

8.1.9.6.1. Stickstoff

Wichtigste Verbindungen: Ammonium, Nitrit, Nitrat.

Eintrag: Atmosphäre, Zuflüsse, N_2 -Fixierung, in neuerer Zeit auch verstärkt Abwasserreinigung, Düngung, Eiweißzersetzung.

Prinzip des Kreislaufes: Die drei Verbindungen werden (unterschiedlich) von Pflanzen aufgenommen und der Stickstoff in die Organismen eingebaut. Durch Exkretion und Abbau der abgestorbenen Organismen wird Stickstoff wieder freigesetzt. Seine Umwandlungen durch Nitrifikation und Denitrifikation werden mikrobiell gesteuert (s. I. 7.6.2.3., I. 7.6.4.).

Epilimnion: Hier kann es bereits zu einem kleinen Stickstoffkreislauf kommen. Aus den Exkreten und dem Abbau der toten Plankter entsteht NH_4^+ , das von Pflanzen aufgenommen oder nitrifiziert wird (und dann als Nitrat zur Verfügung steht).

Hypolimnion (zur Stagnationszeit): Aus dem Abbau abgesunkener toter organischer Substanz entsteht im sauerstoffarmen oder -freien Hypolimnion NH_4^+ (oder NH_3), noch vorhandenes Nitrat wird reduziert (zu N_2 oder NH_4^+). Ein Teil des NH_4^+ kann bereits von Bakterien assimiliert werden. Im Bereich des Metalimnions kann es, je nach Sauerstoffsituation, zur Anreicherung von Nitrit kommen. Auch zur Stagnationszeit gibt es infolge der Seiches, Diffusionen und internen Wirbelbildungen einen gewissen Austausch von epilimnischem Nitrat und hypolimnischem Ammonium.

(zur Zirkulationszeit): Die NH_4^+ -Oxidation geschieht auch während der Zirkulationszeit nur wenige Millimeter tief im Sediment, darunter herrscht Denitrifikation. Im Wasser verschwinden allerdings (stark variierend) etwa $200 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1} NH_4^+-N$ durch Nitrifikation, so viel wie auch unter anaeroben Verhältnissen gebildet werden. Nitrate diffundieren sowohl in das Sediment (wo sie denitrifiziert werden), wie auch in die Wassersäule. Diese Diffusionen können durch Bioturbation beeinflusst werden. Aus dem bisher Gesagten läßt sich auch für beide Seentypen die Tiefenverteilung von Nitrat und Ammonium während der Stagnation ableiten (Abb. 128).

8.1.9.6.2. Phosphor

Wichtigste Verbindung: In Gewässern fast ausschließlich Orthophosphat PO_4^{3-} , ein Phosphorsäurerest. Kationen sind meist Ca^{2+} , Fe^{3+} oder Al^{3+} . In den Organismen kann aufgenommenes PO_4^{3-} in Polyphosphat umgewandelt und gespeichert werden.

Die wichtigsten Fraktionen des Phosphors und ihre international gültigen Abkürzungen: **SRP** (soluble reactive phosphorus), der gelöste reaktive Phosphor, praktisch das bioverfügbare Orthophosphat. Hierzu werden nicht die gelösten organischen Phosphate (DOP) und der kolloidal vorhandene Phosphor gerechnet. Geschieht dies doch, spricht man vom TDP (total dissolved phosphorus).

P_{tot} (= TP). Gesamtphosphor, d. h. gelöster und partikulärer Phosphor ($PP = P_{part}$), sowie Polyphosphate. Der PP kann chemisch-organisch gebunden oder auch nur an Partikel adsorbiert sein. In beiden Fällen gelingt es Algen und Bakterien, mit Hilfe der ausgeschiedenen alkalischen Phosphatase das bioverfügbare Orthophosphat freizusetzen. Die freiwerdende Phosphatase läßt sich im Seewasser nachweisen. Je mehr Phosphatase im Wasser ist, um so deutlicher ist P der limitierende Faktor (JANSSON et al. 1988, CHROST & OVERBECK 1987), um so weniger PO_4^{3-} ist im Wasser.

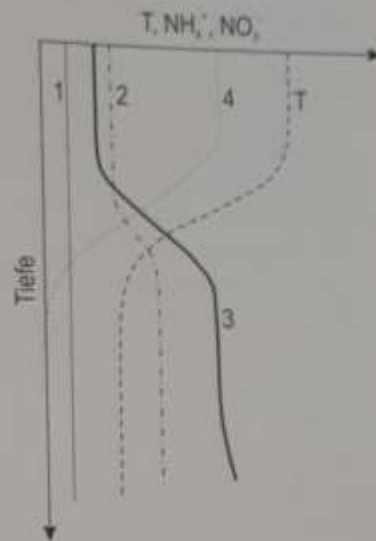


Abb. 128. Tiefenverteilung von Ammonium und Nitrat in Seen. T = Temperatur ($^{\circ}\text{C}$, Stagnationszeit), NH_4^+ (mg l^{-1}): 1 = oligotroph, 3 = eutroph. NO_3^- (mg l^{-1}): 2 = oligotroph, 4 = eutroph. (In Anlehnung an WETZEL 1983b).

Chlorophyll-a und Phosphatase-Gehalt sind positiv miteinander korreliert und gehen zu den Zirkulationszeiten zurück. Doch können Humussubstanzen Phosphatasen binden und somit die Verfügbarkeit des Orthophosphates hemmen (s. I. 8.1.9.10.).

Eintrag: Zuflüsse, Atmosphäre (s. I. 8.1.6.), Eiweißzersetzung. Heute auch noch durch Abwässer und Düngung der Felder. In 8 Seen in Ontario (Kanada) dominierte bei kleinem Einzugsgebiet der atmosphärische Eintrag ($21 \text{ mg m}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ TP}$) und bei großem fn-Wert (s. I. 8.1.3.) der aus dem Einzugsgebiet ($> 50 \text{ mg m}^{-2} \text{ Seeoberfläche a}^{-1} \text{ TP}$) (DILLON et al. 1993).

Prinzip des Kreislaufes: P wird von Pflanzen und Bakterien aufgenommen, beim Durchgang der Nahrungskette akkumuliert und beim Abbau wieder freigesetzt.

Epilimnion (zur Stagnationsphase): Es kommt zu einem kleinen Phosphorkreislauf. Der aufgenommene P wird durch **Exkrete** und Abbau (**Autolyse**, bakteriell) der toten Plankter wieder freigesetzt und als Orthophosphat schnell wieder von Algen und Bakterien akkumuliert. Ein Teil der toten Plankter und litoralen Organismen bringt durch Absinken noch inkorporierten P in das Hypolimnion (etwa 20 % des im Phytoplankton akkumulierten P, BLOESCH & UEHLINGER 1990). In vielen Seen kommt es aus den genannten Gründen zu einem Aufbrauchen des Phosphors, was zu einer Limitierung der Primärproduktion führt, obwohl auch der freigesetzte organisch gebundene Phosphor durch die Phosphatase nutzbar gemacht werden kann. Die Freisetzung des Phosphors erfolgt beim Zerfall toter Plankter noch schneller als die des Stickstoffs.

Hypolimnion (zur Stagnationsphase): Der durch Zerfall der organischen Partikel, v. a. Organismen, freigesetzte Phosphor verhält sich je nach Situation unterschiedlich: diffundiert in das freie Wasser, akkumuliert sich, wird adsorbiert, chemisch gebunden und (oder) von Bakterien aufgenommen. Wichtig für den Stoffhaushalt der Seen ist das Verhalten des Phosphors im Sediment. Beträgt die Sauerstoffsättigung in der Sediment-Wasser-Zone mindestens 10 % (und mehr), gehen Phosphor und Fe^{3+} einen schwerlöslichen Komplex ein. So kann das Sediment dem überstehenden Wasser viel Phosphor ent-

ziehen (**Phosphorfalle des Sediments**). Ist wenig Eisen im Sediment, kann sich Phosphor auch an Sedimentpartikel adsorbieren. Sinkt der Sauerstoffgehalt unter 10 % Sättigung (oder bei einem Redoxpotential von $E_7 < 0,2-0,3$ mV, s. I. 8.1.11.2.1.), reduziert sich das Eisen zu Fe^{2+} , und damit geht Phosphor schlagartig wieder in Lösung.

Beispiel: Bei Belüftung von Tiefenwasser verschwanden $0,4-0,5$ g PO_4-P m^{-2} Woche $^{-1}$, unter anaeroben Verhältnissen wurden $2,5$ g PO_4-P $m^{-2} d^{-1}$ wieder freigesetzt (KAMP-NIELSEN & FLINDT 1993).

Die Freisetzung von P liegt im Jahresdurchschnitt etwa bei $0,7-18$ g P m^{-2} . Auch steigende Temperaturen, Aufwirbelung von Sediment, Abnahme des pH und die im Sediment lebenden gramnegativen Bakterien, die Zitronen-, Malon- und Milchsäure ausscheiden, fördern die Rücklösung des Phosphors (YAMAMOTO & SATOH 1992). Diese als **interne Düngung** bezeichnete Rücklösung des Phosphors erleidet der See in seiner Strebphase, der Stagnation; vor allem, wenn er stärker belastet ist. Der nur adsorptiv festgelegte Phosphor kann auch durch Wasserbewegungen ausgewaschen werden, so daß es auch bei Anwesenheit von Sauerstoff zur P-Freisetzung kommt, z. B. in den Zirkulationszeiten. Ist viel Eisen im Sediment und der Phosphor chemisch bereits gebunden, so entstehen größere Mengen an Ferrihydroxid, welches gelartig ist. Kommt es erneut zu einer Phosphor-Zufuhr, so bindet sich dieser nur adsorptiv an das Hydroxid und ist dann leicht auswaschbar.

Wie schon ausgeführt, ist das Metalimnion keine absolut dichte Trennungsschicht. Seiches und interne Wellenbewegungen, vor allem auch die eddy-diffusion in der aerob-anaeroben Grenzschicht, bringen auch im Sommer Phosphor in die euphotische Schicht (in Flachseen und polymiktischen Seen kann dies ständig geschehen). Gelangt zur Stagnationszeit Phosphor in die produktive Schicht, erhöht sich die Produktion und somit auch die Zahl der absinkenden toten Plankter. Das wiederum bewirkt Sauerstoffschwund, Methangasbildung und intensivierete Phosphorfreisetzung. Auch die Methanblasen reißen Phosphor mit in die Oberflächenschicht. So eskalieren die eutrophierenden Faktoren, es

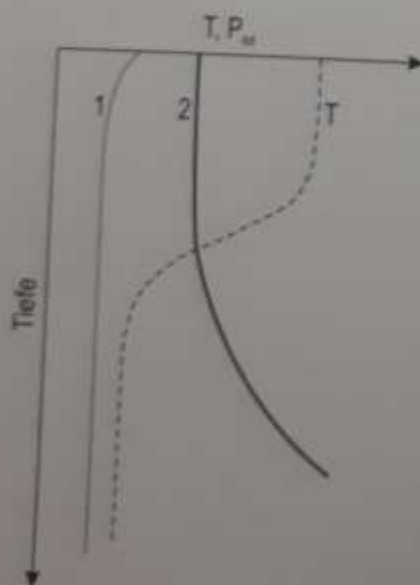


Abb. 129. Tiefenverteilung von Gesamtphosphat (P_{tot}) in Seen. T = Temperatur ($^{\circ}C$, Stagnationszeit), 1 = oligotroph, 2 = eutroph. (In Anlehnung an WETZEL 1983b).

kommt zur **rasanten Eutrophierung** (OHLE 1958). Diese Prozesse sind typisch für Flachseen, finden aber auch in nicht zu tiefen geschichteten Seen statt.

Im litoralen und oxidierten Sediment ist der Phosphor gebunden. Unter absterbenden Makrophyten kann es zu Sauerstoffschwund und damit zur Freisetzung des Phosphors in das Wasser kommen, wobei selbst noch Phosphor als Endprodukt entsteht. In Buchten eutropher Seen kann es auch im Sommer bei windstillen Perioden zum litoralen Sauerstoffschwund kommen, doch verbleibt dieser Phosphor meist im litoralen Wasserbereich.

Aus dem Kreislauf des Phosphors im Epi- und Hypolimnion läßt sich seine Verteilung (Abb. 129) für oligo- und eutrophe Seen ableiten. In den Zirkulationszeiten kommt es zur gleichmäßigen Verteilung von Phosphor im Ober- und Unterwasser und zu einer verstärkten Bindung an die Sedimente.

Aus: Schönborn, W. (2003): Lehrbuch der Limnologie. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). Stuttgart