

Vierde Eutrofiëringssenquête van de Nederlandse meren en plassen

D.T. VAN DER MOLEN, RIZA

R. PORTIELJE, RIZA

S.P. Klapwijk, STOWA †

Uit gegevens van 231 meren en plassen blijkt dat de eutrofiëringstoestand in Nederland van 1980 tot 1996 is verbeterd. In ongeveer 70% van de systemen nemen de concentraties aan totaal-P, totaal-N en chlorofyl- α af, terwijl het doorzicht toeneemt. Deze trend is waarneembaar in systemen die verschillen in onder meer diepte, bodemtype en geografische ligging. Het weer heeft invloed op jaarlijkse afwijkingen van de gemiddelde trend.

Aanleiding en gegevens

Ruim 20 jaar na de Eerste Eutrofiëringssenquête is eutrofiëring nog steeds een belangrijk waterkwaliteitsprobleem in de rijkswateren en vooral ook in de regionale wateren. De aanpak van de eutrofiëring heeft zich in eerste instantie gericht op vermindering van de nutriëntenbelasting, vooral die van fosfaat. De fosfaatbelasting van het Nederlandse oppervlaktewater en van de Rijn is tussen 1985 en 1995 gehalveerd, door vervanging van fosfaten in wasmiddelen en invoering van defosfatering op zuiveringsinstallaties. In de loop van de jaren '80 werd een bredere aanpak van de problemen steeds meer in de praktijk gebracht, met name in regionale projecten. Zo werden naast vermindering van de fosfaatbelasting ook maatregelen gericht op de waterbodem, het waterpeil, de oevers en de visstand geno-

men, om het ecologisch herstel van de oppervlaktewateren te bespoedigen. Dit heeft geleid tot spectaculaire verbeteringen in een aantal individuele watersystemen, zoals het Veluwe-meer.

Aangezien het al weer enige tijd geleden is dat een grondige analyse van de eutrofiëringstoestand van de Nederlandse meren en plassen plaatsvond en de wens leefde om de resultaten van het landelijk beleid ter bestrijding van de eutrofiëring en aanvallende regionale maatregelen te toetsen, heeft een aantal waterbeheerders RIZA verzocht om een nieuw onderzoek uit te voeren.

Dit onderzoek heeft in 1997 plaatsgevonden op basis van gegevens van 231 meren en plassen over de periode 1980 tot en met de zomer van 1996. De gebruikte gegevens, de gehanteerde methoden en de verkregen resultaten zijn uitgebreid beschreven in twee deelrapporten. Deelrapport I, getiteld 'Trendanalyse eutrofiëringstoestand van de Nederlandse meren en plassen' [Portielje & Van der Molen, 1997, RIZA rapport 97.060, ISBN 9036951062], beschrijft trends in de concentraties fosfor (P), stikstof (N) en chlorofyl- α en het doorzicht. Deelrapport II is getiteld 'Relaties tussen eutrofiëringvariabelen en systeemkenmerken van de Nederlandse meren en plassen'

[Portielje & Van der Molen, 1998, RIZA rapport 98.007, ISBN 9036951585]. Hierin worden de trends verder geanalyseerd op mogelijke verbanden met systeemkenmerken, meteorologische condities en specifieke ingrepen in de systemen. Daarnaast staan de onderlinge verbanden tussen doorzicht, chlorofyl- α , nutriëntenconcentraties en -belasting centraal, alsmede de invloed van systeemkenmerken, specifieke maatregelen en biologische variabelen op deze relaties. Dit artikel is een uitgebreide samenvatting van de twee genoemde deelrapporten.

De gebruikte gegevens bestaan uit gemeten concentraties van nutriënten en chlorofyl- α , doorzicht, biologische variabelen, belastingen met water en nutriënten, systeemkenmerken en specifieke maatregelen. Voor de nutriënten fosfor en stikstof is veelal gewerkt met de totale gehalten; in enkele gevallen is ook gekeken naar opgeloste en particulaire fracties. Biologische variabelen zijn de samenstelling van het fytoplankton op basis van dominante groep, zoöplankton (*Daphnia spec.*), vis en de oppervlaktebedekking met ondergedoken waterplanten. Als systeemkenmerken zijn meegenomen de gemiddelde diepte, oppervlakte en het bodemtype. Tenslotte zijn als meteorologische variabelen gebruikt het neerslagoverschot in voorjaar en zomer en ijsbedekking in de winter.

Biologische variabelen worden vaak nog gemeten vanuit een kwalitatieve doelstelling en mede daarom worden diverse monster- en analysemethoden gehanteerd. Een betere afstemming van de methodieken bevordert de onderlinge vergelijking van systemen voor wat betreft deze biologische variabelen en het gebruik er van in kwantitatieve beschouwingen.

Samenvatting

Analyse van relaties tussen waterkwaliteitsvariabelen bevestigt de bevindingen van voorgaande enquêtes op een aantal punten. Verfijningen zijn aangebracht in de relatie tussen doorzicht en chlorofyl- α , chlorofyl- α en nutriënten en tussen de concentratie en belasting van nutriënten. Waterkwaliteitsnormen voor doorzicht en chlorofyl- α blijken niet goed op elkaar aan te sluiten in alle systemen ondieper dan 1,5 m en in systemen met een veenbodem ondieper dan 4,0 m. Dominantie van draadvormige blauwalgen en *Microcystis* is niet gevonden beneden respectievelijk 0,05 en 0,12 mg l⁻¹ totaal-P en 1,35 mg l⁻¹ totaal-N voor beide groepen. Voor een aantal systemen zijn relaties afgeleid tussen de gemiddelde concentratie in het instromende water en de concentratie in het systeem. Graas door zoöplankton en bedekking met waterplanten resulteren in een lager chlorofyl- α gehalte bij een bepaalde concentratie nutriënten, hetgeen wijst op top-down sturing.

De analyses zijn betrokken op een gewogen halfjaar- of jaargemiddelde van de individuele waarnemingen en in enkele gevallen op een specifieke periode in het voorjaar (bijvoorbeeld bij graas door zoöplankton) of het najaar (bijvoorbeeld de bloei van *Microcystis*). Afhankelijk van de variabele en de vraagstelling zijn eisen gesteld aan het aantal waarnemingen per watersysteem om een middeling te kunnen maken voor een bepaalde periode. Zo is bijvoorbeeld voor nutriënten gesteld dat in de zomer bijna maandelijks gemeten moet zijn, terwijl voor de bedekking met waterplanten één waarneming per jaar voldoende is geacht.

In de loop van de tijd is het aantal systemen, waarvan informatie beschikbaar is, toegenomen (afb. 1). Dit geldt voor fysische en

	zomer		winter	
	absoluut (eenheid j ⁻¹)	relatief (j ⁻¹)	absoluut (eenheid j ⁻¹)	relatief (j ⁻¹)
totaal-P (mg l ⁻¹)	-0,008	-0,033	-0,007	-0,030
totaal-N (mg l ⁻¹)	-0,046	-0,013	-0,082	-0,022
chlorofyl-α (μg l ⁻¹)	-2,61	-0,036	-0,84	-0,019
doorzicht (m)	0,004	0,010	0,007	0,012

Tabel 1 Trends van de mediane jaarlijkse concentraties totaal-P, totaal-N en chlorofyl-α en van het doorzicht

chemische variabelen, maar ook voor biologische variabelen. Vermoedelijk is de verzameling watersystemen in de tijd niet 'homogeen', dat wil zeggen dat het 'gemiddelde meer' in de tijd verandert.

Onder meren en plassen is verstaan de zoete, stagnante wateren die een breedte/lengte verhouding van één benaderen. Naast ondiepe zijn ook diepere systemen meegenomen, zoals de Maasplassen en een aantal zandwinputten. De oppervlakte van de systemen varieert van circa één hectare tot enige honderden vierkante kilometers. De aandacht voor kleine wateren is verder toegenomen vergeleken met vorige enquêtes. Juist hierin zijn vaak specifieke maatregelen genomen. Niet beschouwd zijn natuurlijke vennen, omdat deze vaak een geheel eigen karakter hebben. Wel zijn enkele kreken meegenomen met een bijna lijnvormig karakter. Er is naar gestreefd om per vraagstelling een zo groot mogelijk deelverzameling van de watersystemen te gebruiken.

Trends in de waterkwaliteit

Bij de trendanalyse is gekeken naar zowel

	aantal watersystemen	negatieve trend	significant negatief	positieve trend	significant positief
totaal-P	164	73%	48%	27%	12%
totaal-N	140	75%	39%	25%	13%
chlorofyl-α	160	66%	44%	34%	11%
doorzicht	115	28%	11%	72%	40%
N : P ratio	140	30%	14%	70%	44%

Tabel 2 Percentage van de watersystemen met negatieve en positieve trends (zomerhalffjaar)

het landelijk beeld voor concentraties en voor doorzicht, als naar trends in individuele meren en plassen over de periode 1980-1996. Meteorologische condities zijn gebruikt om variaties van jaar tot jaar in de waterkwaliteit te kunnen verklaren. Tenslotte is bestudeerd of de trends verschillen tussen groepen van systemen ingedeeld op basis van diverse systeemkenmerken.

Landelijke trends

Over de periode 1980-1996 nemen de jaar-

lijkse medianen van concentraties totaal-P, totaal-N en chlorofyl-α af, terwijl deze mediaan voor het doorzicht toeneemt (tabel 1 en afb. 2). Op basis van de lineaire trend is het zomergemiddelde gehalte totaal-P over de gehele periode afgenomen met 0,136 mg l⁻¹. De absolute trends zijn alle significant, daar de grenzen van het 80% betrouwbaarheidsinterval (niet gepresenteerd) steeds een gelijk teken hebben als de waarden in de tabel. De trends duiden op een verbetering van de waterkwaliteit, zowel voor zomer- als voor wintergemiddelden. In de winter daalt totaal-N sterker en chlorofyl-α minder dan in de zomer, terwijl

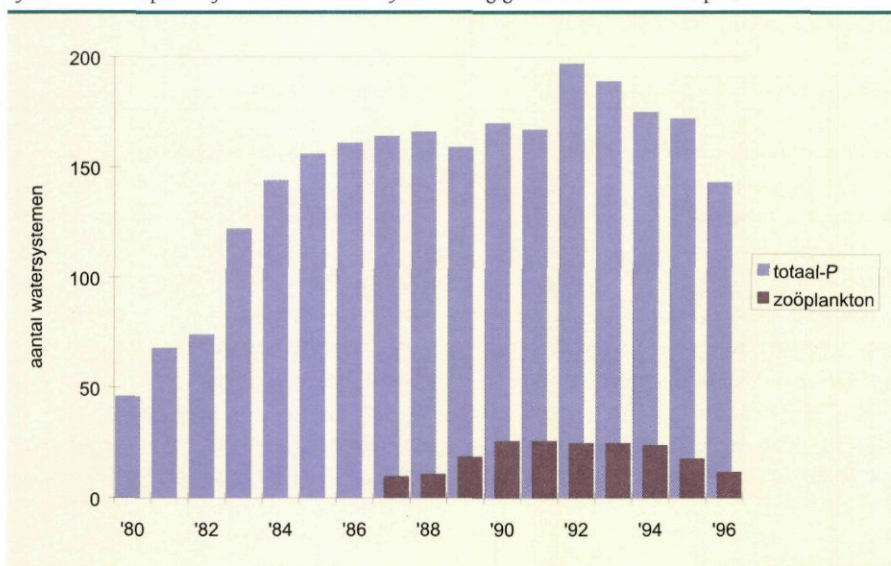
het doorzicht meer toeneemt. Ter controle van de mogelijke invloed van de jaarlijkse variatie van de samenstelling van de verzameling watersystemen, is de analyse herhaald voor een vaste deelverzameling systemen (met ten minste 12 jaren gegevens over de periode 1984-1996). Dit leverde een vergelijkbaar beeld op.

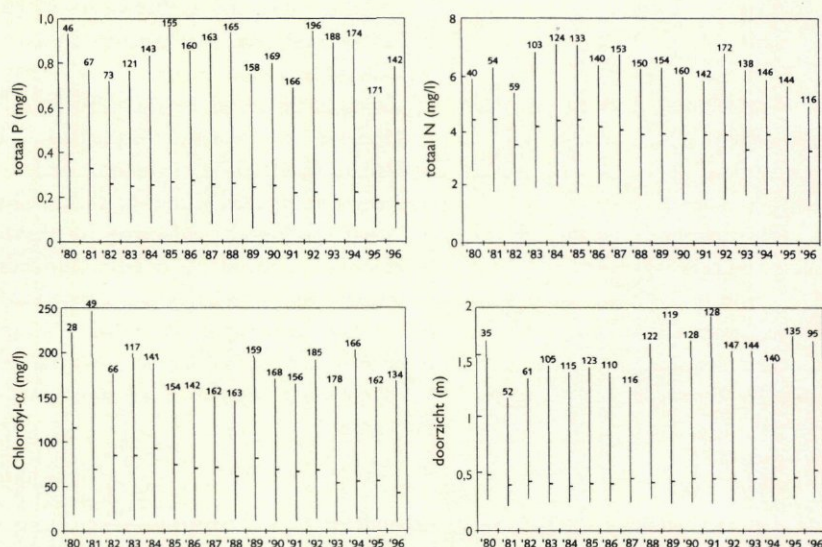
De relatieve trends over de periode 1980-1996 voor totaal-P en totaal-N (respectievelijk 56% en 22%) komen goed overeen met de afname van de emissie gedurende die periode (respectievelijk 55% en 20%). Afwijkingen in bepaalde jaren ten opzichte van de trendwaarde kunnen een relatie hebben met meteorologische condities. Het blijkt dat een strenge winter (uitgedrukt in het aantal ijsdagen) leidt tot lagere chlorofyl-α concentraties in de daarop volgende zomer (significant op $p < 0,1$). Een droog voorjaar (bepaald als neerslagoverschot over januari-maart) resulteert in een beter doorzicht ($p < 0,025$) en lagere concentraties van zowel chlorofyl-α ($p < 0,005$), en ook van totaal-P ($p < 0,1$) en totaal-N ($p < 0,1$). Voor een droge zomer is er alleen een significant verband voor totaal-P ($p < 0,1$).

Trends individuele systemen

Van die watersystemen waarvan minimaal acht jaar gegevens beschikbaar waren zijn trends per systeem berekend. In ongeveer 70% van de watersystemen verbeterde de waterkwa-

Afb. 1 Verloop in de tijd van het aantal watersystemen met gegevens voor totaal-P en zoöplankton.





Afb. 2 Mediane concentraties en centraal 80% interval van zomergemiddelden van totaal-P, totaal-N, chlorofyl-α en doorzicht. Labels indiceren het aantal systemen.

liteit (tabel 2), dat wil zeggen dat de trend voor totaal-P, totaal-N en chlorofyl-α negatief is en die voor doorzicht positief. In bijna de helft van alle systemen is deze verbetering significant. Aan de andere kant is er bij ruim 10% van de watersystemen een significante verslechtering geconstateerd. Het beeld verschilt niet wezenlijk tussen zomer en winter. De trend in de N:P ratio is in het algemeen positief, wat er op duidt dat de afname in totaal-P in het merendeel van de systemen sterker is dan de afname in totaal-N.

Er zijn geen grote verschillen gevonden in relatieve trends tussen deelverzamelingen op basis van diepte, oppervlakte of bodemtype. De verbetering van de waterkwaliteit manifesteert zich dus in alle typen meren en plassen. Het percentage systemen met een positieve trend in de gehalten (verslechtering van de waterkwaliteit) blijkt wat groter te zijn bij een

kleinere oppervlakte (<50 ha). Relatieve trends in chlorofyl-α en totaal-P zijn ongunstiger in diepe systemen (>4,0 m) en de relatieve trend in totaal-N is minder gunstig in systemen met een veenbodem dan in systemen met een zand- of kleibodem. Bodemtype en diepte zijn aan elkaar gerelateerd. Diepe systemen hebben veelal een zandbodem, zodat het aanwijzen van één van beide als verklarende factor voor verschillen in trends op basis van statistische analyse niet goed mogelijk is.

Om na te gaan of (en welke) aanvullende maatregelen aantoonbaar effect hebben op de waterkwaliteit zijn de relatieve trends in systemen waar deze maatregelen zijn uitgevoerd vergeleken met de trends in systemen die alleen zijn beïnvloed door het generiek beleid. De relatieve trends in de deelverzameling systemen met aanvullende maatregelen (reductie externe P-belasting, visstandbeheer, overige

maatregelen) zijn significant gunstiger voor totaal-P ($p < 0,01$), totaal-N en chlorofyl-α (beide $p < 0,1$), dan in de referentieset. Uitgesplitst naar type maatregel zijn in systemen met externe P-reductie ($n=14$) alleen de trends in totaal-P significant gunstiger ($p < 0,01$). In systemen waar visstandbeheer is uitgevoerd ($n=7$) zijn de relatieve trends significant gunstiger wat betreft totaal-P ($p < 0,05$), chlorofyl-α ($p < 0,01$) en doorzicht ($p < 0,1$).

Relaties tussen waterkwaliteitsvariabelen

Analoog aan het concept achter de waterkwaliteitsdoelstellingen, waar grenswaarden voor chlorofyl-α en vervolgens voor nutriënten zijn afgeleid uit een gewenst doorzicht, worden de relaties tussen de waterkwaliteitsvariabelen in de volgorde gevolg – oorzaak behandeld. Gekeken is ook wat het effect op deze relatie is van onder meer de diepte en het bodemtype van het systeem, de soortensamenstelling van het fytoplankton en verschillen in hogere trofische niveaus.

Doorzicht – fytoplankton

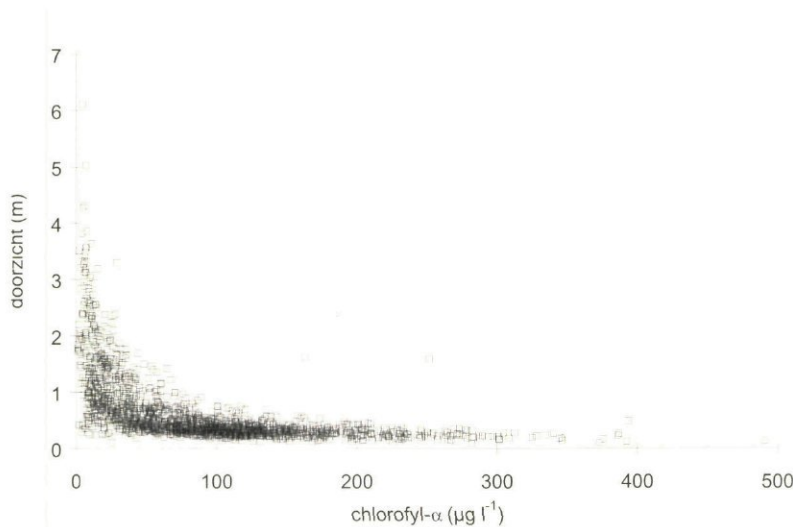
Fytoplankton, uitgedrukt in het chlorofyl-α gehalte, legt een duidelijke bovengrens op aan het bereikbare doorzicht. Omgekeerd is het goed mogelijk dat het doorzicht zeer gering is, hoewel het chlorofyl-α gehalte heel laag is (afb. 3). Systemen waarbij regelmatig zicht tot op de bodem is gemeten zijn in deze analyse

Belangrijke nota's met betrekking tot de eutrofiëring van meren en plassen in Nederland

- 1976: Fosfaten in het Nederlandse oppervlaktewater
- 1976: Eerste Eutrofiëringssenquête
- 1980: Tweede Eutrofiëringssenquête
- 1987: Derde Eutrofiëringssenquête

Tabel 3 Relatie tussen de maximaal haalbare gehalten chlorofyl-α ($\mu\text{g l}^{-1}$) en de concentraties aan totaal-P en totaal-N (mg l^{-1}); zomergemiddelden

Tweede Eutrofiëringssenquête			Derde Eutrofiëringssenquête		Vierde Eutrofiëringssenquête	
maximaal chlorofyl-α =			maximaal chlorofyl-α =		maximaal chlorofyl-α =	
			draadvormige blauwalgen	1428·P	draadvormige blauwalgen	1337·P
			overige meren	625·P	afwezigheid dominante draadvormige blauwalgen	759·P
alle algen	776·P	89,6· (N-1,0)	alle algen	89,6· (N-1,0)	Microcystis	489·P
	15,53					47,4· (N-0,67)



Afb. 3 Doorzicht versus chlorofyl- α (zomergemiddelden).

niet betrokken, omdat geen gemiddelde waarde voor het doorzicht kon worden vastgesteld.

Het mediane doorzicht bij een bepaald chlorofyl- α gehalte neemt toe van ondiepe naar diepere systemen, waarschijnlijk door een verminderde resuspensie. In ondiepe systemen (<1,5 m) is geen verschil in de relatie doorzicht – chlorofyl- α gevonden tussen verschillende bodemtypen. In systemen met een diepte tussen 1,5 en 4,0 m is het mediane doorzicht geringer in systemen met veenbodems bij chlorofyl- α gehalten lager dan 80 $\mu\text{g l}^{-1}$. Mogelijk is hier de invloed van opgeloste, licht-absorberende stoffen (bijvoorbeeld humuszuren) groter. Van de systemen dieper dan 4,0 m heeft 86% een zandbodem, en voor deze groep is een eventuele invloed van het bodemtype dus niet vast te stellen.

Fytoplankton – nutriënten

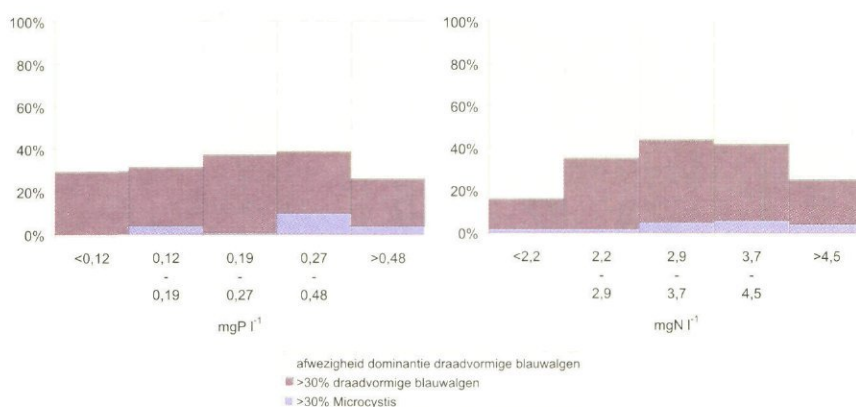
De maximale chlorofyl- α gehalten bij een bepaalde nutriëntenconcentratie verschillen per dominante algengroep. De in deze studie gevonden relaties tussen het maximale chlorofyl- α gehalte in relatie tot de nutriëntenconcentraties, zijn vergelijkbaar met die van de Tweede en Derde Eutrofiëringsequête (tabel 3). Gebruik van de hier gevonden relaties verdient de voorkeur boven die van voorgaande studies. De maximale ratio tussen chlorofyl- α en nutriënten is op een statistisch correcte wijze gedefinieerd. In plaats van een op het oog bepaald maximum is de 95% maximale ratio in de dataset bepaald. Ook is het aantal gegevens waarop deze maxima gebaseerd zijn aanzienlijk groter dan in de voorgaande studies. Voor de eerste maal zijn nu ook betrouwbaarheidsintervallen gegeven. De chlorofyl- α metingen van het RIZA laboratorium van vóór 1985 zijn ditmaal gecorrigeerd in verband met een veranderde analysemethodiek.

De maximale chlorofyl- α :nutriënt ratio's zijn in het algemeen hoger in door draad-

vormige blauwalgen gedomineerde systemen. Tevens is gebleken dat de zeer hoge chlorofyl- α :totaal-P ratio's in systemen gedomineerd door blauwalgen, alleen voorkomen in systemen met een veenbodem. Hierbij bleek ook nog sprake te zijn van een nauwe geografische spreiding: het is wel waargenomen in het veenplassengebied in West-Nederland, maar veel minder in veenplassen in het noorden van het land.

Dominantie van draadvormige blauwalgen (gedefinieerd als >30% van het aantal in de zomer) is niet gevonden beneden 0,05 mg l^{-1} totaal-P. Dit komt overeen met de streefwaarde zoals geformuleerd in de Vierde Nota Waterhuishouding. De waarde is lager dan die gevonden bij de Derde Eutrofiëringsequête, toen dominantie niet werd gevonden beneden 0,08 mg l^{-1} totaal-P. Dominantie van *Microcystis* (gedefinieerd als >30% van het aantal in het derde kwartaal) is in deze studie apart beschouwd. Er wordt een lagere maximale

Afb. 4 Fractie voorkomen van fytoplanktondominantie bij 20% klassen aan nutriëntenconcentraties.



Data analysis on eutrophication variables

A data analysis has been carried out on eutrophication variables of 231 lakes in The Netherlands for 1980-1996. In about 70% of the lakes with sufficient data for trend-analysis, concentrations of total-P, total-N and chlorophyll- α decreased and Secchi disc transparency increased. In the majority of these lakes this trend was significant. In about 10% of the lakes a significant deterioration of the water quality was observed. Lake characteristics hardly affected the trends. Meteorological conditions explained deviation of individual years from the average trend. Relations between eutrophication variables depend on average depth and soil type. In all lakes with an average depth <1,5 m and in lakes with an average depth between 1,5 and 4,0 m with a peaty sediment, the maximum transparency at a certain chlorophyll- α and nutrient concentrations is lower compared to other systems. Dominance of filamentous blue-green algae and *Microcystis* was not found below 1,35 mg l^{-1} total-N and 0,05 and 0,12 mg l^{-1} total-P respectively. For individual lakes nutrient concentrations were correlated to the average concentration in inlet water. Zooplankton grazing (>0,1 biomass *Daphnia*/biomass phytoplankton) and presence of submerged macrophytes (>5% areal coverage with a density >15%) decreased maximum chlorophyll- α concentrations at specific nutrient concentrations, indicating top-down control.

	totaal-P	totaal-N
Veluwemeer	$C = 0,70 \cdot C_{in}$	$C = 1,09 + 0,25 \cdot C_{in}^*$
Drontermeer	$C = 1,27 \cdot C_{in}$	$C = -0,77 + 1,00 \cdot C_{in}$
Nuldernauw	$C = 0,56 \cdot C_{in}$	$C = -0,81 + 0,77 \cdot C_{in}$
Wolderwijd	$C = 1,07 \cdot C_{in}$	$C = -1,75 + 1,11 \cdot C_{in}$
Volkerak	$C = 0,46 \cdot C_{in}$	
Zoommeer	$C = 0,98 \cdot C_{in}$	
Geerplas	$C = 0,71 \cdot C_{in}^*$	
Nieuwkoop N	$C = 0,30 \cdot C_{in}$	
Nieuwkoop Z vóór	$C = 0,59 \cdot C_{in}$	
Nieuwkoop Z na	$C = 1,83 \cdot C_{in}$	
Loosdrecht	$C = 0,64 \cdot C_{in}$	
Nanneveld	$C = 1,13 \cdot C_{in}^*$	

* niet significant op $p < 0,1$

Tabel 4 Regressie van zomergemiddelde concentratie versus C_{in} op basis van jaargemiddelde belasting

ratio gevonden tussen chlorofyl- α en de nutriëntenconcentratie, maar het betrouwbaarheidsinterval is relatief breed. Dit wordt mede veroorzaakt door het geringe aantal waarnemingen en de problemen bij de monsternamen van deze soort. *Microcystis* dominantie is in de dataset niet aangetroffen bij concentraties beneden 0,12 mg l⁻¹ totaal-P. Voor stikstof is het voor het eerst mogelijk gebleken om dergelijke relaties per groep fytoplankton te geven. Zowel voor draadvormige blauwalgen als voor *Microcystis* is dominantie niet gevonden beneden 1,35 mg l⁻¹ totaal-N. De kans op dominantie van een bepaalde groep fytoplankton varieert met de nutriëntenconcentratie (afb. 4). Dominantie van draadvormige blauwalgen neemt af bij zowel lage als zeer hoge concentraties.

Bij hogere waarden van de potentiële graasdruk (hier uitgedrukt als biomassa *Daphnia* zoöplankton gedeeld door biomassa fytoplankton) nemen de maximale chlorofyl- α gehalten bij een bepaalde concentratie nutriënten af, wat duidt op top-down sturing. Aan de andere kant is de potentiële graasdruk bij dominantie van draadvormige blauwalgen immer laag, wat wordt toegeschreven aan een slechte eetbaarheid van deze groep fytoplankton.

Met toenemende bedekking van ondergedoken waterplanten nemen de maximale nutriëntenconcentraties en het chlorofyl- α gehalte af (met uitzondering van totaal-P in zeer kleine systemen). Pas als 5% van het systeem is bedekt met een dichtheid van minimaal 15%, is dit effect aantoonbaar. Voor de maximale chlorofyl- α : nutriënt ratio's wordt pas bij een bedekking van 20% van het oppervlak een verschil aantoonbaar. Dit duidt er op dat waterplanten chlorofyl- α beïnvloeden via bottom-up sturing (competitie om de beschik-

bare nutriënten), top-down sturing (mogelijk positieve invloed op graas en/of allelopathie) en lichtlimitatie, waarbij competitie om nutriënten al bij lagere percentages bedekt oppervlak lijkt op te treden. Er zijn geen effecten aangetoond van de totale visbiomassa op het chlorofyl- α gehalte, de *Daphnia* biomassa en op de chlorofyl- α : nutriënt ratio's.

Nutriëntenconcentratie en -belasting

In deze studie is voor individuele systemen een lineair verband aangetoond tussen de gemiddelde concentratie in het instromende water (C_{in}) en de zomergemiddelde concentratie in het meer (C). De massabalans van een nutriënt over een meer of plas leidt bij evenwicht tot:

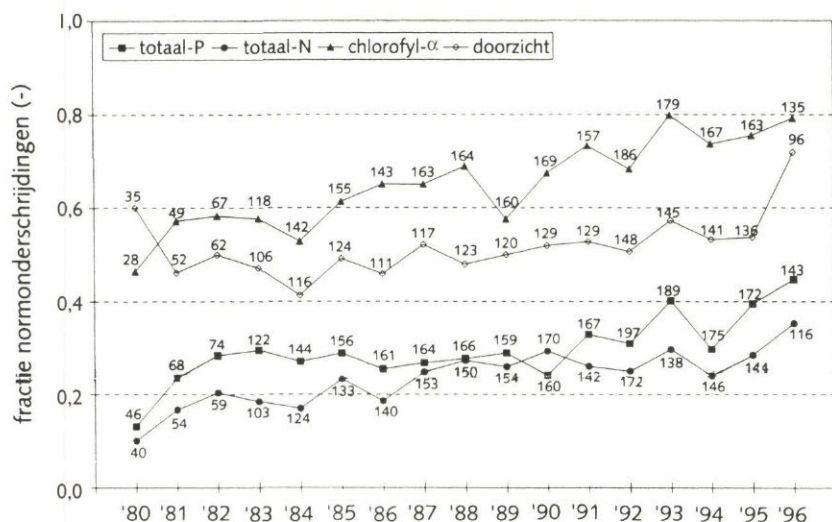
$$C = C_{in} (1 - k \tau)^{-1}$$

Hierbij is k een netto snelheid (tijd⁻¹; positief bij vorming in het systeem en negatief bij verdwijnen van materiaal) en τ de verblijftijd (tijd; volume gedeeld door aanvoerdebiet). C_{in} is niet direct te meten; deze is gelijk aan de

externe belasting (massa per oppervlakte per tijdseenheid) maal de verblijftijd en gedeeld door de gemiddelde diepte. Zowel voor de zomerperiode, als voor het gehele jaar, bleken de relaties vaak statistisch significant, met hogere correlaties voor de zomerperiode. Omdat de belasting op jaarbasis beter is te meten, is deze hier weergegeven (tabel 4). Met behulp van deze relaties kan vervolgens de maximaal toelaatbare belasting per systeem worden berekend om een specifieke waterkwaliteitsdoelstelling te halen, zoals de MTR-waarden van de Vierde Nota Waterhuishouding. Voor de systemen waarvan gegevens beschikbaar waren, geldt dat de MTR-waarde wordt bereikt bij een concentratie van gemiddeld ongeveer anderhalf maal de MTR-waarde in het instromende water.

De parameters van de relatie zijn specifiek voor een systeem. De nauwkeurigheid van deze relatie is voor een specifiek systeem veelal groter dan die voor een relatie gebaseerd op gegevens van een groot aantal systemen. Aan de andere kant moeten er wel voor een aantal jaren gegevens zijn om de parameter(s) te kunnen schatten. De verhouding tussen de zomergemiddelde concentratie en C_{in} geeft aan of er retentie (netto flux naar het sediment) dan wel netto productie (nalevering uit de bodem) plaatsvindt. Ongeveer de helft van het totaal-P dat het Volkerak en de Loosdrechtse Plassen instroomt blijft daar achter, terwijl er meer fosfor het Drontermeer uitstroomt dan er in komt. In de Nieuwkoopse Zuidplas is de situatie vóór en na een beheersmaatregel duidelijk anders. Doordat een aanzienlijke, instantane externe P-reductie heeft plaatsgevonden door het verminderen van de hoeveelheid inlaatwater, is ook de verblijftijd langer geworden. Hier is retentie veranderd in netto nalevering uit de bodem. Voor totaal-N is de verhouding tussen C en C_{in} in de beschikbare dataset steeds kleiner dan één, dat wil zeggen dat er een netto verwijdering optreedt.

In het Indicatief Meerjarenprogramma Water 1980-1984 (1981) is een basiskwaliteit voor stagnante, eutrofiëringsgevoelige wateren geformuleerd. Gesteld werd dat een doorzicht van 0,5 m wordt bereikt bij chlorofyl- α concentraties van hooguit 100 μ g l⁻¹. Hierbij behoorden maximale nutriëntenconcentraties van 0,2 mg l⁻¹ totaal-P en 2,0 mg l⁻¹ totaal-N. Op basis van resultaten van de Derde Eutrofiëringsenquête (1987) bleek slechts 0,4 m doorzicht aan te sluiten bij 100 μ g l⁻¹ chlorofyl- α . Daarnaast zijn grenswaarden voor de nutriëntenconcentraties bepaald (0,15 mg l⁻¹ totaal-P en 2,2 mg l⁻¹ totaal-N) als die waarden, waarbij geen hogere gehalten voor chlorofyl- α zijn gevonden dan de norm. Het betrof hier zomergemiddelde waarden. Later werd de norm voor totaal-P ook geldig als jaargemiddelde en voor alle watertypen. Uitzonderingen door natuurlijke omstandigheden (nutriëntenrijke kwel bijvoorbeeld) waren mogelijk. Recentelijk (1997) zijn deze grenswaarden MTR-waarden genoemd, analoog aan het concept voor milieuvreemde stoffen. Ook zijn streefwaarden geformuleerd voor de nutriënten, namelijk 0,05 mg l⁻¹ totaal-P en 1,0 mg l⁻¹ totaal-N.



Afb. 5 Fractie van het aantal onderzochte meren en plassen die voldoen aan de MTR-waarden voor zomer-gemiddelde concentraties en doorzicht. Labels geven per jaar het aantal meren en plassen aan waarop de fracties betrekking hebben.

Wat betekent dit voor het waterbeheer?

De resultaten van deze analyse kunnen van nut zijn voor de normstelling voor eutrofiëring en bij het beheer van individuele watersystemen. Sommige aspecten hierbij zijn nieuw, andere zijn al eerder gevonden, maar worden nu beter onderbouwd door de grotere dataset en de betere mogelijkheid tot differentiatie.

Waterkwaliteitsnormen

Dalende trends in nutriënten en chlorofyl-α en een toename van het doorzicht leiden er toe dat in veel meren en plassen wordt voldaan aan de MTR-waarden voor de waterkwaliteit (afb. 5). Het percentage systemen waar de norm voor doorzicht wordt gehaald is gestegen van 60% in 1980 naar 72% in 1996. Voor chlorofyl-α is er een toename van 46% naar 79%. Voor totaal-P en totaal-N stegen de percentages respectievelijk van 13% naar 45% en van 10% naar 35%. Veel wateren voldoen nog steeds niet aan de MTR-waarden voor nutriënten. In ongeveer de helft van de watersystemen waar aan de norm voor chlorofyl-α wordt voldaan, wordt geen van beide normen voor nutriënten gehaald.

Op basis van deze analyse is bevestigd dat de huidige MTR-waarden voor doorzicht en chlorofyl-α op elkaar aansluiten voor systemen met een diepte tussen 1,5 en 4,0 m en een zand- of kleibodem en voor alle systemen dieper dan 4,0 m. Voor systemen ondieper dan 1,5 m en voor systemen met een veenbodem ondieper dan 4,0 m dient het gehalte aan chlorofyl-α echter te worden teruggebracht tot onder $50 \mu\text{g l}^{-1}$ om 0,4 m doorzicht te behalen.

De bijbehorende concentraties aan nutriënten zijn weer afhankelijk van de dominante groep fytoplankton. Bij afwezigheid van dominantie van draadvormige blauwalgen mag de totaal-P concentratie niet hoger zijn dan $0,066 \text{ mg l}^{-1}$ om met voldoende mate van zekerheid (95%) te kunnen voorspellen dat de chlorofyl-α gehalten minder dan $50 \mu\text{g l}^{-1}$ zullen bedragen. Voor systemen met dominantie van draadvormige blauwalgen wordt op deze wijze een concentratie afgeleid, waarbij in de dataset in het geheel geen dominantie van blauwalgen is aangetroffen. Dit betekent dat hier de grens gesteld kan worden op $0,05 \text{ mg l}^{-1}$ totaal-P. Dit gehalte komt goed overeen met de streefwaarde uit de Vierde Nota Waterhuishouding.

Uit het bovenstaande volgt dat de huidige MTR-waarden voor doorzicht en nutriënten niet altijd goed op elkaar aansluiten. Voor de directe relatie tussen de MTR-waarden voor chlorofyl-α en nutriënten geldt dat de MTR-waarde voor totaal-P resulteert in maximaal $114 \mu\text{g l}^{-1}$ chlorofyl-α in systemen zonder dominantie van draadvormige blauwalgen en in maximaal $201 \mu\text{g l}^{-1}$ in systemen met dominantie van draadvormige blauwalgen. Voor de MTR-waarde van totaal-N zijn de maximale gehalten aan chlorofyl-α respectievelijk 83 en $123 \mu\text{g l}^{-1}$.

Voor de bepaling van een grenswaarde voor chlorofyl-α voor het bereiken van een gewenst doorzicht, en vervolgens voor het afleiden van toegestane concentraties aan nutriënten, moet met de systeemafhankelijkheid van de relatie tussen deze variabelen rekening worden gehouden. De resultaten van deze studie kunnen hierbij worden gebruikt.

Herstel van meren en plassen

Het bereiken van de MTR-waarde voor doorzicht betekent niet automatisch dat een ecologisch gezond systeem ontstaat, maar is wel een stap in de richting van streefbeeld. In de Handleiding Eutrofiëeringsbestrijding van het RIZA is een stappenplan opgezet om meren en plassen te herstellen. Een belangrijke eerste stap is het vaststellen van het streefbeeld voor het specifieke systeem, waarbij verder gekeken moet worden dan de landelijke MTR-waarden. Overbemesting met nutriënten is slechts één factor, die verstoring kan werken op de totstandkoming van het streefbeeld. Daarnaast spelen onder meer fysische randvoorwaarden (zoals peilvariaties) een rol, evenals invloed van toxische stoffen en verstoringen door recreatie, visserij en beroeps-scheepvaart. Van deze factoren is vaak niet goed bekend welke invloed ze uitoefenen op het ecosysteem.

Voldoende licht nabij de bodem is een voorwaarde voor rekolonisatie van waterplanten, waarna ecologisch herstel in kan zetten. Het gaat dus niet om het doorzicht in absolute zin, zoals de MTR-waarde, maar om doorzicht gerelateerd aan de diepte. Hierbij is niet alleen de gemiddelde diepte van het systeem van belang, maar eveneens de verdeling van verschillende diepte-klassen in een bepaald systeem. Het doorzicht wordt bepaald door de hoeveelheid fytoplankton en een achtergronddoorzicht (doorzicht bij afwezigheid van fytoplankton). Het achtergronddoorzicht is weer afhankelijk van de diepte en het bodemtype.

De grootste absolute stijging van totaal-P wordt gevonden in respectievelijk het Bree-de Water, de Grote Plas Akkerdijk en in mindere mate ook het Oostduinmeer en het Quackjeswater. Het is opvallend dat deze alle dicht langs de kust zijn gelegen en dat drie van deze wateren duinmeren zijn.

Een doorzicht van 0,4 m kan een beginpunt zijn voor ecologisch herstel in de zeer ondiepe delen van een systeem. Dit houdt in, dat voor alle meren met een gemiddelde diepte van minder dan 1,5 m en meren met een veenbodem ondieper dan 4,0 m, chlorofyl-α niet hoger dan $50 \mu\text{g l}^{-1}$ moet zijn. Dit gehalte is via de concentratie totaal-P te bereiken bij respectievelijk $0,05$ en $0,066 \text{ mg l}^{-1}$ in systemen met en zonder dominantie van draadvormige blauwalgen. Voor totaal-N zijn bijbehorende concentraties respectievelijk $1,35$ en $1,6 \text{ mg l}^{-1}$. In systemen met een gemiddelde diepte tussen 1,5 en 4,0 m en een zand- of kleibodem en in

Volgens Chambers & Kalff [1985, Can. J. Fisheries Aquat. Sci. 42: 701-709] hebben waterplanten minimaal 10% van het licht nodig dat op het wateroppervlak valt. Deze hoeveelheid licht is aanwezig op een grote diepte dan de Secchi-diepte, want de Secchi-schijf verdwijnt al uit beeld waar nog circa 15-25% van het licht aanwezig is. Dit betekent dat een doorzicht van 0,4 m kansen biedt voor waterplanten in (delen van) systemen met een diepte van ongeveer 0,5-0,7 m. Dit komt overeen met de waargenomen ontwikkelingen in de ondiepe delen van de randmeren.

diepere systemen, mogen de chlorofyl- α gehalten twee maal hoger liggen voor een doorzicht van 0,4 m. Als deze systemen relatief weinig zeer ondiepe delen bevatten, moet echter een groter doorzicht worden nagestreefd.

men zijn echter geldig binnen een beperkt bereik. Voor extrapolatie naar een situatie, waar na een maatregel de externe belasting instantaan fors is teruggebracht, moet rekening worden gehouden met een vertraging van het beoogde effect, maar kan gebruik gemaakt worden van kennis van vergelijkbare systemen.

Het is gebleken dat graas van zoöplankton en een bepaalde bedekking met waterplanten de maximale chlorofyl- α : nutriënt ratio's verlaagt. Dit betekent dat het gewenste chlorofyl- α gehalte en doorzicht kan worden bereikt bij hogere nutriëntenconcentraties en dat top-down maatregelen ecologisch herstel kunnen bespoedigen. In de beschikbare dataset bleek bij dominantie van draadvormige blauwalgen de graasdruk immer laag te zijn, mogelijk door slechte eetbaarheid voor zoöplankton. Het doorbreken van de dominantie van bepaalde soorten blauwalgen kan derhalve een belangrijke stap zijn in het ecologisch her-

door toegenomen ervaring ook een toename in het arsenaal aan maatregelen dat kan worden aangewend. Naast een bottom-up aanpak is uit de analyses gebleken dat het ook mogelijk is om via top-down sturing en andere aanvullende maatregelen ecologisch herstel te bevorderen. Deze aanvullende maatregelen zijn het meest effectief als de nutriëntenconcentraties al voldoende zijn teruggebracht. Dit pleit voor een combinatie van bottom-up en top-down maatregelen in aanvulling op het generieke beleid. De vaststelling welke combinatie van maatregelen de grootste kans op ecologisch herstel biedt, vergt kennis van het systeem. Zonder voldoende metingen vooraf blijft het deels 'trial and error'. Door kennis van het systeem wordt het steeds beter mogelijk om een pakket maatregelen 'op maat' samen te stellen. Evaluatie van de maatregelen bevordert vervolgens weer de kennis die kan worden aangewend bij nieuwe projecten. 



Afb. 6 Wanneer er eenmaal waterplanten verschijnen kan het herstel zich over het hele meer uitbreiden (foto W. Kolvoort)

Om lage nutriëntenconcentraties te bereiken, moet de belasting voldoende ver worden teruggebracht. De benodigde reductie kan door de beheerder worden afgeleid uit een lineaire relatie met systeem-specifieke parameters tussen de nutriëntenconcentratie en -belasting. De wijde betrouwbaarheidsintervallen, zoals deze golden voor de relaties op basis van studies met een groot aantal meren, kunnen op deze wijze nauwer worden gemaakt. De relaties voor individuele syste-

stel van meren. *Microcystis* is niet aangetroffen bij concentraties lager dan $0,12 \text{ mg l}^{-1}$ totaal-P en $1,35 \text{ mg l}^{-1}$ totaal-N. Verder onderzoek naar de factoren die de bloei van ongewenste algensoorten sturen is gewenst.

Op basis van grotere beschikbaarheid van gegevens zijn verfijningen aangebracht in de relaties doorzicht - chlorofyl- α - nutriëntenconcentratie - nutriëntenbelasting, zoals deze in voorgaande studies zijn afgeleid. Voorts is er

Met dank aan...

Het project is mogelijk gemaakt door financiële bijdragen van STOWA en RIZA en de bereidwilligheid van vele waterbeheerders om gegevens ter beschikking te stellen. De begeleidingscommissie bestond, naast de auteurs van dit artikel, uit E.H.S. van Duin, L. Lijklema, M.-L. Meijer, R. Veening en B. van der Wal.