Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 7: 79 - 121 (1981)

Atmosphärischer Eintrag von C, N und P in den Piburger See

(R. PSENNER)

Atmospheric input of C, N and P into Piburger See

Abstract: The input of airborne organic material (mesh size: 1 mm) amounted to 605 kg per lake in 1978, i.e. 12.4 mg m^{-2} d^{-1} or 318 g per m shoreline. 664.4 kg organic carbon reach the lake by wind and precipitation, 20 % thereof in dissolved, 36 % in fine particulate and 44 % in rough particulate (>1 mm) form. The atmospheric input of nitrogen was 78.6 kg yr^{-1}, 37 % in dissolved, 43 % in fine particulate organic and 20 % in rough particulate organic form. The input of phosphorus was 4.8 kg yr^{-1}, 11 % in dissolved, 70 % in fine particulate and 19 % in rough particulate organic form. The concentrations of TDN in snow were between 420 and 700 µg l^{-1}, of TP between 3.8 and 9.5 µg l^{-1}, the DOC content was about 1 mg l^{-1}; snow was further characterized by low pH (5 and below) and conductivity (7.0 - 10.9 μS_{20^o}). Compared with the total measured loading (surface and subsurface input) atmospheric nitrogen accounted for 18 %, atmospheric phosphorus for 39 % of the external loading.

Inhalt

		Seite
1.	Einleitung	81
2.	Methodik	81
2.1.	Vorbemerkungen	81
2.2.	Verwendete Methoden	83
2.2.1.	Niederschlagsmessung	83
2.2.2.	Empneustonmessung mit Trockenfallen	83
2.2.3.	Atmosphärischer Eintrag (Naßfallen)	85
3.	Ergebnisse	86
3.1.	Relation Seefläche/Uferabstand	86
3.2.	Niederschlag	86
3.3.	Empneuston (Trockenfallen)	90
3.4.	Windsituation	92
3.5.	Atmosphärischer Eintrag	93
3.5.1.	Verteilung über die Seefläche	93
3.5.2.	Jahreszeitliche Verteilung	94
3.5.3.	Jahreseintrag	97
4.	Diskussion	99
4.1.	Freisetzung von organischen und anorganischen Substanzen aus Pflanzenmaterial (Laub, Nadeln, Rinde, Holz)	99
4.2.	Mikrobieller und tierischer Abbau von Pflanzenmaterial	101
4.3.	Verfügbarkeit des Phosphors und Stickstoffs aus dem atmosphärischen Eintrag	107
4.4.	Anteil der atmosphärischen Fracht am Gesamtloading	111
5.	Zitierte Literatur	114

1. Einleitung

Die Eutrophierung von Seen durch vom Wind eingetragenes organisches und anorganisches Material kann, wie SZCZEPANSKI (1965), RAU (1976) und KORTMANN (1980) sowie bisherige eigene Arbeiten am Piburger See (PSENNER 1979) zeigten, vor allem bei kleinen, von Wald umsäumten Seen recht bedeutsam sein. Während bisher nur das grobpartikuläre organische Material erfaßt wurde, sind die hier vorgestellten Ergebnisse eine Weiterführung bzw. Ausweitung der vorangegangenen Untersuchungen, da auch der feinpartikuläre Eintrag und die gelösten Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen miterfaßt wurden. Außerdem wurden im Licht der neugewonnenen Erkenntnisse die bisherigen Ergebnisse der Empneustonuntersuchung neu gewertet und berechnet.

2. Methodik

2.1. Vorbemerkungen

Die bisherigen Arbeiten über die Zufuhr von Nährstoffen aus der Atmosphäre könnte man in zwei Richtungen einteilen:

a) Das Auffangen von Niederschlägen (Regen, Schnee), wobei meist auch trockener Eintrag (Staub, Anflug, Laub) mitgemessen wird.

b) Das Auffangen von grobpartikulärem Material (Maschenweite der verwendeten Netze meist 1 mm), bei dem wiederum ein bestimmter Anteil durch Auslaugung verlorengeht.

Am Piburger See wurde sowohl der erste als auch der zweite Weg beschritten, zusätzlich wurden jedoch Naßfallen verwendet, um den gesamten Eintrag durch Wind und Niederschläge zu erfassen:

c) Auffangen des gesamten Niederschlages und des fein- sowie grobpartikulären Materials in wassergefüllten Wannen.

Bei dieser dritten Methode gelingt es allerdings nicht, zwischen Niederschlägen und Empneuston zu unterscheiden, außer man verwendet gleichzeitig Regenauffanggefäße und zieht diesen Hintergrundwert vom gesamten Eintrag ab. GOMOLKA (1975) versuchte das Problem dadurch zu lösen, daß sie einen regensensitiven Verschlußmechanismus über den Auffangtrichtern anbrachte, um so zwischen trockenem und nassem "fallout" zu unterscheiden. Allerdings war diese Vorrichtung so störempfindlich, daß eine tägliche Kontrolle notwendig war. Außerdem stellte sie fest, daß die Auffangvorrichtung für Trockenmaterial nur etwa die Hälfte des Materials auffing, die von einer gleich großen Wasserfläche aufgefangen wurde, sodaß alle diese Trockenwerte mit 1,8 multipliziert werden mußten.
Die konventionellen Regenauffanggefäße, meistens Trichter, die mit einem Netz gegen das Eindringen von Insekten und grobem Empneuston geschützt sind, sind oft beliebte Aufenthaltsorte von Insekten und Spinnen; Vögel benutzen sie als Rastplatz und verunreinigen die Auffangvorrichtungen, feinpartikuläres Material (Staub, Pollen, ...) wird auch ohne Regen eingebracht. Man mißt deshalb viel mehr als die durch Niederschläge zugeführten Substanzen, und diesen Eintrag sollte man daher besser als "atmospheric fallout" bezeichnen.
Wollte man wirklich nur die Niederschläge erfassen, müßte man Regenauffanggefäße verwenden, die nur öffnen, so lange es regnet, ansonsten aber dicht verschlossen bleiben, was eine ständige Präsenz am See erfordern würde.
Wenn im folgenden Text also von Regen oder Niederschlag die Rede ist, muß man sich vor Augen halten, daß die oben genannten Faktoren dabei miterfaßt wurden, sodaß manchmal in den Regenauffanggefäßen mehr Nährstoffe pro m^2 und Tag festgestellt wurden als in den offenen Fallen.

Deshalb bleiben die Regenmessungen bei der Berechnung des Eintrags an Nährstoffen und organischem Kohlenstoff unberücksichtigt und das in den Naßfallen aufgefangene Material wird als atmosphärischer Eintrag bezeichnet.
Beim Schnee verhält es sich etwas anders, da hier der frischgefallene Schnee untersucht und mit Altschnee verglichen werden kann.
In Tabelle 1 sind die Vor- und Nachteile beider Methoden (Trocken- und Naßfallen) dargestellt.

2.2. Verwendete Methoden

2.2.1. Niederschlagsmessung

Die Regenauffanggeräte bestanden aus einem Kunststofftrichter von ca. 30 cm Durchmesser, der mit einem Nylonnetz von 1 mm Maschenweite bespannt war. Dieser Trichter war auf einer Plastikbox mit kippbarem Deckel montiert, in der sich eine 1-l-Glasflasche befand. Um größere Verschmutzungen durch Vögel zu vermeiden, wurde der Trichterrand mit einem nach außen gebogenen Drahtgitter umgeben.
Zur Schnee- und Eismessung wurden die Proben in große Glascontainer gefüllt und ins Labor gebracht. Nach dem Auftauen wurden sofort die unter 2.2.3. beschriebenen Analysen durchgeführt.

2.2.2. Empneustonmessung mit Trockenfallen

Die Methode ist ausführlich von PSENNER (1979) beschrieben worden. Die Fallen bestehen aus Kunststoffcontainern von 0,1 m^2 Öffnung und haben einen Netzeinsatz von 1 mm Maschenweite. Die Entfernungen vom Ufer betrugen 0, 5, 10, 20 und 30 m, es wurden jeweils drei Fallen verwendet. Das aufgefangene Material wurde nach Laub- und Nadelarten sowie nach Samen und Holz sortiert und deren C-, N- und P-Gehalte nach Literaturangaben berechnet.

Tab.1: Vor- und Nachteile der Empneustonbestimmung bei Verwendung von Trocken- und Naßfallen

	Vorteile	Nachteile
TROCKEN (Netz)	1. Es wird nur Empneuston erfaßt	1. Der feine Anteil (<1 mm) geht verloren
	2. C, N und P wird aus Literaturangaben für die gefundenen Blätter, Nadeln usw. berechnet.	2. Durch Regen kann ein Teil der Nährstoffe herausgelöst werden, d.h. Trockengewichtsverlust.
	3. Die Proben können leicht aufbewahrt werden	3. Durch Standortunterschiede kann es bei der Berechnung von C, N, P zu großen Ungenauigkeiten kommen.
NASS (a. dest.)	1. Es werden alle Anteile und der Niederschlag miterfaßt	1. Keine Trennung Empneuston-Niederschlag
	2. Differenzierung in gelöste, fein- und grobpartikuläre Anteile	2. Das Verhältnis von gelöster und partikulärer Fraktion kann sich während der Sammelperiode verschieben (leaching)
	3. C-, N- und P- Eintrag wird direkt bestimmt	3. Bei Frost kann nicht mehr gemessen werden
		4. Ein Teil der Proben (gelöste Fraktion) muß sofort analysiert werden, die Aufarbeitung ist langwieriger und viel aufwendiger

2.2.3. Atmosphärischer Eintrag (Naßfallen)

Wie bereits von PSENNER (1980) beschrieben, wurden anstatt der hohen Empneustonfallen flache Container (h = 12 cm) derselben Größe (F = 0,1 m^2) verwendet. Sie wurden mit ca. 2 Litern destillierten Wassers gefüllt und in 2,5 m Abständen vom Ufer bis 20 m und in 30 m Entfernung schwimmend fixiert. Außerhalb der Badesaison wurden in Seemitte ebenfalls drei dieser Container fixiert. Alle 2 Wochen wurden die Fallen geleert und mit frischem a.dest. nachgefüllt (der Wasserstand wurde zweimal pro Woche kontrolliert und gegebenenfalls nachgestellt, sodaß die Fallen nie trockenfielen). Vor dem Entleeren wurde der Inhalt (in Litern) gemessen und die Wände sorgfältig abgebürstet, um auch das anhaftende Feinmaterial zu bekommen.
Zum Schutz vor Wildenten wurden die Fallen mit einem spitzen Gitter umgeben.
Die Analyse von C, N, P wurde in drei Fraktionen durchgeführt:

1. grobpartikuläres organisches Material (größer als 1 mm Ø), als RPOC, RPON, RPOP (rough particulate organic) bezeichnet.
2. feinpartikuläres Material (0,45 µm bis 1 mm Ø) ,als FPOC, FPON, FPP (fine particulate) bezeichnet
3. gelöste Anteile (kleiner als 0,45 µm), als DOC, DN, DP (dissolved) bezeichnet.

Der pH und die elektrolytische Leitfähigkeit wurden sofort nach der Ankunft im Labor gemessen, die Abtrennung des grobpartikulären Materials mit Nylonnetzchen erfolgte direkt bei der Entnahme. Der gelöste und feinpartikuläre Phosphor wurde ebenfalls gleich im Labor gemessen (VOGLER 1965, mod. BRUGGER 1979), die Trennung erfolgte durch Glasfaserfilter (Whatman GF/C, 0,45 µm). Der gelöste Stickstoff (organisch und anorganisch) wurde nach KOROLEFF (1976)

bestimmt, C und N auf Glasfaserfiltern und als grobpartikuläres Trockenmaterial wurden mit dem Elemental Analyzer Mod. 1106 der Firma Carlo Erba gemessen, der Phosphor in diesem Material nach VOGLER (1965), mod. BRUGGER (1979).
Die Probe für gelösten organischen Kohlenstoff wurde nach Filtration tiefgekühlt und mit dem TOC-Analyzer der Firma Beckman analysiert.
Aus dem Inhalt der Wannen in Litern und der Expositionszeit wurde der tägliche Eintrag pro m^2 berechnet.
Die Berechnung des Gesamteintrages erfolgte aus der Relation Seefläche / Uferabstand und Eintrag / Uferabstand.

3. Ergebnisse

3.1. Relation Seefläche / Uferabstand

Auf der Seekarte wurden die aus Abb.1 ersichtlichen Uferabstände eingezeichnet und die daraus resultierenden Flächen planimetriert. In Abb.1 ist diese Abnahme der Fläche (in % der Gesamtfläche) mit zunehmendem Uferabstand zu sehen.
Aus dieser Flächen-Distanz-Relation und den diskreten Messungen des Eintrags in 0, 2.5, 5 .... m Uferabstand wurde der Eintrag für den gesamten See berechnet.
Das Programm dazu wurde von G. KNECHT erstellt.

3.2. Niederschlag

Wie bereits in den Vorbemerkungen zur Methodik gesagt wurde, können die in den Regenauffanggefäßen erfaßten Einträge nicht von anderen atmosphärischen Nährstoffquellen getrennt werden, außerdem ist die Verschmutzung durch Vögel und Insekten manchmal sehr stark. Deshalb wurde auf die Berechnung dieser Einträge verzichtet und der atmosphärische Eintrag insgesamt aus den Naßfallen berechnet.

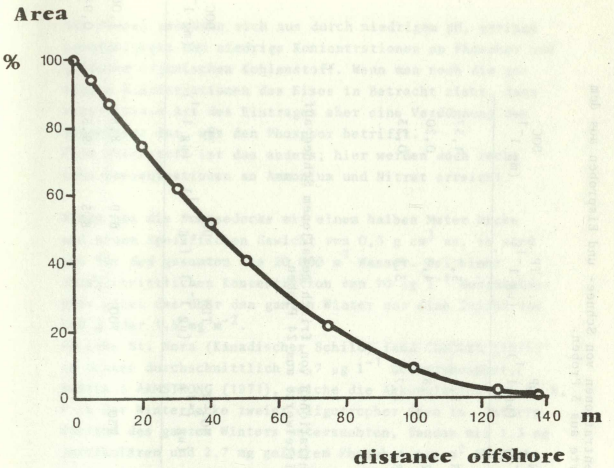

Abb.1: Beziehung zwischen Seefläche (%) und Uferabstand (m) des Piburger Sees.

Beim Schnee ist die Messung einfacher, da man frisch gefallenen mit Altschnee vergleichen kann und es relativ einfach ist, einen repräsentativen Querschnitt vom ganzen See zu bekommen.

In den Tab.2 und 3 sind einige der Ergebnisse dargestellt. Man kann daraus ersehen, daß weder von Jahr zu Jahr noch von Jänner auf März 1980 große Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Schnees bestehen.

Tab.2: pH, Leitfähigkeit und Nährstoffkonzentrationen von Schnee- und Eisproben aus dem Piburger See vom 79-01-30. Mittelwerte aus 3 Proben.

Schicht	pH	LF (μS_{20^o})	NH_4-N ($\mu g\ l^{-1}$)	NO_3-N ($\mu g\ l^{-1}$)	DP ($\mu g\ l^{-1}$)	TP ($\mu g\ l^{-1}$)	DOC ($mg\ l^{-1}$)
20 cm Schnee	4,77	10,9	114,0	304,3	3,1	5,7	1,57
5 cm Trübeis	5,76	4,2	57,3	93,2	1,8	4,3	0,20
10 cm Klareis	5,64	2,5	22,0	21,8	2,7	3,8	0,23

Tab.3: ph, Leitfähigkeit und Nährstoffkonzentrationen von frisch gefallenem Schnee auf der Winterdecke des Piburger Sees. Mittelwerte aus 24 Proben.

Datum	ph	LF (μS_{20^o})	NH_4-N ($\mu g\ l^{-1}$)	NO_3-N ($\mu g\ l^{-1}$)	TDN ($\mu g\ l^{-1}$)	DP ($\mu g\ l^{-1}$)	TP ($\mu g\ l^{-1}$)	DOC ($mg\ l^{-1}$)
80-01-22	4,24	9,6	230	430	700	6,9	8,8	1,06
80-03-12	5,08	7,0				8,5	9,5	0,94

Die Proben zeichnen sich aus durch niedrigen pH, geringe Leitfähigkeit und niedrige Konzentrationen an Phosphor und gelöstem organischen Kohlenstoff. Wenn man noch die geringen Konzentrationen des Eises in Betracht zieht, dann stellt diese Art des Eintrages eher eine Verdünnung des Seewassers dar, was den Phosphor betrifft.
Beim Stickstoff ist das anders; hier werden doch recht hohe Konzentrationen an Ammonium und Nitrat erreicht.

Nimmt man die Schneedecke mit einem halben Meter Dicke und einem spezifischen Gewicht von 0,3 g cm^3 an, so sind das für den gesamten See 20 000 m^3 Wasser. Bei einer durchschnittlichen Konzentration von 10 µg l^{-1} Gesamtphosphor wären das über den ganzen Winter nur eine Zufuhr von 200 g oder 1,5 mg m^{-2}.
Am Lake St. Nora (Kanadischer Schild) fand GOMOLKA (1975) im Schnee durchschnittlich 12,7 µg l^{-1} Gesamtphosphor. BARICA & ARMSTRONG (1971), welche die Akkumulation von C, N, P in der Winterdecke zweier oligotropher Seen in Ontario während des ganzen Winters untersuchten, fanden mit 1,3 mg partikulärem und 2,7 mg gelöstem Phosphor pro m^2 ähnliche Werte. 61 - 92 % der Nährstoffe stammten aus dem Schneefall, der Rest war aus dem Seewasser ins Eis gesickert.
In den betreffenden Seen lag die Leitfähigkeit ziemlich genau bei 10 $\mu S_{25}o$, der pH zwischen 4,4 und 5,6, die Ammoniumkonzentrationen zwischen 0 und 94 µg l^{-1}, die Nitratkonzentrationen zwischen 170 und 1080 µg l^{-1}, und die Gesamtphosphorkonzentrationen meist zwischen 10 und 20 µg l^{-1}, also sehr ähnlich wie am Piburger See.
Auch die Annahme des halben Novemberwertes als Winterwert, wie er zur Berechnung des Gesamteintrages verwendet wurde, läßt sich mit diesen Ergebnissen vereinbaren.

3.3. Empneuston (Trockenfallen)

Frühere Berechnungen des Empneustons mit der Trockenfallenmethode (Maschenweite der Netze: 1 mm) ergaben für den Zeitraum August 1977 bis August 1978 ziemlich hohe Werte für den Entrag an grobem organischem Material (PSENNER 1979), das hauptsächlich aus Blättern, Nadeln und Samen bestand. Es wurde bereits damals angenommen, daß der während der Eisbedeckung gemessene Eintrag zu hoch sein könnte. Da die Fallen während des Winters auf dem See verblieben und deren oberer Rand sich zeitweise auf dem Niveau der Winterdecke befand, kann es zu stark überhöhten Fangergebnissen kommen, weil sich die vom Wind über die Schneefläche getriebenen Partikel bevorzugt in diesen Fallen ablagern. Deshalb werden diese Winterergebnisse hier nicht mehr miteinbezogen, sondern der Durchschnittswert des Eintrags vom Oktober bis November 1978 als Winterwert angenommen. Dieser scheint realistischer zu sein, da, wie DIXON (1976) zeigte, die in Frage kommenden Laubbäume bis Mitte November 95 - 100 % ihres Laubes bereits verloren hatten. Da dieser Eintrag nach Nadeln, Blättern, Samen und Holz getrennt berechnet wurde, konnten aus den bei PSENNER (1979) zitierten Autoren die Einträge an organischem Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor berechnet werden (Tab.4). Es liegen zu wenige Vergleichsmessungen vor, um die Angaben über den Piburger See genauer zu werten, jedenfalls scheinen diese neuen Berechnungen eher im Rahmen der vergleichbaren Untersuchung zu liegen als die bei PSENNER (1979) genannten Werte, die durch die Überschätzung des winterlichen Eintrages zustandegekommen sind.
Demnach gelangen im Jahr 1978 605 kg groben organischen Materials in den Piburger See. Vergleicht man die Ergebnisse der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorfrachten mit denen aus der Naßfallenuntersuchung (Tab.5, S.98), so sieht man, daß die Unterschiede - abgesehen von N - nicht besonders groß sind.

Tab.4: Empneuston (grobpartikuläres organisches Material) sowie C-, N- und P-Eintrag in den Piburger See 1978.

	RPOM	RPOC	RPON	RPOP
mg $m^{-2}d^{-1}$	12,4	5,6	0,09	0,012
kg $See^{-1}a^{-1}$	605,1	272,3	4,2	0,61

Um mit den Ergebnissen anderer Autoren vergleichen zu können, muß der Eintrag pro m Uferlinie berechnet werden, das sind beim Piburger See, was das grobpartikuläre organische Material betrifft, 318 g m^{-1} im Jahr.
RAU (1976) nennt für den Findley Lake, der sich bezüglich Seeareal und Baumbestand des Einzugsgebietes mit dem Piburger See vergleichen läßt, einen Wert von 270 g m^{-1}, hier sind allerdings nur die Monate Juli bis Oktober berücksichtigt.
SZCZEPANSKI (1965) fand für den Mikołajskie See im Laufe einer dreijährigen Untersuchung des Laubfalles (berücksichtigt wurde der Zeitraum vom 1. September bis 15. November) einen Durchschnittswert von 489 g m^{-1}, während GASITH & HASLER (1976) am Lake Wingra für den Herbst einen Wert von 632 g m^{-1} fanden.
Es wäre natürlich auch möglich, daß die Ergebnisse von 1978 die Situation am Piburger See etwas unterschätzen, da 1977 im Herbst und 1979 im Juni höhere Werte festgestellt wurden als in den Vergleichszeiträumen des Jahres 1978.
1979 betrifft diese Erhöhung allerdings nur die feinpartikuläre Fraktion und geht wahrscheinlich auf den starken Pollenflug zurück.
Daß hier der Wind eine bedeutende Rolle spielt, ist zu erwarten.

3.4. Windsituation

Es ist klar, daß Windrichtung und Windgeschwindigkeit die Höhe des Eintrags (vor allem zur Zeit des Pollenflugs und des herbstlichen Laubfalls) mitbestimmen.
Kenntnisse über die Windverteilung am See sind notwendig, um die spezielle Lage der Laubfallen im Forschungsareal (= Schonbucht; andere Stellen am See konnten wegen der starken touristischen Belastung nicht herangezogen werden) in Beziehung zum gesamten übrigen See zu setzen.
GATTERMAYR (1977) hatte zum Problem Windgeschwindigkeiten und Windverteilung am Piburger See eine umfangreiche Untersuchung gemacht.
Während einer sommerlichen Situation, bei der kühle Festlandluft aus NW-Richtung gegen Mitteleuropa vordringt, herrschen in der Schonbucht gegenüber anderen ost-südost gelegenen Teilen des Sees geringere Windgeschwindigkeiten, da der Wind über die leicht geneigten Wiesen und Felder die Seemitte und den südöstlichen Seeteil stärker erreicht als die windgeschützte Schonbucht.
Bei sehr gradientenschwachen Wetterlagen im Herbst wird das Maximum der Windgeschwindigkeit meist in der Schonbucht gemessen, während die östlichen Seeteile nur geringe Windgeschwindigkeiten aufweisen.
Bei Föhn, der von Südosten auf den See trifft, werden die größten Windgeschwindikgeiten im Zentralteil und im Südosten des Sees gemessen, während die Schonbucht etwas geringere Windgeschwindigkeiten aufweist.
Ganz allgemein gilt also, daß bei stärkeren Winden aus Südost und Nordwest, die von der Großwetterlage bedingt sind, die Schonbucht niedrigere Windgeschwindigkeiten aufweist als Seemitte und Südostteil des Sees, während bei gradientenschwachen Wetterlagen der Wind in der Schonbucht stärker ist als an allen übrigen Teilen des Sees.

Windgeschwindigkeiten über 4 m s^{-1} treten im Untersuchungszeitraum von April 1975 bis Oktober 1976 fast ausschließlich bei Südföhn auf. Solche Windsituationen z.B. zur Zeit des Pollenflugs oder des herbstlichen Laubfalles können den Eintrag von organischem Material natürlich bedeutend erhöhen und so auch zu großen jährlichen Unterschieden führen.
Allerdings überwiegen die Tage mit niedrigen Windgeschwindigkeiten und Windstille bei weitem.
GOMOLKA (1975) analysierte den atmosphärischen P-Eintrag und versuchte einen Zusammenhang zwischen verschiedenen meterologischen Parametern herzustellen.
Einzig mit der Windrichtung und der Luftfeuchtigkeit ergab sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang.
Am Lake St. Nora (Kanadischer Schild) brachten Winde aus WSW einen erhöhten P-Eintrag (was mit der Besiedlungsdichte und Industrialisierung der betreffenden Gebiete zusammenhängt), und bei niedriger Luftfeuchtigkeit war der "dry fallout" am höchsten.

3.5. Atmosphärischer Eintrag (Naßfallen)

3.5.1. Verteilung über die Seefläche

Über die Verteilung des Empneustons in Abhängigkeit vom Uferabstand gibt es verschiedene Angaben bzw. Ansichten.
Während RAU (1976) eine e-Funktion annahm und den untersuchten See als Kreisfläche behandelte, fanden andere Autoren (SZCZEPANSKI 1965, MATTHEWS & KOWALCZEWSKI 1969) eine lineare Abnahme mit dem Uferabstand.
GOMOLKA (1975) stellte fest, daß die Unterschiede in der Fängigkeit der Niederschlagskollektoren für Phosphor zwischen denen am Land und jenen auf der offenen Seefläche nur auf den trockenen Eintrag zurückzuführen waren, während die Regenmessungen keine Uferabhängigkeit aufwiesen.

PSENNER (1979) fand am Piburger See das ganze Jahr über eine extrem starke Abnahme des Eintrags an grobem organischem Material auf den ersten Metern. In 10 m Uferabstand konnten nur mehr Promille bis Prozent des Eintrages auf der Uferlinie direkt festgestellt werden, und in 30 m wurde fast nichts mehr aufgefangen.
Die mit Naßfallen 1978 und 1979 durchgeführten Untersuchungen liefern ein etwas anderes Bild. Als Beispiel seien hier nur die Daten für den organischen Kohlenstoff im Frühsommer und im Herbst (Abb.2) angeführt. Beim grobpartikulären Material ist die Uferlinie wie erwartet deutlich überrepräsentiert, besonders auffällig im Herbst.
Das feinpartikuläre und gelöste Material weist keine so extreme Verteilung auf. Beim Stickstoff ist diese starke Zunahme der grobpartikulären Fraktion im Herbst nicht mehr festzustellen, noch viel weniger beim Phosphor, was darauf hindeutet, daß das Laub und die Nadeln beim herbstlichen Laubfall viel weniger Nährstoffe enthalten als während der Vegetationsperiode.

3.5.2. Jahreszeitliche Verteilung

Aus den Abb. 3 bis 5 ist der durchschnittliche, auf die Seefläche bezogene atmosphärische Eintrag in mg m^{-2} d^{-1} in den einzelnen Untersuchungsperioden zu entnehmen.
Was auf den ersten Blick auffällt,ist der hohe Anteil der gelösten Fraktion am Gesamtstickstoff und der hohe Anteil der feinpartikulären beim Gesamtphosphor. Die Unterschiede von Jahr zu Jahr sind beträchtlich.
1979, als sofort nach Eisbruch mit den Messungen begonnen wurde, ist der rasche Anstieg des atmosphärischen Eintrags mit Beginn der Vegetationsperiode zu erkennen.

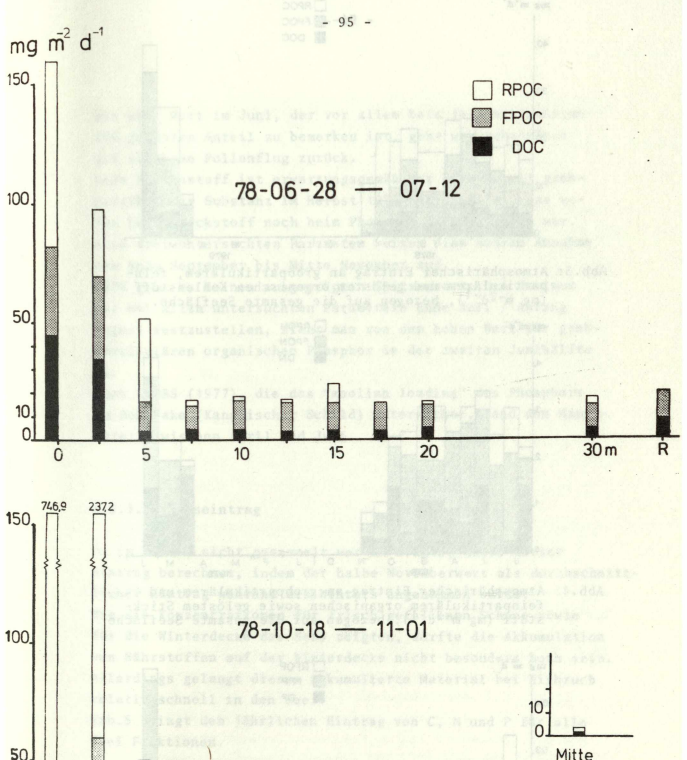

Abb.2: Eintrag von organischem Kohlenstoff (mg $m^{-2}d^{-1}$) in Abhängigkeit vom Uferabstand (m).

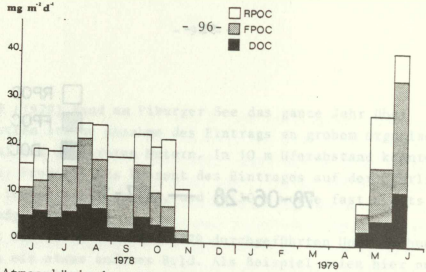

Abb.3: Atmosphärischer Eintrag an grobpartikulärem, feinpartikulärem und gelöstem organischen Kohlenstoff (mg $m^{-2}d^{-1}$), bezogen auf die gesamte Seefläche.

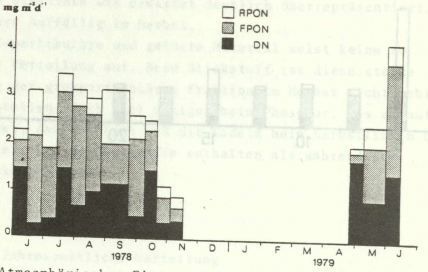

Abb.4: Atmosphärischer Eintrag an grobpartikulärem und feinpartikulärem organischen sowie gelöstem Stickstoff (mg $m^{-2}d^{-1}$), bezogen auf die gesamte Seefläche

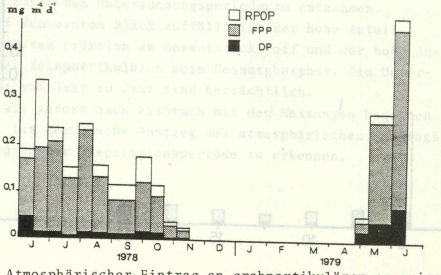

Abb.5: Atmosphärischer Eintrag an grobpartikulärem organischen sowie feinpartikulärem und gelöstem Phosphor (mg $m^{-2}d^{-1}$), bezogen auf die gesamte Seefläche.

Der hohe Wert im Juni, der vor allem beim feinpartikulären und gelösten Anteil zu bemerken ist, geht wahrscheinlich auf erhöhten Pollenflug zurück.
Beim Kohlenstoff ist erwartungsgemäß der hohe Anteil grobpartikulärer Substanz im Herbst 1978 beträchtlich, was weder beim Stickstoff noch beim Phosphor festzustellen war.
Alle drei untersuchten Parameter weisen eine starke Abnahme von Ende September bis Mitte November auf.
1978 gibt es keinen ausgeprägten Spitzenwert. Das Maximum war bei allen untersuchten Parametern Ende Juli / Anfang August festzustellen, sieht man von dem hohen Wert für grobpartikulären organischen Phosphor in der zweiten Junihälfte ab.
Auch CROSS (1977), die das "aeolian loading" des Phosphors am Bob Lake (Kanadischer Schild) untersuchte, fand den Hauptanteil zwischen April und Juni.

3.5.3. Jahreseintrag

Da im Winter nicht gesammelt werden konnte, wurde dieser Eintrag berechnet, indem der halbe Novemberwert als durchschnittlicher Eintrag während des Winters angenommen wurde.
Wie die Konzentrationen für frisch gefallenen Schnee sowie für die Winterdecke des Sees zeigten, dürfte die Akkumulation von Nährstoffen auf der Winterdecke nicht besonders hoch sein. Allerdings gelangt dieses akkumulierte Material bei Eisbruch relativ schnell in den See.
Tab.5 bringt den jährlichen Eintrag von C, N und P für alle drei Fraktionen.

Tab.5: Atmosphärischer Eintrag von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor in den Piburger See

	DOC	FPOC	RPOC	TOC
kg See^{-1}a^{-1}	136,5	236,1	291,8	664,4
mg m^{-2}d^{-1}	2,8	4,8	6,0	13,6
%	20	36	44	100

	DN	FPON	RPON	TN
kg See^{-1}a^{-1}	28,7	33,8	16,2	78,6
mg m^{-2}d^{-1}	0,59	0,69	0,33	1,61
%	37	43	20	100

	DP	FPP	RPP	TP
kg See^{-1}a^{-1}	0,522	3,379	0,893	4,797
µg m^{-2}d^{-1}	10,7	69,3	18,3	98,2
%	11	70	19	100

Im Zeitraum von Juni 1978 bis Juni 1979 gelangen demnach 664,4 kg organischer Kohlenstoff, 78,6 kg Stickstoff und 4,8 kg Phosphor über Luft und Niederschläge in den Piburger See. Das Gewichtsverhältnis ist C : N : P = 143 : 17 : 1 oder molar C : N : P = 381 : 36 : 1;

das gilt für den Gesamteintrag, bei den einzelnen Fraktionen sieht dieses Verhältnis anders aus.
Vergleicht man den atmosphärischen Eintrag von C, N, P in den Piburger See mit anderen Quellen (Tab.6, S_{112}), stellt man fest, daß vor allem beim Phosphor, der ja unter den Nährstoffen im Piburger See die entscheidende Rolle spielt, diese Form des Eintrages mit 39 % der gesamten gemessenen Zufuhr stark ins Gewicht fällt. Beim Stickstoff sind es immerhin noch 18 % , während der organische Kohlenstoff nur mehr zu etwa 6 % aus Empneuston und Niederschlägen stammt.
Deshalb stellt sich hier die Frage: Wie gut sind die Nährstoffe aus dem atmosphärischen Eintrag für Algen, Zooplankton und Benthosorganismen verfügbar? Im folgenden soll dieses Problem unter Zuhilfenahme der entsprechenden Literatur geklärt werden.

4. Diskussion

4.1. Freisetzung von organischen und anorganischen Substanzen aus Pflanzenmaterial (Laub, Nadeln, Rinde, Holz)

Frühe Untersuchungen stammen von REIMER (1954), der unter anderem die Phosphorfreisetzung aus Laub in einem kleinen Waldgewässer untersuchte. Nach seinen Angaben ist nach einer Woche die größte Menge freigesetzt, und zwar hauptsächlich als anorganisches Phosphat in abnehmender Stärke bei Betula, Salix, Fagus, Alnus. NYKVIST (1959a) beobachtete bei Fraxinus excelsior einen Verlust des Trockengewichtes (= TG) von 22 % nach bereits einem Tag des Auslaugens in Wasser; von den anorganischen Bestandteilen wurden 52 % ausgelaugt, davon 0,15 % TG Stickstoff und 0,05 % TG Phosphor, d. h. die Hälfte des ursprünglich vorhandenen. Ganz anders bei Pinus silvestris (NYKVIST 1959b), wo nach einem Tag bei 25° C nur 0,9 % der organischen Substanz ausgelaugt war, eine ähnlich geringe Abgabe von wasserlöslichen Substanzen zeigte

Picea abies (NYKVIST 1961b), währnd Betula verrucosa eine Zwischenstellung einnahm (NYKVIST 1961a).
Aus diesen Untersuchungen ging hervor, daß bei Blättern am ersten Tag der Großteil der wasserlöslichen Substanzen freigesetzt wird, während bei Nadeln sich die Freisetzung durch Auslaugen über mehrere Tage erstreckt. In allen diesen Versuchen war eine starke Zunahme des Auslaugeeffektes mit der Temperatur festzustellen, die im Bereich zwischen 3° und 40° C ziemlich linear erfolgte und zu einer Verdoppelung der ausgelaugten Substanzmenge führte. GALLAGHER et al. (1976) berichten, daß aus jungen Blättern von Spartina alterniflora bereits nach drei bis sechs Stunden die höchste Freisetzung von DOC zu vermerken war, wenn sie in Ästuarwasser exponiert wurden. WETZEL und MANNY (1972) fanden ebenfalls eine sehr rasche Freisetzung organischer Substanzen aus Hickory- und Ahornblättern, die in künstliche Flüsse eingesetzt wurden. Der lösliche organische Stickstoff wurde dabei in den ersten zwölf Stunden vollständig herausgelöst, der lösliche organische Kohlenstoff erreichte einen Maximalwert nach 30 Stunden.

McCONNELL (1968) untersuchte das Leaching-Verhalten von Eichenblättern und fand, daß nach 24 Stunden bereits die meisten Kohlehydrate aus den Blättern extrahiert waren, bei den Phenolen wurde erst nach 120 Stunden ein Plateau erreicht.
PETERSEN und CUMMINS (1974), die Laubpakete von 10 g in einen Fluß setzten, stellten während der ersten 24 Stunden der Exposition einen rapiden Gewichtsverlust fest. Er betrug für verschiedene Laubbäume zwischen 5,16 % TG (Quercus alba) und 27,20 % TG (Cornus amomum), im Durchschnitt etwa 15 %. Außer den oben erwähnten Arten wurden auch Carya glabra, Populus tremuloides, Salix lucida, Decodon verticillatus und Fraxinus nigra untersucht.

WILLOUGHBY (1974) kam zu ähnlichen Ergebnissen; er fand, daß Alnus und Quercus innerhalb von 7 Tagen alle wasserlöslichen Substanzen verlieren, während Picea und Pinus ihre wasserlöslichen organischen Substanzen in einer konstanten Rate innerhalb von 20 bis 25 Tagen abgeben.
MEYER (1980) stellte bei der Exposition von Ahorn-, Birken- und Buchenblättern (exponiert in Netzchen von 1 mm Maschenweite) in einem Waldfluß (Bear Brook) in den ersten Tagen eine rasche Abnahme des Phosphorgehaltes auf etwa die Hälfte des Ausgangswertes fest. Bereits in der ersten Woche beginnt aber der P-Gehalt durch bakterielle Besiedlung wieder zu steigen, und diese Zunahme dauert etwa ein Jahr, während im zweiten Untersuchungsjahr keine weitere Zunahme zu verzeichnen war. Während das Trockengewicht bei Birke in einem Jahr auf 10 % sank, nahm der P-Gehalt im gleichen Zeitraum von 0,05 % TG auf 0,12 % TG zu.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß das Auslaugen, d.h. die Freisetzung organischer und anorganischer Substanzen bei den meisten Laubarten nach einem Tag, bei Nadeln aber erst nach ca. 3 Wochen abgeschlossen ist. Die weitere Freisetzung von Nährstoffen erfolgt relativ langsam und erst nach Besiedlung durch Mikroorganismen.

4.2. Mikrobieller und tierischer Abbau von Pflanzenmaterial

An die erste Phase des Auslaugens wasserlöslicher Substanzen schließt die mikrobielle Besiedlung an, die zur Zersetzung und zum Abbau von Zuckern, Proteinen und Fetten führt, während schwer zu hydrolysierende Verbindungen (Lignin, Zellulose, Terpene, Tannin, Wachse, Harze) übrig bleiben und sehr langsam umgesetzt werden (MILLAR 1974) und deshalb sehr lang auch makroskopisch sichtbar bleiben.

So gibt z.B. HODKINSON (1975) für Salix-Blätter in einem Biberteich eine Halbwertszeit von 0,71 Jahren an, für Juncus 3,75 Jahre, für Picea-Rinde jedoch 5,75 Jahre. Eigene Untersuchungen am Piburger See zeigten, daß auch in tieferen Sedimentschichten (20 cm) Blätter und Nadeln makroskopisch erkennbar sind.

JENSEN (1974) wies nach, daß auch frisch entfaltete Blätter oft von großen Mengen von Bakterien besetzt sind, auch konnten Hefen und filamentöse Pilze auf den Blättern gefunden werden. Solange die Blätter jung sind, ernähren sich die Mikroorganismen hauptsächlich von Exsudaten und frischem Gewebe. Diese Mikroflora besteht meist nur aus wenigen Arten, da ihre Lebensbedingungen sehr selektiv sind, und sie dringen - abgesehen von pathogenen Formen - nicht in das Innere des Blattes ein.

Sind die Blätter abgefallen, entsteht eine Sukzession von Mikroorganismen, die von der Zusammensetzung des Materials und von den Umweltbedingungen abhängt. Während beim Laubabbau im Boden eher die Pilze dominieren (GYLLENBERG und EKLUND 1974), sind es im Wasser und unter anaeroben Bedingungen vor allem Bakterien. Es sind aber auch aquatische Actinomyceten (GOODFELLOW 1974) sowie aquatische Pilze bekannt, die ihren Lebenszyklus im Wasser vollenden (JONES 1974).

SUBERKROP und KLUG (1974) zeigten in einer Reihe von Elmiskopaufnahmen, daß die in einem Fluß in Michigan exponierten Eichen- und Hickory-Blätter von Hyphomyceten besiedelt wurden, die in das Innere der Blätter eindrangen, während Bakterien in der Anfangsphase des Abbaues meist auf die Oberfläche begrenzt sind. Sobald die Cuticula entfernt ist, dringen sie auch ins Blattinnere ein, teilweise können sie das allerdings auch durch die Spaltöffnungen.

SUBERKROP und KLUG (1976) untersuchten Herbstfall-Blätter von Quercus alba und Carya glabra (Hickory) auf bakterielle und pilzliche Besiedlung bei Exposition in einem Waldfluß und stellten dabei eine logarithmische Zunahme der Gesamtkeimzahlen mit der Zeit, jedoch keine bakterielle Sukzession fest. Die vorherrschenden Vertreter der Pilzflora waren aquatische Hyphomyceten und die Autoren nehmen an, daß deren gesamter Lebenszyklus im Wasser abläuft, während die terrestrischen Pilze in einem Ruhestadium sind und nur unter stark angereicherten Bedingungen wachsen und sporulieren.
Auch MASON (1976) fand, daß beim Abbau von Phragmitesblättern auf der Schlammoberfläche eines seichten Teiches Pilze im frühen Stadium dominieren, während nach 122 Tagen Bakterien etwa die zehnfache Respirationsrate der Pilze aufwiesen.
GALLAGHER et al. (1976) erwähnen, daß die mikrobielle Respirationsrate auf Spartina alterniflora im Wasser bereits nach einigen Stunden ansteigt, da DOC relativ schnell ausgelaugt wird.
Der folgende Abbau ist ein Zusammenspiel von Mikroorganismen und Invertebraten, wobei die ersteren für eine Anreicherung des Materials an Stickstoff, letztere für eine mechanische Zerkleinerung sorgen. Frisch gefallene Blätter scheinen der saprophytischen Fauna nicht zu schmecken, nach einigen Wochen sind wahrscheinlich die Polyphenole und andere übelschmeckende Substanzen durch Leaching oder bakteriellen Abbau verschwunden.
KAUSHIK und HYNES (1968) wiesen bereits darauf hin, daß die Proteinzunahme von Alnus-, Ulmus- und Quercusblättern durch Pilz- und Bakterienbesiedlung zur Verbesserung des Nährwertes dieser Substrate für Hyalella azteca, Asellus communis und Paraleptophlebia mollis führten. Ein sich zersetzendes Blatt nimmt an Gewicht und kalorischem Gehalt insgesamt ab; ein Tier, das davon frißt, nimmt aber mit jedem Bissen dieselbe Kalorienmenge auf, ein älteres Blatt ist jedoch wegen des zunehmenden Proteingehaltes ein weit besseres Futter (KAUSHIK

und HYNES 1971). Je höher die im Wasser gelöste Stickstoffkonzentration, desto größer ist auch die mikrobielle Zunahme auf und in den sich zersetzenden Blättern.
MATHEWS und KOWALCZEWSKI (1969) fanden in der Themse ebenfalls eine N-Zunahme bei Blättern von Acer, Quercus und Salix. In den Proben, wo Asellus, Gammarus, Pisidium, usw. Zugang hatten, verschwand das Blattmaterial trotzdem nicht schneller als in den Proben, die durch feinmaschige Netze vor einer Besiedlung durch Tiere geschützt waren. Die Autoren schlossen daraus, daß Tiere - wenigstens in diesem speziellen Fall - bei der Zersetzung von Blättern im Wasser eine geringere Rolle spielen als im Boden. Zu ähnlichen Schlußfolgerungen kam PIECZYNSKA (1972) bei einer Untersuchung im Eulitoral masurischer Seen.
SHORT und WARD (1980) fanden, daß die Abbaurate von Blättern von Alnus tenuifolia in einem regulierten Waldfluß in den Rocky Mountains höher war als in dem naturbelassenen Vergleichsfluß. Diese Unterschiede gingen allerdings nicht - wie erwartet - auf das verschieden starke Vorhandensein von Invertebraten zurück, sondern auf die höheren Temperaturen im regulierten Fluß, die zu einem stärkeren mikrobiellen Wachstum führten.
PETERSEN und CUMMINS (1974) wiesen darauf hin, daß bei Hickoryblättern, die in einem Waldfluß exponiert wurden, die Abbautätigkeit von Mikroorganismen und Invertebraten etwa gleich hoch ist, bei Eichenblättern dagegen der Invertebrateneinfluß gering ist. Die Invertebraten vermochten offensichtlich zwischen verschiedenen Laubarten und den besiedelnden Mikroorganismen zu unterscheiden.
Zu einer ähnlichen Aussage kommen auch VISSER und WHITTAKER (1977). Laborversuche mit Espenlaub ergaben, daß ein Collembole (Onychiurus subtenuis) Cladosporium gegenüber Basidiomyceten, die beide auf den Blättern wuchsen, stark bevorzugte und deshalb diese Art ziemlich radikal aberntete.

BÄRLOCHER und KENDRICK (1973) untersuchten den Pilzbewuchs von im Wasser exponierten Ulmen- und Ahornblättern und fanden, daß Mycelien von Tricladium angulatum eine bessere Nährstoffquelle für Gammarus pseudolimnaeus darstellten als die Blätter selber. Dieselben Autoren wiesen in einer späteren Arbeit (BÄRLOCHER und KENDRICK 1975) darauf hin, daß der Nährwert der pilzlichen Substanzen sehr viel größer ist als es die bloße Schätzung der mikrobiellen Biomasse auf den Blättern vermuten läßt.

Etwas widersprüchliche Angaben zur bakteriellen Ernährung von Simulium-, Chironomus- und Baetis-Larven stammen von BAKER und BRADNAM (1976). Von den mit der Nahrung (Detritus, Algen, Reste höherer Pflanzen) aufgenommenen Bakterien verdauen Simulium und Chironomus mehr als die Hälfte, Baetis und Ephemerella schienen das nicht zu tun.

DAVIS und WINTERBOURN (1977) fanden bei der Untersuchung eines Flusses in Neuseeland, daß Nothofagus solandri (Bergbuche) - in Netzchen von 1 mm Maschenweite exponiert - in 152 Tagen 49 % ihres anfänglichen Trockengewichtes verlor; dennoch fand in den ersten 3 Wochen eine absolute Proteinzunahme statt. Es wurden zwar terrestrische und aquatische Hyphomyceten festgestellt, aber die Bakterien waren die Erstbesiedler und, den Scanning-Elmiskopaufnahmen nach zu urteilen, bedeutender. Die Anzahl der Invertebraten pro Probe nahm in den ersten drei Wochen schnell, dann aber nur mehr unmerklich zu. Bedeutend waren Chironomidenlarven und Nymphen der Steinfliege Spaniocerca zelandica.

BERRIE (1976) weist darauf hin, daß diese Verhältnisse bei den einzelnen Tierarten sehr unterschiedlich sein können. So vermögen bestimmte Tiere die strukturellen Bestandteile des Pflanzengewebes wie Zellulose und Lignin (oft 50 % des Detritus) nicht zu verwerten, sie werden daher eher die aufsitzenden Mikroorganismen abweiden (Tubificiden, Schnecken, Amphipoden, Cladoceren), während es z.B. bei Gammarus pulex auch Zelluloseverdauung zu geben scheint.

RAU (1977) exponierte Nadeln von Abies amabilis und Tsuga mertensiana im Findley Lake und fand, daß der Abbau in den Proben, welche für Limnephiliden- und Chironomidenlarven zugänglich waren, nach einem Jahr 80 - 90 % ausmachte, in 0,8- und 0,073-mm-Netzchen jedoch nur 20 - 30 %. Nach einem weiteren Jahr war in beiden Fällen kein zusätzlicher Gewichtsverlust festzustellen.
KOSTALOS und SEYMOUR (1976) fanden heraus, daß Gammarus minus beste Überlebensraten bei pilzbesiedelten Blättern aufwies, während diese bei sterilen Blättern deutlich geringer waren.
IVERSEN (1973) stellte bei Exposition von Buchenblättern in einem dänischen Quellbach einen Gewichtsverlust von 90 % im ersten Jahr fest. Der Stickstoffgehalt nahm im ersten Monat zu und blieb dann konstant, wobei der N-Gehalt der Bakterien hundertmal höher war als jener der ebenfalls auf den Blättern befindlichen Pilze und Algen. Die Trichoptere Sericostoma personatum akzeptierte die Blätter erst nach dieser Stickstoffanreicherung als Nahrung.

Zusammenfassend läßt sich etwa folgendes sagen: Bereits Stunden nach Beginn des Auslaugungsprozesses können sich die ersten mikrobiellen Besiedler entwickeln, manche Arten sind bereits vor dem Laubfall auf den Blättern zu finden.
Allgemein scheinen Pilze im ersten Stadium und bei aeroben Bedingungen die Hauptrolle zu spielen, später folgt die bakterielle Besiedlung. Mit der mikrobiellen Besiedlung erhöht sich meistens der Proteingehalt des Laubes und es wird für pflanzenfressende Invertebraten, von denen manche sowohl Laub- als auch Pilzarten unterscheiden können, damit zu einem wertvolleren Futter. Die Tiere weiden die aufsitzenden Mikroorganismen ab, zerkleinern das Material und erleichtern damit wieder das Eindringen von weiteren Bakterien und Pilzen.
Einige Autoren nehmen eine exponentielle Abnahme des Materials durch mikrobielle und tierische Aktivitäten an und berechnen daraus die Halbwertszeiten für verschiedene Laub- und Nadel-

sorten, andere finden im ersten Jahr eine bei Blättern stärkere Abnahme des Trockengewichtes, während im folgenden Jahr der Abbau nur mehr unmerklich langsam vor sich geht, da sich die schwer abbaubaren organischen Substanzen anreichern.

4.3. Verfügbarkeit des Phosphors und Stickstoffs aus dem atmosphärischen Eintrag

Über die Verwertbarkeit des Phosphors für Algen gibt es in der Literatur sehr verschiedene Angaben. Das ist verständlich, da einerseits oft nicht zwischen anorganischem und organischem partikulärem Phosphor getrennt wurde, andererseits die Bedingungen für die Resuspension bzw. Regeneration von Phosphat von See zu See sehr variieren können.
So ist das Wieder-in-Lösung-gehen von Eisenhydroxophosphaten von anoxischen Verhältnissen im Hypolimnion und in der Sediment-Wasser-Grenzschicht abhängig, während Apatit und dessen Löslichkeit davon nicht beeinflußt wird. Beim partikulären organischen Phosphor müssen wir ebenfalls unterscheiden, ob wir es mit Zoo- und Phytoplankton zu tun haben, das seine Nährstoffe nach dem Tod relativ schnell und in großem Umfang abgibt (KRAUSE 1964, GOLTERMAN 1964), oder mit Laub, Nadeln, Rinde, Holzpartikeln, usw., die in einem weit geringerem Ausmaß und in viel größeren Zeiträumen Nährstoffe durch Auslaugung und bakterielle Aktivitäten ins Wasser abgeben.
Die Streitfrage, ob bei der Eutrophierung von Seen nur das gelöste Orthophosphat ("Soluble Reactive Phosphorus") oder auch, und in welchem Umfang, der partikuläre Phosphor der Zubringer eine Rolle spielt, scheint heute gelöst. Seit OHLE's (1965) Entdeckung der "biogenen Infiltration" nimmt man eher den Gesamtphosphor als eutrophierenden Faktor, und auch VOLLENWEIDER's (1968) "loading concept" verwendet den Gesamtphosphor zur Berechnung der erlaubten und kritischen

Fracht. Die Annahme, die hinter diesen Konzepten steckt, ist die, daß auch anorganische, schwer lösliche und organische Phosphorverbindungen durch Resuspension und Mineralisation in eine lösliche und damit für Algen verwertbare Form übergehen.
Anders COWEN und LEE (1976). Sie untersuchten die Verfügbarkeit von partikulärem Phosphor aus städtischem "runoff" nach einem starken Unwetter für eine Kultur von Selenastrum und stellten fest, daß nur zwischen 8 und 55 % des partikulären Phosphors für das Algenwachstum innerhalb von 18 Tagen zur Verfügung stand. Für Madison (Wisconsin) fanden sie im Durchschnitt folgende Werte für den verfügbaren Phosphor:

Available P = TDP + 0,3 TPP

TDP ... Total dissolved P
TPP ... Total particulate

Für die Zuflüsse des Ontario-Sees ergab sich folgende Beziehung:

Available P = TDP + 0,2 TPP

Für Schneeproben aus Madison fand COWEN (1974) mit denselben Testorganismen, daß weniger als 25 % des partikulären Phosphors innerhalb von 18 Tagen verwertbar war.
Als Beispiel für den Unterschied zwischen verfügbarem und Gesamtphosphor sei hier noch THOMAS et al. (1980) angeführt, welche die Ufererosion beim Eriesee mit 11 000 Tonnen Gesamtphosphor angeben, wovon 1 400 Tonnen als "available phosphorus" bezeichnet werden.
GOMOLKA (1975) bestimmte die Verfügbarkeit des Phosphors in Niederschlägen durch Zugabe von radioaktiv markiertem Orthophosphat. Der Anteil von gelöstem reaktionsfähigem Phosphor (SRP) schwankte bei diesen Proben zwischen 0 % und 100 %, im Jahresdurchschnitt waren es beim Regen 61 % und beim trockenen "fallout" 57 % des Gesamtphosphors.

Auch während des Pollenfluges war der SRP-Anteil recht hoch, obwohl man eigentlich annehmen sollte, daß Pollenmaterial relativ inert wäre.

Geht man die drei untersuchten Fraktionen durch, so besteht die grobpartikuläre zu 100 % aus organischen Partikeln (Blätter, Nadeln, Samen, Insekten, Rinden- und Holzstückchen). Wenn man annimmt, daß bei einer vierzehntäglichen Entnahme dieses Material durchschnittlich eine Woche lang im Wasser gelegen hat, so kann das "leaching" als abgeschlossen und die mikrobielle Besiedlung meist schon als fortgeschritten betrachtet werden, allerdings dürfte sich der P- und N-Gehalt durch die mikrobielle Besiedlung nicht wesentlich erhöht haben, während die leichtlöslichen P- und N-Verbindungen wahrscheinlich bereits herausgelöst worden sind. Der P- und N-Gehalt, den man in dieser Fraktion bestimmt, besteht deshalb zum Großteil aus schwerköslichen Substanzen und dürfte der benthischen Fauna erst im Laufe von Monaten oder Jahren zugänglich werden. Diese Fraktion hat im Jahresdurchschnitt sowohl beim Phosphor als auch beim Stickstoff annähernd den gleichen Anteil, nämlich 19 bzw. 20 % des Gesamteintrages (Tab.5, Seite 98).

Etwas schwieriger ist die Definition der feinpartikulären Fraktion. Auch sie besteht in der Hauptsache aus toten organischen Partikeln, aber auch aus Mikroorganismen und Algen, die sich in den Auffanggefäßen entwickeln und einen Teil der im Wasser gelösten P- und N-Verbindungen aufgenommen haben. Es wäre deshalb möglich, daß die gelöste Fraktion deshalb unterschätzt und die feinpartikuläre überschätzt wird. Ein Vergleich dieser Fraktion zwischen Stickstoff und Phosphor zeigt, daß beim P dieser Anteil nur 11 % des Gesamteintrages ausmacht, beim N aber 35 %. Das könnte bedeuten, daß P als Minimumnährstoff bedeutend schneller aus dem Wasser aufgenommen wird als Ammonium und Nitrat.

Bei den Niederschlagsmessungen am Lake St. Nora stellt GOMOLKA (1975) fest, daß die Blätter nur einen geringen Beitrag zum Phosphor-loading leisteten, was allerdings auch mit der Position der Fallen und der Meßperiode zusammenhängt, und daß der größte Teil des trockenen Eintrages vom Pollenflug stammte, mit deutlichen Maxima im Mai und Juni.
Auch der Beitrag der in den Niederschlagskollektoren gefundenen Insekten wurde vernachlässigt, da ein Lockeffekt der Fallen vermutet wurde und da außerdem viele Insekten einen großen Teil ihres Lebenszyklus im See durchlaufen und aufgefangene Imagines deshalb nicht als P-Eintrag betrachtet werden können.

Was bezeichnet man also als verfügbaren Phosphor?
Läßt man die grobpartikuläre Fraktion (aus der die löslichen Anteile ausgelaugt wurden) ganz beiseite, verbleiben immer noch mehr als 80 % in feinpartikulärer und gelöster Form, deren Verteilung nicht unbedingt die ursprüngliche Form des Eintrages wiedergibt; der Hauptanteil davon kann deshalb wohl als verfügbarer Phosphor bezeichnet werden.
Ähnlich stellt sich das Problem beim Stickstoff. Auch hier wurde beim gelösten N nur einigemale zwischen anorganisch (NH_4, NO_3) und organisch gelöstem Stickstoff unterschieden. Ammonium- und Nitrat-Stickstoff machten in den untersuchten Fällen stets mehr als die Hälfte des gesamten gelösten Stickstoffes aus, ist also als Nährstoff leicht verfügbar. Beim DON muß zwischen refraktären und leicht abbaubaren Verbindungen unterschieden werden, da erstere sich fast inert verhalten und nicht als Stickstofflieferanten zur Verfügung stehen. Eine ähnliche Unterscheidung ist auch beim feinpartikulären organischen Stickstoff zu treffen. Da hier auch mikrobieller Stickstoff mitbestimmt wird, dürfte auch in dieser Fraktion ein bedeutender Teil leicht verfügbar sein.

4.4. Anteil der atmosphärischen Fracht am "Gesamtloading"

Die Nährstofffracht des oberirdischen Zuflusses ist relativ gut zu ermitteln, auch die Bedeutung der Nährstoffabschwemmung aus land- und forstwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet für die Eutrophierung wurde genauer untersucht (PECHLANER & PSENNER 1979). Der unterirdische Zufluß wurde von GATTERMAYR (1976, 1977b, 1978, 1979) aus der Wasserhaushaltsgleichung ermittelt, die Nährstoffkonzentrationen wurden mit denen der Quelle oberhalb des Piburger Sees gleichgesetzt und so der "input" berechnet.
DÖRRSTEIN (1977) versuchte einen bedeutenden Teil des internen "loadings", verursacht durch das Aufsteigen der Blaualge Oscillatoria limosa, zu berechnen. Andere Nährstoffquellen (oberflächlicher Abrinn, Badegäste ...) sind allerdings noch nicht quantitativ erfaßt und können höchstens aus Literaturangaben und Besucherzahlen (HAIMAYER 1979) geschätzt werden. In Tab.6 sind deshalb nur die gemessenen externen Frachten miteinander verglichen worden. Der über Wind und Niederschläge in den Piburger See gelangende organische Kohlenstoff macht dabei nur 6 % des gesamten autochthonen und allochthonen Kohlenstoffs aus, beim Stickstoff macht der atmosphärische Eintrag bereits 18 % des gesamten gemessenen "loadings" aus, beim Phosphor sind es 39% der gemessenen Frachten.
KORTMANN (1980) berichtet, daß am Durham Pond (Connecticut) der "atmospheric fallout" ca. 25 % des gesamten Phosphorbudgets ausmachte, im Jahr waren es 126 mg m^{-2}, während WETZEL (1975) in städtischen Gebieten nur 100 mg $m^{-2}a^{-1}$ fand. Das ist immerhin das Dreifache der atmosphärischen Fracht am Piburger See (36 mg $m^{-2}a^{-1}$), allerdings hat der Durham Pond nur 4,7 ha Fläche. Die gelösten Stickstoffverbindungen aus der atmosphärischen Fracht machten am Durham Pond 10 % des Inputs an gelöstem N aus, davon waren etwa 48 % organisch, von diesen wurden 57 % als labile DON bezeichnet.

Tab.6: Vergleich verschiedener Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorfrachten am Piburger See.
OZ ... oberirdischer Zufluß
UZ ... unterirdischer Zufluß
PP ... Primärproduktion
AE ... Atmosphärischer Eintrag
Die Werte für OZ, UZ, PP sind Mittelwerte der Jahre 1975 - 1977 (PECHLANER und PSENNER 1979, ROTT 1979).
Alle Angaben in kg $See^{-1}a^{-1}$ und in %.

	C		N		P	
	kg	%	kg	%	kg	%
OZ	1 000	9	245,7	57	7,1	58
UZ			107,3	25	0,4	3
PP	10 000	86				
AE	664	6	78,6	18	4,8	39
Σ	11 664	100	431,6	100	12,3	100

GOMOLKA (1975) nennt als Grenzwerte für das "annual phosphorus loading" aus Niederschlägen 8,6 mg $m^{-2}a^{-1}$ (VIRO 1953) und 475 mg $m^{-2}a^{-1}$ (VIJAYALAKSHMI und PANDALAI 1962).
Sie selber fand am Lanke St. Nora 37 mg $m^{-2}a^{-1}$ atmosphärischen Phosphor-Eintrag, wobei das Verhältnis von Naß : Trocken im Jahresdurchschnitt bei 0,9 lag.
CROSS (1977) fand am Bob Lake ein "aeolian loading" von 44,3 mg P $m^{-2}a^{-1}$.

Die Autorin weist auf die Bedeutung des atmosphärischen Eintrages an P hin (er betrug am Bob Lake 23 % des Gesamten P-Eintrages), da der Hauptanteil zwischen April und Juni in den See gelangt und deshalb sofort für das Phytoplankton zur Verfügung steht.
GOMOLKA (1975) gibt für die Bedeutung des atmosphärischen Phosphor-Eintrages folgende Werte an, die von der Größe des Einzugsgebietes, von Geologie, Landnutzung, Besiedlungsdichte, usw. abhängen.

Tab.7: Atmospheric phosphorus loading as a decimal fraction of total loading

A_d ... Catchment area exclusive of the lake surface
A ... Lake area

	Igneous Forest		Sedimentary forest & grazing	
A_d/A	RIGLER (1974)	GOMOLKA (1975)	RIGLER (1974)	GOMOLKA (1975)
1	,94	,89	,75	,61
3	,83	,72	,50	,35
10	,60	,44	,23	,14
30	,33	,21	,09	,05
100	,13	,07	,03	,02

Nach GOMOLKA (1975)

Beim Piburger See mit einem A_d/A von 19, wären das nach RIGLER (1974) 0,45 und nach GOMOLKA (1975) 0,35, d.h. zwischen 35 und

45 % des gesamten P-Eintrages. Der von uns am Piburger See gemessene Wert von 39 % stimmt mit den oben zitierten Untersuchungen gut überein.
Da der Phosphor im Piburger See ohnehin als Minimumnährstoff fungiert, ist dieses Ergebnis ein Hinweis dafür, daß die atmosphärische Eutrophierung eine bedeutende Rolle spielt und bei Budgetberechnungen und Sanierungsmaßnahmen nicht außer acht gelassen werden darf.

5. Zitierte Literatur

BAKER, J.H. and BRADNAM, L.A. (1976): The role of bacteria in the nutrition of aquatic detrivores.- Oecologia 24:95-104

BARICA, J. and ARMSTRONG, F.A.J. (1971): Contribution by snow to the nutrient budget of some small northwest Ontario lakes.-Limnol.Oceanogr.16:891-899

BÄRLOCHER, F. and KENDRICK, B (1973): Fungi and food preferences of Gammarus pseudolimnaeus.- Arch. Hydrobiol. 72:501-516

- and KENDRICK, B. (1975): Assimilation efficiency of Gammarus pseudolimnaeus (Amphipoda) feeding on fungal mycelium or autumn-shed leaves.- Oikos 26:55-59

BERRIE, A.D. (1976): Detritus, microorganisms and animals in fresh water.- In: ANDERSON, J.M. and MaCFAYDEN, A. (eds.): The role of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes. The 17th Symp. Brit. Ecol. Soc. April 1975. Blackwell Scient. Publ. 1976

BRUGGER, A. (1979): Phosphor, seine Bedeutung in Gewässern und ein modifiziertes Verfahren zu seiner analytischen Bestimmung.- Jber.Abt.Limnol. Innsbruck 5:144-177

COWEN, W.F. (1974): Algal nutrient availability and limitation in Lake Ontario during IFYGL.- Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin-Madison (1974)

- and LEE, G.F. (1976): Phosphorus availability in particulate materials transported by urban runoff.- J. Water Poll. Control Fed. 48:580-591

CROSS, P.M. (1977): An attempt to estimate phosphorus retention in Bob Lake from iron retention and the iron: phosphorus ratio in the sediments.- Ph.Diss. Univ. of Toronto (1977): 1-121

DAVIS, S.F. and WINTERBOURN, M.J. (1977): Breakdown and colonization of Nothofagus leaves in a New Zealand stream.- Oikos 28:250-255

DIXON, K.R. (1976): Analysis of seasonal leaf fall in north temperate deciduous forests.- Oikos 27:300-306

DÖRRSTEIN, D. (1977): Sedimentation im Piburger See (Ötztal, Tirol).- Diss.Abt. Limnol. Innsbruck 9:1-118

GALLAGHER, J.L., PFEIFFER, W.J. and POMEROY, L.R. (1976): Leaching and microbial utilization of dissolved organic carbon from leaves of Spartina alterniflora.- Estuar. Coastal Marine Science 4:467-471

GASITH, A. and HASLER, A.D. (1976): Airborne litterfall as a source of organic matter in lakes.- Limnol. Ocean. 21:253-258

GATTERMAYR, W. (1976): Ökosystemstudie Piburger See. Meteorologie und Wasserhaushalt.- Jber. Abt. Limnol. 2:47-51

- (1977a): Ökosystemstudie Piburger See. Meteorologisch-hydrologisches Programm.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 3:57-76

GATTERMAYR, W. (1977b): Ökosystemstudie Piburger See. Wasserhaushalt.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 3:77-91

- (1978): Besitzt der Piburger See einen nennenswerten unterirdischen Abfluß?- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 4:15-23

- (1978): Das hydrographische Regime des Piburger Sees im Jahr 1977.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 5:29-33

GOLTERMAN, C.R. (1964): Mineralization of algae under sterile conditions or by bacterial breakdown.- Verh. Intern. Ver. Limnol. 15:544-548

GOMOLKA, R.E. (1975): An investigation of atmospheric phosphorus as a source of lake nutrient.- Ph. Diss. Univ. of Toronto (1975):1-167

GOODFELLOW, M. (1974): Actinomycetes.- In: DICKINSON, C.H. and PUGH, G.J.F. (1974): Biology of plant litter decomposition. Academic Press London

GYLLENBERG, H.G. and EKLUND, E. (1974): Bacteria.- In: DICKINSON, C.H. and PUGH, G.J.F. (1974): Biology of plant litter decomposition. Academic Press London

HAIMAYER, P. (1979): Der Piburger See (Ötztal) als Freizeitraum. Ein Beitrag zur Frage der Belastbarkeit touristischer Landschaften.- Innsbr. Geogr. Studien 6:183-208

HODKINSON, I.D. (1975): Dry weight loss and chemical changes in vascular plant litter of terrestrial origin, occuring in a beaver pond ecosystem.- J. Ecol. 63:131-142

IVERSEN, T.M. (1973): Decomposition of autumn-shed beech leaves in a springbrook and its significance for the fauna.- Arch. Hydrobiol. 72:305-312

JENSEN, V. (1974): Decomposition of angiosperm tree leaf litter.- In: DICKINSON, C.H. and PUGH, G.J.F. (1974): Biology of plant litter decomposition. Academic Press London

JONES, E.B.G (1974): Aquatic fungi: freshwater and marine. IN: DICKINSON, C.H. and PUGH, G.J.F. (1974): Biology of plant litter decomposition. Academic Press London

KAUSHIK, N.K. and HYNES, H.B.N (1968): Experimental study of autumn-shed leaves in aquatic environments.- J.Ecol. 56:229-243

- and HYNES, H.B.N. (1971): The fate of dead leaves that fall into streams.- Arch. Hydrobiol. 68:465-515

KORTMANN, R.W. (1980): Benthic and atmospheric contributions to the nutrient budgets of a soft-water lake.- Limnol. Oceanogr. 25:229-239

KOSTALOS, M. and SEYMOUR, R.L. (1976): Role of microbial enriched detritus in the nutrition of Gammarus minus (Amphipoda).- Oikos 27:512-516

KRAUSE, H. (1964): Zur Chemie und Biochemie der Zersetzung von Süßwasserorganismen unter besonderer Berücksichtigung des Abbaues der organischen Phosphorkomponenten.- Verh. Int. Ver. Limnol. 15:545-561

MASON, C.F. (1976): Relative importance of fungi and bacteria in the decomposition of Phragmites leaves.- Hydrobiologia 51:65-69

MATHEWS, C. and KOWALCZEWSKI, A. (1969): The disappearance of leaf litter and its contribution to production in the River Thames.- J. Ecol. 57:543-552

McCONNELL, W.J. (1968): Limnological effects of organic extracts of litter in a southwestern impoundment.- Limnol. Oceanogr. 13:343-349

MEYER, J.L. (1980): Dynamics of phosphorus and organic matter during leaf decomposition in a forest stream. - Oikos 34:44-53

MILLAR, C.S. (1974): Decomposition of coniferous leaf litter.- IN: DICKINSON, C.H. and PUGH, G.J.F. (1974): Biology of plant litter decomposition. Academic Press London

NYKVIST, N. (1959a): Leaching and decomposition of litter I. Experiments on leaf litter of Fraxinus excelsior.- Oikos 10:190-211

- (1959b): II. Experiments on needle litter of Pinus silvestris.- Oikos 10:212-224

- (1961a): III. Experiments on leaf litter of Betula verrucosa.- Oikos 12:249-263

- (1961b): IV. Experiments on needle litter of Picea abies.- Oikos 12:264-279

- (1962): V. Experiments on leaf litter of Alnus glutinosa, Fagus silvatica and Quercus robur.- Oikos 13:232-248

OHLE, W. (1965): Nährstoffanreicherung der Gewässer durch Düngemittel und Meliorationen.- Münchner Beiträge 12:54-83

PECHLANER, R. (1968): Beschleunigte Eutrophierung im Piburger See, Tirol.- Ber. nat.-med. Ver. Innsbruck 56:143-161

- (1971): Die Restaurierung des Piburger Sees. - Carinthia II, Sonderh. 31 (Festschrift Findenegg): 97-115

PECHLANER, R. (1979): Response of the eutrophied Piburger See to reduced external loading and removal of monimolimnic water.- Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 13:293-305

- und PSENNER, R. (1979): Fallstudie Piburger See zur Frage der Bedeutung der Nährstoffabschwemmung aus land- und forstwirtschaftlich genutzten Einzugsbereichen für die Seen-Eutrophierung.- Wasserwirtschaft Wasservorsorge (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft), Forschungsarbeiten, 1-108

PETERSEN, R.C. and CUMMINS, K.W. (1974): Leaf processing in a woodland stream. - Freshwat. Biol. 4:343-368

PIECZYNSKA, E. (1972): Production and decomposition in the eulittoral zone of lakes. - In: KAJAK, Z. and HILLBRICHT-ILKOWSKA, A. (1972): Productivity problems of freshwaters. Warszawa Krakow: 271-285

PSENNER, R. (1978): Der Einfluß des Empneustons auf den Nährstoffgehalt des Piburger Sees.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 4:46-52

- (1979): Nährstoffeintrag in den Piburger See in Form von Empneuston.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 5:47-55

- (1980): Nährstoffeintrag in den Piburger See durch die Luft und durch Niederschläge.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 6:47-48

RAU, G.H. (1976): Dispersal of terrestrial plant material into a subalpine lake.- Oikos 27:153-160

- (1977): Conifer needle processing in a subalpine lake.- Limnol. Oceanogr. 22:356-358

REIMER, H. (1954): Untersuchungen über die Wirkung des herbstlichen Laubfalles auf die produktionsbiologischen Faktoren in einem fischereilich genutzten Gewässer.- Ph. Diss. Univ. Hamburg:1-91

RIGLER, F.H. (1974): Phosphorus cycling in lakes, Appendix to: RUTTNER, F. (1974): Fundamentals of Limnology.- Univ. of Toronto Press, Toronto:307
Zit. in GOMOLKA (1975)

ROTT, E. (1979): Bestand und Produktion des Phytoplanktons 1978/79 sowie Übersicht über die Strahlungstransmission 1975 - 1979 im Piburger See.- Jber. Abt. Limnol. Innsbruck 6:61-68

SHORT, R.A. and WARD, J.V. (1980): Leaf litter processing in a regulated Rocky Mountain stream.- Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37:123-127

SUBERKROPP, K.F. and KLUG, M.J. (1974): Decomposition of deciduous leaf litter in a woodland stream I. A scanning electron microscopic study.- Microbial Ecology 1:96-103

- and KLUG, M.J. (1976): Fungi and bacteria associated with leaves during processing in a woodland stream.- Ecology 57:707-719

SZCZEPANSKI, A. (1965): Deciduous leaves as a source of organic matter in lakes.- Bull. Acad. Pol. Sci. Cl. II. Ser. Sci. biol. 13:215-217

THOMAS, N.A., ROBERTSON, A. and SONZOGNI, W.C. (1980): Review of control objectives: New target loads and input controls.- In: LOEHR, R.C., MARTIN, C.S. and RAST, W. (1980): Phosphorus management strategies for lakes.- Ann Arbor Science, Michigan

VIJAYALAKSHMI, K. and PANDALAI, K.M. (1962): Nutrient enrichment of the coconut soils of the humid Kerala coast through monson precipitation.- Nature 194:112
Zit. in GOMOLKA (1975)

VISSER, S. and WHITTAKER, J.B. (1977): Feeding preferences for certain litter fungi by Onychiurus subtenuis (Collembola).- Oikos 29:320-325

VOGLER, P. (1965): Probleme der Phosphoranalytik in der Limnologie und ein neues Verfahren zur Bestimmung von gelöstem Orthophosphat neben kondensierten Phosphaten und organischen Phosphorsäureestern.- Int. Rev. Ges. Hydrobiol. 50:33-48

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.- Technical Rep. DAS/CSI/OECD Paris:1-159

WETZEL, R.G. (1975): Limnology.- Saunders (Philadelphia), 1-743

- and MANNY, B.A. (1972): Decomposition of dissolved organic carbon and nitrogen compounds from leaves in an experimental hard-water stream.- Limnol. Oceanogr. 17:927-931

WILLOUGHBY, L.G. (1974): Decomposition of litter in freshwater.- In: DICKINSON, C.H. and PUGH, G.J.F. (1974): Biology of plant litter decomposition. Academic Press London

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Jahresbericht der Abteilung für Limnologie am Institut für Zoologie der Universität Innsbruck

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: 1980

Autor(en)/Author(s): Psenner Roland

Artikel/Article: Atmosphärischer Eintrag von C, N und P in den Piburger See 79-121