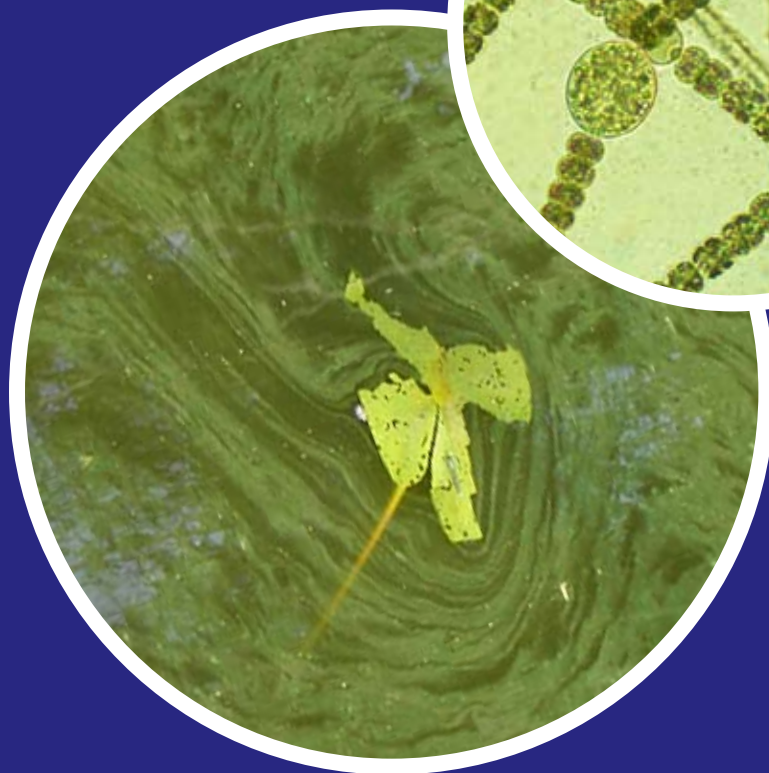


BLAUWALGEN: GIFTIG GROEN

2009

43



stowa

DE BIOLOGIE EN
RISICO'S VAN CYANOBACTERIËN

BLAUWALGEN: GIFTIG GROEN

watemozaïek

COLOFON

Uitgave

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer STOWA, Utrecht

Auteurs

Miquel Lurling, Leerstoelgroep Aquatische Ecologie en Waterkwaliteitsbeheer, Wageningen Universiteit
Herman van Dam, Adviseur Water en Natuur

Eindredactie

Bas van der Wal, STOWA

Fotografie

Koeman en Bijkerk (blz 10,28 en 40)

RWS/Waterdienst, hydrobiologisch laboratorium, Gerlinda Boekhoud-de Graaf
(grote foto cover en blz 04,06,16,24,36)

Frank van Oosterhout (blz 12)

Wikipedia (blz 15)

Miquel Lurling, Wageningen Universiteit (Kleine foto cover en resterende foto's)

Vormgeving

Shapeshifter, Utrecht

Druk

Libertas, Bunnik

STOWA-rapportnummer 2009-43

ISBN 978.90.5773.466.3

STOWA Utrecht, november 2009

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

Disclaimer *De in dit rapport gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.*

TEN GELEIDE

De laatste paar jaar waren de zomers niet zo heet, maar in de recordwarme zomers van 2003 en 2006 waren de signalen overduidelijk: op veel plaatsen werd intensieve bloei van cyanobacteriën ('blauwalgen') gesignaleerd. De laatste decenia is de temperatuur van het Nederlandse oppervlaktewater al een paar graden toegenomen en volgens de gangbare klimaatscenario's zal de temperatuurstijging nog wel even doorgaan; ten gunste van de cyanobacteriën.

Behalve visuele, geur- en stankoverlast zijn cyanobacteriën bekend om de productie van gifstoffen, die schadelijk zijn voor de gezondheid van mens en dier. Maar ook blijken de cyanobacteriën aan de basis van de evolutie van het leven op aarde te staan, met een voor zulke primitieve organismen opvallende rijkdom aan vormen. De verschillende soorten zijn aangepast aan het leven in een groot aantal, soms zeer verschillende milieus, van droge woestijnbodems tot in hete bronnen.

In deze brochure wordt de achtergrondkennis over cyanobacteriën op een rijtje gezet, niet alleen ten behoeve van de bestuurders, de makers van het waterbeleid en de waterbeheerders, maar ook voor de onderzoekers. Gezamenlijk spannen deze groeperingen zich in diverse verbanden in om vat te krijgen op de precieze mechanismen die de bloei van cyanobacteriën veroorzaken, om de aard en werking van de gifstoffen te achterhalen en om voorspellingsmodellen voor cyanobacteriën te ontwikkelen. Dat om de gezondheidsrisico's van de cyanobacteriën zoveel mogelijk het hoofd te bieden.



INHOUD

	Ten geleide	03
H1	Ontstaan van de groene soep	06
H2	Wat zijn blauwalgen?	10
H3	Hoe zien cyanobacteriën eruit?	16
H4	De drijf laag	24
H5	Gifstoffen en hun effecten	28
H6	Cyanobacteriën en klimaatverandering	36
H7	Blauwalgen kunnen hun borst nat maken	40
H8	Referenties	42

H1 Ontstaan van de groene soep

In de loop van vorige eeuw manifesteerde de kwetsbaarheid van onze wateren voor menselijke beïnvloeding zich overduidelijk in veelal een groene soep, waarin zwevende algen domineren. Bijvoorbeeld in het Veluwemeer, dat in de eerste tien jaren van haar bestaan tot aan het midden van de zestiger jaren gekenmerkt werd door helder water met veel ondergedoken waterplanten. Het werd troebel en kende vanaf ongeveer 1970 een permanente bloei van de cyanobacterie *Planktothrix agardhii*²⁴.

De Loosdrechtse Plassen lieten in dezelfde periode eenzelfde omslag van helder naar troebel water zien, waarin de cyanobacteriën *P. agardhii* en *Prochlorothrix hollandica* domineerden^{30,33}. Als belangrijkste reden voor de omslag van helder water met waterplanten naar troebel, algen gedomineerd, water, geldt de vermessing (of eutrofiëring) van het oppervlaktewater⁴⁷.

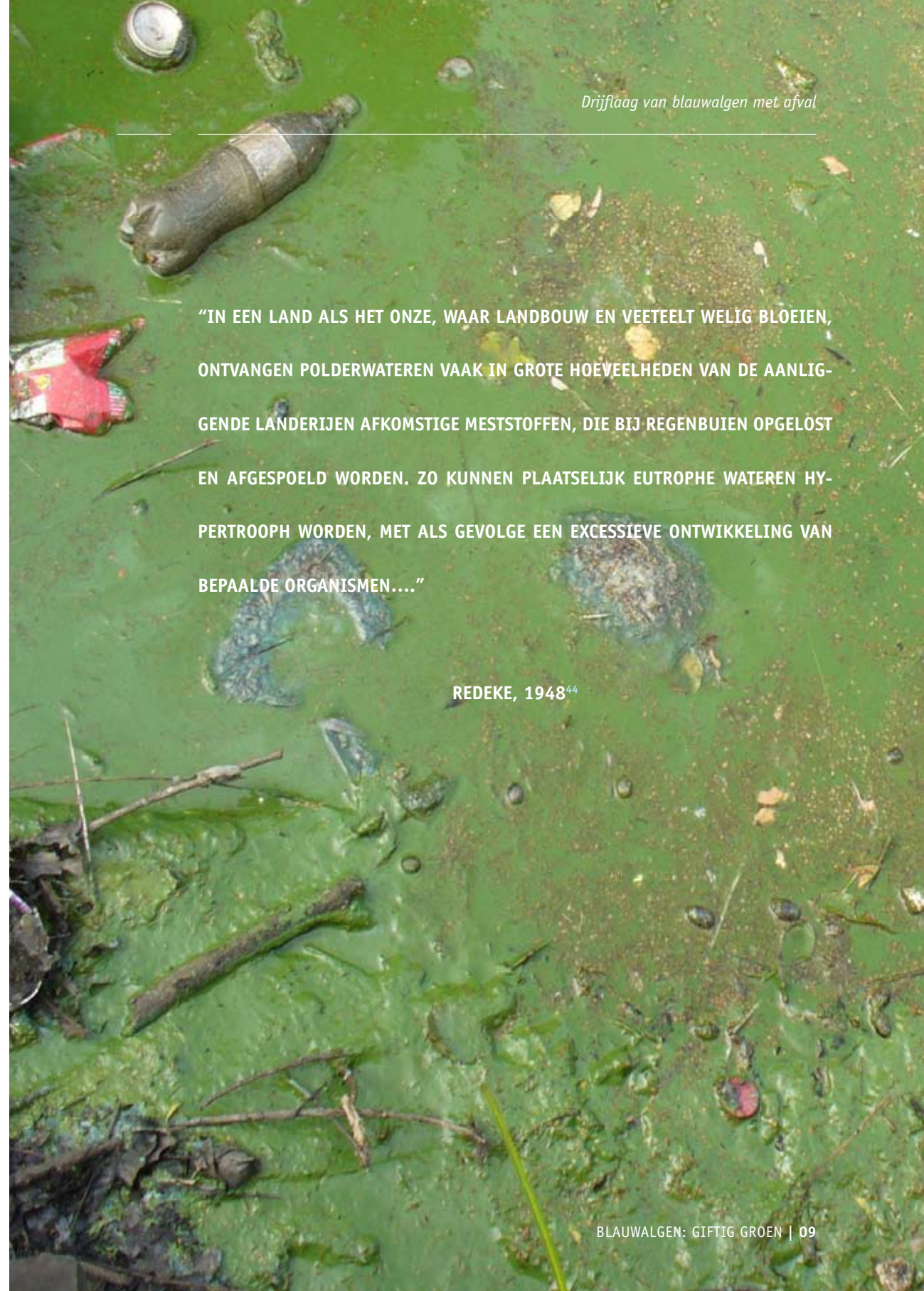
Door allerlei menselijke activiteiten, zoals lozing van huishoudelijke en industrieel afvalwater, of lozing vanuit de landbouw en veeteelt, waren er gedurende vele tientallen jaren grote hoeveelheden voedingsstoffen in het water gekomen.

In boezemwateren in het westen des lands, zoals de Ringvaart Haarlemmermeerpolder, het Braassemmeer en de Westeinderplassen, waar al in de eerste helft van de twintigste eeuw 's zomers bloeien van cyanobacteriën als *Microcystis aeruginosa*, *Aphanizomenon flos-aquae* en *Planktothrix agardhii* werden aangetroffen waren water uit de Rijn en afvalwater van steden als Gouda, Leiden en Haarlem waarschijnlijk een belangrijke bron van meststoffen^{29, 31}.

In Noord-Brabant en Limburg bemerkte Redeke (1948)⁴⁴ bij vele boerenhoven "...hypertrophe en gemeenlijk zeer kwalijk riekende poelen...". Vermesting van het oppervlaktewater kwam vanaf 1950 onder andere door de bevolkingsgroei en het gebruik van fosfaathoudende wasmiddelen in een stroomversnelling.

Om het tij te keren werd in 1970 de Wet op de Verontreiniging van Oppervlaktewater (WVO) aangenomen en verschenen er diverse andere beleidsstukken (o.a. de Fosfatennota in 1979)³⁹. De maatregelen die zijn getroffen om vertroebelde wateren weer helder te krijgen, vooral de vermindering van de nutriënteninvoer, hebben in een aantal wateren tot een aanzienlijke verbetering van de waterkwaliteit geleid, waaronder bijvoorbeeld het Veluwemeer^{25, 26}.

Helaas heeft deze aanpak niet altijd een bevredigend resultaat opgeleverd³⁷ en maakte het optreden van sterke blauwalgenbloei in de Nederlandse oppervlaktewateren in de extreem warme zomers van 2003 en 2006 eens te meer duidelijk dat een onacceptabel deel van onze oppervlaktewateren nog steeds erg kwetsbaar blijft voor blauwalgenbloei.



Drijfvaag van blauwalgen met afval

“IN EEN LAND ALS HET ONZE, WAAR LANDBOUW EN VEETEELT WELIG BLOEIEN, ONTVANGEN POLDERWATEREN VAAK IN GROTE HOEVEELHEDEN VAN DE AANLIGGENDE LANDELIJEN AFKOMSTIGE MESTSTOFFEN, DIE BIJ REGENBUIEN OPGELOST EN AFGESPOELD WORDEN. ZO KUNNEN PLAATSELIJK EUTROPHE WATEREN HYPERTROOPH WORDEN, MET ALS GEVOLGE EEN EXCESSIEVE ONTWIKKELING VAN BEPAALDE ORGANISMEN...”

REDEKE, 1948⁴⁴

H2 Wat zijn blauwalgen?

WAT ZIJN BLAUWALGEN (CYANOBACTERIËN)?

“Dit zijn de laagststaande Algen, wier protoplast nog geen kern bevat...” (Redeke, 1948)⁴⁴.

Alg is afgeleid van het Latijnse *alga* wat zeewier betekent. Ongeveer anderhalve eeuw lang werden alle lagere organismen die tot fotosynthese in staat zijn, van eencellige tot kelp (de grote bruine wieren van de zee kust), gezien als algen. Tegenwoordig zijn de organismen ingedeeld in prokaryoten, die geen membraangebonden celstructuren bezitten (geen celorganellen zoals een celkern, mitochondriën, chloroplasten, endoplasmatisch reticulum, Golgi apparaat en vacuoles) en eukaryoten, die wel celorganellen bezitten. Omdat blauw'alg' geen celorganellen hebben zijn het in wezen bacteriën, waarvoor de naam cyanobacteriën dus meer op zijn plaats is⁵².

Cyanobacteriën zijn fotoautotroof: ze zetten kooldioxide (CO₂) en anorganische voedingsstoffen onder invloed van licht om in biomassa. Bij dit proces (fotosynthese) komt zuurstof vrij. Cyanobacteriën vangen licht met behulp van pigmenten. Alle cyanobacteriën bevatten chlorofyl-a (bladgroen) en het pigment fycocyanine (phycocyaan) waaraan de groep haar naam dankt. De kleur van cyanobacteriën varieert van blauwgroen (cyaan) tot roodbruin vanwege de mogelijke aanwezigheid van andere pigmenten, zoals fycoerythrine ([Figuur 1](#)).

Omdat het woord 'blauwalg' meer recht doet aan het fotosynthetische vermogen en de overeenkomst met 'echte' algen weergeeft, wordt deze aanduiding nog vaak naast het wetenschappelijk correcter 'cyanobacteriën' gebruikt.

Cyanobacteriën behoren tot de oudste levensvormen die we kennen. Volgens sommigen⁴⁹ waren er al 3,5 miljard jaar geleden cyanobacteriën, maar volgens anderen⁶ zijn ze nog niet zo oud. In ieder geval blijkt uit de aanwezigheid van fossielen en chemische aanwijzingen dat er al zo'n 2,7 miljard jaar geleden cyanobacteriën waren^{5, 49}. Dankzij hun fotosynthese zorgden deze cyanobacteriën voor één van de grootste milieuveranderingen uit de geschiedenis van de aarde ([Figuur 2](#)). De atmosfeer veranderde rond 2,2 miljard jaar geleden van een vrijwel zuurstofloze in een zuurstofrijke⁹. Hiermee werd het leven zoals we dat nu kennen mogelijk, maar niet voordat er ruim anderhalf miljard jaar voorbij gingen waarin essentiële veranderingen optraden ([Figuur 2](#)).

Fig 1 ROODBRUINE CYANOBACTERIËN (*PLANKTOTHRIX RUBESCENS*)
(Zwemplas de Rauwbraken, 2005).



Uit de oercellen (prokaryoten) zijn moderne cellen met allerlei organellen (eukaryoten) ontstaan. De endosymbiosetheorie geeft hiervoor een verklaring. Er wordt verondersteld dat een celkern - en daarmee een eukaryoot - is ontstaan, doordat het ringvormige DNA-molecuul in een oer-prokaryoot op een bepaalde wijze aan het celmembraan was verkleefd en omstulpt geraakte. Instulpingen in het celmembraan van deze oereukaryoot zouden uiteindelijk tot incorporatie van een cyanobacterie en een fotosynthetische purperbacterie hebben geleid, die in de moderne cellen geëvolueerd zijn tot respectievelijk chloroplasten (bladgroenkorrels) en mitochondriën (Figuur 3). Beide celorganellen bevatten eigen DNA en dat van de chloroplast heeft bijvoorbeeld veel gelijkenis met het DNA van een cyanobacterie⁹.

Fig 2 GESCHIEDENIS VAN DE AARDE

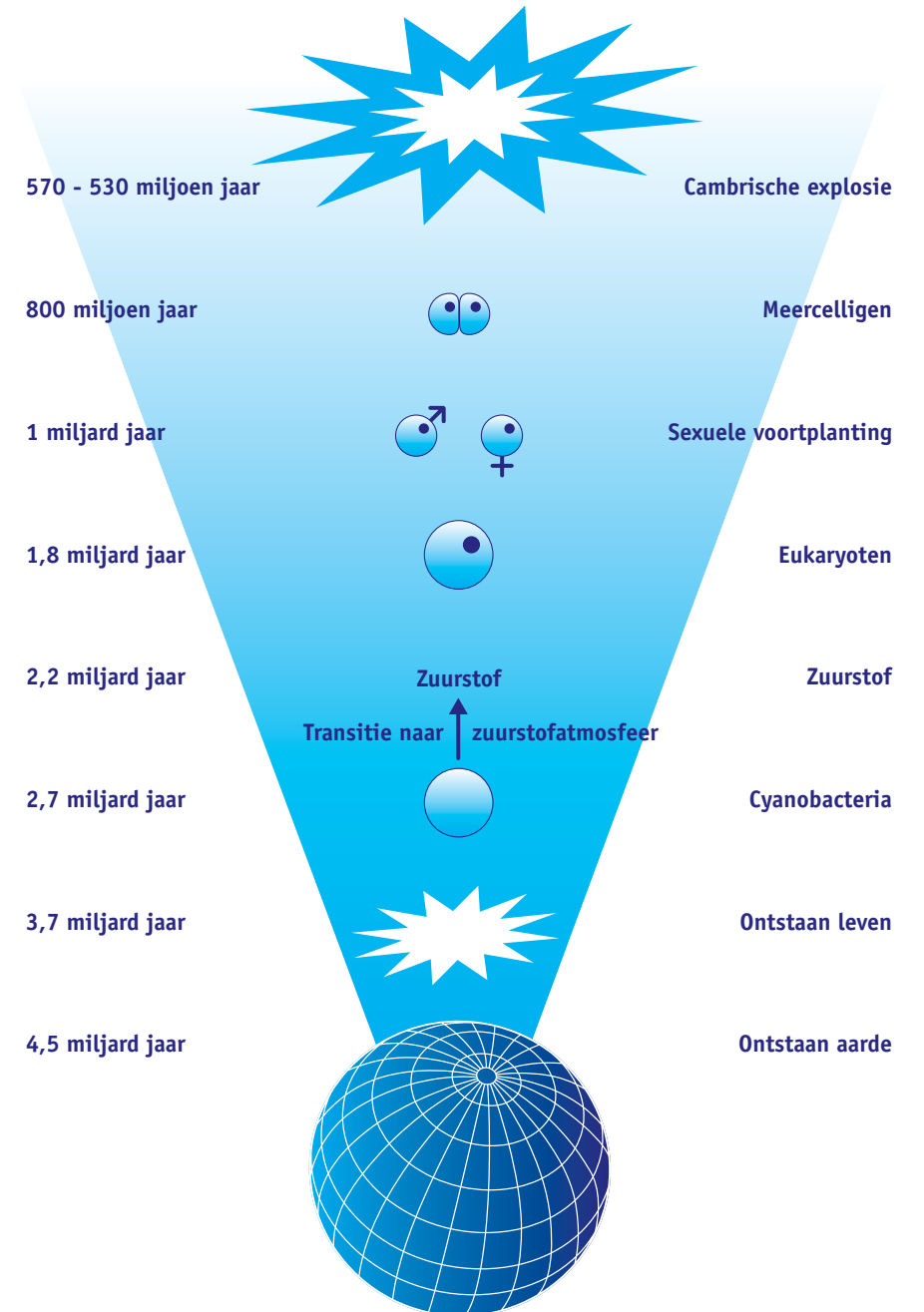
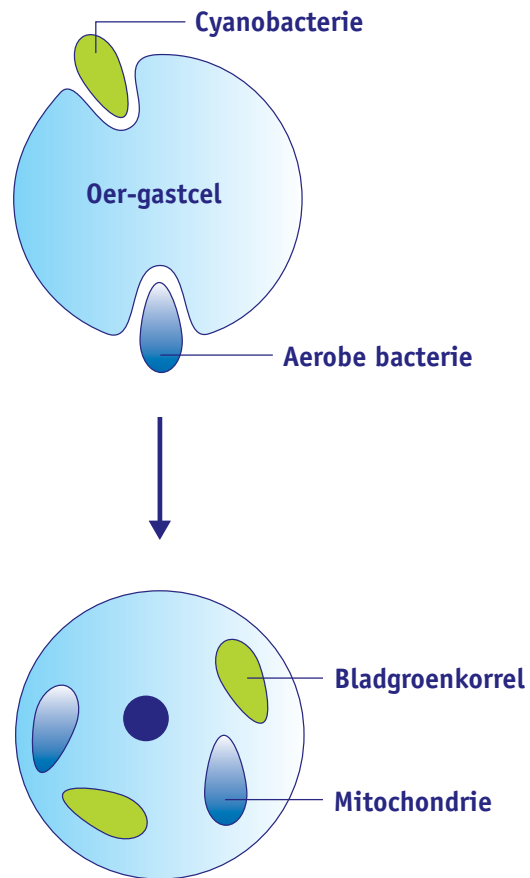


Fig 3 **ENDOSYMBIOSE VAN EEN CYANOBACTERIE EN EEN AEROBE BACTERIE**

Deze evolueren over vele generaties van een oercel naar een moderne cel (aangegeven met een pijl) in een chloroplast en een mitochondrie.



Cyanobacteriën horen van nature in het water thuis. Ze worden aangetroffen in zoet, brak en zout water, in koud water tot zeer warm water en in extreme milieus, waar verder geen andere organismen overleven, zoals in heetwaterbronnen (Figuur 4). Daarnaast komen cyanobacteriën voor op het land en kunnen ze symbiotische interacties aangaan met dieren, planten, zoals bij de Grote kroosvaren (figuur 5), en schimmels^{36, 57, 61}.

Fig 4 **ORANJEKLEURIGE CYANOBACTERIËN IN EEN HEETWATERBRON**

(Yellowstone NP, USA).



Fig 5 **GROTE KROOSVAREN (AZOLLA FILLICULOIDES)**

Deze waterplant leeft in symbiose met de cyanobacterie *Anabaena azollae*.



H3 Hoe zien cyanobacteriën eruit?



Cyanobacteriën zijn minuscule organismen. Ze zijn eencellig, kolonievormig of komen voor als meercellige filamenten (draden). Cyanobacteriën kunnen zich alleen asexueel voortplanten door celdeling. Een ronde kolonie wordt gevormd door celdelingen in meerdere richtingen; een filament door celdeling in één bepaalde richting. De aldus gevormde keten van cellen wordt een trichoom genoemd. Een trichoom kan recht zijn, gedraaid of vertakt zijn. Van draadvormige soorten kunnen kleine fragmenten uitgroeien tot een nieuwe lange keten van cellen. Draadvormers kunnen ook samenklonteren in vlokken, zoals *Aphanizomenon flos-aquae* (Figuur 6). Deze vlokken zijn met het blote oog zichtbaar, maar de afzonderlijke cyanobacteriecellen niet. Als een watermonster tegen het licht wordt gehouden, zijn vaak de individuele ketens zichtbaar.

Fig 6 MICROSCOPISCHE OPNAMEN VAN *APHANIZOMENON FLOS-AQUAE*



Sterk groen of rood- tot donkerbruin gekleurd water kan duiden op een cyanobacteriebloei (Figuur 7). Goed waarneembare wit tot groen of groenbruin gekleurde vlokjes, sliertjes of bolletjes kunnen kolonievormende cyanobacteriën zijn.

Pas door een microscoop worden de cyanobacteriecellen zichtbaar en kan vastgesteld worden om welke soort het gaat. Het indelen van organismen volgt een bepaalde hiërarchie: Rijk – Stam – Klasse – Orde – Familie – Geslacht – Soort. Aldus ontstaat er een taxonomische boom waarin een aantal soorten tot een bepaald geslacht behoren, een aantal geslachten een familie vormen, enzovoort (Figuur 8).

Fig 7 CYANOBACTERIEBLOEI

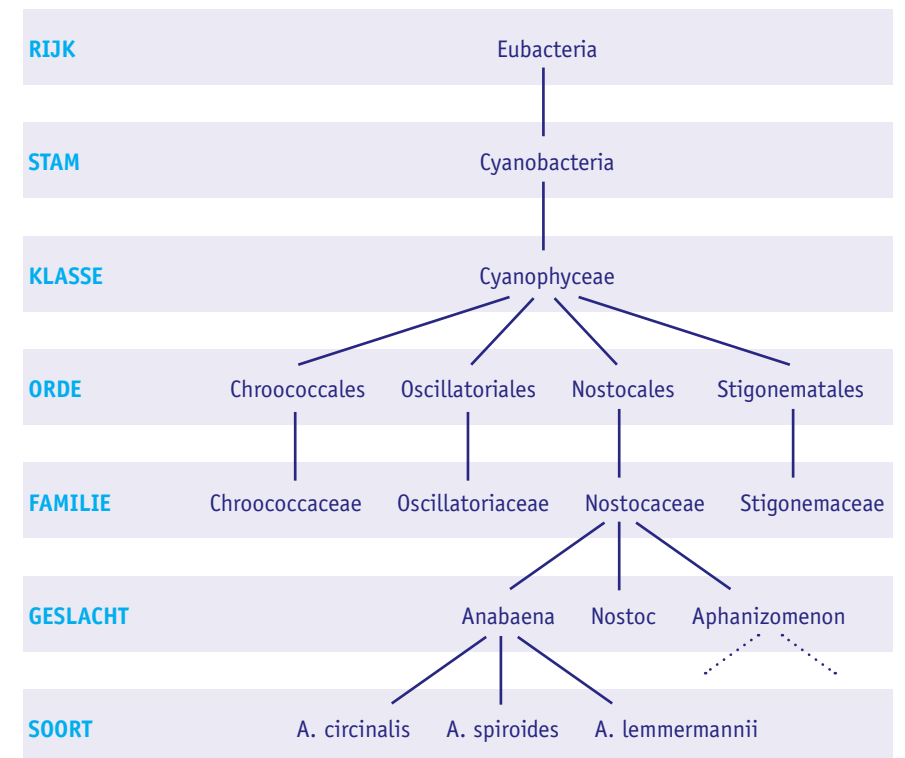
Voorbeelden van een groene-, een bruine- en een rode soep van cyanobacteriën aange- troffen in wateren in Noord-Brabant. Sint-Oedenrode: Planktothrix agardhii, Anabaena, Aphanizomenon (A), Someren: Microcystis (B) en Berkel-Enschot: Planktothrix 'agardhii/ rubescens' (C).



Onder de microscoop blijkt dat er veel verschijningsvormen zijn: clusters, ketens, spiralen, maar ook anders ogende cellen in één keten (Figuur 9). De geelachtig hel- dere cellen (H) in de *Anabaena*-keten bevatten geen reservemateriaal en gasblaasjes. De celwand is dikker dan van de normale cellen en vormt aan grens met andere cellen een knobbeltje aan de binnenzijde.

Deze cellen worden heterocysten (H) genoemd. In deze cellen creëren de cyano- bacteriën een zuurstofloze omgeving waardoor ze stikstofgas kunnen fixeren. Het enzym nitrogenase katalyseert de reductie van stikstofgas naar ammonium ($N_2 \rightarrow NH_4^+$), de stikstofvorm die makkelijk in te bouwen is.

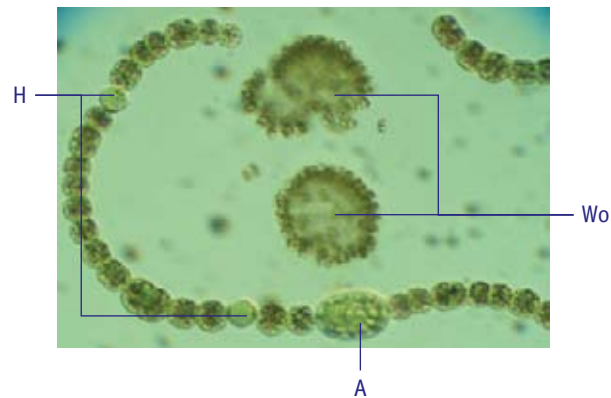
Fig 8 TAXONOMISCHE BOOM CYANOBACTERIËN



Verder valt de grote cel op (A). Dit is een cel vol reservestoffen, een akineet (ακι-υτεοο= bewegingsloos). Akineten worden vaak gevormd in wat oudere populaties en stellen de cyanobacteriën in staat om periodes met ongunstige omstandigheden te overleven. Akineten kunnen vele jaren overleven op het sediment³⁴. Eenmaal terug in de waterkolom kunnen ze uitgroeien en de aanzet vormen tot een nieuwe bloei.

Fig 9 MEERDERE VERSCHIJNINGSVORMEN

Twee kleine Woronichinia-kolonies (Wo) en een Anabaena-keten met daarin twee heterocysten (H) en een akineet (A).

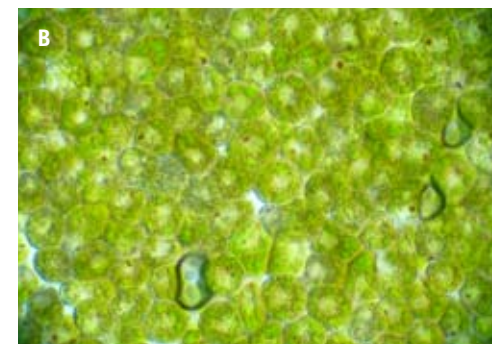


Een cyanobacteriënbloei kan gedomineerd worden door één soort, maar ook bestaan uit verschillende soorten. Zo liet een studie in België, Luxemburg en Noord-Frankrijk naar de samenstelling en toxiciteit van 64 cyanobacteriënbloeien zien dat *Microcystis*- en *Planktothrix*-soorten de meest dominante bloeivormers waren, gevolgd door *Anabaena*-, *Woronichinia*-, en *Aphanizomenon*-soorten⁶².

In de zomers van 2001 en 2002 bleken in waterreservoirs in Tsjechië soorten behorende tot de geslachten *Anabaena*/*Aphanizomenon*, *Microcystis* en *Woronichinia* het meest dominant³. In Nederland worden vooral *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Gloeothechia*, *Microcystis* en *Planktothrix* als de meest abundante bloeivormers gezien⁵³.

Fig 10 DRIJFLAAG VAN EUGLENA

Drijflaag van *Euglena* op een water nabij 's-Hertogenbosch (A). Microscopische opname van een deel van de drijflaag (B) en van de zwemmende cellen in het water (C).



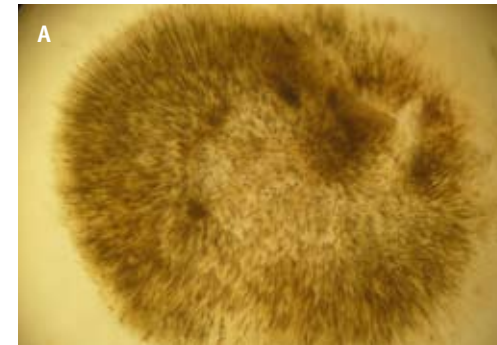
Tijdens een bloei kunnen cyanobacteriën accumuleren aan het wateroppervlak en door de wind aan lager wal worden geblazen. Dit zal veelal resulteren in een verfachtige groene tot roodbruine laag op het water: een drijfslag.

Het op het blote oog detecteren van een cyanobacteriënbloei is goed mogelijk, maar zal altijd geverifieerd moeten worden. Immers niet alle drijfslagen op een water bestaan uit cyanobacteriën. De hieronder afgebeelde foto laat een drijfslag zien bestaande uit het palmelloïde stadium van de flagellaat *Euglena* (Figuur 10). In dit stadium hebben de cellen hun flagel (zweephaar) verloren en produceren ze een slijmlaag om zich heen. Waarschijnlijk was er veel organisch materiaal in het water gekomen.

Op het oog harige bolletjes in het water van een vijver bleken bij uitvergroting onder een microscoop slijmerige kolonies de cyanobacterie *Gloeotrichia* (Figuur 11).

Fig 11 DE CYANOBACTERIE *GLOEOTRICHIA*

Een harig bolletje in het water (A) blijkt onder de microscoop de cyanobacterie *Gloeotrichia* (B), waarvan onder een uitvergroting (C).



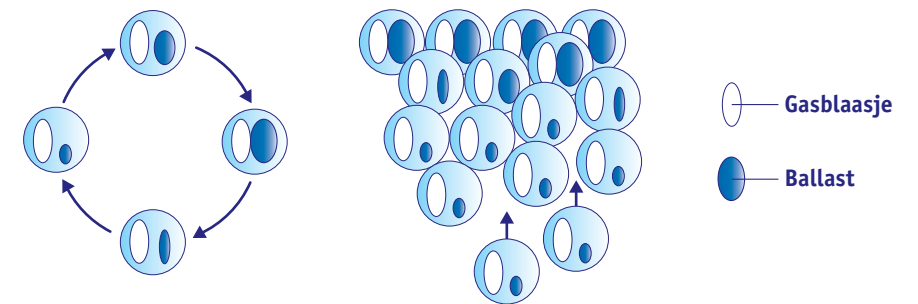
H4 De drijflaag

Veel cyanobacteriën bezitten gasblaasjes. De gasblaasjes worden omsloten door een wand van eiwit. Als de lichtintensiteit laag is kunnen er meer gasblaasjes gevormd worden. De cyanobacteriën kunnen hierdoor een positief drijfvermogen krijgen. Eenmaal aan het wateroppervlak is de lichtintensiteit hoog, waardoor de fotosynthesesnelheid hoog is en koolhydraten worden opgeslagen. Hierdoor worden de cyanobacteriën zwaarder. Tevens neemt de celdruk toe, waardoor er gasblaasjes bezwijken. De cyanobacteriën zakken nu naar dieper water, consumeren de opgeslagen koolhydraten en maken eventueel nieuwe gasblaasjes aan. Gedurende de nacht verkrijgen de cyanobacteriën daardoor weer een positief drijfvermogen.

Een deel van de populatie kan aan het wateroppervlak gaan drijven zodat een soms dikke drijflaag ontstaat (Figuur 12), die kan met een briesje aan lager wal kan worden geblazen (Figuur 13).

Fig 12 DRIJFLAAGVORMING

Verticale verplaatsing van een cyanobacteriecel in de waterkolom als gevolg van opslag en consumptie van (ballast) koolhydraten (links) en drijflaagvorming (rechts). Naar Verspagen⁵⁶.



Drijflagen kunnen het gehele jaar voorkomen, maar worden vooral in de periode van het late voorjaar tot het begin van de herfst waargenomen (grofweg de periode waarin diepe meren gestratificeerd zijn). In de herfst, als de watertemperatuur en de lichtinstraling dalen, zal een groot deel van de kolonies uiteindelijk op de waterbodem belanden waar ze de opgeslagen koolhydraten langzaam consumeren. Er zijn verschillende mechanismen waardoor de verschillende cyanobacteriën hun positieve drijfvermogen kunnen verliezen en uitzinken⁴⁰:

- Verhoogde turgordruk waardoor gasblaasjes knappen, bijvoorbeeld in *Anabaena*;
- Gestopte aanmaak van nieuwe gasblaasjes en accumulatie van ballast, bijvoorbeeld in *Planktothrix*;
- Accumulatie van colloïdaal materiaal aan het slijm rondom de kolonies, bijvoorbeeld in *Microcystis*.

Fig 13 STEDELIJKE WATEREN MET CYANOBACTERIEBLOEI

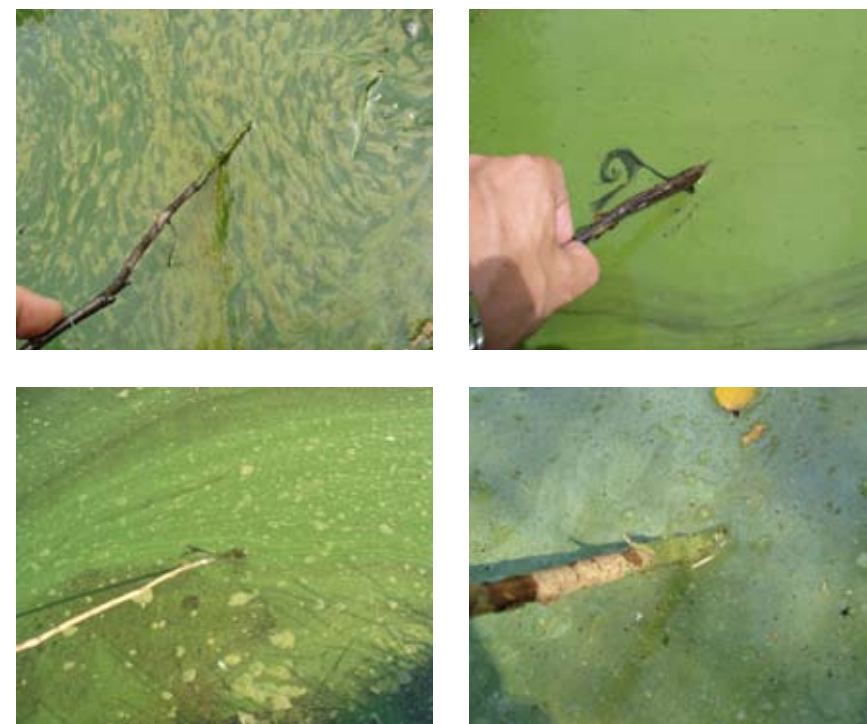
Voorbeeld van enkele stedelijke wateren met een cyanobacteriebloom en drijfslag (zomer 2006).

A = Bennekom, B = Bergen-op-Zoom, C = Grave, D = Helmond.



In het voorjaar kunnen een aantal kleine cellen en kolonies opstijgen in de waterkolom en een aanzet geven tot een volgende bloei. Een paar voorbeelden van een drijfslag zijn weergegeven in [Figuur 14](#).

Fig 14 ENKELE VOORBEELDEN VAN EEN DRIJFLAAG



H5 Gifstoffen en hun effecten

Intense bloei van cyanobacteriën is onwenselijk. Een drijfslag op het water ziet er niet echt uitnodigend uit om in te gaan zwemmen. Soms gaat drijfslagvorming gepaard met een behoorlijke stank, variërend van een “rioollucht” tot een zwavelachtige of muffige geur. Ook kan er bij afbraak zo veel zuurstof verbruikt worden dat vissen massaal sterven. Het grootste probleem is echter de eigenschap van veel cyanobacteriën om gifstoffen (cyanotoxines) te produceren.

5.1 SOORTEN CYANOTOXINES

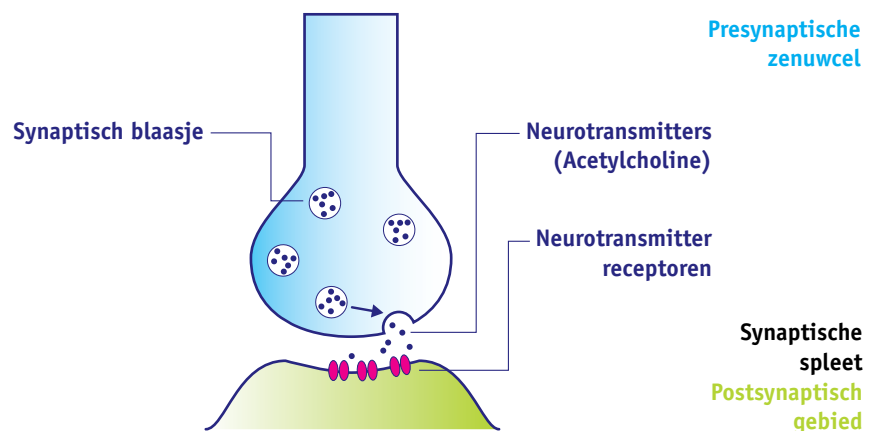
Er zijn verschillende groepen van cyanotoxines: neurotoxines, cytotoxines, hepatotoxines en irriterende stoffen (dermatotoxines)^{6, 10, 12, 22, 50, 60}.

Neurotoxines

Neurotoxines beïnvloeden de overdracht van signalen tussen zenuwcellen (Figuur 15). Er worden vier groepen onderscheiden:

- *Anatoxine-a* en *homoanatoxine-a* remmen postsynaptische depolarisatie. Deze alkaloiden binden irreversibel aan de acetylcholine receptor (kunnen na binding niet door acetylcholine-esterase gescheiden worden van de receptor), waardoor er een continue actiepotentiaal ontstaat, met als gevolg een overstimulatie en verkramping van de spieren wat kan resulteren in een ademhalingsstilstand.
- *Anatoxine-a(s)* is een natuurlijk organofosfaat en lijkt qua werking op bepaalde bestrijdingsmiddelen zoals parathion. Dit toxine is een zeer krachtige remmer van het enzym acetylcholine-esterase, wat uiteindelijk ook leidt tot verkramping van de spieren.
- *Saxitoxines*, waarvan meer dan tien varianten bekend zijn, remmen de neurologische signaaloverdracht door binding aan de natrium/kalium-kanalen in zenuwcellen. Hierdoor wordt voortplanting van de elektrische impuls langs een axon verstoord en zullen bij de synaps geen neurotransmitters (acetylcholine) uitgescheiden worden in de synapsspleet met als gevolg een verstoorde communicatie tussen neuron en spiercel. Dat leidt tot verlamming van de spieren.
- β -*N-methylamino-l-alanine* (BMAA) is een neurotoxisch aminozuur dat als “slow-toxin” recentelijk in verband is gebracht met de ziekte van Alzheimer of vergelijkbare neurodegeneratieve aandoeningen. Het is waarschijnlijk doodsoorzaak nummer één bij de inheemse bewoners van het eiland Guam, die het gif binnenkrijgen met producten van een palmvaren, waarvan de wortels in symbiose leven met cyanobacteriën^{13, 14}.

Fig 15 NEUROTOXINES BEÏNVLOEDEN DE SIGNAALOVERDRACHT TUSSEN ZENUWCELLEN



Cytotoxines

Hiertoe behoren *cylindrospermopsine* en *deoxy-cylindrospermopsine*, die de eiwitsynthese remmen en daardoor necrose in lever, nieren, milt, longen veroorzaken. Deze toxines zijn bovendien genotoxisch (kan tot DNA schade leiden).

Hepatotoxines

Hepatotoxines veroorzaken schade aan de lever en zijn in twee groepen te verdelen:

- *Microcystines* remmen eiwitfosfatase en resulteren in leverschade. Vanwege het hydrofiele karakter kunnen microcystines alleen door middel van actief, ATP-afhankelijk, transport door de celmembraan geraken. Omdat levercellen een dergelijk transportmechanisme hebben, hopen microcystines zich na consumptie op in de lever alwaar ze levercellen ernstig kunnen beschadigen door het cytoskelet te verstoren. Er zijn meer dan 70 varianten bekend. Microcystines zijn cyclische hepta-peptides wat betekent dat ze uit een ring van zeven aminozuren bestaan. Vijf niet-eiwitaminozuren vormen de basis, terwijl twee eiwitaminozuren gevarieerd kunnen voorkomen. De meest bekende variant, microcystine-LR, bevat leucine (L) en arginine (R).
- *Nodularines*, waarvan zes varianten bekend zijn, zijn cyclische penta-peptides (bestaan uit vijf aminozuren) en gelijken qua structuur en werking sterk op de microcystines. Nodularines zijn tevens carcinogeen.

Dermatotoxines

Dermatotoxines veroorzaken irritaties, voornamelijk aan de huid, maar ook aan de ogen. Er worden twee groepen onderscheiden:

- *Lipopolysacchariden*, componenten van de buitenste celwand van cyanobacteriën, kunnen irritaties and ogen of huid veroorzaken als ook koorts.
- *Aplysiatoxine*, *debromoaplysiatoxine* en *lyngbyatoxine* veroorzaken huidirritatie.

5.2 BLOOTSTELLING AAN CYANOTOXINES

Uit bovenstaand overzicht van de belangrijkste cyanotoxines volgt dat contact met, of consumptie van, cyanobacteriën kan resulteren in irritaties aan ogen en huid, hoofdpijn, maag- en darmklachten en zelfs nog grotere gezondheidsproblemen. Zo is anatoxine-a dodelijk omdat het niet enzymatisch afgebroken kan worden en er geen tegengif voor bestaat⁷.

Zwem- en badwater

Er zijn aanwijzingen dat consumptie van cyanobacteriën in de zomer van 2002 een 17 jarige tiener in Wisconsin (VS) fataal is geworden, nadat hij samen met vier vrienden verkoeling had gezocht in een vijver nabij een golfterrein. Drie van de vijf tieners ontwikkelden lichte symptomen, maar de twee die een ferme slok water hadden binnen gekregen, ontwikkelden heftige symptomen zoals misselijkheid, overgeven en diarree. Eén van hen overleed 48 uur na contact en consumptie van cyanobacteriën.

Onderzoek toonde aan dat beide waren blootgesteld aan *Anabaena flos-aquae* en anatoxine-a. Echter de tijdsspanne tussen blootstelling en overlijden van 48 uur was ook voor de bij het onderzoek betrokken expert, Dr W. Carmichael, een raadsel. Desalniettemin concludeerde hij “...the evidence points to anatoxin”².

Vaak zijn ze achteraf moeilijk te onderscheiden van andere mogelijke oorzaken, maar huidirritatie, diarree en misselijkheid lijken tamelijk algemeen voor te komen na contact met cyanobacteriën tijdens het zwemmen. Een epidemiologische studie met 852 recreanten laat een hogere incidentie aan diarree, braken, koorts, en irritaties aan ogen, oren en huid zien binnen een week na blootstelling aan cyanobacteriën, waarbij de klachten proportioneel zijn met blootstellingsduur en dichtheid van de cyanobacteriën⁴².

In 1989 werden in Engeland 20 soldaten onderworpen aan een zwem- en kano-training in een meer met een dichte *Microcystis* bloei. De helft werd behoorlijk ziek (diarree, overgeven, buikpijn, keelpijn, zwerende lippen), en twee moesten met longontsteking (toegeschreven aan inademing van toxinen) worden opgenomen in het ziekenhuis⁵⁵. Het bleek dat degenen die het slechts konden zwemmen en het meeste water hadden binnen gekregen ook het ziekst waren geworden.

Uit onderzoek naar microcystines in drijfslagen van stadswateren in ZO-Nederland blijkt dat één slok hiervan voor een kind de maximaal toelaatbare inname al tientallen tot duizend maal overschrijdt³⁵, waardoor er een reëel risico op permanente schade en een hoog gezondheidsrisico is.

Niet alleen door zwemmen surfen en duiken, maar ook door baden of douchen kunnen mensen blootgesteld worden aan cyanotoxines. Zo worden bijvoorbeeld de lipopolysacchariden verantwoordelijk gehouden voor de uitbraken van koorts, spierpijn en luchtweginfecties in vijf verschillende steden in Zweden, Finland en Zimbabwe, kort nadat mensen een warme douche of bad hadden genomen¹.

Ernstige gezondheidseffecten bij mensen zijn niet snel te verwachten na recreatieve blootstelling aan met blauwalgen verontreinigd water, doordat de meeste mensen terughoudend zijn met zwemmen in en zeker met drinken van troebel en stinkend water. Het gevaar van blauwalgen in de Nederlandse situatie lijkt vooral te schuilen in drijfslagen, die door de wind in de zwemzone van recreatieplassen kunnen terechtkomen⁴⁵.

Drinkwater

Drinkwater bereid uit meren met een cyanobacteriënbloei heeft meerdere malen tot grote problemen geleid, bijvoorbeeld in 1988 in de regio Paulo Afonso nabij de Itaparica Dam (Brazilië). Er werden 2000 mensen ziek en er overleden er 88 (voornamelijk kinderen) als gevolg van het drinken van water, dat was bereid uit een nieuw stuwmeer vol *Anabaena* en *Microcystis*⁵⁴.

Ernstige gezondheidseffecten zijn geregeld veroorzaakt door bestrijding van de cyanobacteriënbloei in drinkwaterreservoirs met kopersulfaat waardoor cyanotoxines vrijkwamen. Behandeling van een bloei van *Cylindrospermopsis raciborskii*

in Solomon Dam (Palm Eiland, Australië) met kopersulfaat, leidde in november 1979 tot ziekenhuisopname van 148 personen (waarvan 140 kinderen). Ze werden opgenomen met symptomen van leverontsteking (hepato-enteritis), overgeven en diarree, en bleken bij nader onderzoek zowel lever- als nierschade te hebben²³. Ook in Australië, werd in 1981 in het drinkwaterreservoir van het stadje Armidale een bloei van *Microcystis aeruginosa* met kopersulfaat bestreden met als gevolg lever-schade bij de consumenten¹⁸.

Naast deze acute effecten kan een chronische blootstelling aan cyanotoxines in lagere concentraties leiden tot verhoogd kankerrisico, zoals het geval lijkt in zuidoost China. De microcystines kunnen een grote bedreiging voor de menselijke gezondheid vormen, omdat mensen via (lage concentraties in) drinkwater langdurig blootgesteld kunnen worden⁵⁹.

Een ernstig incident vond plaatst in februari 1996 in een nierdialysecentrum nabij Recife (Brazilië). Bijna 90% van de patiënten (116 van 131) kreeg zichtklachten, werd misselijk en moest overgeven na de behandeling. Honderd patiënten ontwikkelden een ernstig leverfalen. Uiteindelijk overleden 76 mensen aan de intraveneuze blootstelling aan microcystine en cylindrospermopsine^{8, 27}.

Dit incident maakt duidelijk dat nierdialysepatiënten extra kwetsbaar zijn voor cyanotoxines vanwege de blootstelling aan grote hoeveelheden speelwater. Ook mensen met een leveraandoening zullen kwetsbaarder zijn voor de nadelige effecten van cyanotoxines. Zuigelingen, die in relatie tot hun lichaamsgewicht veel meer water consumeren dan volwassenen, zullen kwetsbaarder zijn voor blootstelling aan cyanotoxines in drinkwater. Voor kinderen geldt dit eveneens, zij het in iets mindere mate.

Dieren zijn minder terughoudend dan mensen bij het drinken van stinkend en troebel water en zullen daardoor makkelijker een toxische dosis innemen⁴⁵. Daardoor zijn er veel gevallen bekend van sterfte bij vee, honden, vogels en andere dieren die water met cyanobacteriën hebben gedronken⁵⁹. In Nederland zijn bijvoorbeeld de massale vogelsterfte in het Volkerak-Zoommeer in 2002, de vis- en vogelsterfte in de Romeinenweerd in 2003 en de eendensterfte in de Rhederlaag in 2005 in verband gebracht met cyanogiffen^{38, 43}.

Voedingssupplementen

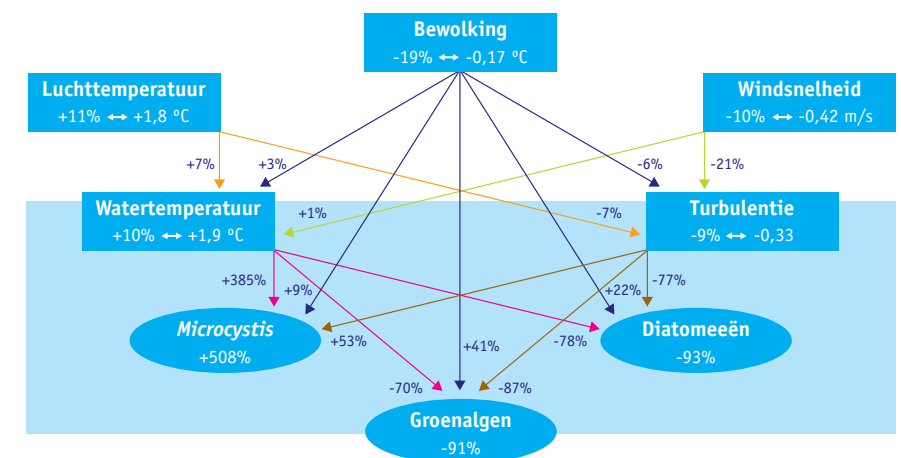
Voedingssupplementen op basis van cyanobacteriën, *Spirulina* en *Aphanizomenon*, kunnen cyanogiffen bevatten. Omdat er hierbij vaak natuurlijk materiaal wordt gebruikt, is verontreiniging met microcystine producerende cyanobacteriën mogelijk en de gebruikte cyanobacteriën zijn soms zelf in staat zijn tot productie van cyanogiffen^{17, 19}. Het gebruik van dergelijke voedingssupplementen dient met extra zorg omgeven te worden, zeker daar waar het onderdeel uitmaakt van behandeling van ADHD in kinderen. In vrijwel alle daartoe onderzochte cyanobacteriënproducten is microcystine aanwezig, waarbij in ruim 70% van de monsters de richtlijn van de Wereld Gezondheidsorganisatie (WHO) werd overschreden¹⁷. Onderzoek aan de weefsels van een overleden 34-jarige vrouw uit Oregon (VS), die veelvuldig cyanobacteriënproducten consumeerde, wees op microcystinevergiftiging¹⁶.

H6 Cyanobacteriën en klimaatverandering

‘Blooms like it hot’. Zo is de titel van een recent artikel in Science⁴¹. In de zomer van 2006 (de heetste zomer van de afgelopen vijfhonderd jaar) was in de Nieuwe Meer bij Amsterdam de groei van blauwalgen, ondanks zeer intensieve menging, niet meer te stoppen²⁸ (Figuur 16). Cyanobacteriën doen het bij hogere temperaturen (vaak boven 25 °C) beter dan andere groepen uit het plankton, zoals diatomeeën (kiezelwieren) en groenalgen. Doordat de verticale gelaagdheid in de meren door temperatuuroptoe name groter wordt en het groeiseizoen langer wordt ontstaat een steeds gunstiger milieu voor cyanobacteriën. Door toename van de neerslag in sommige perioden zal de afspoeling van nutriënten toenemen, wat ook gunstig is voor de cyanobacteriën, evenals het stagneren van het water in droge perioden, die vaker dan vroeger zullen gaan voorkomen. De toename van de verdamping bevordert de verzilting, wat volgens Paerl & Huisman⁴¹ voor de cyanobacteriën gunstiger is dan voor veel andere soorten (‘echte’) algen.

Fig 16 MODEL VAN DE EFFECTEN VAN HETE ZOMERS OP DE HOEEVEELHEID PLANKTONALGEN

Voor elke variabele is in elk hokje aangegeven wat de absolute en relatieve afwijkingen zijn in de hete zomer van 2003 ten opzichte van een normale zomer, in de recreatieplas Nieuwe Meer (Amsterdam). Bij de pijlen zijn alleen de relatieve veranderingen in 2003 ten opzichte van een normale zomer aangegeven. Dus van de toename van 508% van het blauwalg *Microcystis* wordt 385% veroorzaakt door de toename van de watertemperatuur. Door interacties tussen de verschillende factoren zijn de percentages niet additief^{28, 51}.



De intensiteit en frequentie van bloei van toxische cyanobacteriën lijkt wereldwijd en ook in Nederland toe te nemen. Dat resulteerde enige jaren geleden bijvoorbeeld in een richtlijn voor zwemwater^{11, 20, 21, 32}. Deze toename verloopt parallel aan de verandering van het klimaat in Nederland, wat gereflecteerd wordt in de geleidelijke toename van de watertemperatuur^{15, 48}. Door de temperatuurstijging van een paar graden is in de Friese meren al een verlenging van het groeiseizoen van blauwwieren van twee maanden waargenomen⁵⁸. De recente klimaatscenario's van het KNMI (www.knmi.nl/klimaatscenarios) laten een toekomstige temperatuurstijging zien en mogelijke veranderingen in neerslag.

Er is een vergrote kans op eutrofiëring door extra afspoeling van meststoffen bij zware buien, er worden hogere watertemperaturen verwacht, en een langere periode met hogere temperaturen. Voor Nederland wordt derhalve een door klimatologische veranderingen gestimuleerde bloei van cyanobacteriën verwacht⁴⁶. Er is daardoor al een wereldwijde gestage opmars van (sub)tropische “probleem-cyanobacteriën” aan de gang⁴¹.

Hoewel de klimaatveranderingen in de oppervlaktewateren in het landelijk gebied al zullen leiden tot een toenemende bloei van blauwalgen zijn er in het stedelijk gebied, de woonomgeving van de meeste mensen, nog een paar oorzaken die deze toename nog eens zullen versterken.

Zo wordt - om voldoende waterberging te realiseren - het areaal natte natuur vergroot en zijn er daardoor talrijke nieuwbouwprojecten met een aanzienlijke oppervlakte stilstaand water. In stedelijk gebied is het altijd warmer dan op het platteland. Stenen, beton en asfalt nemen de zonnewarmte beter op dan akkers en weilanden. Bovendien is in de stad is ook minder afkoeling door verdamping en wind. Het gevolg is dat in stedelijk gebied massale bloei van cyanobacteriën, inclusief de vorming van drijfvlagen en stankoverlast, eerder kan optreden en langer kan aanhouden dan in het buitenwater. Er is echter nog weinig bekend over de omvang van de huidige cyanobacteriënproblematiek in stedelijk water.

In stedelijk gebied zijn vooral riooloverstorten belangrijke veroorzakers van de vermesting van het oppervlaktewater, maar ook watervogels (en het voeren ervan) en jarenlang lokaasgebruik in de hengelsport en het uitlaten van honden kan tot aanzienlijke vermesting van vijvers en stilstaande wateren leiden. Door de voed-

selrijkdom van het water kunnen vervolgens cyanobacteriën zich tot hoge dichtheden vermenigvuldigen. Het vermogen van cyanobacteriën om diverse gifstoffen te produceren en in hoge concentraties te accumuleren aan het wateroppervlak (een drijfslag te vormen), leidt tot onwenselijke situaties met mogelijk schadelijke effecten voor mens en dier. Vandaar dat het tijdig signaleren van cyanobacteriën-bloei en een adequate informatieverstrekking naar de burgers noodzakelijk is.

In Nederland wordt bloei van cyanobacteriën vooralsnog alleen scherp in de gaten gehouden in de wateren bedoeld voor de drinkwatervoorziening en op officiële zwemlocaties. Het toenemende wateroppervlak in de woonomgeving, als architectonische verfraaiing en waterberging, wordt nog niet systematisch op bloei van cyanobacteriën onderworpen, zodat daarvan ook nog geen duidelijk overzicht bestaat. Uit oriënterend onderzoek is gebleken dat in stadswateren intensieve bloei van blauwalgen optreedt, niet alleen met de daaraan verbonden geur- en stankbezwaren, maar ook met risico's voor de gezondheid van mens en dier³⁵.

H7 Blauwalgen kunnen hun borst nat maken

Het is voor de waterbeheerders een grote uitdaging om alle instrumenten in te zetten die de uitbreiding van de cyanobacteriën en de schadelijke gevolgen daarvan tegen gaan. Daarvoor is het belangrijk om meer te weten van de sleutelfactoren voor het voorkomen van bloeien van cyanobacteriën. Ook over de toxines die worden geproduceerd door cyanobacteriën bestaan nog vragen, net als de mogelijke maatregelen om ze te bestrijden.

In het kader van het Watermozaïek heeft STOWA daarom, samen met het kennisinstituut Deltares, het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO), de Universiteiten van Amsterdam en Wageningen en de betrokken waterbeheerders een programma opgezet om onder meer de volgende vragen te beantwoorden:

- Wat zijn de sleutelfactoren die ervoor zorgen dat verschillende soorten cyanobacteriën in zoete wateren tot bloei komen?
- Welke toxines worden door deze soorten geproduceerd en onder welke omstandigheden?
- Welke bronmaatregelen kunnen geformuleerd worden om de bloei van cyanobacteriën tot een acceptabel niveau te beperken? Welke effecten zijn van deze maatregelen te verwachten?
- Welke symptoombestrijdingsmaatregelen kunnen geformuleerd worden om de effecten van de bloei van cyanobacteriën tot een acceptabel niveau te beperken? Welke effecten zijn van deze maatregelen te verwachten?
- Wat is de kosteneffectiviteit van verschillende maatregelen?

Een en ander moet resulteren in concrete, bij voorkeur in kwantitatieve termen geformuleerde aanbevelingen en (vuist)regels en gedragsregels voor het waterbeheer. Op dit moment loopt al onderzoek naar de vervolmaking van een model voor de voorspelling van drijfslagen, de beperking van drijflaagvorming door toedienen van ijzer of aluminium en Phoslock (een middel dat fosfaten bindt) en het voorkomen van andere toxines dan microcystine in het oppervlaktewater.

Op de website van STOWA (www.stowa.nl) is regelmatig nieuws over de blauwalgenproblematiek te vinden, o.a. onder het thema 'Cyanobacteriën'. De Wageningen Universiteit heeft een digitaal blauwalgendossier (<http://www.wur.nl/NL/nieuwsagenda/dossiers/Blauwalgen.htm>) en er is een speciale site voor informatie over blauwalgen en de manier waarop algenbloei kan worden bestreden en voorkomen (www.blauwalg.wur.nl).

H8 Referenties

- 1 Annadotter, H., Cronberg, G., Nystrand, R. & Rylander, R. 2005. Endotoxins from cyanobacteria and gram-negative bacteria as the cause of an acute influenza-like reaction after inhalation of aerosols. *EcoHealth* 2: 209-221.
- 2 Behm, 2003. Coroner cites algae in teen's death. From the Sept. 6, 2003 editions of the *Milwaukee Journal Sentinel*.
- 3 Boutte, C., Komarkova, J., Grubisic, S., Znachor, P., Bataille, A., Zapomelova, E., Gul-lukaya, A., Jezberova, J. & Wilmote, A. 2005. A polyphasic approach to assess the cyanobacterial diversity of summer samples from Czech reservoirs. *Archiv Hydrobiol. Suppl.* 159: 177-195.
- 4 Brasier, M.D., Green, O.R., Jephcoat, A.P., Kleppe, A.K., Van Kranendonk, M.J., Lindsay, J.F., Steele, A. & Grassineau, N.V. 2002. Questioning the evidence for Earth's oldest fossils. *Nature* 416: 76-81.
- 5 Brocks, J.J., Logan, G.A., Buick, R. & Summons, R.E. 1999. Archeanmolecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science* 285: 1033-1036.
- 6 Bumke-Vogt, C., Mailahn, W. & Chorus, I. 1999. Anatoxin-a and neurotoxic cyanobacteria in German lakes and reservoirs. *Environ. Toxicol.* 14: 117-125.
- 7 Carmichael, W.W. 1994. The toxins of cyanobacteria. *Sci. Am.* 64-72.
- 8 Carmichael, W.W., Azevedo, S., An, J.S., Molica, R.J.R., Jochimsen, E.M., Lau, S., Rinehart, K.L., Shaw, G.L. & Eagelsham, G.K. 2001. Human fatalities from cyanobacteria: chemical and biological evidence for cyanotoxins. *Environmental Health Perspectives* 109: 663-668.
- 9 Cavalier-Smith, T. 2006. Cell evolution and Earth history: stasis and revolution. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 361: 969-1006.
- 10 Chorus, I., Falconer, I.R., Salas, H.J. & Bartram, J. 2000. Health risks caused by fresh-water cyanobacteria in recreational water. *J. Toxicol. Environ. Health B* 3: 323-347.
- 11 CIW, 2002. *Veilig zwemmen: Cyanobacteriën in zwemwater*. Commissie Integraal Water-beheer, aangepast protocol 2002. www.ciw.nl.
- 12 Codd, G.A., Morrison, L.F. & Metcalf, J.S. 2005. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 203: 264-272.
- 13 Cox, P.A. & Sacks, O.W. 2002. Cycad neurotoxins, consumption of flying foxes, and ALS-PDC disease in Guam. *Neurology* 58: 956-959.
- 14 Cox, P.A., Banack, S.A. & Murch, S.J. 2003. Biomagnification of cyanobacterial neurotoxins and neurodegenerative disease among the Chamorro people of Guam. *Proc. Natl Acad. Sci.* 100: 13380-13383.
- 15 Dam, H. van 2009. *Evaluatie basismetnet waterkwaliteit Hollands Noorderkwartier: trendanalyse hydrobiologie, temperatuur en waterchemie 1982-2007*. Rapport 708.

- Herman van Dam, Adviseur Water en Natuur, Amsterdam.
- 16 Dietrich, D.R., Ernst, B. & Day, B.W. 2007. Human consumer death and algal supplement consumption: a *post mortem* assessment of potential microcystin-intoxication via microcystin immunohistochemical (MC-IHC) analyses. 7th ICTC, *New Challenges on Toxic Cyanobacteria Issues*, pp. 132.
- 17 Dittmann, E. & Wiegand, C. 2007. Cyanobacterial toxins – occurrence, biosynthesis and impact on human affairs. *Mol. Nutr. Food Res.* 50: 7-17.
- 18 Falconer, I.R., Beresford, A.M. & Runnegar, M.T.C. 1983. Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa*. *Med. J. Aust.* 1: 511-514.
- 19 Falconer, I.R., Bartram, J., Chorus, I., Kuiper-Goodman, T., Utkilen, H., Burch, M., & Codd, G.A. 1999. *Safe levels and safe practices*. In: Chorus, I. & Bartram, J. (Eds.), *Toxic cyanobacteria in Water*. E and FN Spon, London, pp. 155-178.
- 20 Figueirido, de D.R., Azeiteiro, U.M., Esteves, S.M., Gonçalves, F.J.M. & Pereira, M.J. 2004. Microcystin-producing blooms-a serious global public health issue. *Eco-tox. Environ. Saf.* 59: 151-163.
- 21 Gezondheidsraad, 2001. Microbiële risico's van zwemmen in de natuur. *Publicatie 2001/25*. 's-Gravenhage.
- 22 Haider, S., Naithani, V., Viswanathan, P.N. & Kakkar, P. 2003. Cyanobacterial toxins: a growing environmental concern. *Chemosphere* 52: 1-21.
- 23 Hawkins, p.r., runnegar, m.t.c., jackson, a.r.b. & falconer i.r. 1985. severe hepatotoxicity caused by the tropical cyanobacterium (blue-green alga) *Cylindrospermopsis raciborskii* (woloszynska) seenaya and subba raju isolated from a domestic water supply reservoir. *Appl. Environm. Microbiol.*, 50: 1292-1295.
- 24 Hoser, H. & Meyer, M.-L. 1986. Control of phosphorus loading and flushing as restoration methods for lake Veluwe, The Netherlands. *Hydrobiol. Bull.* 20: 183-194.
- 25 Hoser, H., Portielje, R. & Lammens, E. 2007. Heldere meren in Nederland in 2015: droom of werkelijkheid? *H₂O* 40(18): 31-33.
- 26 Ibelings, B.W., Portielje, R., Lammens, E.H.R.R., Noordhuis, R., van den Berg, M.S., Jooze, W. & Meijer, M.L. (2007). Resilience of alternative stable states during the recovery of shallow lakes from eutrophication: Lake Veluwe as a case study. *Ecosystems* 10: 4-16.
- 27 Jochimsen, E.M., Carmichael, W.W., An, J.S., Cardo, D.M., Cookson, S.T., Holmes, C.E.M., Antunes, M.D. de C., de Melo Filho, D.A., Lyra, T.M., Barreto, C.S.V., Azevedo, S.M.F.O. & Jarvis, W.R. 1998. Liver failure and death after exposure to microcystins at a haemodialysis center in Brazil. *New Engl. J. Med.* 338: 873-878.
- 28 Jöhnk, K., Huisman, J., Sharples, J., Sommeijer, B., Visser, P.M. & Stroom, J.M. 2008. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology* 14: 495-512.
- 29 Klapwijk, S.P., van den Hove, L. & Nieuwpoort, P. 1988. Een vergelijking tussen historische en recente gegevens van hydrochemie en fytoplankton in het gebied van Rijnland. In: Roijackers, R.M.M. (Ed.) *Hydrobiologisch onderzoek in Nederland. Fundamentele en toepassingsgerichte aspecten. Publikatie No. 6 van de Hydrobiologische Vereniging Amsterdam*, pp 93-103.
- 30 Kroes, H.W. 1986. Restoration of shallow lake ecosystems, with emphasis on Loosdrecht lakes. *Hydrobiol. Bull.* 20: 5-7.
- 31 Lauterborn, R. 1918. Die geographische und biologische Gliederung des Rheinstroms. III. *Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie von Wissenschaften, Mathem.-naturw. Klasse, Abt. B., Biol. Wissensch.* p. 1-87.
- 32 Leenen, E. 2000. Veilig zwemmen: Blauwalgen in Nederlands oppervlaktewater. *Infectieziekten Bull.* 11: 120-121.
- 33 Liere, L. van, 1986. Loosdrecht lakes, origin, eutrophication, restoration and research programme. *Hydrobiol. Bull.* 20: 9-15.
- 34 Livingstone, D. & Jaworski, G.H.M. 1980. The viability of akinetes of blue-green algae recovered from the sediments of Rostherne Mere. *Br. Phycol. J.* 15: 357-364.
- 35 Lurling, M., Oosterhout, J.F.X. van & Beekman, W. 2009. *Blauwalgen in stadswater: verkennend onderzoek naar blauwalgenbloei in de woonomgeving*. Rapport 2009-42. STOWA, Utrecht.
- 36 Meeks, J.C. 1998. Symbiosis between nitrogen-fixing cyanobacteria and plants. *Bioscience* 48: 266-276.
- 37 Meijer, M.L. 2000. *Bio-manipulation in the Netherlands*. Proefschrift Wageningen Universiteit. RIZA, Lelystad.
- 38 Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2002. *Massale vogelsterfte in Volkerak-Zoommeer; blauwalgen mogelijke oorzaak*. Persbericht van 7 oktober 2002.
- 39 Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1979): Maatregelen voor het terugdringen van de fosfaatbelasting van het Nederlandse oppervlaktewater (Fosfatennota). *Tweede Kamer zitting 1978-1979*, 15.640, nrs. 1-2.
- 40 Oliver, R.L., Thomas, R.H., Reynolds, C.S. & Walsby, A.E. 1985. The sedimentation of buoyant *Microcystis*-colonies caused by precipitation with an iron-containing colloid. *Proc. Roy. Soc. London. Ser. B, Biol. Sc.* 223: 511-528.
- 41 Paerl, H.W. & Huisman, J. 2008. Climate: Blooms like it hot. *Science* 320: 57-58.

- 42 Pilotto, L.S., Douglas, R.M., Burch, M.D., Cameron, S., Beers, M., Rouch, G.R., Robinson, P., Kirk, M., Cowie, C.T., Hardiman, S., Moore, C. & Attewell, R.G. 1997. Health effects of recreational exposure to cyanobacteria (blue-green algae) during recreational water-related activities. *Aust. New Zeal. J. Public Health* 21: 562-566.
- 43 Pollux, B.J.A. & Polux, P.M.J. 2004. Vis- en vogelsterfte door blauwalgen in de Romeinenwaard. *Natuurhistorisch Maandblad* 93: 207-209.
- 44 Redeke, H.C. 1948. *Hydrobiologie van Nederland. De zoete wateren*. De Boer, Amsterdam.
- 45 Riel, A.J.H.P. van, Meulenbelt, J. & Schets, F.M. 2007. Gezondheidseffecten van blauwalgen. *Ned. Tijdschr. Geneesk.* 151: 1723-1728.
- 46 Roijackers, R.M.M. & Lurling, M. (2007). *Climate change and bathing water quality*. Rapport, Wageningen UR.
- 47 Scheffer, M. 1998. *The ecology of shallow lakes*. Chapman & Hall, London.
- 48 Scheffer, M., Straile, D., van Ness, E.H. & Hosper, H. 2001. Climate warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnol. Oceanogr.* 46: 1780-1783.
- 49 Schopf, W.J. & Packer, B.M. 1987. Early Archaen (3.3 billion to 3.5 billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia. *Science* 237: 70-73.
- 50 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&FN Spon, London, pp 41-111.
- 51 Spierings, E. 2008. Blauwalg profiteert van klimaatverandering. *BioNieuws* 18(7): 5.
- 52 Stanier, R.Y. & Cohen-Bazine, G. 1977. Phototrophic prokaryotes: the cyanobacteria. *Ann. Rev. Microbiol.* 31: 225-74.
- 53 STOWA, 2000. *Toxische blauwalgen in recreatiewateren*, STOWA report 2000-20, Utrecht, The Netherlands.
- 54 Teixeira, M. G.L.C. da, Costa, M. da C.N., Pires de Carvalho, V.L., Pereira, M. dos S., & Hage, E., 1993. Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica Dam, Bahia, Brazil. *Bull. Pan Am. Health Organisation* 27: 244-253.
- 55 Turner, P.C., Gammie, A.J., Hollinrake, K. & Codd, G.A. 1990. Pneumonia associated with cyanobacteria. *Br. Med. J.* 300: 1440-1441.
- 56 Verspagen, J. 2006. Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the cyanobacterium *Microcystis*. *Proefschrift Universiteit Utrecht / NIOO thesis* 46, 145 pp.
- 57 Vessey, K.J., Pawlowski, K. & Bergman, B. 2005. Root-based N₂-fixing symbiosis: Legumes, actinorhizal plants, *Parasponia* sp. and cycads. *Plant & Soil* 274: 51-78.
- 58 Wanink, J., Dam, H. van, Grijpstra, F. & Claassen, T. 2008. Invloed van klimaatverandering op fytoplankton van de Friese meren. *H₂O* 41 23. 32-35.
- 59 WHO, 1999. *Toxic cyanobacteria in water* (Eds. Chorus, I. & Bartram, J.), E. & F.N. Spon, London, NY. ISBN 0-419-23930-8.
- 60 Wiegand, C. & Pflugmacher, S. 2005. Ecotoxicological effects of selected cyanobacterial metabolites a short review. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 203, 201-218.
- 61 Wilkinson, C.R. & Fay, P. 1979. Nitrogen fixation in coral reef sponges with symbiotic cyanobacteria. *Nature* 279: 527-529.
- 62 Willame, R., Jurczak, T., Ifly, J.F., Kull, T. Meriluoto, J. & Hoffmann, L. 2005. Distribution of hepatotoxic cyanobacterial blooms in Belgium and Luxembourg. *Hydrobiologia* 551:99-117.

.....

stowa

STICHTING
TOEGEPAST ONDERZOEK WATERBEHEER

stowa@stowa.nl WWW.stowa.nl
TEL 030 232 11 99 FAX 030 231 79 80
Arthur van Schendelstraat 816
POSTBUS 8090 3503 RB UTRECHT

