



Jan Wanink, Koeman en Bijkerk bv
Herman van Dam, Adviseur Water en Natuur en Grontmij | AquaSense
Froukje Grijpstra, Wetterskip Fryslân
Theo Claassen, Wetterskip Fryslân

Invloed van klimaatverandering op fytoplankton van de Friese meren

De resultaten van het monitoringsprogramma van Wetterskip Fryslân in de Friese boezemmeren laten zien dat totaalstikstof en totaalfosfaat in de afgelopen kwart eeuw sterk zijn afgenomen. Dit komt waarschijnlijk door beheermaatregelen om de eutrofiëring terug te dringen. De afname in nutriëntengehaltes ging gepaard met een daling van de concentraties chlorofyl-a. Tegelijkertijd verminderde het aandeel van blauwalgen in het fytoplankton. Toch bleef de blauwalg *Planktothrix agardhii* de meest algemene soort. De wijzigingen in het klimaat resulteerden na 1995 in een toename van de seizoensfluctuaties in de concentraties van totaalfosfaat en, in nog sterkere mate, van totaalstikstof. Het stijgen van de temperatuur werd ook zichtbaar door het eerder optreden van het voorjaarsmaximum en het naar achteren schuiven van het zomermaximum van chlorofyl. Het eerste wordt toegeschreven aan een vervroegde bloei van diatomeeën ten gevolge van hogere watertemperaturen en relatief hoge nutriëntconcentraties in het vroege voorjaar. Het tweede aan verlenging van het groeiseizoen voor blauwalgen, die het fytoplankton domineren bij hogere temperaturen.



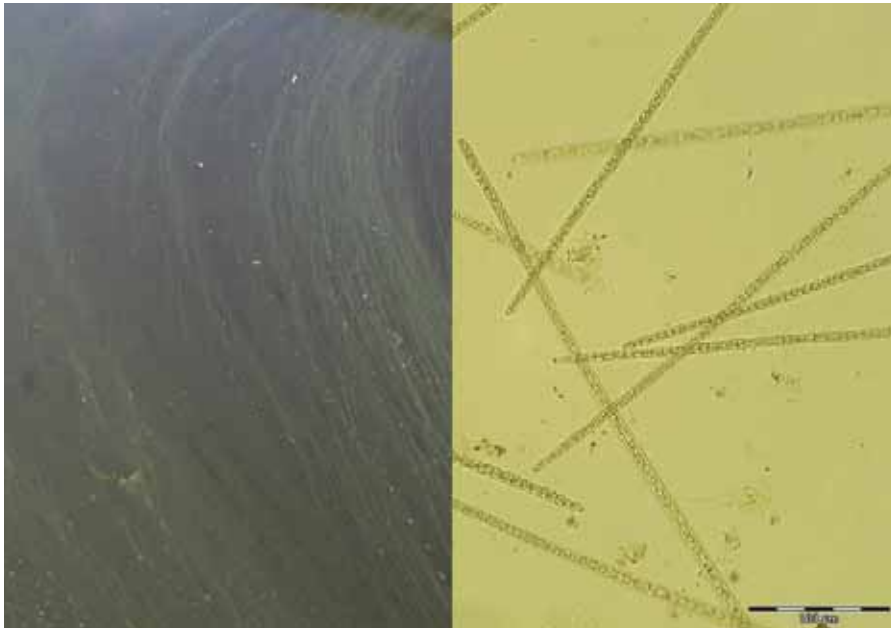
Ondanks de aanwezigheid van biezenvelden blijft het Tjeukemeer troebel en domineert fytoplankton (foto: Wetterskip Fryslân).

Wetterskip Fryslân voert sinds het begin van de jaren tachtig fysisch-chemisch en biologisch onderzoek uit in de Friese oppervlaktewateren. Een op de verzamelde gegevens toegepaste trendanalyse laat zien dat de

belangrijkste verandering gedurende de afgelopen kwart eeuw bestaat uit een sterke reductie van de nutriëntconcentraties. Hierdoor is de hoeveelheid fytoplankton sterk afgenomen, evenals de dominantie binnen dit biologisch kwaliteitselement van

de blauwalgen^{1),2)}. Opvallend was dat naast de afname van de jaar- of zomergemiddelde waarden voor de concentratie chlorofyl-a gedurende de gehele onderzoeksperiode ook sprake was van verschuivingen binnen de jaren. Daarbij werd het voorjaarsmaximum steeds vroeger in het jaar waargenomen en het zomermaximum steeds later. Voor een verklaring van deze verschuivingen werd gedacht aan de effecten van klimaatverandering. Gesuggereerd werd dat de toegenomen regenval in de winterperiode een verhoogde nutriëntentoevoer en vervolgens een vervroeging van de voorjaarsbloei van diatomeeën zou hebben veroorzaakt. Het later optreden van het zomermaximum in de chlorofylconcentratie zou kunnen worden verklaard door het vaker voorkomen van warme zomers, waardoor het groeiseizoen van met name blauwalgen zou worden verlengd.

In dit artikel gaan wij na of de waargenomen veranderingen in het fytoplankton, voor zover ze niet kunnen worden verklaard door de genomen maatregelen tegen eutrofiëring, overeenkomen met recente modelvoorspellingen over effecten van klimaatver-



In opgestuwd water samengeklonterde draden van de dominante blauwalg *Planktothrix agardhii* zijn soms met het blote oog te zien. Met het microscoop worden afzonderlijke draden zichtbaar (foto's: Koeman en Bijkerk).

anderingen op Nederlandse meren^{3),4)}. Hierbij worden de seizoensvariaties in de hoeveelheid zonneschijn, de watertemperatuur en de nutriëntengehaltes als sturende factoren onderzocht.

De maandgemiddelde chlorofylconcentraties zijn berekend voor vier perioden: 1985-1990, 1991-1995, 1996-2000 en 2001-2005. De benodigde gegevens zijn verzameld op 46 meetlocaties in 25 boezemmeren. Voor de meeste overige analyses zijn gegevens gebruikt uit de zes meren met de langste meetreeksen: Bergumermeer, Heegermeer, Slotermeer, Brandemeer, Groote Brekken en Tjeukemeer. Per meer zijn de gegevens afkomstig van één meetlocatie in het midden van het meer. Deze meren zijn vanaf 1981 (fytoplankton), 1984 (nutriënten) of 1985 (chlorofyl) maandelijks bemonsterd gedurende de periode april-september. Vanaf 1993 is in elke maand van het jaar gemonsterd. Met de nutriëntenbemonstering zijn op de meetlocaties tevens de watertemperatuur en de zichtdiepte gemeten. Voor de zes meren zijn maandgemiddelde concentraties van totaalstikstof en totaalfosfaat berekend over vrijwel dezelfde perioden als voor de chlorofylconcentraties. Alleen de eerste periode was voor de nutriëntenbepaling een jaar langer: 1984-1990.

Over de periode 1985-2005 is voor de zes meren per jaar geschat op welke dagnummers de voorjaars- en zomerpieken in de chlorofylconcentratie werden gevonden. Over dezelfde periode is voor alle 25 meren per jaar het optreden van fytoplanktonbloei onderzocht. Hiertoe werd aangenomen dat van bloei sprake was wanneer één taxon bij een individuele bemonstering meer dan de helft van het totale fytoplankton uitmaakte. In het voorjaar betroffen de meeste gevallen van bloei diatomeeën, maar er waren te weinig gegevens beschikbaar om een eventueel aanwezige trend in de tijd te onderzoeken.

Het merendeel van de waargenomen bloeien betrof de blauwalg *Planktothrix agardhii*: een plaagalg die gedurende de gehele onderzoeksperiode de meest algemene fytoplanktonsoort vormde. Verschuivingen over de jaren in de voorjaars- en zomermaxima van chlorofyl én de zomerbloei van *P. agardhii* zijn getoetst met behulp van de nonparametrische Spearman-correlatie.

Om de veranderingen in het fytoplankton te kunnen relateren aan de watertemperatuur, is in de zes meren voor elk jaar tussen 1985 en 2005 bepaald op welke datum voor het eerst (voorjaarspunt) en voor het laatst (zomerpunt) de standaardwaarde van 16,5°C werd bereikt. Deze waarde is afgeleid uit de gemiddelde watertemperaturen tijdens de voorjaars- en zomermaxima van chlorofyl in 1985. Voor zonneschijn is op vergelijkbare wijze een standaardwaarde van zes uur per dag, gemiddeld over 30 dagen, afgeleid uit de gegevens van het weerstation Leeuwarden (bron: KNMI). Hierbij vertegenwoordigen jaarlijkse voorjaars- en zomerpunten de einddata van 30-daagse gemiddelden waarop voor het eerst en het laatst deze standaardwaarde werd bereikt.

Met behulp van Pearsons correlatie is onderzocht of significante verbanden bestaan tussen de biologische kwaliteitselementen chlorofyl-a en *P. agardhii* en de sturende factoren watertemperatuur en zonneschijn.

Modelvoorspellingen

In een uitgebreide literatuurstudie uit 2005 zijn alle waargenomen en voorspelde effecten van klimaatverandering op ondiepe Nederlandse meren samengevat³⁾. Daarbij werden temperatuur, ijsbedekking en wind als relevante klimaatfactoren beschouwd. De belangrijkste conclusies betreffende fytoplankton zijn: opwarming versterkt en stabiliseert de dominantie van blauwalgen in fytoplanktongemeenschappen; opwarming

leidt tot stabilisatie van troebele door fytoplankton gedomineerde systemen en werkt pogingen tot herstel tegen én de opwarming verhoogt de draagkracht voor primaire producenten - met name fytoplankton - en lijkt hiermee op eutrofiëring.

Met behulp van een ecosysteemmodel zijn hierna voorspellingen gedaan voor verschillende scenario's met betrekking tot opwarming en nutriëntenbelasting⁴⁾. Een algemene voorspelling is dat klimaatverandering leidt tot verlaagde kritische nutriëntenbelastingen en, in combinatie met de verwachte toename van de externe fosfaatbelasting, tot een grotere kans op een omslag van de heldere naar de troebele fase van het systeem. Voor zowel het scenario 'warmere winters' als 'jaarrond warm' voorspelt het model voor heldere systemen een vervroegde, minder sterke voorjaarsbloei van diatomeeën en voor troebele systemen een verlate, iets zwakkere voorjaarsbloei van diatomeeën en een vervroegde, beduidend sterkere zomerbloei van blauwalgen. Vanaf de vroege zomer domineren hierbij blauwalgen het fytoplankton. De verlate voorjaarsbloei wordt toegeschreven aan de ook in het voorjaar hoge abundantie van blauwalgen, als restant van de zomerpiek van het voorafgaande jaar, waarmee de diatomeeën slecht kunnen concurreren. In een experimentele opzet die de relatief sterke respons van blauwalgen op temperatuurverhoging bevestigde, werd aangetoond dat een warmer voorjaar niet leidt tot een andere volgorde in de successie van de verschillende soortgroepen⁵⁾.

In de praktijk wijzen alle waarnemingen met betrekking tot de effecten van opwarming in ondiepe meren van de gematigde gebieden op vervroegde voorjaarsbloeien van diatomeeën⁶⁾. De onderzoekers van het ecosysteemmodel wijzen er echter op dat nog geen resultaten van alleen troebele systemen beschikbaar zijn⁴⁾. Inmiddels is uit onderzoek in de Duitse Müggelsee gebleken dat opwarming ook in een troebel systeem tot vervroeging van de voorjaarsbloei leidt, maar dat de mate waarin dit zich manifesteert sterk afhangt van de fosfaatbelasting⁷⁾. De verwachting is dat meer neerslag in de winter tot hogere fosfaatgehalten in het voorjaar leidt, maar uit een onderzoek tijdens drie warme jaren in de Friese meren bleek geen duidelijk seizoenspatroon in totaalfosfaat⁸⁾. Dit onderzoek toonde wel aan dat in de onderzochte jaren de concentratie van totaalstikstof relatief hoog was in het voorjaar, waarna een afname optrad in de zomer. Deze afname wordt toegeschreven aan verhoogde denitrificatie als gevolg van temperatuurverhoging. Verwacht wordt dat door opwarming versterkte sulfaatreductie en denitrificatie zullen leiden tot hogere gehalten aan humuszuren en fosfaat, waardoor sprake is van interne eutrofiëring⁹⁾.

Waargenomen veranderingen in het fytoplankton

Afbeelding 1 toont de afname van de maandgemiddelde concentraties chlorofyl van 25 meren in vier perioden tussen

1981 en 2005. In de eerste periode zijn de concentraties hoog van april tot oktober, met een maximum in mei. Met de afname van de eutrofiëring in de tijd^(1,2) neemt niet alleen de chlorofylconcentratie af, maar wordt de verdeling in de perioden na 1990 meer tweetoppig, met een piek in april en een nog wat hogere in augustus-september. Voor de zes meren met de langste reeksen waarnemingen zijn de gemiddelde jaarlijkse voorjaars- en zomermaxima tussen 1985 en 2005 in afbeelding 1 weergegeven. Zowel in het voorjaar als in de zomer is sprake van een significante trend met het jaar van bemonstering (zie tabel 1). Hierbij valt het voorjaarsmaximum in 2005 ongeveer anderhalve maand vroeger dan in 1985 en het zomermaximum ongeveer een maand later. Het voorjaarsmaximum wordt waarschijnlijk bepaald door de bloei van diatomeeën, maar met de beschikbare gegevens voor deze soortgroep kon de gevonden trend niet worden bevestigd. De verwachting dat het zomermaximum voornamelijk wordt bepaald door de bloei van blauwalgen, wordt bevestigd door de resultaten voor *Planktothrix agardhii* in alle 25 meren (zie afbeelding 1 en tabel 1). Deze gedurende de gehele onderzoeksperiode meest algemene fytoplanktonsoort vertoont een trend in de zomerbloei, die bijna gelijk is aan die voor chlorofyl.

Zonneschijn en watertemperatuur

Evenals de biologische kwaliteitselementen zijn ook de stuurfactoren zonneschijn en watertemperatuur zowel in het voorjaar als in de zomer statistisch significant gecorreleerd met het meetjaar (zie afbeelding 1 en tabel 1). In het voorjaar is voor beide factoren sprake van een vervroeging van ongeveer een maand over de periode 1985-2005. Hierbij ligt de trendlijn voor zonneschijn iets vroeger in het seizoen dan die voor chlorofyl en die voor watertemperatuur iets later. In de zomer liggen de trendlijnen voor zonneschijn en watertemperatuur dichtbij die voor

chlorofyl en *P. agardhii*, waarbij de eerste factor ongeveer een maand naar achteren verschuift over de periode 1985-2005 en de tweede ongeveer drie weken.

Nutriënten en zichtdiepte

Zoals eerder vastgesteld zijn de zomergemiddelde concentraties van totaalstikstof en totaalfosfaat tussen 1984 en 2005 sterk afgenomen ten gevolge van maatregelen ter bestrijding van eutrofiëring. Afbeelding 2 geeft een indruk van deze afnames, maar laat tevens zien dat tussen de seizoenen verschillen kunnen optreden die groter worden in de loop der jaren. Na 1995 zijn de concentraties in de periode januari-maart relatief hoog, dalen daarna sterk en beginnen in december weer licht toe te nemen. De absolute stikstofconcentraties zijn tijdens de eerste drie maanden van de perioden 1996-2000 en 2001-2005 zelfs ruim hoger dan die in de jaren daarvoor. Dit patroon ondersteunt het idee dat ten gevolge van de toegenomen regenval in de winter tegenwoordig sprake is van een hogere nutriëntentoevoer naar het oppervlaktewater in het begin van het jaar, waarna de verhoogde watertemperatuur leidt tot denitrificatie^(8,9).

De afname van de nutriëntenconcentraties tussen 1984 en 2005 ging gepaard met een toename van de gemiddelde zichtdiepte met 42 procent (zie tabel 2). Deze toename heeft echter niet geresulteerd in een omslag van het systeem van een troebele naar een heldere fase. Met een gemiddelde zichtdiepte van 40,5 cm tijdens de periode 2001-2005, kunnen de zes meren nog steeds worden omschreven als troebel.

Verklarende factoren

Hoewel met de beschikbare gegevens geen verband tussen de voorjaarsbloei van diatomeeën en het bemonsteringsjaar kan worden aangetoond, betreffen de aangetroffen gevallen van voorjaarsbloei

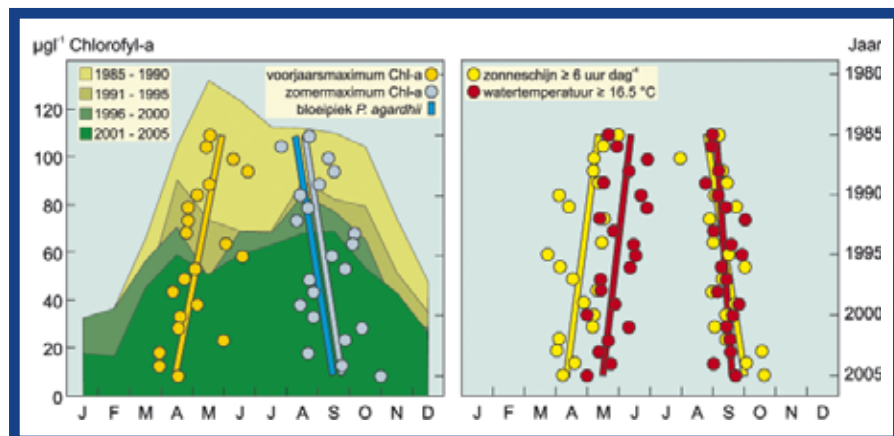
alleen deze soortgroep. Daarom wordt aangenomen dat de verschuiving van het voorjaarsmaximum van chlorofyl toch hoofdzakelijk kan worden toegeschreven aan vervroegde voorjaarsbloei van diatomeeën. Omdat de optimum watertemperatuur voor de groei van diatomeeën (18°C) beduidend lager is dan die voor blauwalgen (25°C)⁽⁴⁾, werd verwacht dat zonneschijn in het voorjaar een beperkende factor zou kunnen zijn. Ondanks de overeenkomsten tussen de gevonden trends voor zonneschijn en chlorofylconcentraties in zowel voorjaar als zomer (zie afbeelding 1), zijn deze factoren echter niet significant gecorreleerd (zie tabel 3). De bloei van *P. agardhii* vertoont ook geen significant verband met zonneschijn.

Watertemperatuur lijkt, in tegenstelling tot zonneschijn, wel een verklarende factor te zijn (zie tabel 3). In het voorjaar werd een sterke, statistisch significante correlatie vastgesteld tussen het chlorofylmaximum en het moment waarop het water de waarde van 16,5°C bereikt. Hoewel in de zomer geen significant verband tussen deze factoren werd gevonden, was de temperatuur toen wel significant gecorreleerd met de bloei van *P. agardhii*, welke voor een groot deel het chlorofylmaximum in dit seizoen lijkt te bepalen.

Gedurende alle vier perioden en seizoenen was de atomaire N/P-verhouding groter dan 16, waardoor fosfaat het limiterende nutriënt is. Op grond van de geconstateerde seizoensfluctuaties in de concentratie van totaalfosfaat tijdens de periode 2001-2005 (zie afbeelding 2) kan worden gezegd dat ook deze factor mogelijk heeft bijgedragen aan de vervroeging van het voorjaarsmaximum van chlorofyl. De gemiddelde fosfaatconcentratie daalde van 0,17 mg/l gedurende de periode januari-maart naar 0,07 mg/l gedurende de periode april-juni. Tijdens de eerste periode was de concentratie hiermee hoger dan die gedurende enkele jaren van hypertrofië in de Duitse Müggelsee (0,10 mg/l) en tijdens de tweede periode gelijk aan die gedurende jaren met sterk gereduceerde fosfaatgehalten⁽⁷⁾. Hoewel in de Müggelsee onder beide omstandigheden een

Afb. 1: Linker paneel: gemiddelde maandelijkse concentraties chlorofyl-a van 25 boezemmeren in vier perioden. De stippen geven de datum aan van de jaarlijkse voorjaars- (geelbruin) en zomermaxima (lichtblauw) in de zes meren met de langste reeksen waarnemingen en de bijbehorende lijnen de significante trends. De helderblauwe lijn geeft de significante trend van de zomerbloei van de dominante blauwalg *Planktothrix agardhii* in alle 25 meren aan.

Rechter paneel: de gele stippen geven de datum aan waarop het 30-daags gemiddelde van het op weerstation Leeuwarden gemeten aantal uren zonneschijn per dag, voor het eerst en voor het laatst de waarde van zes uur bereikt (bron: KNMI). De rode stippen geven de datum aan waarop de gemiddelde watertemperatuur in de zes meren jaarlijks voor het eerst en voor het laatst de waarde van 16,5°C bereikt. De bijbehorende lijnen geven de significante trends aan.



Tabel 1: Correlaties (Spearman's r) en steekproefgrootte (N) van de seizoenstijming van de onderzochte variabelen (stippen in afbeelding 1) met jaar.

Significanties: * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$, *** $p \leq 0,001$.

variabele	r	N
<i>voorjaar</i>		
chlorofyl-a	-0,51**	20
zonneschijn	-0,47*	21
watertemperatuur	-0,65***	21
<i>zomer</i>		
<i>P. agardhii</i>	0,20***	381
chlorofyl-a	0,59**	20
zonneschijn	0,47*	20
watertemperatuur	0,42*	21

vervroegde voorjaarsbloeï van diatomeeën werd waargenomen en toegeschreven aan hogere watertemperaturen in het voorjaar, was de vervroeging sterker tijdens de periode met hoge fosfaatgehalten. Dit werd verklaard door een omslag van een *bottom up*- (silicaatbeperkend) naar een *top down*-proces (begrazing door watervlooiën) als basis voor het ineenstorten van de bloei.

Conclusies

De in de jaren negentig uitgevoerde maatregelen ter vermindering van de eutrofiëring vormen de grondslag voor de tussen 1984 en 2005 waargenomen sterke reductie van de nutriëntconcentraties in de Friese boezemmeren. Dit heeft vervolgens geresulteerd in een afname van de hoeveelheid aanwezig fytoplankton, zoals afgeleid uit de gemeten chlorofylconcentraties, alsmede in een lichte toename van de helderheid van het water. Gedurende dezelfde periode begonnen zich echter effecten van klimaatverandering te manifesteren, vooral in de vorm van toenemende seizoensfluctuaties in nutriënt- en chlorofylconcentraties.

In tegenstelling tot de voorspellingen van het ecosysteemmodel⁴⁾ viel de opwarming van de troebele Friese meren samen met een vervroegd voorjaarsmaximum

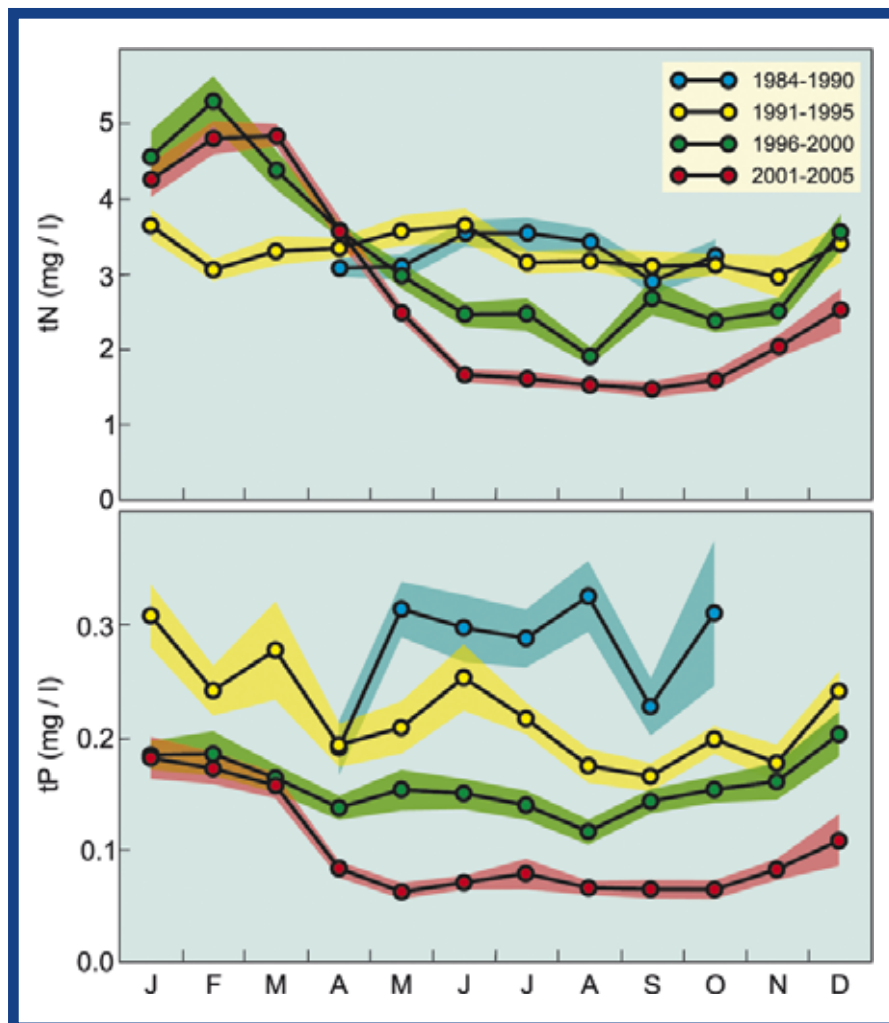
van chlorofyl, waarschijnlijk veroorzaakt door vroegere bloei van diatomeeën. Opmerkelijk was ook het later optreden van de zomerpiek in chlorofyl, die werd veroorzaakt door bloei van blauwalgen. Wel volgens de modelvoorspellingen nam de sterkte van de voorjaarspiek van chlorofyl af en die van de zomerpiek toe. Van de onderzochte factoren licht (uren zonneshijn), temperatuur en nutriënten, bleek temperatuur een significante verklarende factor voor de waargenomen veranderingen in het fytoplankton. De door klimaatverandering toegenomen seizoensfluctuaties in de nutriëntgehalten lijken ook bij te dragen aan het eerder optreden van de voorjaarsbloeï van diatomeeën. Door de geringe gevoeligheid van blauwalgen voor fosfaatbeperking zal het lagere fosfaatgehalte in de zomermaanden de dominantie van deze groep als gevolg van hogere temperaturen niet in de weg staan. Klimaatverandering leidt derhalve tot de noodzaak van het bereiken van nog lagere fosfaatgehalten, om een omslag naar de helder water-fase te bereiken.

LITERATUUR

- 1) Van Dam H. en J. Wanink (2007). Trendanalyse hydrobiologische gegevens Friesland. Grontmij-rapport 210455. Koeman en Bijkerk-rapport 2007-015. Adviseur Water en Natuur-rapport 605.

- 2) Van Dam H., J. Wanink, F. Grijpstra en T. Claassen (2008). Trendanalyse 1981-2005 van hydrobiologische gegevens uit Friesland. H₂O nr. 6, pag. 29-33.
- 3) Mooij W., S. Hülsmann, L. De Senerpont Domis, B. Nole, P. Bodelier, P. Boers, M. Dionisio Pires, H. Gons, B. Ibelings, R. Noordhuis, R. Portielje, K. Wolfstein en E. Lammens (2005). The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. Aquatic Ecology nr. 39, pag. 381-400.
- 4) Mooij W., J. Janse, L. De Senerpont Domis, S. Hülsmann en B. Ibelings (2007). Predicting the effect of climate change on temperate shallow lakes with the model PCLake. Hydrobiologia nr. 584, pag. 443-454.
- 5) De Senerpont Domis L., W. Mooij en J. Huisman (2007). Climate-induced shifts in an experimental phytoplankton community: a mechanistic approach. Hydrobiologia nr. 584, pag. 403-4.
- 6) Dionisio Pires M. (2008). Betekenis van klimaatverandering voor de ecologische kwaliteit van oppervlaktewateren. Achtergrondrapport ex-ante evaluatie KRW. NIOO.
- 7) Huber V. en R. Adrian (2008). Phytoplankton response to climate warming modified by trophic state. Limnology and Oceanography nr. 53, pag. 1-13.
- 8) Loeve R., P. Droogers en J. Veraart (2006). Klimaatverandering en waterkwaliteit. FutureWater.
- 9) Van Dam H. en A. Mertens (2008). Vennen minder zuur maar warmer. H₂O nr. 12, pag. 36-39.

Afb. 2: Gemiddelde maandelijkse concentraties (gekleurde stippen) en tweemaal de standaardfout (bijbehorende gekleurde stroken) van totaalstikstof (tN) en totaalfosfaat (tP) tijdens de vier perioden in de zes boezemmeren met de langste reeksen waarnemingen.



Tabel 2: Gemiddelde zichtdiepte per onderzoeksperiode in de zes boezemmeren met de langste reeksen waarnemingen.

periode	zichtdiepte (cm)	standaard deviatie	N
1984-1990	28,6	11,0	218
1991-1995	29,1	12,3	275
1996-2000	37,9	14,6	339
2001-2002	40,5	15,3	327

Tabel 3: Correlaties (Pearson's r) en steekproefgrootte (N) van de biologische kwaliteitselementen met de stuurfactoren zonneshijn en watertemperatuur. Significanties: *p ≤ 0,05, **p ≤ 0,01, *p ≤ 0,001.**

onderzochte relatie	r	N
<i>voorjaar</i>		
zonneshijn - chlorofyl-a	0,11	20
watertemperatuur - chlorofyl-a	0,52**	21
<i>zomer</i>		
zonneshijn - P. agardhii	-0,05	370
watertemperatuur - P. agardhii	0,16***	374
zonneshijn - chlorofyl-a	0,29	20
watertemperatuur - chlorofyl-a	0,11	20