

Stikstof en eutrofiëring in ondiepe Hollandse meren

Inleiding

Eutrofiëring is overvloedige groei van fytoplankton en andere waterplanten, die op kan treden als gevolg van hoge concentraties van voedingsstoffen in het oppervlaktewater. Fytoplankton is een verzamelnaam voor alle mikroskopisch kleine planten, die in het water zweven. Het vormt in grote oppervlaktewateren het merendeel van de plantaardige biomassa en reageert zeer snel op de toevoer van voedingsstoffen aan het water. Daarom is vooral de groei van fytoplankton vaak direkt of indirekt de oorzaak



DR. A. D. SCHMIDT-
VAN DORP
Waalre

van een aantal ongewenste verschijnselen, zoals: sterke schommelingen van de zuurstof-concentratie, het optreden van een hoge zuurgraad en grote troebelings van het water. Deze verschijnselen gaan meestal samen met een vermindering van het aantal plant- en diersoorten en met een dominantie van soorten, die overlast veroorzaken. Eutrofiëring is geen nieuw verschijnsel en kan van nature plaatsvinden. Immers de toevoer van voedingsstoffen aan het oppervlaktewater gebeurt ook door erosie van sedimenten of door uitwerpselen van dieren, bijv. bij vogelkolonies. Wel versnelde in deze eeuw de eutrofiëring door menselijke activiteiten. De bevolking groeide sterk, de landbouwmethoden veranderden (o.a. door het gebruik van kunstmest en doordat mest niet teruggebracht werd op het land) en na 1950 nam het gebruik van fosfaatrijke wasmiddelen enorm toe. Evenals in andere werelddelen bleken ook in Europa vele meren snel te vervuilen.

In de Rijndelta werd het water waarschijnlijk van oudsher al enigermate geëutrofiëerd door de voedingsstoffen, die de rivier aanvoerde. Een beschrijving van de dominerende fytoplanktonsoorten in de Rijndelta aan het begin van deze eeuw (Lauterborn, 1918) wijst erop, dat dit water toen reeds vrij eutroof was. Peelen (1975) vergeleek oude gegevens van verschillende onderzoekers met recente waarnemingen (tot 1973) en vond voor het fytoplankton van het Nederlandse gedeelte van de rivier geen significante kwalitatieve verandering (van het saprobienivo), maar wel een toename van het totale aantal individuen.

In zes meren in de Rijndelta, gelegen in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Rijnland, werd een onderzoek ingesteld naar factoren, die de eutrofiëring van het

Verklaring van enkele gebruikte termen

Anorganische stikstof-concentratie: de som der concentraties van ammonium-, nitriet- en nitraatstikstof (hierbij is niet inbegrepen de in het water opgeloste N_2).

Beperkende faktor: een faktor wordt beschouwd als zijnde beperkend, wanneer de biomassa of groeisnelheid van het fytoplankton alleen veranderen, als deze faktor een wijziging ondergaat. Biomassa: het totaal van de organismen, zoals gemeten naar hun aantal, gewicht, gehalte van een bepaalde stof, volume of andere maatstaf.

Saprobie: de snelheid van alle heterotrofe processen tezamen.

Seston: het in het water zwevende (levende en dode) organische materiaal en anorganische materiaal in deeltjesvorm.

Totale stikstof-concentratie: de concentraties van de organische-, ammonium-, nitriet- en nitraatstikstof in ongefiltreerd water tezamen (hierbij is niet inbegrepen de in het water opgeloste N_2).

Winterhalfjaar: oktober t/m maart.

Zomerhalfjaar: april t/m september.

oppervlaktewater bepalen. Rijnland is een waterstaatkundige eenheid. De watertoevoer aan het gebied vindt hoofdzakelijk plaats vanuit de Hollandse IJssel, een zijrivier van de Rijn. Dit water bevat hoge voedingsstofconcentraties als gevolg van de lozing van afvalwater in de dicht bevolkte gebieden van Duitsland en Nederland, waar de Rijn doorheenstroomt. Waarschijnlijk komen alle voedingsstoffen, die voor de groei van fytoplankton slechts in kleine hoeveelheden nodig zijn, in dit rivierwater in voldoende mate voor om sterke fytoplanktongroei mogelijk te maken. Alleen stikstof en fosfaat werden onderzocht als voedingsstoffen, die voor de eutrofiëring in Rijnlands gebied mogelijk de sleutelfaktor (de primair beperkende faktor) kunnen vormen. Tevens werd bij dit onderzoek rekening gehouden met het feit, dat de lichtintensiteit, de troebelings van het water, de doorstroming,

de diepte en de watertemperatuur ook van invloed zijn op de fytoplanktongroei.

De opzet van het onderzoek

Zes meren, variërend in diepte van gemiddeld 1,5 tot 4,2 m, werden onderzocht. Dit waren in 1974 het Braassemermeer, de Mooie Nel, de Westeinder- en de Kager Plassen, die tot de boezem behoren en de polderplassen van Langeraar en Nieuwkoop. In 1975 werden de Mooie Nel, de Westeinder-, de Kager- en de Nieuwkoopse Plassen onderzocht.

De meren werden elk eens per twee weken bemonsterd op 5 tot 7 punten. In totaal werd in 1974 en 1975 op ongeveer 160 dagen gemonsterd. In deze jaren werd in de periode van maart t/m september van ongeveer 900 watermonsters de primaire produktie geschat en werd naast een aantal fysische- en chemische grootheden ook de chlorofyl-a-concentratie bepaald.

Van ruim 150 watermonsters werd de ontwikkeling van de chlorofyl-a-concentratie in het laboratorium gevolgd na verrijking van het water met anorganische stikstof en/of fosfaat.

Een beschrijving van de wateren en van de methoden is elders gegeven (Schmidt-van Dorp, 1978).

Als maatstaf voor de biomassa van het fytoplankton werd de chlorofyl-a-concentratie genomen. Een aanwijzing over de groeisnelheid van het fytoplankton geeft de fotosynthesesnelheid.

Een verband van de stoffen stikstof en fosfaat met de biomassa en groeisnelheid van het fytoplankton werd op verscheidene manieren gezocht:

a. De concentraties van deze voedingsstoffen in de winter werden vergeleken met de chlorofyl-a-concentratie in de daarop volgende zomer.

Het nemen van watermonsters op de Kagerplassen.



b. De totale concentraties van stikstof en fosfaat in de zomer werden vergeleken met de daarbij optredende chlorofyl-a-concentratie.

c. Het verloop van de concentraties van stikstof en fosfaat in de tijd werd vergeleken met dat van de chlorofyl-a-concentratie.

d. Oppervlaktewatermonsters werden verrijkt met anorganische stikstof en/of orthofosfaat. Daarna werd gedurende enige dagen in het laboratorium de ontwikkeling van de chlorofyl-a-concentratie gemeten.

e. De gehalten van stikstof en fosfaat in het seston van het oppervlaktewater, in het seston van de biotests en in het oppervlaktewater werden vergeleken.

f. De concentraties van stikstof en fosfaat werden vergeleken met de maximale fotosynthesesnelheid.

g. De toevoersnelheid van stikstof en fosfaat (de 'belasting') aan het oppervlaktewater van twee meren werd vergeleken met de chlorofyl-a-concentraties in deze meren.

De resultaten van deze zeven verschillende onderzoeken worden in het kort hieronder beschreven. Voor een uitgebreider behandeling ervan wordt verwezen naar het proefschrift (Schmidt-van Dorp, 1978).

De voedingsstof-concentraties en de biomassa in het oppervlaktewater

De beschikbaarheid van één voedingsstof kan de biomassa bepalen. Als één der benodigde voedingsstoffen niet meer beschikbaar is, kan het fytoplankton vaak nog geruime tijd in leven blijven, maar zich niet meer vermenigvuldigen. Er treedt dan een direct verband op tussen de totale concentratie van die voedingsstof en de biomassa van het fytoplankton.

In wateren in gematigde- en polaire streken kan soms uit de winterconcentraties van orthofosfaat en van anorganische stikstof enigszins worden voorspeld, hoe groot de uiteindelijk gevormde biomassa van het fytoplankton in de daarop volgende zomer zal zijn (Lund, 1970; Edmonson, 1970).

In deze wateren is de fytoplankton-biomassa in de winter meestal zeer laag en neemt bij het aanbreken van de lente sterk toe. Daarom werden de gemiddelde voedingsstof-concentraties van het winterhalfjaar vergeleken met de gemiddelde chlorofyl-a-concentraties van het zomerhalfjaar en met de hoogste chlorofyl-a-concentratie, die in het zomerhalfjaar werd gemeten (tabel I). Er werd hierbij echter geen verband gevonden tussen de voedingsstof-concentraties in de winter en de chlorofyl-a-concentraties in de daarop volgende zomer.

TABEL I - De concentraties van orthofosfaat en van anorganische stikstof in het winterhalfjaar (gemiddeld over oktober 1974 t/m maart 1975) en de chlorofyl-a-concentraties in het zomerhalfjaar (gemiddeld over april t/m september 1975). Ook voor elke monsterdatum is de gemiddelde chlorofyl-a-concentratie, gemeten over alle monsterpunten in een meer, berekend; de hoogste gevonden waarde is gegeven tussen haakjes.

Meer	Winterhalfjaar '74-'75		Zomerhalfjaar '75
	Orthofosfaat mg P l ⁻¹	Anorganische stikstof mg N l ⁻¹	Chlorofyl-a (piek) mg l ⁻¹
Kager Plassen	0,50	3,7	0,055 (april 0,213)
Mooie Nel	0,95	4,3	0,048 (sept. 0,090)
Nieuwkoopse Plassen I	0,1	0,2	0,035 (aug. 0,080)
Nieuwkoopse Plassen II	< 0,1	0,1	0,129 (juni 0,193)
Nieuwkoopse Plassen III	< 0,1	0,1	0,209 (aug. 0,289)
Westeinder Plassen	0,15	1,8	0,043 (april 0,132)

TABEL II - De concentraties van het totaalfosfaat, orthofosfaat en chlorofyl-a in het zomerhalfjaar (gemiddeld over april t/m september; echter in 1974 voor de Langerarse- en de Nieuwkoopse Plassen gemiddeld over april t/m juli).

Meer	Totaalfosfaat mg P l ⁻¹		Orthofosfaat mg P l ⁻¹		Chlorofyl-a mg l ⁻¹	
	1974	1975	1974	1975	1974	1975
Braassemermeer	0,50	—	0,28	—	0,018	—
Kager Plassen	0,42	0,50	0,31	0,37	0,025	0,055
Langerarse Plassen	0,75	—	0,50	—	0,118	—
Mooie Nel	1,86	1,70	1,71	1,56	0,051	0,048
Nieuwkoopse Plassen I	0,16	0,21	0,10	0,12	0,012	0,035
Nieuwkoopse Plassen II	0,14	0,13	0,04	0,02	0,122	0,129
Nieuwkoopse Plassen III	0,21	0,24	0,04	0,03	0,151	0,209
Westeinder Plassen	0,20	0,25	0,09	0,15	0,035	0,043

TABEL III - De concentraties van de totale stikstof, de anorganische stikstof en chlorofyl-a in het zomerhalfjaar (gemiddeld over juni t/m september 1974 en over april t/m september 1975; echter in 1974 voor de Langerarse- en de Nieuwkoopse Plassen gemiddeld over juni en juli).

Meer	Totale stikstof mg N l ⁻¹		Anorganische stikstof mg N l ⁻¹		Chlorofyl-a mg l ⁻¹	
	1974	1975	1974	1975	1974	1975
Braassemermeer	3,1	—	2,2	—	0,021	—
Kager Plassen	2,5	3,0	1,0	1,0	0,036	0,055
Langerarse Plassen	4,6	—	0,2	—	0,158	—
Mooie Nel	5,3	6,7	3,1	4,5	0,061	0,048
Nieuwkoopse Plassen I	1,7	2,1	0,1	0,2	0,016	0,035
Nieuwkoopse Plassen II	3,1	3,1	0,1	0,1	0,157	0,129
Nieuwkoopse Plassen III	4,0	3,6	0,1	0,2	0,220	0,209
Westeinder Plassen	2,1	1,4	0,6	0,4	0,049	0,043

Evenmin was er verband tussen de gemiddelde voedingsstof-concentraties in het zomerhalfjaar en de daarbij optredende chlorofyl-a-concentraties (tabellen II en III).

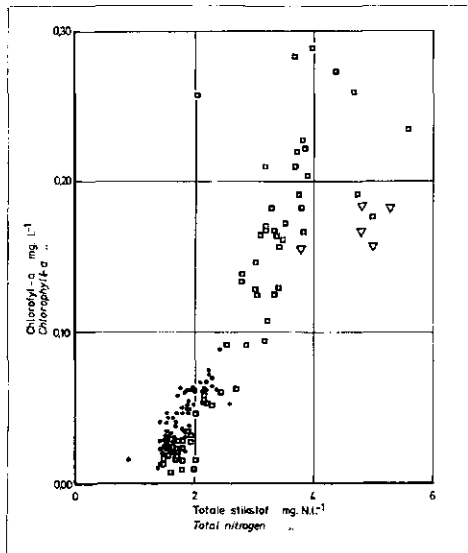
Wel ging in het zomerhalfjaar een toename van de chlorofyl-a-concentratie meestal samen met een duidelijke daling van de concentratie van anorganische stikstof. Ook vertoonde de totale stikstof-concentratie een verband met de chlorofyl-a-concentratie op die plaatsen, waar de concentratie van de anorganische stikstof gedurende langere tijd niet hoger was dan 0,2 mg N l⁻¹ (afb. 1). De fytoplankton-biomassa in het oppervlaktewater vertoonde dus een verband met de concentraties van de anorganische en totale stikstof. Voor fosfaat werden dergelijke verbanden niet gevonden.

De voedingsstof-concentraties en de biomassa in biotests

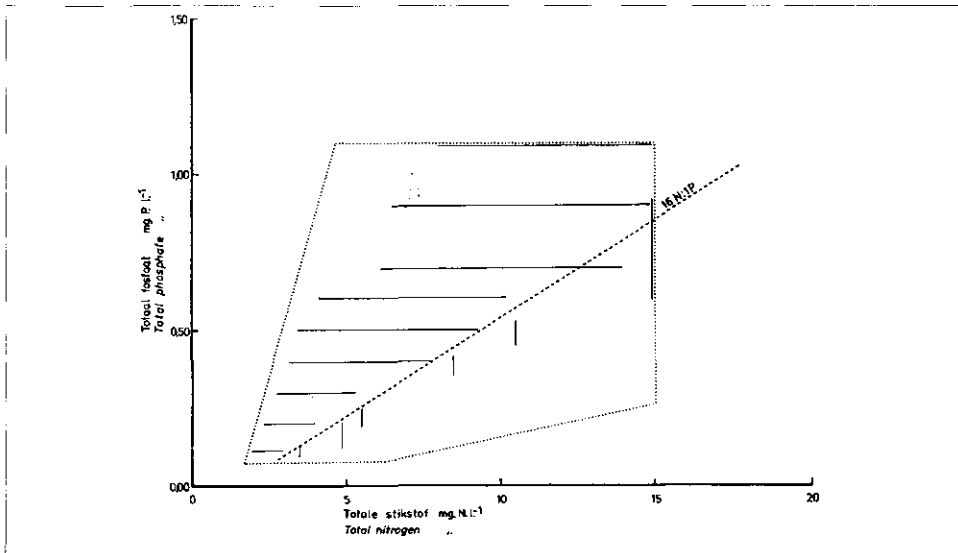
In 1974 werden watermonsters van alle meren verrijkt met ammonium, nitraat en/of

orthofosfaat. Daarna werd van deze monsters en een monster zonder toevoegingen (een 'blanco') in het laboratorium de ontwikkeling van de chlorofyl-a-concentratie gevolgd totdat een maximum van de chlorofyl-a-concentratie was bereikt. De resultaten van deze biotests werden eerder beschreven (Schmidt-van Dorp, 1975). In watermonsters van alle meren kon men door toevoeging van anorganische stikstof de fytoplanktongroei in biotests stimuleren. De mate van stimulering was soms recht evenredig met de toegevoegde hoeveelheid stikstof. Fosfaat was in deze meren in het algemeen dus niet de sleutelfactor, die de gevonden chlorofyl-a-concentraties beperkte. Het kwam gewoonlijk in voldoende hoeveelheden voor om meer fytoplanktongroei mogelijk te maken, dan in werkelijkheid werd aangetroffen.

In 1975 werden ongeveer 140 van dergelijke biotests uitgevoerd met watermonsters van de Westeinder- en de Nieuwkoopse Plassen. Juist deze meren werden uitgekozen, omdat



Afb. 1 - De totale stikstof-concentratie, vergeleken met de chlorofyl-a-concentratie in watermonsters met een anorganische stikstof-concentratie van niet meer dan 0,2 mg N l⁻¹ (n = 134, ρ = 0,83). ▽ Langeraarse Plassen, ● Westeinder Plassen, ○ Kager Plassen, □ Nieuwkoopse Plassen.



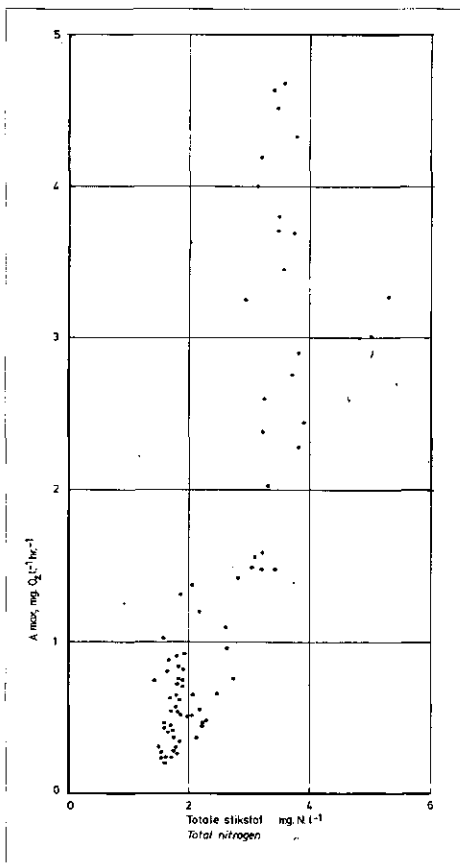
Afb. 2 - De totale stikstof- en totaalfosfaat-concentraties, die in de ongeveer 140 biotests met water van de Westeinder- en de Nieuwkoopse Plassen voorkwamen, lagen in het gebied, dat door de stippellijn is omgeven. De invloed van stikstof op de maximaal gemeten chlorofyl-a-concentratie was het duidelijkst bij concentraties binnen het horizontaal gestreepte gebied; de invloed van fosfaat was het duidelijkst bij concentraties binnen het vertikaal gestreepte gebied. De onderbroken lijn scheidt het gebied, waar de invloed van stikstof overheerste van dat, waar de invloed van fosfaat overheerste.

het water hiervan lagere totaalfosfaat-concentraties had dan dat der andere meren (tabel II) en een beperking der fytoplanktongroei in deze meren dus het eerste verwacht zou mogen worden. Uit de resultaten bleek, dat de maximale chlorofyl-a-concentratie in een biotest met een relatief lage totale stikstof-concentratie niet door de fosfaat-concentratie werd bepaald. Echter in een biotest met een zeer hoge totale stikstof-concentratie kon de maximale chlorofyl-a-concentratie wel door de totaalfosfaat-concentratie worden bepaald. De invloed van stikstof was het duidelijkst, wanneer de stikstof : fosfaat (gewichts-)verhouding in het water lager was dan ongeveer 16 N : 1 P. De invloed van fosfaat werd alleen gevonden bij een hogere N : P verhouding. Schematisch is dit aangegeven in afb. 2.

Door de concentraties van het totaalfosfaat en van de totale stikstof te korreleren met de maximaal gevonden chlorofyl-a-concentratie bij een multi-pele korrelatieberekening werd een significant verband tussen de voedingsstof-concentraties en de biomassa gevonden (korrelatiecoëfficiënt van 0,87). Eenzelfde berekening werd uitgevoerd met de totaalfosfaat-concentratie en de concentratie van de totale stikstof, verminderd met de concentratie van de in het water opgeloste organische stikstof. Daarbij werd tussen de voedingsstof-concentraties en de biomassa een beter verband aangetoond (korrelatiecoëfficiënt van 0,89). Uit de resultaten van de biotests bleek dus, dat de maximaal gevormde biomassa hierin sterk bepaald werd door de totale concen-

traties van stikstof en fosfaat. Welk der beide voedingsstoffen de biomassa primair

Afb. 3 - Van watermonsters met een anorganische stikstof-concentratie van niet meer dan 0,2 mg N l⁻¹ is de totale stikstof-concentratie vergeleken met A_{max}: de bruto fotosynthesesnelheid bij verzadigende stralingsintensiteit.



beperkte, hing af van de onderlinge concentratieverhouding van de twee voedingsstoffen. Een 'drempel' werd gevonden bij een N : P (gewichts-)verhouding van ongeveer 16 N : 1 P.

De voedingsstof-concentraties en de fotosynthesesnelheid

Voorwaarde voor de groei van fytoplankton is, dat bij de fotosynthese met behulp van lichtenergie (energie uit fotosynthetisch actieve straling) CO₂ wordt gereduceerd en vastgelegd in organische verbindingen. Met welke snelheid de fotosynthese verloopt, hangt af van de beschikbare hoeveelheid licht, CO₂, van de temperatuur en van de beschikbare voedingsstoffen. Wanneer voldoende licht aanwezig is, wordt de snelheid der fotosynthese beperkt door de temperatuur of door de concentraties van voor de groei benodigde stoffen. In zo'n geval mag een verband verwacht worden tussen de maximale fotosynthesesnelheid en de temperatuur of één der voedingsstof-concentraties. De maximale fotosynthesesnelheid van het natuurlijke fytoplankton, zoals die kort na de bemonstering in het laboratorium werd gemeten, hing steeds duidelijk samen met de chlorofyl-a-concentratie, maar niet met de concentraties van het totaalfosfaat of van de totale stikstof in het water. Alleen in watermonsters met een anorganische stikstof-concentratie van niet meer dan 0,2 mg N l⁻¹ hielden de onderlinge totale stikstof-concentraties verband met de maximale fotosynthesesnelheid (afb. 3). Voor fosfaat werd een dergelijk verband niet gevonden.

De niet (direct) opneembare stikstof

De lijnen, die een verband aangeven tussen de totale stikstof-concentratie en de chlorofyl-a-concentratie of de maximale fotosynthesesnelheid (afb. 1, 2 en 3) gaan niet door de oorsprong van het assenstelsel, maar snijden de stikstof-as tussen 1 en 2 mg N l⁻¹.

Vergelijkt men echter de chlorofyl-a-concentratie met het stikstof-gehalte van seston, dan wordt eenzelfde verband gevonden, waarvan de hellingslijn wél door de oorsprong van het assenstelsel gaat (afb. hier niet gegeven). Dit werd gevonden zowel voor het seston in oppervlaktewater als voor het seston in biotests, waar de biomassa beperkt werd door de stikstof-concentratie. Dit leidde tot de veronderstelling, dat niet alle stikstof door het fytoplankton uit het water kon worden opgenomen.

De veronderstelde hoeveelheid niet-opneembaar stikstof van 1 à 2 mg N l⁻¹ was meestal veel groter dan de concentratie van anorganische stikstof.

In de zomer bedroeg de concentratie van anorganische stikstof op vele plaatsen niet meer dan enkele tienden van milligrammen N per liter. Daarom werd de concentratie van de in het water opgeloste organische stikstof gemeten, nadat dit water was gefiltreerd over een 4 - 5 µm glasvezelfilter.

De concentraties van de in het water opgeloste organische stikstof schommelden in 4 meren in 1975 tussen 1,0 en 1,9 mg N l⁻¹ (gemiddeld over 6 maanden).

Deze stikstof zou zich ten dele kunnen bevinden in bacteriën en kleine detritusdeeltjes, die het glasvezelfilter passeren.

Ten dele bevindt deze stikstof zich waarschijnlijk in humuszuren. De meren hebben alle een min of meer venige bodem; ook het binnenstromende water komt uit venige gebieden en is enigszins verontreinigd met gezuiverd of ongezuiverd afvalwater.

Het gefiltreerde water van de meren is geel gekleurd.

Stikstof in humuszuren is relatief goed bestand tegen microbiële afbraak en de mineralisatie van stikstof uit humusverbindingen levert slechts een zeer trage stroom van anorganische stikstof. In de landbouw is deze stikstofbron bekend onder de naam 'Dauerhumus' (Amberger, 1974).

Ook fosfaat kan soms ten dele niet door het fytoplankton worden opgenomen (Golterman et al., 1969). Bij dit onderzoek werden echter geen aanwijzingen gevonden, dat een deel van de totale fosfaathoeveelheid niet door het fytoplankton zou kunnen worden gebruikt. Misschien heeft dit wel gegolden voor zeer kleine hoeveelheden fosfaat, in de orde van enkele microgrammen per liter. Voor de bepaling van dergelijk kleine fosfaat-concentraties was de gebruikte methode niet gevoelig genoeg.

Een voorlopige konklusie is, dat een deel van de in het water opgeloste organische stikstof niet of niet direct door het fytoplankton kan worden opgenomen, en dat dit deel als voedingsstof bij de eutrofiëring geen rol speelt.

De N : P verhouding in seston en in oppervlaktewater

Van de in 1975 genomen watermonsters is de verhouding berekend van stikstof tot fosfaat in het seston en in het oppervlaktewater. Daarbij is van het oppervlaktewater de totaalfosfaat-concentratie vergeleken met de totale stikstof-concentratie, verminderd met de in het water opgeloste organische stikstof. Een frekwentieverdeling van de N : P verhoudingen in het zomerhalfjaar is gegeven in afb. 4.

Alleen in het midden van de Nieuwkoopse Plassen (gebied II is de Noordeinderplas) kwam een verhouding van 15 in het oppervlaktewater vaak voor. Ook zuidelijker in deze Plassen (gebied III) werd een verhouding van meer dan 15 regelmatig gevonden. In de Mooie Nel, de Westeinder- en de Kager Plassen was N : P verhouding in het oppervlaktewater steeds lager dan 15. De N : P verhouding in het water onderging in de loop van het zomerhalfjaar overall een gerichte verandering. Relatief hoge verhoudingen werden gevonden in de lente. De verhouding daalde in de loop van het zomerhalfjaar. Pas in september of oktober kwam aan deze daling een einde.

Regionale fosfaat- en stikstofbalansen

Voor twee meren, waarvan de hydrologie het meest kon worden overzien, werd een schatting gemaakt van de toe- en afvoer van stikstof en fosfaat in het oppervlaktewater. Voor de Westeinder Plassen werd de belasting met stikstof geschat op 2 g N m⁻², die met fosfaat op 1,5 g P m⁻² in het zomerhalfjaar. Voor de Nieuwkoopse Plassen werd de belasting met stikstof geschat op 3 g N m⁻², die met fosfaat op 0,8 g P m⁻² in het zomerhalfjaar. Door de formule toe te passen, die een empirisch verband geeft tussen de fosfaatbelasting L en de chlorofyl-a-concentratie (chl-a), daarbij rekening houdend met de gemiddelde diepte van een meer \bar{z} en de verblijftijd van het water t_w :

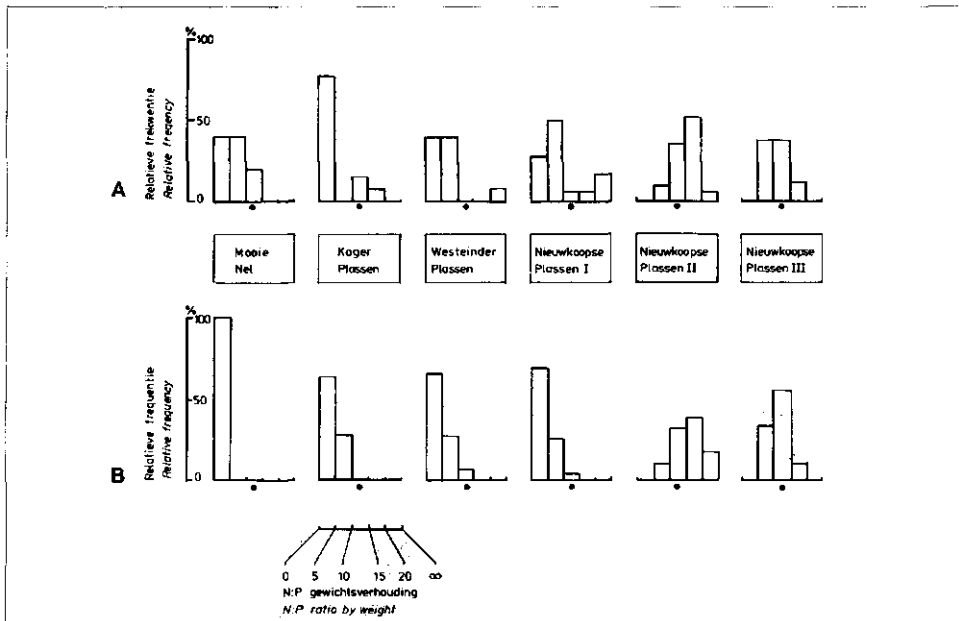
$$(chl-a) = 0,367 \left(\frac{t_w L}{\bar{z} (1 + \sqrt{t_w})} \right)^{0,91}$$

(Vollenweider, 1976)

kon uit de berekende fosfaatbelasting de chlorofyl-a-concentratie worden voorspeld. De voorspelling bleek voor de Nieuwkoopse Plassen in dezelfde orde van grootte te zijn, als de chlorofyl-a-concentraties, die in het water gevonden werden. Voor de Westeinder Plassen was de voorspelling veel hoger dan de waarden, die in het meer werden aangetroffen.

De reden voor dit verschil kan enerzijds gelegen zijn in het feit, dat in ondiepe meren fosfaat-uitwisseling met de bodem optreedt, meer dan in het model van Vollenweider

Afb. 4 - Een histogram van de N : P gewichtsverhouding in het zomerhalfjaar van water uit de in 1975 bemonsterde meren. Afb. 4a: de verhouding van het stikstof in het seston (gemeten als de totale stikstofconcentratie, verminderd met de totale stikstof-concentratie in gefiltreerd water) en het fosfaat in het seston (gemeten als het verschil tussen de totaalfosfaat- en orthofosfaatconcentratie in het water). Afb. 4b: de N : P gewichtsverhouding van de totale beschikbare stikstof (gemeten als de stikstofconcentratie, verminderd met het opgeloste organische stikstof) en het totaalfosfaat in het oppervlaktewater.



(1976) gemiddeld is verwerkt. Anderzijds meent Vollenweider zelf, dat zijn model alleen van toepassing is op wateren, waar de fytoplanktongroei door fosfaat wordt beperkt.

In elk geval lijkt het tegenstrijdig, dat een meer met een lagere fosfaatbelasting sterker geëutrofeerd was dan een meer met een hogere fosfaatbelasting. De stikstofbelasting vertoonde in dit opzicht een betere overeenkomst met de gevonden mate van eutrofiëring. Modellen om het verband tussen de stikstofbelasting en de chlorofyl-a-concentratie te toetsen, zijn echter niet beschikbaar.

Overwegingen over de rol van stikstof als sleutelfactor bij de eutrofiëring

Verbanden tussen de stikstof-concentraties en de fytoplanktongroei in het oppervlaktewater van de meren werden vooral duidelijk, wanneer de concentratie van anorganische stikstof laag was. Dit gebeurde in vele wateren aan het eind van de zomer. Een anorganische stikstof-concentratie van niet meer dan $0,2 \text{ mg N l}^{-1}$ werd gedurende vele zomermaanden gevonden in de Nieuwkoopse-, de Langeraarse- en de Westeinder Plassen. Ook in de Kager Plassen kwamen deze lage concentraties regelmatig voor. In het Braassemmeer en in de Mooie Nel werden ze zelden of nooit gevonden. Door de lage concentraties van anorganische- en totale stikstof in de zomermaanden was ook de N : P verhouding in deze periode laag. Juist dan werd in watermonsters een toename van de chlorofyl-a-concentratie gevonden, wanneer ze met stikstof werden verrijkt, en ontbrak in het algemeen het effect van een verrijking met fosfaat. Alleen in een deel van de Nieuwkoopse Plassen kwamen N : P verhoudingen in het oppervlaktewater voor van meer dan 15 en werd na verrijking met fosfaat soms ook een effect hiervan op de gevormde chlorofyl-a-concentratie gevonden. In de Kager- en de Westeinder Plassen was de N : P verhouding steeds lager dan 15. In watermonsters van de Westeinder Plassen kon alleen enige invloed van fosfaat op de fytoplankton-biomassa worden aangetoond, nadat aan het water een overmaat stikstof was toegevoegd; in watermonsters van de Kager Plassen was al zoveel fosfaat aanwezig, dat ook na verrijking met stikstof het fosfaat nog niet de primair beperkende factor werd (Schmidt-van Dorp, 1975). Fosfaat is waarschijnlijk alleen incidenteel als primair beperkende factor bij de fytoplanktongroei opgetreden, in de lente in de Westeinder Plassen en enige malen in de loop van het zomerhalfjaar in de Nieuwkoopse Plassen. Dit gebeurde bij totaal-fosfaat-concentraties van niet meer dan $0,2 \text{ mg P l}^{-1}$. De drempel lag bij deze waarde,

omdat op die momenten enkele grammen stikstof voor het fytoplankton beschikbaar waren. Bij lagere stikstof-concentraties zal ook de drempelwaarde voor de totaal-fosfaat-concentratie dalen; een fosfaatbeperking mag dan worden verwacht bij totaal-fosfaat-concentraties, lager dan $0,2 \text{ mg P l}^{-1}$. Bij hogere concentraties van de beschikbare stikstof zal naar verwachting de drempelwaarde voor de totaal-fosfaat-concentratie weinig stijgen boven $0,2 \text{ mg P l}^{-1}$. Dit komt, omdat bij dergelijk hoge stikstof-concentraties een zo dichte fytoplanktongroei kan optreden (met een chlorofyl-a-concentratie van meer dan $0,1 \text{ mg l}^{-1}$), dat een versnelling der fytoplanktongroei niet mogelijk is. In dichte suspensies wordt door de zelfschaduw van het fytoplankton de lichtintensiteit de primair beperkende faktor.

De gevonden verbanden hebben betrekking op meren met chlorofyl-a-concentraties van gemiddeld $0,02$ tot $0,2 \text{ mg l}^{-1}$ in het zomerhalfjaar (tabel II, III en IV). Onbekend is, of deze verbanden ook op zouden treden in minder eutrofe meren. In de zes onderzochte, ondiepe meren was de invloed van stikstof op de eutrofiëring veel groter dan die van fosfaat. Dit stemt overeen met algemene uitspraken over de rol van stikstof als sleutelfactor in meren met eutroof water. Thomas (1953) veronderstelde dit na vergelijking van meren in Zwitserland en aangrenzende gebieden. Bringmann en Kühn (1965) voerden biotests uit met water uit verschillende streken in Duitsland; in water met een laag eigen fosfaatgehalte had het toevoegen van fosfaat veel effect op de algengroei en had het toevoegen van stikstof weinig effect; in wateren met een hoger eigen fosfaatgehalte was het relatieve effect van stikstof groot. Shannons gegevens (geciteerd door Brezonik, 1972) van 55 meren in Florida suggereren, dat stikstof de primair beperkende voedingsstof is bij een belasting van meer dan ongeveer $3 \text{ g N m}^{-2} \text{ j}^{-1}$.

In eutrofe meren schijnt stikstof meestal de primair beperkende voedingsstof te zijn, wanneer de belasting met stikstof hoger is dan 2 à $3 \text{ g N m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ en de fosfaatbelasting hoger dan $0,2$ à $0,5 \text{ g P m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ (Forsberg, 1975). De reden van deze verschuiving werd gezocht in een versnelling van het stikstof-metabolisme, waarbij denitrificatie zou wedijveren met de primaire produktie om de opname van stikstof (Vollenweider, 1968). Het stikstofverlies door denitrificatie kan bij een watertemperatuur van 20°C enkele tienden van grammen $\text{N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ bedragen (Toms, Mindenhall & Harman, 1975). Bovendien verloopt de mineralisatie van fosfaat uit afstervend fytoplankton waarschijnlijk sneller en vollediger dan die van stikstof (Golterman, 1960), zodat de 'turn over' tijd van fosfaat in het water korter is dan die van stikstof.

Konklusie

Met uitzondering van een deel van de Nieuwkoopse Plassen was het fosfaat in de zes onderzochte, ondiepe meren geen sleutelfactor bij de eutrofiëring. De biomassa en groeisnelheid van het fytoplankton hield in de zomer verband met de concentraties van de beschikbare stikstof. Een 'drempel' tussen de invloedsgebieden van stikstof en van fosfaat, werd gevonden bij een N : P (gewichts-)verhouding van ongeveer 16 N : 1 P.

Literatuur

- Amberger, A. von, (1974). *Dynamik des Stickstoffs im Boden in Hinblick auf Festlegung und Auswaschung*. Wasser- und Abwasser-Forschung 7, 1, 14-18.
- Brezonik, P. L., (1972). *Nitrogen sources and transformations in natural waters*. In: Nutrients in natural waters. Ed. H. E. Allen & J. P. Kramer, New York.
- Bringmann, P. G. and Kühn, R., (1965). *Nitrat oder Phosphat als Begrenzungsfaktor des Algenwachstums*. Gesundheits Ing. 7, 210-214.
- Edmonson, W. T., (1970). *Phosphorus, nitrogen and algae in Lake Washington after diversion of sewage*. Science 169: 690-691.
- Forsberg, C., (1975). *Nitrogen as a growth factor in fresh water*. Proceedings of the Copenhagen IAWPR Congress 1975.
- Golterman, H. L., (1960). *Studies on the cycle of elements in fresh water*. Thesis, University of Amsterdam.
- Golterman, H. L., Bakels, C. C. and Jakobs-Mögelin, J., (1969). *Availability of mud phosphates for the growth of algae*. Verh. Intern. Verein. Limnol. 19, 39-58.
- Lauterborn, R., (1918). *Die geographische und biologische Gliederung des Rheinstroms III*. Sitzungsber. Heidelb. Akad. Wiss. Mat-Nat-Klasse B, 1. Abhandlung, 1-87.
- Lund, W. G., (1970). *Primary production*. Water treatment and examination 19, 332-358.
- Peelen, R., (1975). *Changes in the composition of the plankton of the Rivers Rhine and Meuse in the Netherlands during the last 55 years*. Verh. Intern. Verein. Limnol. 19, 1997-2009.
- Schmidt-van Dorp, A. D., (1975). *Fosfaat en eutrofiëring binnen het Hoogheemraadschap van Rijnland*. H₂O 13, 254-258.
- Schmidt-van Dorp, A. D., (1978). *De eutrofiëring van ondiepe meren in Rijnland (Holland)*. Proefschrift, Rijksuniversiteit van Utrecht. **
- Thomas, E. A., (1953). *Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete*. Schweiz. Ver. Gaz Wasserfachm. 2, 1-15.
- Toms, I. P., Mindenhall, M. J. and Harman, M. M. I., (1975). *Factors affecting the removal of nitrate by sediments from rivers, lagoons and lakes*. TR 14 of the Water Research Center, Great Britain.
- Vollenweider, R. A., (1968). *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. OECD Report, Paris, France, DAS/CSI/68.27.
- Vollenweider, R. A., (1976). *Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication*. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 33, 53-83.
- ** Het proefschrift 'De eutrofiëring van ondiepe meren in Rijnland (Holland)' kan worden besteld door overmaking van f 37,75 op postgiro nummer 3049607 ten name van mevr. Schmidt-van Dorp, Van Egmondlaan 15, 5583 VA Waalre.

