Die lokale Beeinflussung eines stehenden Gewässers
durch eine punktförmige Abwasserbelastung;
ein direkter Nachweis der wachstumsbegrenzenden Wirkung
des Phosphors im Vierwaldstättersee

Von R. GÄCHTER, E. SZABÓ, A. MAREŠ

Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz an der ETH Zürich.

Einleitung

In natürlichen Gewässern sind die zehn als Kernnährstoffe geltenden Elemente von Sachs und die Spurenelemente nicht dem Bedarf des Planktons entsprechend im richtigen Verhältnis gelöst. In den meisten Fällen ist z.B. das Kohlenstoffangebot viel zu gross, während die gelösten Phosphor- und Stickstoffverbindungen nur in unverhältnismässig kleinen Konzentrationen auftreten.

Nach Untersuchung von MITSCHERLICH [6] kann eine Erhöhung der Konzentration eines jeden Wachstumsfaktors eine Steigerung des Pflanzenertrages bewirken, wobei die Ertragssteigerung der Differenz zu dem unter den gegebenen Bedingungen erzielbaren Höchstertag proportional ist. Also:

$$\frac{dy}{dx} = (A-y) c \quad (1)$$

oder in der integrierten Form

$$\ln (A-y) = \ln A - c x \quad (2)$$

wobei y den Ertrag, A den Höchstertag, c die sog. Wirkungskonstante und x die Menge des vorhandenen Nährstoffs bedeutet.

Das Phytoplankton wird daher auf veränderte Bedingungen um so empfindlicher reagieren, je grösser der dem entsprechenden Nährstoff typische Wirkungsfaktor ist und in je kleinerer Menge er dem Phytoplankton bisher zur Verfügung stand.

Da in oligotrophen Seen das Phosphat oft biogen «bis zum letzten Ion» aufgezehrt wird, sich eutrophe Seen durchwegs durch höhere Gesamtphosphorkonzentrationen auszeichnen und sich in der neueren Entwicklung einiger Seen parallel zur Zunahme der Phytoplanktondichte eine Erhöhung der Phosphorkonzentrationen

nachweisen lässt [1, 4, 5], wird angenommen, dass die Entwicklung des Phytoplanktons in erster Linie durch das Phosphorangebot kontrolliert werde.

Die Richtigkeit dieser Vermutung wurde für verschiedene Schweizer Seen durch Düngerversuche im Labor [11] oder «in situ» [2] experimentell bestätigt. Da aber bei Experimenten mit einem isolierten Volumen Seewasser neben der Phosphorkonzentration zwangsläufig noch verschiedene andere, die Planktonentwicklung beeinflussende Faktoren (z.B. Turbulenz und ständige Nährstoffzufuhr) verändert werden, können die gewonnenen Resultate, so wertvoll sie qualitativ sein mögen, quantitativ nicht ohne Vorbehalte auf die Verhältnisse im offenen See übertragen werden. In dieser Hinsicht ideal wären Experimente, die es erlauben würden, in ein und demselben See auf engstem Raum unter sonst gleichen, völlig natürlichen Bedingungen den Zusammenhang zwischen dem Phosphorangebot und der Primärproduktion zu untersuchen.

Vorausgesetzt, dass die wachstumsbegrenzende Wirkung des Phosphors durch eine ausschliessliche, kontrollierte Erhöhung der Phosphorkonzentration qualitativ experimentell bereits nachgewiesen wurde [2], entspricht das Studium der Ausbreitung des Phosphors, herrührend von einer punktförmigen Abwasserquelle und die gleichzeitige Erfassung der Phytoplanktonkonzentration (standing crop) weitgehend der Idee des obenerwähnten idealen Experiments.

Probenahmestellen und Methodik

Die Horwer Bucht ist ein Teilbecken des stark gegliederten Vierwaldstättersees. Das steilufrige, trogförmige Becken ist etwa 2 km lang, 1 km breit und maximal 72 m tief. Am nördlichen Ufer mündet der Steinibach, belastet mit dem Abwasser von etwa 10000 Einwohnern der Gemeinden Horw und Kriens.

Am 8. September 1970 wurden an den in Abb. 1 bezeichneten 48 Punkten aus 50 cm Tiefe Proben erhoben. Aus dem Rohwasser wurde die Gesamtphosphorkonzentration nach SCHMID [8], aus dem Filtrat (Membranfilter der Sartorius-Membranfilter GmbH Göttingen 0,45 μ) die Nitratkonzentration nach MÜLLER und WIEDEMANN [7] bestimmt. Zur Bestimmung der Pigmentkonzentration wurde 1 l Rohwasser durch mit Magnesiumhydroxidkarbonat überschichtete Glasfaserfilter filtriert und die Filter nach der bei GOLTERMAN [3] beschriebenen Methode weiterbehandelt.

Resultate

Dank seiner sehr hohen Gesamtphosphorkonzentration (einige mg P/l) liess sich die Einmischung des stark abwasserbelasteten Bachwassers im See leicht verfolgen. Nach seiner Einmündung nach rechts abgedrängt, breitete es sich hauptsächlich dem westlichen Ufer entlang aus. Verglichen mit dem Westufer wurde das nur etwa 1 km entfernte Ostufer durch das Abwasser wesentlich schwächer beeinflusst (Abb. 1a).

Ein der Konzentrationsverteilung des Phosphors entgegengesetztes Bild ergab die Verteilung der Nitratkonzentrationen (Abb. 1b). Während in der östlichen Seehälfte noch Konzentrationen von mehr als 130 μ g N/l gemessen wurden, fielen sie gegen das Westufer hin bis auf etwa 70 μ g N/l ab. Die Nitratkonzentration zur Zeit der Vollzirkulation beträgt in diesem Seeteil etwa 400 μ g N/l [2].

Wir interpretieren diese Resultate dahin, dass eine erhöhte Phosphorzufuhr zum See eine verstärkte biogene Nitratzehrung ermöglichte und damit in diesem mesotrophen Seeteil, in Übereinstimmung mit dem Sequenzschema von THOMAS [12], Phosphor der primär wachstumsbegrenzende Wirkungsfaktor sei. Dies wird bestätigt durch die qualitative Übereinstimmung der Verteilung der Gesamtposphorkonzentrationen mit derjenigen der Pigmente (Abb. 1a und 1c).

Diskussion

Durch die Einleitung von kommunalem Abwasser werden einem Gewässer wohl sämtliche für das Algenwachstum benötigten Kern- und Spurenelemente zugeführt. Im Falle des Vierwaldstättersees kann jedoch eine Stimulierung der Primärproduktion durch alle andern Kernnährstoffe als durch Phosphor weitgehend ausgeschlossen werden, denn

- in den Jahren 1965, 1966, 1969 und 1970 wurden jeweils am Ende der Stagnationsperiode im Mittel für die trophogene Schicht noch die folgenden Konzentrationen für Kohlenstoff und Phosphat gemessen:

Phosphat: 0,5–1,2 $\mu\text{g P/l}$

anorganischer Kohlenstoff: 19,6–22,5 mg C/l .

Das entspricht einem Atomverhältnis von

$\text{P:C} = 1 : (0,4 - 1,2) \cdot 10^5$

Von Algen werden Phosphor und Kohlenstoff im Mittel im Verhältnis von

$\text{P:C} = 1 : 106$

eingebaut. Kohlenstoff spielt daher sicher nicht die Rolle eines wachstumsbegrenzenden Faktors.

- Die Abwassereinleitung bewirkte im See eine erhöhte Nitratzehrung, so dass im unveränderten Seewasser auch Stickstoff als begrenzender Faktor ausgeschlossen werden kann.
- Auch Sulfat ist im See sicher im Überschuss vorhanden (12–17 mg/l).

Eine wachstumsfördernde Wirkung von künstlich zugeführten Spurenelementen und organischen Verbindungen kann beim heutigen Stand des Wissens nicht ausgeschlossen werden. Immerhin konnte experimentell nachgewiesen werden, dass bereits die Zugabe von wenigen Mikrogrammen analysenreinen Phosphats eine massive Steigerung der Assimilationsraten bewirkte [2].

Erhöhte Pigmentkonzentration und hohe Gesamtposphorkonzentration sind daher nicht zwei völlig unabhängige Parallelerscheinungen, sondern es darf angenommen werden, dass die Pigmentkonzentration als Mass für den Standing crop weitgehend durch die Gesamtposphorkonzentration bestimmt wird. In Abb. 2 wurden die Wertepaare «Gesamtposphor» und «Totalpigmente» der einzelnen Untersuchungsstellen graphisch zusammengestellt. Der Zusammenhang zwischen dem Standing crop der Algenpigmente y und der Gesamtposphorkonzentration x ist nicht über den ganzen Bereich linear, sondern entspricht der Mitscherlich-(Ertrags-)Kurve

$$\log (30 - y) = \log 30 - 0,012 (x - 6) \quad (3)$$

Dass die Kurve nicht durch den Ursprung des Systems geht, ist damit zu erklären, dass ein Teil der Phosphorverbindungen vom Phytoplankton nicht direkt als Phos-

Abb.1a. Horizontale Verteilung der Gesamtposphorkonzentrationen in der Horwer Bucht (Angaben in $\mu\text{g P/l}$).

Abb.1b. Horizontale Verteilung der Nitratkonzentrationen in der Horwer Bucht (Angaben in $\mu\text{g N/l}$).

Abb.1c. Horizontale Verteilung der Gesamtpigmentkonzentration in der Horwer Bucht (Angaben in $\mu\text{g/l}$).

Abb.2. Zusammenhang zwischen der Gesamtposphorkonzentration und der Gesamtpigmentkonzentration in Oberflächenproben der Horwer Bucht.

phorquelle ausgenützt werden kann. Das steht in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen [2], wo eine Verdoppelung der Gesamtposphorkonzentration durch Zugabe von leicht «assimilierbarem» Phosphat mehr als eine Verdoppelung der Kohlenstoffassimilationsraten bewirkte.

Der im Herbst erzielte Maximalertrag $A = 30 \mu\text{g Pigmente/l}$ dürfte im Frühjahr und Sommer bei allgemein höheren Konzentrationen der übrigen Nährelemente höher liegen. Zudem sind die Lichtbedingungen an der Seeoberfläche superoptimal, so dass die Maximalerträge der Wasserschicht von 1 bis 5 m den gemessenen Oberflächenenertrag ebenfalls während der ganzen Sommerstagnation übertreffen dürften.

Da im Pelagial in der trophogenen Schicht die $30\text{-}\mu\text{g-P/l}$ -Grenze nur selten überschritten wird [2], müsste eine Reduktion der Gesamtposphorkonzentration vom See mit einer äquivalenten Reduktion seiner Primärproduktion beantwortet werden.

Die Gesamtposphorkonzentration der trophogenen Schicht während der Sommerstagnation ist abhängig von der Basisphosphorkonzentration des Gewässers während der Frühjahrszirkulation, den täglichen Sedimentationsverlusten und der ständigen Phosphorzufuhr zu dieser Schicht.

Wenn durch geeignete Sanierungsmassnahmen (Ringleitung, dritte Reinigungsstufe) die ständige allochthone Phosphorzufuhr massgeblich verringert werden kann, so muss sich zwangsläufig auch die Gesamtposphorkonzentration der trophogenen Schicht und damit die Primärproduktion während der Sommerstagnation verringern.

Wie rasch und wie weit auch die Basisphosphorkonzentration während der Frühjahrszirkulation kleiner wird, hängt davon ab, wie schnell sich das Wasser eines Sees erneuert, wie stark und wie lange er thermisch geschichtet ist und wie gross die unkontrollierbare externe und interne Restbelastung im Vergleich zum jährlichen Verlust durch Abfluss und irreversible Fixierung im Sediment bleibt.

STUMM [9] hat den Begriff der «relativen Aufenthaltszeit» einzelner chemischer Elemente bezüglich der Aufenthaltszeit des Wassers im Seebecken eingeführt

$$t_{\text{rel}} = \frac{t_{\text{Element}}}{t_{\text{Wasser}}} = \frac{[E]}{(d[E]/dt)_{\text{Zufluss}} \cdot t_{\text{Wasser}}} \quad (4)$$

Die relative Aufenthaltszeit « t_{rel} » kann sowohl kleiner als auch grösser als 1 sein. Aluminiumionen z.B. werden im See sehr schnell ausgefällt und im Sediment irreversibel festgelegt. Ihre relative Aufenthaltszeit ist daher kleiner als 1. Elemente, die am biogenen Stoffkreislauf teilnehmen, werden in der trophogenen Schicht vom Phytoplankton assimiliert und in eine sedimentierbare Form übergeführt. Während der Sedimentation werden in der tropholytischen Schicht diese Algennährstoffe wieder freigesetzt und durch die nächste Zirkulation der Algensynthese aufs neue zugeführt. Die relative Aufenthaltszeit des Phosphors ist daher grösser als 1 und liegt in der Grössenordnung 5–20 [10]. Da unter anaeroben Bedingungen an der Sediment-Wasser-Kontaktzone die Fixierung des Phosphors im Sediment geringer ist als unter aeroben Verhältnissen, ist die relative Aufenthaltszeit des Phosphors in eutrophen Seen grösser als in oligotrophen Gewässern. Eine Reduktion der Basisphosphorkonzentration eines Sees darf daher um so eher erwartet werden, je niedriger sein Trophiegrad zur Zeit der Sanierung war.

Zusammenfassung

Die Beeinflussung des Vierwaldstättersees (Horwer Bucht) durch den mit dem Abwasser von 10000 Einwohnern belasteten Steinibach liess sich im Oberflächenwasser auf eine Distanz von mehr als 2 km verfolgen (Abb. 1a, 1b, 1c).

Es zeigte sich, dass eine erhöhte Phosphorzufuhr eine verstärkte biogene Nitrat-zehrung ermöglicht. Die Abhängigkeit der Pigmentkonzentration y von der Gesamtphosphorkonzentration x liess sich durch die folgende Mitscherlich-Gleichung beschreiben:

$$\log (30 - y) = \log 30 - 0,012 (x - 6)$$

Damit wurde im Vierwaldstättersee erstmals unter völlig natürlichen Bedingungen die Beeinflussung der Primärproduktion durch eine erhöhte Phosphorkonzentration nachgewiesen (Abb. 2).

Die Erfolgsaussichten von Abwassersanierungsmassnahmen an Seen verschiedener Trophiegrade werden diskutiert.

SUMMARY

The influence of the 'Steinibach' tributary, into which the wastewater of 10,000 inhabitants is discharged, on the Lake of Lucerne (Horwer Bucht) is detectable in the surface water over a distance of more than 2 km (Picture 1a, 1b, 1c).

It was revealed that the increased phosphorus supply enables more intensive biological nitrate consumption. The dependence of the pigment concentration, y , on the total phosphorus concentration, x can be expressed by the following Mitscherlich equation:

$$\log (30 - y) = \log 30 - 0.012 (x - 6).$$

This was the first time that the influence of an increased phosphorus concentration on primary production was proved in the Lake of Lucerne under completely natural conditions (Picture 2). The possibilities of implementing successful water pollution control measures in lakes with various trophic levels are discussed.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AMBÜHL, H., *Der Einfluss chemischer Düngung auf stehende Oberflächengewässer*, GWF 107, 357-363 (1966).
- [2] GÄCHTER, R., *Phosphorhaushalt und planktische Primärproduktion im Vierwaldstättersee (Horwer Bucht)*, Schweiz. Z. Hydrol. 30, 1-66 (1968).
- [3] GOLTERMAN, H. L., und CLYMO, R. S., *Methods for Chemical Analysis of Fresh Waters*, IBP-Handbook Nr. 8 (Oxford und Edinburgh 1969), 188 S.
- [4] GRIM, J., *Der Phosphor und die pflanzliche Produktion im Bodensee*, GWF 108, 1261-1271 (1967).
- [5] KLIFFMÜLLER, R., *Der Anstieg des Phosphatphosphors als Ausdruck fortschreitender Eutrophierung im Bodensee (Obersee)*, Int. Rev. ges. Hydrobiol. Hydrogr. 47, 118-122 (1962).
- [6] MITSCHERLICH, L., *Das Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren*, Z. Pfl. Ernährg. Düng. Bodenk. [A] 1, 49-84 (1922).
- [7] MÜLLER, R., und WIDEMANN, O., *Die Bestimmung des Nitrations im Wasser*, Jb. v. Wass. 22, 247-271 (1955).
- [8] SCHMID, M., und AMBÜHL, H., *Die Bestimmung geringster Mengen von Gesamtphosphor im Wasser von Binnenseen*, Schweiz. Z. Hydrol. 27, 184-192 (1965).
- [9] STUMM, W., und STUMM-ZOLLINGER, E., *Prozesse in natürlichen Gewässern*, Chimia 22, 325-337 (1968).

- [10] STUMM, W., und LECKIE, J. O., *Phosphate Exchange with Sediments, Its Role in the Productivity of Surface Waters*, Proceed. 5th Int. Conf. Wat. Poll. Res., Pergamon Press (1971).
- [11] THOMAS, E. A., *Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete*, Schweiz. Ver. Gas- u. Wasserfachm. 2, 1-15 (1953).
- [12] THOMAS, E. A., *Der Eutrophierungsvorgang bei Seen Zentraleuropas*, Wasser- und Energie-wirtschaft 60, 115-125 (1968).

Anschrift der Autoren:

Dr. René Gächter, Hydrobiologisches Laboratorium der ETH, CH-6047 Kastanienbaum.

E. Szabó, dipl. Chem., EAWAG, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf.

A. Mareš, Hydrobiologisches Laboratorium der ETH, CH-6047 Kastanienbaum.