijdrage van vogels aan de nutriëntenconcentraties in het Volkerak-Zoommeer is waarschijnlijk niet significant.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Beschrijving ecosysteem Volkerak-Zoommeer	9
3	Effecten blauwalgen op biota	12
3.1	Effecten op fytoplankton	14
3.2	Effecten op zoöplankton	14
3.3	Effecten op benthische evertibraten	14
3.4	Effecten op macrofyten	16
3.5	Effecten op vis	16
3.6	Effecten op vogels	16
3.7	Effecten op het functioneren van het Volkerak-Zoommeer ecosysteem	16
4	Handelingsperspectief	18
4.1	Eerder gedefinieerde maatregelen	18
4.2	Nutriënten	18
4.2.1	Belangrijkste nutriëntenbronnen	20
4.2.2	Nutriëntenreductie	21
5	Conclusies en advies	23
	Referenties	25

1 Inleiding

Het Volkerak-Zoommeer kampt al sinds de jaren negentig met jaarlijks terugkerende blauwalgenbloeien. Dit resulteerde in drijfvlagen die zorgen voor stankoverlast, zuurstofloze situaties en de productie van toxines. Tezamen leidde dit tot negatieve effecten op het ecosysteem en verschillende functies, zoals recreatie en landbouw, van het Volkerak-Zoommeer. Sinds ongeveer 2008 zijn de chlorofylconcentraties flink en structureel afgenomen, vermoedelijk door de intrede van quaggamosselen aangevuld met een toename van waterplanten (De Vries & Postma 2013). De laatste jaren is er anekdotisch bewijs dat er weer een toename is, maar uit de beschikbare metingen is dat (nog) niet statistisch aangetoond (Weeber et al. 2018). Desondanks zijn er ook in de recentere jaren nog steeds problemen met blauwalgen met name in relatie tot recreatie en innamestops door waterschappen ([Omroep Zeeland 2019](#), [Telegraaf 2020](#), zie ook Figuur 1.1).



Figuur 1.1 Ondanks afgenomen chlorofylconcentraties is er nog steeds sprake van blauwalgenoverlast in het Volkerak-Zoommeer voor recreatie en waterinname.

Smith et al. (2016) noemen puntsgewijs de interacties tussen blauwalgen en andere componenten van het ecosysteem vanuit de verschillende stadia van blauwalgen. Effecten van blauwalgen op biota worden vooral beschreven vanuit de toxines. De effecten die in Smith et al. (2016) genoemd worden komen hier verderop uitgebreider aan bod.

Een overmaat aan blauwalgen ontstaat door een combinatie van factoren. In de eerste plaats spelen hoge nutriëntenconcentraties, vooral stikstof en fosfaat, een belangrijke rol. De verschillende (gereduceerde) vormen waarin deze stoffen in het water voorkomen, zoals NH_4 , zijn belangrijke bronnen voor blauwalgen (Paerl 2014). Ook temperatuur is een belangrijke factor. Blauwalgen groeien harder dan ander fytoplankton bij hogere temperaturen (Paerl 2018). Tenslotte zijn blauwalgen zeer efficiënt in het opnemen en vastleggen van koolstof waardoor ze tijdens lage CO_2 concentraties ander fytoplankton kunnen wegconcurreren (Huisman et al. 2018).

Of de blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer een negatief effect op de in het systeem aanwezige biota hebben is nog onduidelijk. Behalve een sterke aanwijzing dat vogels in 2002 overleden zijn aan blootstelling, is er geen sterfte van biota door blauwalgen bekend. In deze studie is daarom gekeken of blauwalgen mogelijk een effect hebben op het voedselweb in het Volkerak-Zoommeer door specifiek te zoeken naar literatuur over interacties tussen blauwalgen en biota, die ook in het Volkerak-Zoommeer voorkomen. Er bestaan verschillende soorten/geslachten van blauwalgen, maar in het Volkerak-Zoommeer komt

vooral het geslacht *Microcystis* voor. Deze studie focust op *Microcystis*, waarvoor hieronder dit geslacht kort omschreven zal worden.

De vraag in deze studie luidt: is er een effect van blauwalgen, en *Microcystis* in het bijzonder, op het ecosysteem van het Volkerak-Zoommeer?

Met als onderliggende vraag: Welk handelingsperspectief is er om iets aan blauwalgen te doen in het Volkerak-Zoommeer?

Microcystis

Vooraf in eutrofe meren en plassen kan deze cyanobacterie gaan domineren en een plaag worden doordat het dikke drijfvlagen vormt. De cellen van *Microcystis* zijn rond en groeien in kolonies met een slijm laag eromheen (Verspagen 2006). Deze cellen bevatten gasvacuoles waarmee ze hun drijfvermogen kunnen regelen (Ibelings et al. 1991). In stilstaand water accumuleren *Microcystis*-kolonies aan de oppervlakte en vormen zodoende drijfvlagen. *Microcystis*, als kolonievormende soort benut zijn drijfvermogen op een meer dynamische wijze dan veel andere cyanobacteriën (Thomas & Walsby 1985). In periodes met minder wind (en voldoende sterke instraling) wordt de mengdiepte van de waterkolom beperkt tot een oppervlakkige laag als gevolg van het optreden van microstratificatie (gelaagdheid in het water die overdag optreedt bij weinig wind tijdens warme zomerdagen en 's nachts weer verdwijnt door afkoeling). De *Microcystis* populatie, met zijn hoge drijfvermogen en stijgsnelheid, reageert direct en concentreert zich in deze oppervlakkige laag. Het netto resultaat is dat *Microcystis* in vergelijking met concurrenten (andere fytoplankton groepen zoals groenalgen en kiezelwieren) gemiddeld meer licht ontvangt als gevolg van zijn gemiddeld hogere positie in de waterkolom en dus in het voordeel is (Ibelings et al. 2021).

Net zoals andere cyanobacteriënsoorten produceert *Microcystis* toxines (Sivonen & Jones 1999). Het best beschreven voor deze soort zijn, net als voor veel andere soorten, de microcystines. Het succes van *Microcystis* in eutrofe (en stilstaande) wateren komt niet alleen door hun drijfvermogen, maar ook doordat ze niet of nauwelijks door zoöplankton worden gegeten (Rohrlick et al. 1999). *Microcystis* kolonies zijn òf te groot òf te toxisch om aantrekkelijk te zijn voor zoöplankton (hetzelfde geldt overigens voor meer cyanobacteriesoorten, waaronder draadvormende, zoals *Planktothrix* (Dionisio Pires et al. 2007)). Microcystines bevinden zich normaliter in de cellen. Pas als cellen doodgaan komen deze vrij in het water terecht. Bacteriën kunnen de Microcystines tussen een paar uur tot een paar dagen afbreken (Massey & Yang 2020).

Verdere typerende karakteristieken van *Microcystis* hebben te maken met de levenscyclus. *Microcystis* kolonies overwinteren in grote aantallen in en op het sediment waardoor er een grote potentiële ent aanwezig is (Verspagen 2006). Soorten die, op het moment dat condities gunstig zijn, een grote entpopulatie kunnen mobiliseren zijn in het voordeel. Voor *Microcystis* hebben gunstige condities enerzijds te maken met stabiliteit van de waterkolom en anderzijds met hoge watertemperaturen. Deze soort laat namelijk een sterke toename in groeisnelheid bij een stijgende watertemperatuur zien, wat ook zo is voor andere blauwalgen (Paerl 2018, You et al. 2018). De toename in groeisnelheid is groter dan voor andere fytoplanktonsoorten (Coles & Jones 2000). Hierdoor versterkt *Microcystis* zijn concurrentiepositie met toenemende temperatuur van het water. Bovendien wordt wel geopperd dat juist stijgende watertemperatuur *Microcystis* mobiliseert en vrij maakt van het sediment en dus zorgt voor een extra grote entpopulatie op het moment dat de condities gunstig zijn voor groei. Tenslotte heeft *Microcystis* een voordeel ten opzichte van groenalgen onder hoge pH en lage CO₂ concentraties omdat *Microcystis*, net zoals andere cyanobacteriën als *Dolichospermum* (het vroegere *Anabaena*) en *Aphanizomenon*, bicarbonaat kan opnemen (Talling 1976). Een hoge temperatuur, hoge pH en lage CO₂ concentraties zijn normale verschijnselen in eutrofe systemen, juist in de zomermaanden wanneer de cyanobacteriën tot bloei komen. Het is duidelijk dat *Microcystis* vele wapens heeft om zich succesvol te vermenigvuldigen in eutrofe plassen.

2 Beschrijving ecosysteem Volkerak-Zoommeer

Om na te gaan welke interacties er plaatsvinden tussen blauwalgen, en *Microcystis* in het bijzonder, enerzijds en het voedselweb anderzijds is het nodig om inzicht te hebben welke soorten er in het Volkerak-Zoommeer voorkomen. In dit hoofdstuk wordt dat kort beschreven. De informatie hiervoor is vooral afkomstig uit de digitale systeemrapportage van het Volkerak-Zoommeer: <https://www.teststeststestrapportage.nl/>.

Fytoplankton

Het fytoplankton in het Volkerak-Zoommeer wordt in de zomermaanden grotendeels gedomineerd door blauwalgen. Met name *Microcystis* soorten komen veel voor maar ook soorten uit de geslachten *Aphanizomenon* en *Dolichospermum* (stikstof-fixeerders) zijn talrijk aanwezig (Figuur 8.9 in de systeemrapportage).

Zoöplankton

Zoöplankton wordt weinig gemeten in Nederland omdat het niet in de KRW is opgenomen. In het Volkerak-Zoommeer is dat ook zo, al is in 2019 wel een inventarisatie gemaakt. Op basis van aantallen zijn de Copepoden en de raderdiergeslachten *Synchaeta* en *Polyarthra* het talrijkst. Op basis van biovolume zijn de Copepoden en Branchiopoden, waaronder het geslacht *Daphnia* de meest voorkomende groepen (Figuur 8.17 in de systeemrapportage).

Benthische evertetraten

Het benthos wordt in het produndaal gedomineerd door tweekleppigen en vlokreeften. In het litoraal ook, tezamen met slakken. Dit patroon is zowel zichtbaar in het Volkerak als het Zoommeer (Figuren 8.21-8.26 in de systeemrapportage). De tweekleppigen worden gedomineerd door de quagga mossel *Dreissena bugensis* (Figuren 8.27-8.34 in de systeemrapportage).

Macrofyten

Meest voorkomende soorten/geslachten zijn *Zannichellia*, Waterpest en Schedefonteinkruid. De abundantie verschilt per jaar. Zo is Schedefonteinkruid vooral de laatste jaren meer aanwezig en binnen het geslacht *Zannichellia* is per jaar een andere soort het meest abundant (Figuren 8.35-8.40 in de systeemrapportage).

Vissen

Veel vissoorten in het Volkerak-Zoommeer behoren tot de eurytope soorten, soorten die geen sterke eisen stellen aan hun leefomgeving en zowel in stromend als niet stromend water voorkomen. Enkele voorbeelden die in het Volkerak-Zoommeer voorkomen zijn de brasem, baars, paling, snoekbaars, blankvoorn, snoek, dieldoornige stekelbaars en pos (Mies & van Giels 2018). Enkele soorten behoren tot de diadrome soorten, die migreren tussen zoet en zout water. Enkele voorbeelden die in het Volkerak-Zoommeer voorkomen zijn de bot, houting en spiering. Daarnaast zijn ook mariene soorten aangetroffen, zoals harder, haring, koornaarvis, schol en sprat. Ook exoten komen in het Volkerak-Zoommeer voor, hiervan worden onder andere de soorten marmergrondel, roofblei en zwartbekgrondel aangetroffen.

Tussen 2008 en 2017 is het visbestand in het Volkerak-Zoommeer afgenomen. In het Krammer-Volkerak is dit van 250 kg vis/ha naar 200 kg vis/ha (Mies & Van Giels 2018). In het Zoommeer is dit 320 kg vis/ha naar 160 kg vis/ha. Volgens Mies & Van Giels (2018) zijn een verandering in waterkwaliteit, voedselaanbod en onttrekkingen van vis door beroeps- en sportvisserij hier mogelijke oorzaken van.

Vogels

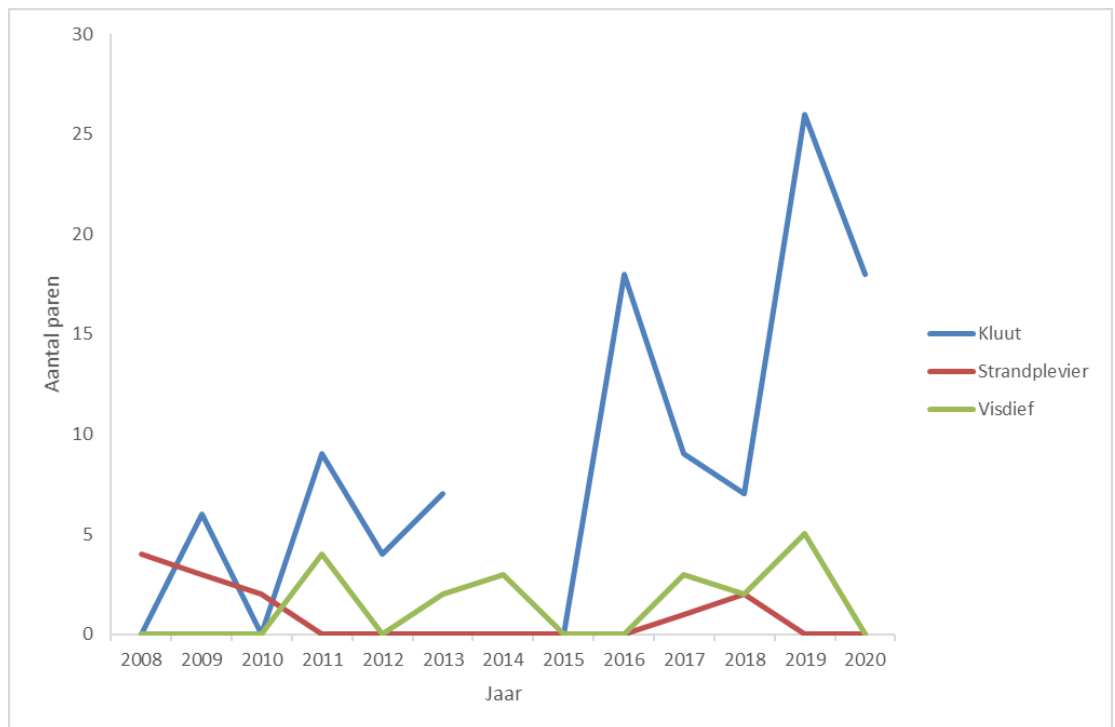
Vogeldata zijn te vinden op:

Krammer-Volkerak: <https://stats.sovon.nl/stats/gebied/1000114>

Zoommeer: <https://stats.sovon.nl/stats/gebied/1000120>

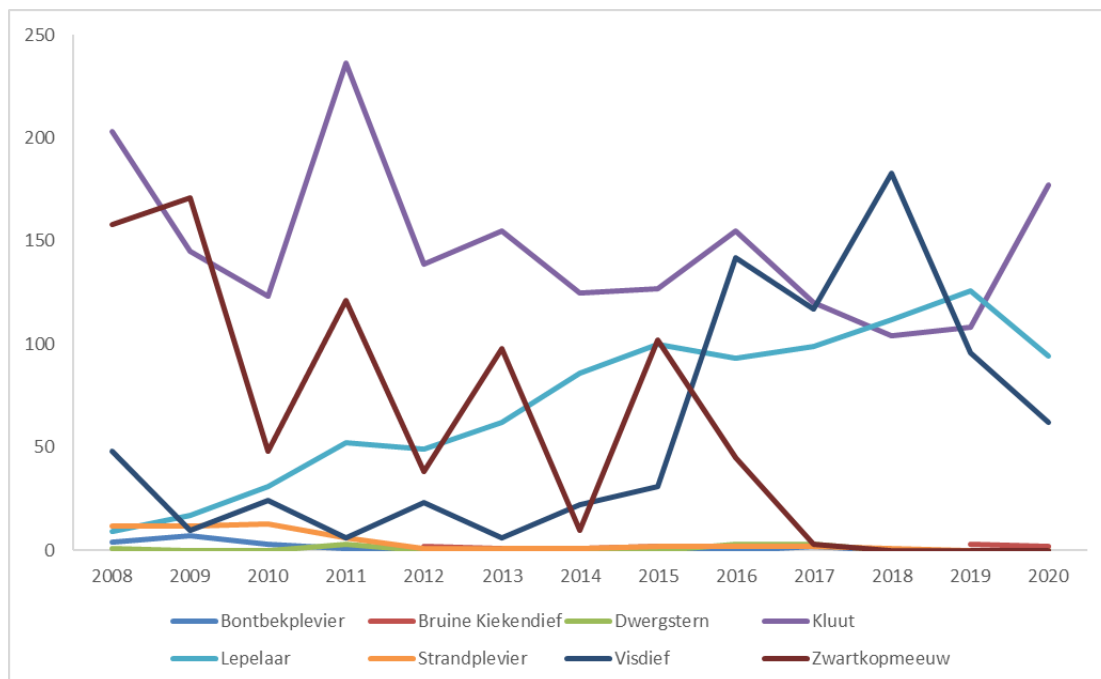
Hieronder is gekeken naar broedvogels en niet naar vogels die in de winter in het gebied verblijven omdat blauwalgen in het voorjaar (vooral zomer) opkomen.

In het Zoommeer worden is voor broedparen op de SOVON site informatie over 4 soorten te vinden (kluut, strandplevier, visdief en zwartkopmeeuw). Zwartkopmeeuwen zijn tussen 2008 en 2020 helemaal niet waargenomen als broedpaar. Het aantal paren strandplevier en visdief schommelt tussen 0 en 5 en verschilt per jaar (Figuur 2.1). Het aantal paartjes kluten is wel toegenomen sinds 2008, al zitten er wel eens jaren tussen met weinig paren (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Aantal paren van verschillende vogelsoorten waargenomen in het Zoommeer tussen 2008 en 2020. Data afkomstig uit © Netwerk Ecologische Monitoring (Sovon, RWS, CBS, provincies). www.sovon.nl.

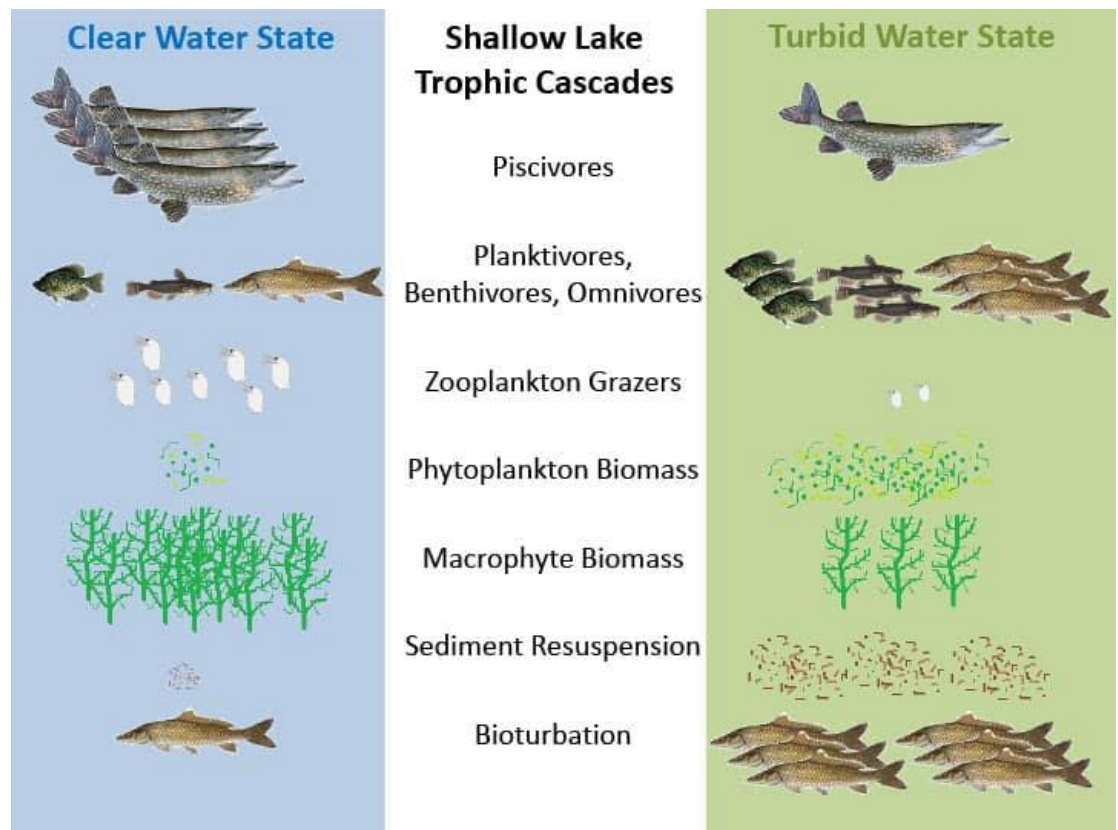
In het Volkerak worden is voor broedparen op de SOVON site informatie over 8 soorten te vinden: bontbekplevier, bruine kiekendief, dwergstern, kluut, lepelaar, strandplevier, visdief en zwartkopmeeuw. Bontbekplevier en strandplevier zijn afgenomen. Nog sterker afgenomen (tot nul) is zwartkopmeeuw. Lepelaar is sterk toegenomen. Het aantal paartjes van alle andere soorten blijven min of meer gelijk tussen 2008 en 2020 (Figuur 2.2).



Figuur 2.2 Aantal paren van verschillende vogelsoorten waargenomen in het Volkerak tussen 2008 en 2020. Data afkomstig uit © Netwerk Ecologische Monitoring (Sovon, RWS, CBS, provincies). www.sovon.nl.

3 Effecten blauwalgen op biota

In wateren die gedomineerd worden door blauwalgen is het voedselweb ontregeld. Deze wateren kenmerken zich door weinig doorzicht, het veelal ontbreken van ondergedoken waterplanten, zoöplankton en piscivore vis. Naast veel blauwalgen kenmerken deze systemen zich vaak ook door de aanwezigheid van een grote dichtheid benthivore vis zoals karper en brasem, die de bodem omwoelen (Figuur 3.1). De oorzaak voor het ontstaan van deze troebele, biodiversiteitsarme toestand is de hoge concentratie nutriënten van met name stikstof en fosfaat die zich in het systeem bevinden (Scheffer 1998).

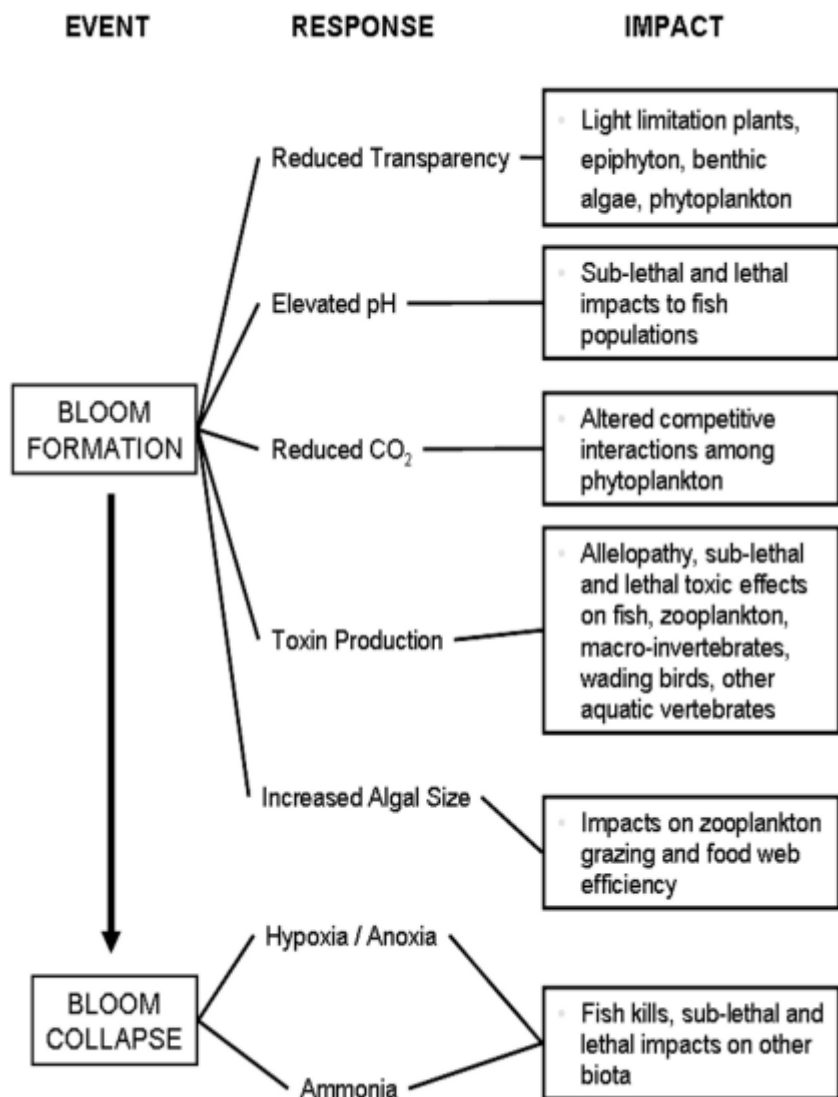


Figuur 3.1 Voorbeeld van een voedselweb in ondiepe meren in een heldere en troebele toestand (Afbeelding van <https://www.wenck.com/news/off-the-hook-carp-and-shallow-lake-ecology/>).

Blauwalgen profiteren van deze troebele toestand en dragen ook bij aan het in stand houden ervan. Hierdoor ontstaan grote concentraties die allerlei effecten op de (nog) aanwezige biota kunnen veroorzaken. Blauwalgen kunnen op verschillende manieren een direct negatief effect op aquatische voedselwebben hebben. Deze zijn:

- de productie van verschillende toxines
- de lage voedselkwaliteitswaarde. Hierbij moet bijvoorbeeld gedacht worden aan de afwezigheid van bepaalde vetzuren. Blauwalgen bevatten niet de essentiële meervoudig onverzadigde vetzuren 20:5 ω 3 (eicosapentaenoic acid (EPA)) en 22:6 ω 3 (docosahexaenoic acid (DHA)) (Dionisio Pires et al. 2003).
- De niet eetbaarheid vanwege de grootte van de kolonies en het hebben van een slijm laag om de cellen
- Het wegvangen van licht als gevolg van hun drijfvermogen
- Het vormen van zuurstofloze condities wanneer ze afsterven

Daarnaast zijn er nog een aantal andere indirecte verschijnselen die mogelijk ook een effect op het voedselweb kunnen hebben zoals een verhoogde pH en het vormen van ammoniak bij sterfte. Figuur 3.2 geeft een overzicht van de potentiële negatieve effecten van blauwalgen op ecosystemen.



Figuur 3.2 Ecologische gevolgen van blauwalgenbloei (Havens 2008)

Hieronder volgt een overzicht over effecten van blauwalgen (met name Microcystis) op verschillende componenten van een voedselweb.

3.1 Effecten op fytoplankton

Blauwalgen hebben nadelige effecten op andere fytoplankton via concurrentie om licht en nutriënten (Huisman et al. 2018). Dit gaat in de eerste plaats via het vormen van drijfvlagen aan het wateroppervlak waardoor blauwalgen de concurrentie om licht winnen van met name groenalgen en diatomeeën, die niet het vermogen hebben om zelfstandig aan het wateroppervlak te blijven. In de tweede plaats concurreren algen en blauwalgen met elkaar via het uitscheiden van stoffen die een nadelig effect op de concurrentie kan hebben, allelopathie. De door blauwalgen geproduceerde toxines worden vaak als allelopathische stoffen beschouwd om andere algen te onderdrukken (LeGrand et al. 2003; Singh et al. 2001).

3.2 Effecten op zoöplankton

Hoewel veel blauwalgen qua grootte wel gegeten kunnen worden door zoöplankton, geldt dat niet meer als er grote kolonies gevormd worden. Het eten van blauwalgen door zoöplankton gebeurt dan ook vaak aan het begin van het voorjaar wanneer er sprake is van kleine kolonies of individuele cellen.

Zoöplankton is echter zeer gevoelig voor de toxines van blauwalgen. Ingestie van toxines leidt tot langzamere groei, minder reproductie en sterfte van zoöplankton (Moustaka-Goumi & Sommer 2020). *Daphnia* is hier extra gevoelig voor omdat deze organismen niet selectief zijn in hun voedselkeuze (Lüring 2003). Dat is wel het geval bij copepoden (Moustaka-Goumi & Sommer 2020). *Dreissena* larven sterven sneller wanneer blauwalgen toxines bevatten (Dionisio Pires et al. 2003).

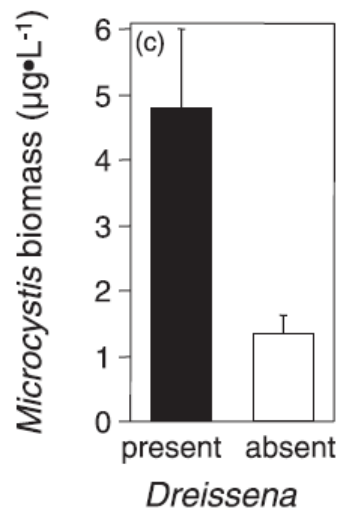
Het gemis aan bepaalde essentiële vetzuren en andere nutriëntratio's belemmert de ontwikkeling van zoöplankton (Moustaka-Goumi & Sommer 2020). Tenslotte bevatten met name *Microcystis* soorten, een slijm laag om de cellen die blauwalgkolonies lastiger eetbaar maken. Met name wanneer deze slijm laag bestaat uit xylose/mannose zijn de kolonies taaier (Rohrlack et al. 1999). De compositie van deze en andere suikers in de slijm laag van *Microcystis* varieert overigens zeer, zowel binnen een soort als tussen soorten.

3.3 Effecten op benthische evertetraten

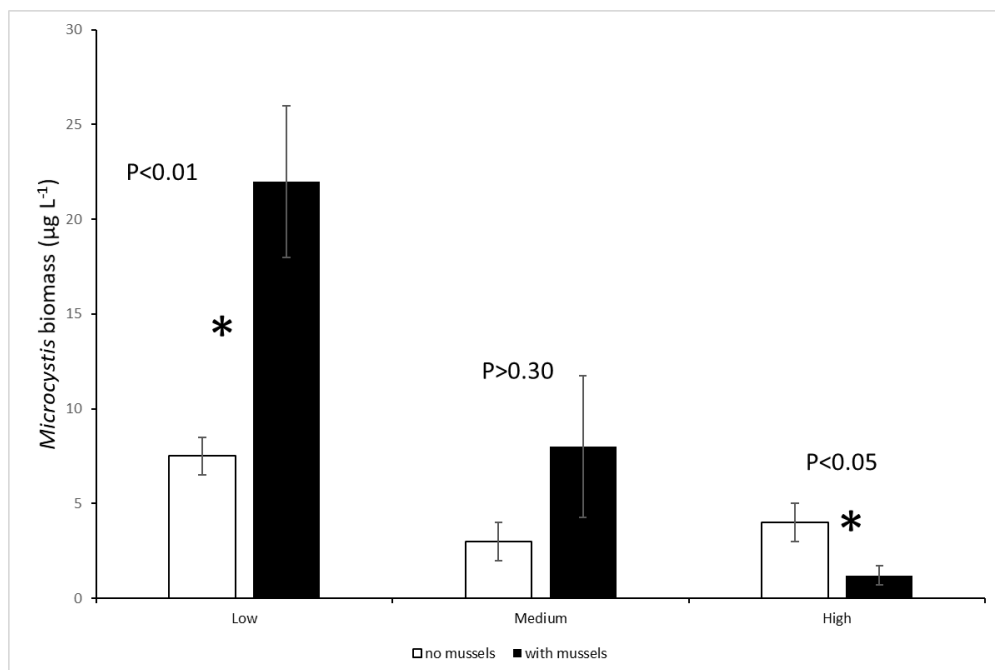
Er is relatief weinig onderzoek verricht naar effecten van blauwalgen op benthische evertetraten, met uitzondering op de *Dreissena*-soorten (zie hieronder). Bestaand onderzoek heeft zich in eerste instantie gericht op de effecten van toxines. Toxines van blauwalgen leidden tot meer sterfte in muggelarven (Christoffersen 1996). Aasetende evertetraten, die meestal op de bodem leven zoals rivierkreeften, lijken een vrij hoge LD₅₀ (letale-dosismediaan) voor microcystines te hebben en kunnen ook hoge concentraties in hun weefsel bevatten (Bownik 2016).

Dreissena's

Over interacties tussen *Microcystis* en *Dreissena* mosselen (driehoeks- en quagga mosselen) is vrij veel geschreven in zowel Europese als Amerikaanse studies (Strayer 2009; Vanderploeg et al. 2013). Desondanks is de vele literatuur niet éénduidig of mosselen een positief of negatief effect op blauwalgen hebben. In meren met lage nutriëntenconcentraties (vooral P) lijkt de aanwezigheid van driehoeksmosselen te leiden tot meer blauwalgen en *Microcystis* in het bijzonder (Figuur 3.3, Knoll et al. 2008). Bij mesocosm onderzoeken met mosselen neemt, bij toenemende totaal fosfaatconcentraties, de *Microcystis* biomassa juist af (Figuur 3.4, Sarnelle et al. 2012).



Figuur 3.3 *Microcystis* biomassa in mesocosms in een meer met een TP concentratie $\leq 20 \mu\text{g/L}$. De mesocosms bevatten wel of geen driehoeksmosselen. Figuur uit Knoll et al. (2008).



Figuur 3.4 Effecten van verschillende totaal fosfaat (TP) concentraties en driehoeksmosselen op de biomassa van *Microcystis aeruginosa*. Witte kolommen zijn mesocosms zonder mosselen en zwarte kolommen is met mosselen. Low = geen fertilisatie, Medium is 15 en High is 25 $\mu\text{g/L}$ TP (= gemeten waarden in de mesocosms). De asteriksen geven aan dat er binnen een fosfaat behandeling een significant effect van de mosselen is (positief dan wel negatief effect). Figuur uit: Sarnelle et al 2012.

Er zijn weinig studies die gekeken hebben naar de effecten van blauwalgen op adulte quagga mosselen, behalve naar effecten op voortplanting. De enige gevonden studie is die van Boegehold et al. (2018) waaruit blijkt dat blauwalgen negatieve effecten hebben op paai en bevruchting bij quagga mosselen. De reden hiervoor is onduidelijk maar de meest voorkomend toxine, microcystine-LR, lijkt niet de oorzaak.

3.4 Effecten op macrofyten

Effecten van blauwalgen op ondergedoken waterplanten kan zich op twee manieren uiten:

- 1) Concurrentie om licht en nutriënten (Triest et al. 2016).
- 2) Uitscheiden van stoffen die groei en/of functioneren van de planten nadelig beïnvloeden (allelopathie). Dit laatste wordt vooral toegewezen aan de in *Microcystis* aanwezige toxine, microcystine-LR (Pflugmacher 2002). Effecten uiten zich in minder groei, minder zuurstofproductie en pigmentverkleuring bij planten zoals Grof hoornblad en Kransvederkruid. Veel vaker echter tonen studies aan dat juist planten stoffen uitscheiden die een inhiberend effect op blauwalgen hebben (Chen et al. 2012).

3.5 Effecten op vis

Vissoorten in Nederland grazen niet direct op blauwalgen. Toxines van blauwalgen kunnen zich echter via de voedselketen ophopen in visweefsel en op deze manier een negatief effect op vissen hebben, zoals leverschade (Ibelings et al. 2005).

Grote drijfslagen van blauwalgen die gaan afsterven kunnen tot vissterfte leiden als gevolg van het ontstaan van zuurstofloosheid in het water (Moustaka-Goumi & Sommer 2020). Vaak is het moeilijk om waarnemingen van massale vissterfte te koppelen aan de tegelijkertijd aanwezigheid van hoge concentraties blauwalgen. Dit omdat er op dat moment vaak ook botulisme in het water voorkomt (Vasconcelos 2001).

3.6 Effecten op vogels

Vogels zijn geen directe predatoren van blauwalgen, maar kunnen, net zoals vissen, blauwalgentoxines accumuleren als gevolg van het eten van voedsel waarin die toxines zich opgehoopt hebben. In 2002 was er een massale vogelsterfte in het Volkerak-Zoommeer met verlamingsverschijnselen gerelateerd aan anatoxine, een neurotoxine die geproduceerd wordt door blauwalgen (Smith et al. 2016). In de Verenigde Staten is recent aangetoond dat massasterfte onder de Amerikaanse zeearend te wijten is aan een neurotoxine van blauwalgen, die de vogels binnenkregen via de voedselketen (Breinlinger et al. 2021). De aanwezigheid van hoge concentraties blauwalgen leidt tot een slecht doorzicht in het water waardoor vogels die op zicht jagen wegblijven uit het systeem. Vaak zijn er dan ook geen waterplanten aanwezig waardoor ook plantenetende vogels wegblijven.

3.7 Effecten op het functioneren van het Volkerak-Zoommeer ecosysteem

Hoewel er in de literatuur aanwijzingen zijn dat blauwalgen (en *Microcystis*) negatieve effecten kunnen hebben op de verschillende componenten van een aquatisch voedselweb, is het voor het voedselweb van het Volkerak-Zoommeer onduidelijk of deze daadwerkelijk overlast ondervindt door groei van blauwalgen. Deze onduidelijkheid heeft de volgende oorzaken:

- Afwezigheid van massale vis- en vogelsterftes. De laatste vermelding hierover is van 2002 wat erop duidt dat de concentratie blauwalgen niet meer zo hoog is, er geen enorme drijfslagen meer voorkomen of de toxineconcentraties niet meer zo hoog zijn.
- Typische kenmerken voor een blauwalgen gedomineerd (eco)systeem als weinig doorzicht en ontbreken van ondergedoken waterplanten niet voorkomen in het Volkerak-Zoommeer. Waterplanten lijken zich daarentegen uit te breiden.
- Weinig data beschikbaar over bepaalde componenten zoals het zoöplankton.
- Weinig tot geen informatie beschikbaar over groei, reproductie, migratie van soorten in het ecosysteem.

Om deze onduidelijkheden weg te nemen is het aan te bevelen om:

- Toxines in het veld te meten
- Groepen, zoals het zoöplankton, weer op te nemen in het MWTL
- Fitheid van soorten in het Volkerak-Zoommeer te bepalen door gericht onderzoek hiernaar te doen in een combinatie van veld- en laboratoriumonderzoek.

4 Handelingsperspectief

4.1 Eerder gedefinieerde maatregelen

In het verleden is onderzocht of verzilting van het Volkerak-Zoommeer als maatregel tegen blauwalg een optie was. Omdat blauwalgen niet voorkomen in verzilt water, is dit een effectieve maatregel.

Doorspoelen van het systeem is ook als mogelijkheid verkend, omdat de verblijftijd van het water te lang is en dit, in combinatie met hoge nutriëntenconcentraties, blauwalgengroei zou bevorderen. Door de verblijftijd te verkorten is er voor de blauwalgen minder tijd om te gaan bloeien. Bij verblijftijd van minder dan 30 dagen is er minder kans op explosieve groei door blauwalgen (Verspagen 2006). Doorspoelen bleek echter geen reële optie omdat de effectiviteit ontoereikend was en er niet voldoende water vanuit Hollandsch Diep beschikbaar was (MER 2012).

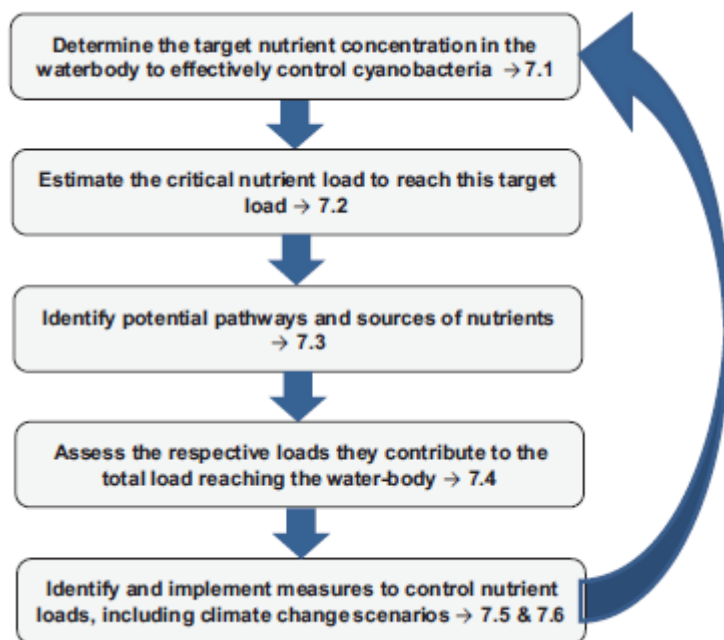
Een andere mogelijkheid die in het verleden is onderzocht is de inzet van Dreissena's (Weber & Smit 2004). Los van het feit dat eigenlijk nog aangetoond moet worden of Dreissena's in het Volkerak-Zoommeer een negatief effect op de blauwalgconcentraties hebben, is het promoten van exoten niet de meest voor de hand liggende optie.

4.2 Nutriënten

Het bestrijden van blauwalgen heeft de meeste kans als de toevoer van nutriënten omlaag gebracht kan worden (<https://www.wur.nl/nl/show-longread/Blauwalg-bestrijden-wat-werkt-nu-echt.htm>). Allerlei andere maatregelen gericht op andere aspecten in waterlichamen, zoals natuurvriendelijke oevers, aanleggen van eilanden en biomanipulatie kunnen alleen succesvol zijn wanneer eerst de nutriëntenconcentraties (N, P) in het systeem omlaag gebracht zijn.

Er bestaan tevens vele zogenaamde symptoommaatregelen ter bestrijding van blauwalgen zoals het toedienen van waterstofperoxide, bellenschermen en doorspoelen. Dit soort maatregelen wordt ingezet om in korte tijd van de blauwalgen af te komen. Echter, in open systemen zoals het Volkerak-Zoommeer werken symptoommaatregelen niet omdat bij het stoppen van deze maatregelen de blauwalgen altijd terugkeren ('dweilen met de kraan open').

Het WHO heeft recent een algemeen overzicht gepubliceerd over te nemen stappen om inzichten te krijgen in de nutriëntenconcentraties, doelen en maatregelen (Figuur 4.1).



Figuur 4.1 Algemene stappenplan om de doelen voor nutriëntenconcentraties te halen. Uit Chorus & Zessner (2021).

De nutriëntenconcentraties die het belangrijkst zijn om te bepalen, zijn N en P. Vaak wordt genoemd dat het voldoende is om één van de twee elementen te reduceren omdat als één element gereduceerd is een reductie van het andere element vaak niet veel meer oplevert (Chorus & Zessner 2021), al denkt niet alle studies hier hetzelfde over (Paerl & Otten 2016, Scott & McCarthy 2010).

Wanneer eenmaal de doelen voor de nutriëntenconcentraties gesteld zijn, kan bepaald worden wat de nutriëntenbelasting mag zijn, de zogenaamde kritische belasting. Voor het Volkerak-Zoommeer zijn deze stappen doorlopen en gerapporteerd in de systeemrapportage Volkerak-Zoommeer (Deltares, RWS & WMR 2020, Tabel 4.1).

Tabel 4.1 KRW doelen voor totaal stikstof (TN) en totaal fosfaat (TP) in mg/L. Bron: systeemrapportage Volkerak-Zoommeer.

Stof	KRW klasse	Onderwaarde	Bovenwaarde	Schreurs
TN	Goed	NA	1,30	2,5
TN	Matig	1,30	2,60	
TN	Ontoereikend	2,60	5,20	
TN	Slecht	5,20	NA	
TP	Goed	NA	0,07	0,1 (0,2 voor Microcystis)
TP	Matig	0,07	0,14	
TP	Ontoereikend	0,14	0,28	
TP	Slecht	0,28	NA	

In het verleden is gekeken bij welke nutriëntenconcentraties Microcystis dominant aanwezig was in meren (Schreurs 1992). Microcystis is vooral dominant bij totaal fosfaat (TP) concentraties vanaf 0,2 mg/L (Figuur 5.4A in het proefschrift van Schreurs). Voor totaal stikstof wordt Microcystis over alle concentraties evenveel gevonden. Wel werd een

dominantie van *Microcystis* gevonden bij concentraties opgelost stikstof > 0.35 mg/L. Voor ortho-fosfaat is dat bij concentraties >0,05 mg/L.

Voor blauwalgen in het algemeen bleek dat deze dominant zijn bij TP concentraties van 0,1-0,8 mg/L (Figuur 5.2A in proefschrift Schreurs) en TN concentraties van 2.5-4.5 mg/L (Figuur 5.3A in proefschrift Schreurs). Blauwalgen domineren vaak in meren met de laagste concentraties ortho-fosfaat en opgelost stikstof (Schreurs 1992).

Uit bovenstaande volgt dat de KRW doelen “Goed” en “Matig” voor TP dusdanig laag zijn dat dominantie van *Microcystis* niet hoeft op te treden, volgens data van Schreurs (1992). Volgens Schreurs (1992) is dominantie in meren door *Microcystis* onafhankelijk van TN.

Het KRW-doel in het Volkerak-Zoommeer voor anorganisch opgelost stikstof (DIN) is ≤ 0.22 en ≤ 0.45 mg/L voor ZGET en GET respectievelijk (Didderen et al. 2014). De laagste DIN concentratie die sinds 2011 is gemeten is 1.32 mg/L (locatie Oesterdam).

De concentraties voor ortho-fosfaat en opgelost stikstof in het Volkerak zouden respectievelijk < 0,05 en < 0,35 mg/L moeten zijn om de dominantie van *Microcystis* zoveel mogelijk te beperken (Schreurs 1992). Wanneer we naar ortho-fosfaat kijken dan zien we bij Oesterdam (april-september) dat deze schommelt tussen ongeveer 0,010 en 0,150 mg/L (vanaf 2012). De TP concentraties schommelen tussen 0.03 en 0.17 mg/L (2012-2017). De ortho-fosfaatconcentraties zitten daarmee soms onder maar ook boven de door Schreurs (1992) gegeven ortho-fosfaat drempelwaarde voor dominantie door *Microcystis* (0,05 mg/L, Figuur 5.9B in het proefschrift). Totaal fosfaat, hoewel data niet actueel zijn, blijft wel onder de drempelwaarde van 0,2 mg/L. Nitraat schommelt van ongeveer 0,5-4,5 mg/L (vanaf 2012) en in 2016-2017 van 0,08-3,4 mg/L.

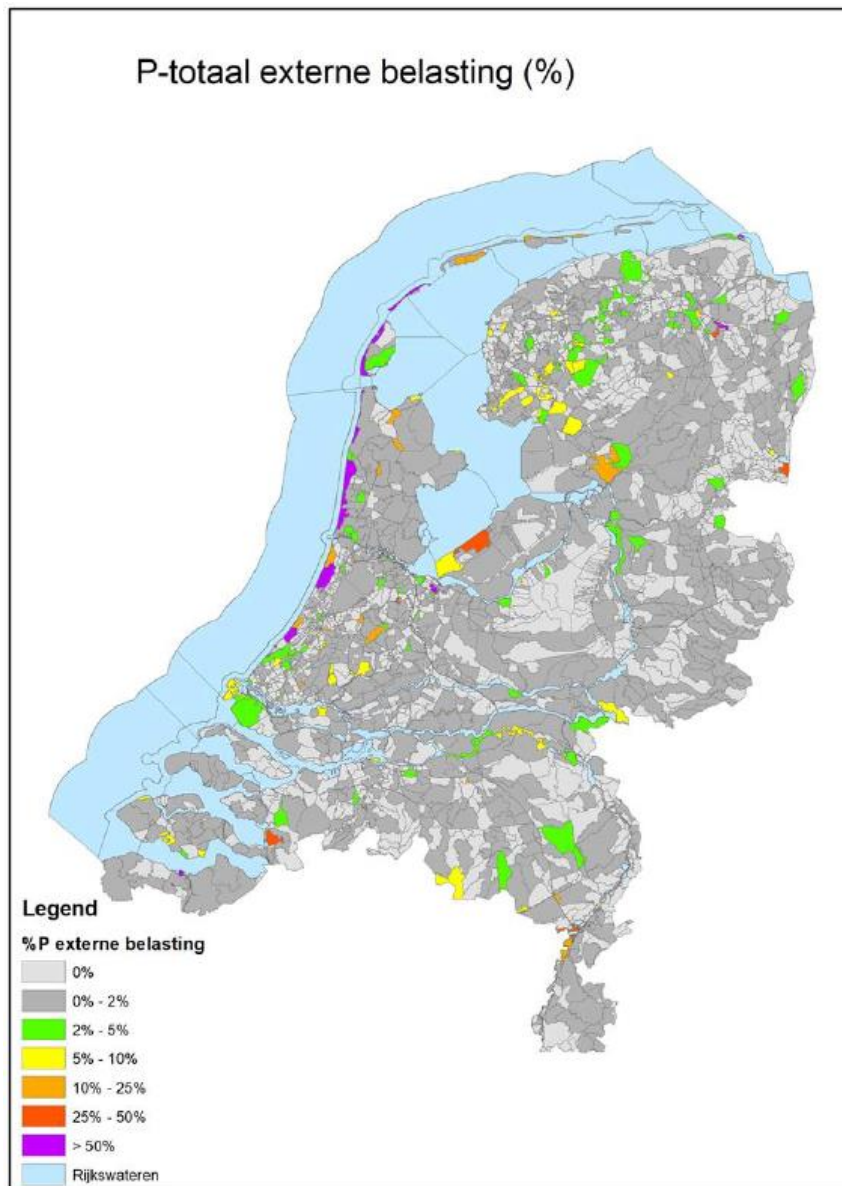
Op locatie Steenberg schommelen sinds 2012 de totaal-fosfaatconcentraties tussen 0,020 en 0,180 mg/L (data systeemrapportage) en lijkt daarmee ook onder de door Schreurs (1992) gegeven drempelwaarde te zitten (0,200 mg/L). Ortho-fosfaat schommelt sinds 2012 tussen 0,0024 en 0,219 mg/L en net zoals bij Oesterdam bevindt de concentratie in het water zich soms onder en soms boven de drempelwaarde voor dominantie door *Microcystis* (0,05 mg/L). Totaal stikstof wordt in het Volkerak-Zoommeer niet gemeten. De nitraatconcentraties (opgelost) liggen sinds 2012 tussen 0,076 en 3,75 mg/L.

4.2.1 Belangrijkste nutriëntenbronnen

In Figuur 4.1 worden de stappen vervolgens aangegeven om de bronnen te identificeren en de bijdrage van verschillende bronnen aan nutriëntenbelasting. Ook deze stappen zijn voor het Volkerak-Zoommeer uitgevoerd (Weeber et al. 2021). In de stoffenbalans rapportage van het Volkerak-Zoommeer wordt genoemd dat de Dintel de grootste bron is voor stikstof en fosfaat (Weeber et al. 2021). Ongeveer 50% van de totale stikstofvracht richting het Volkerak is afkomstig van de Dintel. Voor fosfor is dat ook ongeveer 50%.

Vogels

In deze paragraaf worden de vogels als mogelijke bron van nutriënten input genoemd omdat op lokaal niveau (nabij kolonies) de hoeveelheid ingebrachte voedingsstoffen door vogels voor algenbloei kunnen zorgen (Verstijnen et al. 2020). De bijdrage van vogels aan de nutriëntenconcentraties in het Volkerak-Zoommeer is waarschijnlijk niet significant (Figuur 4.2). Voor stikstof zijn in beide gebieden geen significante bijdragen van vogels aan de N-belasting te verwachten.



Figuur 4.2 Ruimtelijke weergave van de maximum potentiële toevoeging door kolonievogels en vogels op slaapplekken aan de totale fosfaatbelasting. Uit: Noordhuis et al. 2021.

4.2.2 Nutriëntenreductie

Wat rest is het identificeren en uitvoeren van maatregelen om de nutriëntenconcentraties of de hoeveelheid ingelaten water omlaag te brengen, zodanig dat de bloei van blauwalgen voldoende wordt beperkt. Hierbij moet opgemerkt worden dat blauwalgen één component van het ecosysteem zijn en dat een integrale (eco)systeemanalyse voor alle componenten nodig is om een maatregel als nutriëntenreductie in samenhang met andere potentiële maatregelen af te wegen.

Aangezien de Dintel de grootste nutriëntenbron voor het Volkerak-Zoommeer is (Weeber et al., 2021), is het logisch om te proberen om de vrachten vanuit de Dintel te reduceren. Het is niet bekend of met maatregelen in de Dintel de kritische nutriëntenconcentratie gehaald kan worden. Reductie kan via verlagen van de emissies aan de bron, of door het verlagen (of veranderen van de timing) van de hoeveelheid in te laten water.

Water inlaten

Om te voorkomen dat water, dat verontreinigd is met giftige blauwalgen, niet in andere wateren terechtkomt en daardoor de functies van dat andere water in gevaar brengt, is het zaak om tijdig te signaleren, meten en te handelen. Hiervoor is een stappenschema ontwikkeld (Stowa 2020-35, zie figuur hieronder). Dit stappenschema dient als houvast voor waterbeheerders bij het nemen van besluiten rondom het inlaten van met blauwalgen geïnfecteerd water. Ook voor het inlaten van water vanuit het Volkerak-Zoommeer kan dit schema gebruikt worden (voor zover dat nog niet gedaan wordt).



5 Conclusies en advies

- Uit de literatuur is bekend dat blauwalgen, inclusief *Microcystis*, nadelige effecten (vooral op overleving en reproductie) op de verschillende componenten van een ecosysteem kunnen hebben. Dat gaat door middel van toxineproductie, competitie om nutriënten en licht, vertroebeling van water, ontstaan van zuurstofloosheid, lage voedselkwaliteit en oneetbaarheid van kolonies.
- Ook voor veel in het Volkerak-Zoommeer voorkomende soorten zijn er in de literatuur negatieve effecten van blauwalgen beschreven. In het Volkerak-Zoommeer systeem zelf zijn vooralsnog geen aanwijzingen dat blauwalgen het voedselweb of het ecosysteem negatief beïnvloeden. Aanwijzingen zoals vis- of vogelsterfte, slecht doorzicht en ontbreken van ondergedoken waterplanten komen in het Volkerak-Zoommeer niet voor. De visstand is afgenomen, maar dat komt o.a. door een afname in nutriënten. Waterplanten, zoals *Zannichellia*, nemen toe terwijl dit soorten zijn die, vanwege het feit dat ze permanent ondergedoken zijn, niet zouden voorkomen bij hoge blauwalgenbiomassa. Het lijkt erop dat het effect van blauwalgen op de ecologie van het Volkerak-Zoommeer beperkt is maar nader onderzoek hiernaar is hiervoor nodig.
- Om beter inzicht te krijgen zouden de volgende activiteiten uitgevoerd kunnen worden:
 - Blauwalgtoxines in het veld meten
 - Voedselwebcomponenten zoals het zoöplankton weer in MWTL opnemen
 - Fitheid van soorten zoals zoöplankton, macrofauna en vis bepalen door middel van een combinatie van veld- en laboratoriumonderzoek.
- Ortho-fosfaat en opgelost stikstof in het Volkerak-Zoommeer zouden respectievelijk lager dan 0,050 mg P/L en 0,35 mg N/L moeten zijn om de kans op dominantie door *Microcystis* zo klein mogelijk te maken. Met name ortho-fosfaat is van belang. De huidige voorkomende concentraties balanceren soms rond deze grenzen.
- Uit de nutriëntenbalans (Weeber et al., 2021) blijkt dat de rivier de Dintel voor stikstof en fosfaat de grootste bron is, gevolgd door waterinlaat via de Volkeraksluizen. Het is niet bekend of met maatregelen in de Dintel de kritische nutriëntenconcentratie gehaald kan worden. Reductie kan via verlagen van de emissies aan de bron, of door het verlagen (of veranderen van de timing) van de hoeveelheid in te laten water.
- De bijdrage van vogels aan de nutriëntenconcentraties in het Volkerak-Zoommeer is waarschijnlijk niet significant.

Los van bovenstaande conclusies en adviezen kunnen de volgende activiteiten van meerwaarde zijn:

- Bloomin Algae: dit is een app waarbij burgers een bloei of drijfslag via de app kunnen doorgeven. De gegevens komen bij de WUR terecht. Dit zou kunnen helpen om na te gaan hoe vaak een bloei of drijfslag in het systeem voorkomt.
- WISPStation data analyseren. De WISPStation is in het Volkerak-Zoommeer operationeel sinds 2019. De metingen kunnen gebruikt worden om een bloei te voorspellen. Inmiddels is de satelliet PRISMA, met aan boord een hyperspectrale camera waarmee blauwalgen gedetecteerd kunnen worden. De WISPStation data kunnen gebruikt worden om een PRISMA beeld boven het Volkerak-Zoommeer te

kalibreren. Hiermee zou dan een beter vlakdekkend beeld van blauwalgen over het systeem verkregen kunnen worden (beter dan met Sentinel-2 en 3).

Referenties

- Boegehold, A.G., N.S. Johnson, J.L. Ram & D.R. Kashian (2018) Cyanobacteria reduce quagga mussel (*Dreissena rostriformis bugensis*) spawning and fertilization success. *Freshwater Science* 37(3).
- Bownik, A. (2016) Harmful algae: effects of cyanobacterial cyclic peptides on aquatic invertebrates – a short review. *Toxicon* 124: 26-35.
- Chen, J., H. Zhang, Z. Han, J. Ye & Z. Liu (2012) The influence of aquatic macrophytes on *Microcystis aeruginosa* growth. *Ecological Engineering* 42: 130-133.
- Breinlinger, S. et al. (2021) Hunting the eagle killer: A cyanobacterial neurotoxin causes vacuolar myelinopathy. *Science* 371, (6536), eaax9050.
- Christoffersen, K. (1996) Ecological implications of cyanobacterial toxins in aquatic food webs. *Phycologia* 35: 42-50.
- Chorus, I. & M. Zessner (2021) Assessing and controlling the risk of cyanobacterial blooms – Nutrient loads from the catchment. Chapter 7 in *Toxic cyanobacteria in water, 2nd edition* (I. Chorus & M. Welker eds.), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH.
- Coles J.F. & Jones R.C. (2000) Effect of temperature on photosynthesis-light response and growth of four phytoplankton species isolated from a tidal freshwater river. *Journal of Phycology* 36: 7–16.
- Deltares, RWS & WMR (2020) Concept Systeemrapportage Volkerak Zoommeer.
- De Vries, I. & R. Postma (2013) Quick scan waterkwaliteit en ecologie Volkerak-Zoommeer. Deltares rapport 1207783-000.
- Dionisio Pires, L.M., R. Kusserow & E. van Donk (2003) Influence of toxic and non-toxic phytoplankton on feeding and survival of *Dreissena polymorpha* (Pallas) larvae. *Hydrobiologia* 491: 193-200.
- Dionisio Pires, L.M., B.M. Bontes, L. Samchyshyna, J. Jong, E. van Donk & B.W. Ibelings (2007) Grazing on microcystin-producing and microcystin-free phytoplankters by different filter-feeders: implications for lake restoration. *Aquatic Sciences* 69: 534-543.
- Havens, K.E. (2008) Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. Chapter 33 in *Cyanobacterial harmful algal blooms – state of the sciences and research needs* (Hudnell ed.).
- Huisman, J., G.A. Codd, H.W. Paerl, B.W. Ibelings, J.M.H. Verspagen & P.M. Visser (2018) Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology* 16, pages471–483. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>.
- Ibelings, B.W., Mur, L.R. and Walsby, A.E. (1991). Diurnal changes in buoyancy and vertical distribution of *Microcystis* in two shallow lakes. *Journal of Plankton Research*, 13, 419-436.
- Ibelings, B.W., K. Bruning, J. de Jonge, K. Wolfstein, L.M. Dionisio Pires, J. Postma & T. Burger (2004) Distribution of microcystins in a lake foodweb: no evidence for biomagnification. *Microbial Ecology* 49: 487-500.
- Ibelings, B.W., R. Kurmayer, S.M.F.O. Azevedo, S.A. Wood, I. Chorus & M. Welker (2021) Understanding the occurrence of cyanobacteria and cyanotoxins. Chapter 4 in *Toxic cyanobacteria in water, 2nd edition* (I. Chorus & M. Welker eds.), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH.
- Knoll, L.B., O. Sarnelle, S.K. Hamilton, C.E.H. Kissman, A.E. Wilson, J.B. Rose & M.R. Morgan (2008) Invasive zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) increase cyanobacterial toxin concentrations in low-nutrient lakes. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences* 65: 448-455.
- LeGrand, C., K. Rengefors, G.O. Fistarol & E. Granéli (2003) Allelopathy in phytoplankton – biochemical, ecological and evolutionary aspects. *Phycologia* 42: 406-419.

- Lürling, M. (2003) The effect of substances from different zooplankton species and fish on the induction of defensive morphology in the green alga *Scenedesmus obliquus*. *Journal of Plankton Research* 25: 979-989.
- Massey, I.Y. & F. Yang (2020) A mini review on microcystins and bacterial degradation. *Toxins* 12, 268; doi:10.3390/toxins12040268.
- Milieueffectrapportage waterkwaliteit Volkerak-Zoommeer (2012).
- Mies, J., and J. van Giels. 2018. "Rapport visstandonderzoek Volkerak-Zoommeer najaar 2." ATKb.
- Moustaka-Gouni, M. & U. Sommer (2020) Effects of harmful algal blooms of large-sized and colonial cyanobacteria on aquatic food webs. *Water* 12: 1587.
- Noordhuis, R., M. van Roomen & E. van Winden (2021) Vogelmest in de Nederlandse wateren – landelijk beeld van de betekenis van vogelmest voor de nutriëntbalans van onze oppervlaktewateren. Deltares rapport 11205268-003-BGS-0002.
- Paerl, HW (2014) Mitigating harmful cyanobacterial blooms in a human- and climatically-impacted world. *Life* 4: 988-1012.
- Paerl, HW (2018) Mitigating toxic planktonic cyanobacterial blooms in aquatic ecosystems facing increasing anthropogenic and climatic pressures. *Toxins* 10, 76.
- Paerl HW, Otten TG. Duelling 'CyanoHABs': unravelling the environmental drivers controlling dominance and succession among diazotrophic and non-N₂-fixing harmful cyanobacteria. *Environ Microbiol.* 2016 Feb;18(2):316-24. doi: 10.1111/1462-2920.13035. Epub 2015 Oct 14. PMID: 26310611.
- Pflugmacher, S. (2002) Possible Allelopathic Effects of Cyanotoxins, with Reference to Microcystin-LR, in Aquatic Ecosystems. *Environmental Toxicology* 17: 407-413.
- Rohrback, T., M. Henning & J. Kohl (1999) Mechanisms of the inhibitory effect of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* on *Daphnia galeata*'s ingestion rate. *Journal of Plankton Research* 21: 1489-1500.
- Sarnelle, O., J.D. White, G.P. Horst & S.K. Hamilton (2012) Phosphorus addition reverses the positive effect of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on the toxic cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*. *Water Research* 46: 3471-3478.
- Scheffer, M. (1998) Ecology of shallow lakes. ISBN: 1-4020-23069-5. Kluwer Academic Publishers
- Schreurs, H. (1992) Cyanobacterial dominance: relations to eutrophication and lake morphology. Proefschrift Universiteit van Amsterdam
- Scott, J.T. & M.J. McCarthy (2010) Nitrogen fixation may not balance the nitrogen pool in lakes over timescales relevant to eutrophication management. *Limnology & Oceanography* 55: 1265-1270.
- Singh, D., M.B. Tyagi, A. Kumar, J.K. Thakur & A. Kumar (2001) Antialgal activity of a hepatotoxin-producing cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 17: 15-22.
- Sivonen K, Jones G (1999) Cyanobacterial toxins. In: Chorus I, Bartram J (eds) Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. E and FN Spon, London, New York, pp 41-111.
- Smith, S., M. Tangelder, M. Poelman, P. Kamermans, J. Veraart & M. de Lange (2016) Inventarisatie onderzoek blauwalg Volkerak-Zoommeer. Memo WUR.
- Stowa 2020-35. Beslisschema voor het inlaten van water met blauwalgen.
- Strayer, D.L. (2009) Twenty years of zebra mussels: lessons from the mollusk that made headlines. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 135-141.
- Talling J.F. (1976) The depletion of carbon dioxide from lake water by phytoplankton. *Journal of Ecology* 64: 79-121.
- Triest, L., I. Stiers & S. van Onsem (2016) Biomanipulation as a nature-based solution to reduce cyanobacterial blooms. *Aquatic Ecology* 50: 461-483.
- Thomas, R.H. & A.E. Walby (1985) Buoyancy regulation in a strain of *Microcystis*. *Journal of General Microbiology* 131: 799-809.

- Vanderploeg, H.A., A.E. Wilson, T.H. Johengen, J.Dyble Bressie, O. Sarnelle, J.R. Liebig, S.D. Robinson & G.P. Horst (2013) Role of Selective Grazing by Dreissenid Mussels in Promoting Toxic *Microcystis* Blooms and Other Changes in Phytoplankton Composition in the Great Lakes. Chapter 32 in *Quagga and zebra mussels: biology, impacts, and control* (eds. T.F. Nalepa and D.W. Schloesser).
- Vasconcelos, V. (2001) Cyanobacteria toxins: diversity and ecological effects. *Limnetica* 20: 45-58.
- Verspagen, J. (2006) Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the cyanobacterium *Microcystis*. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Verstijnen, Y.J.M., V. Maliaka, G. Catsadorakis, M. Lüring & A.J.P. Smolders (2020) Colonial nesting waterbirds as vectors of nutrients to Lake Lesser Prespa (Greece). *Inland Waters*, DOI: 10.1080/20442041.2020.1869491
- Weber, A. & M.G.D. Smit (2004) Waterzuivering door driehoeksmosselen (*Dreissena polymorpha*) in het Volkerak-Zoommeer: de inzet van een mosselfilter in de Steenbergse Vliet. TNO rapport 32161.02.
- Weeber, M.P., A.J. Nolte, T.A. Troost, M. Genseberger, L. Kramer, M.C.H. Tiessen, 2018. Dataanalyse en modelvalidatie van het Volkerak-Zoommeer ecosystem : Met focus op blauwalgen en quaggamosselen. Deltares rapport 11201168-000-ZKS-0007-v3 in opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- Weeber, M., W. Altena & A. Nolte (2021) Stoffenbalans Volkerak-Zoommeer. Deltares rapport 11206834-000-ZKS-0001.
- You, J., K. Mallery, J. Hong & M. Hondzo (2018) Temperature effects on growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Plankton Research* 40: 16-28.

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