

A. Hamm: Herkunft und Rolle des Phosphors als wesentlicher Eutrophierungsfaktor von Seen;  
besprochen an einigen Beispielen bayerischer Seen

1. Einleitung

Daß Phosphor der entscheidende Eutrophierungsfaktor von Seen ist, braucht heute nicht mehr besonders betont zu werden. Die Fragen für die praxisbezogene Wasserforschung als auch für die wassergütewirtschaftlichen Maßnahmen zur Verhinderung der Seeneutrophierung beziehen sich vor allem auf die Differenzierung der Herkunft der Phosphorbelastung und auf die spezifische Rolle des Phosphors im Stoffhaushalt eines Sees. Die Erforschung dieser Fragen hat dabei den, wie ich meine, richtigen Weg von zunächst immer besser werdender meßtechnischer Erfassung über Bilanzierungen schließlich zu modellhaften Vorstellungen genommen.

Wir sind heute bereits in der Lage - auch wenn noch manche Fragen offen sind - auf gut gesicherter Grundlage rechnerische und modellhafte Vorstellungen über die Seeneutrophierung in die Zielvorstellungen und die Praxis des Gewässerschutzes an Seen einzubringen. Ich möchte diesen Vortrag dazu benutzen, die zeitliche Entwicklung dieser Arbeiten an unserem Hause von den ersten Anfängen an zu schildern bis hin zu den Ausblicken, in welche Richtung weitere dbzgl. praxisbezogene Grundlagenforschung unserer Meinung nach gehen sollte. Dabei ergibt sich zwangsläufig, daß dies an einigen Beispielen bayerischer Seen geschieht, so daß Sie dann zusammen mit den weiteren Referaten dieser Tagung auch ein Bild über die aktuellen Probleme an bayerischen Seen, so hoffe ich, gewinnen können.

## 2. Simssee

Die ersten Anfänge der Arbeiten zur Frage der Herkunft und Bedeutung der Nährstoffe bei oberbayerischen Seen sind eng mit unserem Tagungsort verbunden, denn die erste Nährstoffbelastungsuntersuchung von Seen in Bayern überhaupt, veranlaßt seinerzeit durch das Landratsamt Rosenheim, waren Untersuchungen am Simssee im Jahre 1969, der eine besorgniserregende Eutrophierungsentwicklung aufwies. Vorher waren lediglich orientierende Untersuchungen über die Nährstoffgehalte verschiedener oberbayerischer Seen durchgeführt worden, die bei LIEBMANN und HAMM (1) publiziert sind. Beim Simssee wurden an den wichtigen Stellen der Zuflüsse Hilfspegel durch das Wasserwirtschaftsamt Rosenheim errichtet und monatlich eine Stichprobe gezogen. Aus diesen, insgesamt nur 12 Werten der einjährigen Untersuchung wurde über die momentane Nährstofffracht in mg/sec auf die Jahresfracht hochgerechnet (2).

Heute wissen wir, daß eine solche Meßdichte in keiner Weise ausreicht, um genauere Auskünfte über die Nährstofffracht in einem Zufluß und den Austrag aus seinem Einzugsgebiet zu erhalten. Dennoch wurde damals sicherlich die Größenordnung der Belastung als auch die der Anteile aus den Hauptquellen - nämlich Abwasser und diffuse Belastung - soweit richtig erfaßt. Die Abwässer aus Endorf bildeten den entscheidenden Anteil an der Phosphorzufuhr zum Simssee. Eine gewässer-schutztechnische Studie des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft hat dann die praktische Verwirklichung der Sanierung des Simssees mit einer Abwasserfernhaltung über eine Sammelkanalisation und gemeinsamen Kläranlage mit Einleitung der gereinigten Abwässer in den Inn in die Wege geleitet.

### 3. Tegernsee und Schliersee

Die nächsten Arbeiten der BayLWF über die Nährstoffbelastung von Seen betrafen Tegernsee und Schliersee. Es wurde ein zweijähriges Forschungsvorhaben zur Ermittlung der Nährstoffbilanz der beiden Seen nach der Abwasserfernhaltung in den hydrologischen Jahren 1973 und 1974 durchgeführt, das seitens des Bay. Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen gefördert wurde (3). Gleichzeitig konnte damit ein Beitrag über die Stoffausträge von Seezuflüssen im bayerischen Alpen- und Voralpenland geliefert werden. Bei dieser Arbeit war es schon klar, daß eine monatliche Probenahme an den Seezuflüssen nicht ausreichen kann, genauere Frachtwerte zu liefern. Eine Verdichtung der Probenahme war erforderlich. Gewählt wurde ein 13tägiger Abstand, um auch einen Wechsel der Wochentage zu erreichen.

Bei diesen Untersuchungen zeigte es sich, daß bei solchen überwiegend aus diffusen Nährstoffquellen gespeisten Seezuflüssen die Nährstofffracht ganz wesentlich vom jahreszeitlichen Ablauf, den Niederschlags- und Abflußverhältnissen u.a. externen Faktoren beeinflusst wird. So ergab sich beispielsweise, daß beim Tegernsee ein einziges Starkregenereignis in zwei Tagen im Juni 1973 etwa 10 % der Jahres-P-Fracht in den See gespült hat. Deshalb wurde auch bei o.a. Arbeit besonderer Wert auf die Analyse der Fehler der Frachtermittlungen gelegt.

Beispielsweise wurde untersucht, ob bei dem gewählten Untersuchungsrythmus eine weitgehende Deckungsgleichheit in dem 2-Jahres-Zeitraum zwischen Niederschlagsverhältnissen und Verteilung der Probenahmetage gegeben ist. Diesen Vergleich zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Verteilung der Probeentnahmetage in den hydrologischen Jahren 1973 und 1974 nach den Niederschlagsverhältnissen - Niederschlagsmeßstelle Rottach-Egern (aus HAMM (3))

	Gesamtzahl Tage v.1.11.72 bis 31.10.1974 = 730 Tage davon	Verteilung d. Probeentnahme- tage 54 Tage = 7,4 % d. Gesamt-Tage davon	Verteilung d. Probeentnahme- tage unter zu- sätzl. Berück- sichtigung der Niederschläge am Vortag
niederschlags- freie Tage (< 1mm)	401 = 54,9 %	35 = 64,8 %	27 = 50,0 %
Regentage *) (> 1mm)	269 = 36,8 %	17 = 31,5 %	25 = 46,3 %
Regentage *) (> 10mm)	118 = 16,2 %	8 = 14,8 %	10 = 18,5 %
Regentage *) (> 20mm)	44 = 6,0 %	3 = 5,6 %	5 = 9,2 %
Regentage *) (> 30mm)	0 = 0 %	0 = 0 %	2 = 3,7 %
Regentage *) (> 50mm)	5 = 0,7 %	0 = 0 %	1 = 1,8 %
Schneefall	60 = 8,2 %	2 = 3,7 %	2 = 3,7 %

\*) inklusive Schnee-Regen

Anmerkung: Bei alleiniger Berücksichtigung des Untersuchungstages ist eine gewisse Unterrepräsentanz von Niederschlagstagen gegeben, insbesondere fallen Tage mit Starkniederschlägen ganz aus. Bezieht man in Anbetracht der Niederschlagsmessung von 7 - 7<sup>30</sup> und des verzögerten Abflusses jedoch den jeweiligen Vortag in die Überlegungen mit ein, so ergibt sich ein Übergewicht der Niederschlagstage. Insbesondere lagen einige Spitzenniederschläge am jeweiligen Vortag der Probeentnahme. Im großen und ganzen entspricht daher die Verteilung der Probeentnahmetage gut der Gesamtverteilung der Niederschlagsereignisse im Untersuchungszeitraum. Lediglich die Schneefalltage sind generell unterrepräsentiert.

Somit war eine entsprechende Verteilung der Probenahmetage zwar im Mittel gegeben, jedoch ist ein Starkniederschlag in Bezug auf die Nährstoffabschwemmung z.B. im Herbst ganz anders zu beurteilen als im Frühsommer. Verschiedene repräsentative Ereignisse dieser Art (Schneesmelzhochwässer, sommerliche Starkregenereignisse; herbstliche Abschwemmung bei Zusammenbruch der Vegetationsdecke) wurden damals bereits versucht in Hinblick auf die Nährstoffausträge aus den Einzugsgebieten, als auch Nährstoffbelastung der Seen detailliert zu analysieren, doch konnten dies bislang nur Ansätze bleiben.

Ferner wurden Vergleichsberechnungen über verschiedene Methoden der Frachtermittlungen durchgeführt. Mittlerweile war eine umfangreiche Arbeit an den Meßergebnissen an Mittelgebirgsbachzuflüssen zur Wahnbachtalsperre von TREUNERT et. al. (4) erschienen. Bei Probenahmeabständen von 14 - 21 Tagen ergibt sich ein Fehler bei den Jahresfrachten von  $\pm 20$  %. Von entscheidendem Einfluß für die Genauigkeit der Frachtberechnungen ist dabei die Abflußermittlung. Bei den Tegernsee/Schliersee-Zuflüssen wurden die Abflüsse der nicht mit Pegelanlagen versehenen Bäche durch Berechnungen aus dem Wasserhaushalt des Sees ermittelt, da jeweils am Seeabfluß - beim Tegernsee zusätzlich auch noch bei den beiden Hauptzuflüssen - Pegelstellen eingerichtet waren. Vorgenannte Fehlerangaben beziehen sich auf eine kontinuierliche Mengenmessung. Ein solches Rechenverfahren war möglich, da diese Bäche aus einem geologisch relativ gleichförmigen Gebiet kamen.

Beispielsweise ergaben sich Abweichungen in den Jahresfrachten bei den Tegernsee- und Schlierseezuflüssen, wenn man eine monatliche Probenahme heranzog, verglichen mit dem vorgenannten Untersuchungsrythmus, in der Größenordnung von  $\pm 23$  - 55 %. Dabei waren die Unterschiede im hydrologischen Jahr 1973 mit erheblichen Abfluß- und Frachtschwankungen viel größer als im hydrologisch ausgeglichenen Jahr 1974. Man er-

kennt, daß diese Abweichungen also erheblich sind und feinere Differenzierungen bei Austragsmessungen schwer damit herausgearbeitet werden können. Eine weitere Verdichtung der Probeentnahme ist somit der einzige Weg, um diesen Schwierigkeiten zu entgehen.

Dennoch überraschte immer wieder der Grad der Übereinstimmung der Schätzung bzw. größenordnungsmäßigen Berechnung und orientierender Messung von Nährstofffrachten mit den dann durch umfangreiche Untersuchungsprogramme gefundenen Werten. Beispielsweise wurde die Tegernseebelastung vor der hier geschilderten Untersuchung schon einmal aufgrund von nur 1/4-jährlichen Probeentnahmen an den Zuflüssen abgeschätzt (BERNHARDT, et al. (5)) mit folgenden Ergebnissen (Tab. 2).

Tab. 2:

Orientierende Untersuchung und genaue Messung der Nährstoffzufuhr zum Tegernsee und Schliersee (BERNHARDT, et al. (5) und HAMM (4))

Werte in t/a

	Tegernsee		Schliersee	
	Ges.P	min.N	Ges.P	min.N
nach orientierenden Untersuchungen 1970	9,2	92,8	0,8	11,5
Messung 1973	9,6	125,0	1,15	13,8
Messung 1974	4,8	114,0	1,32	15,5
Abwasser (zum Seeabfluß abgeleitet)				
orientierend 1970	47,4	189,7	-	-
Messung 1974	45,0	-	-	-

Die unterschiedliche Belastung in den beiden Meßjahren 1973 und 1974 konnte auf die sehr unterschiedliche Niederschlags- und Abflußverteilung zurückgeführt werden.

Aufgrund des Vergleiches anthropogen beeinflusster und anthropogen nicht beeinflusster Seezuflüsse, die hier aus einem geologisch relativ einheitlichen Gebiet, nämlich entweder Hauptdolomit (Weißbach, Rottach) oder Flysch kommen, wurden Grundfrachtwerte und anthropogen bedingte flächenbezogene Austragswerte ermittelt, die im folgenden generalisierend wiedergegeben sind (Tabelle 3). Unter diff. Ortsbelastung werden dabei verstanden: Anschwemmungen aus befestigten Flächen incl. landwirtschaftlicher Anteile, z.B. Mistgrubenabläufe; ferner diffuse Abwassereinflüsse, Düngerabschwemmungen, Straßenabrieb usw.; also all das, was aus einem besiedelten Gebiet, auch wenn das Abwasser abgetrennt ist, noch zivilisatorisch bedingt an Nährstoffen ins Gewässer gelangt.

Tab. 3: Flächenbezogene Phosphorausträge bei den Tegernsee/Schliersee-Zuflüssen (aus HAMM (4)) - Werte kg/ha,a

	Ges. P (gelöst)	Ges. P
Kalkalpin (Rottach, Weißbach, Söllbach)	0,15	0,23
Flysch (Wald) (Langenbach, Leitnergraben)	0,18	0,25
kleine Bäche aus Flysch mit diff. Ortsbelastung	0,48	0,65

Insgesamt ergab sich für diese beiden Seen mit einer Abwasserfernhaltung, also einer höchstmöglichen Entlastung, folgende Aufteilung der Quellen der Nährstoffbelastung:

Tegernsee	1973	1974
"Grundlast"	52 %	76 %
diffuse Ortsbelastung	(42 %)	11 %
Niederschlag auf die Seeoberfläche	6 %	13 %

---

#### Schliersee

"Grundlast"	44 - 54 %
diffuse Ortsbelastung	24 - 26 %
Abwasserbelastung aus Fischhausen	12 - 18 %
Niederschlag auf die Seeoberfläche	12 %

Der hohe Anteil 1973 an "diffuser Ortsbelastung" war z.T. auch durch Murenabgänge und Trübstoffabschwemmungen durch Wasserbaumaßnahmen bedingt.

Bezüglich der Nährstoffbilanzierung wurde bei den Tegernsee/Schlierseeuntersuchungen deutlich, daß der Stoffhaushalt unserer voralpinen Seen mit relativ großem Einzugsgebiet in viel stärkerem Maß allochthon beeinflußt wird, als vermutet. Es wurden Monatsbilanzen über die Gesamtzufuhr und den Abfluß aus dem See an Phosphor- und Stickstoffverbindungen aufgestellt (Abb. 1 und 2 (aus HAMM (6))). Sie zeigen einmal den gewaltigen Anstieg der P-Fracht mit der Schneeschmelze und den Frühsommer-Starkniederschlägen parallel zu den Abflußspitzen, die Retention im Sommer, aber auch, daß zeitweise mehr Nährstoffe aus dem See abfließen, als ihm gleichzeitig zukommen; z.B. im Herbst bei Einsatz der Volldurchmischung des Sees. Die Genauigkeit dieser Bilanzen und ihre Aussage-

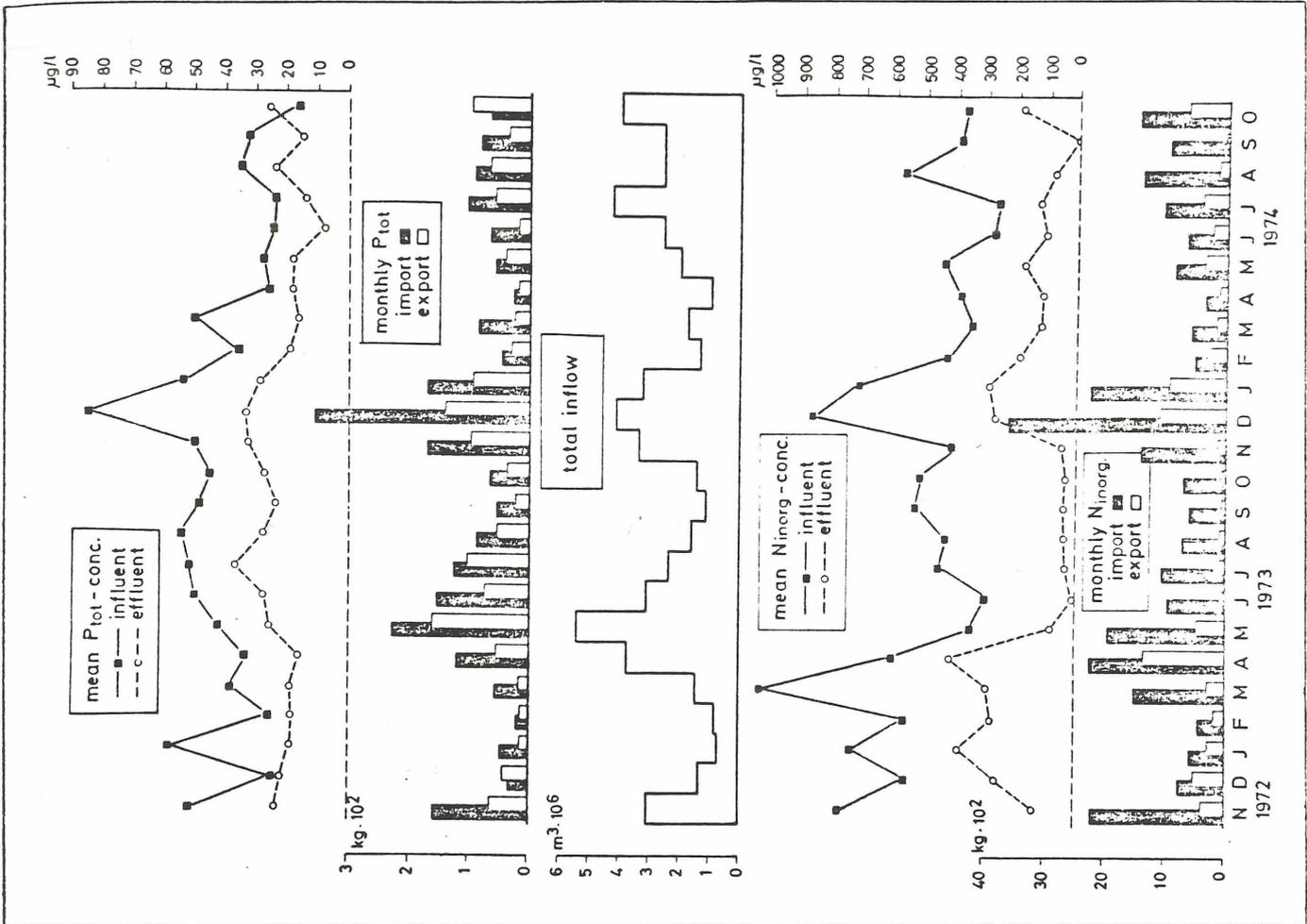


Abb.2: Nährstoffbilanz Schliersee  
(aus (6))

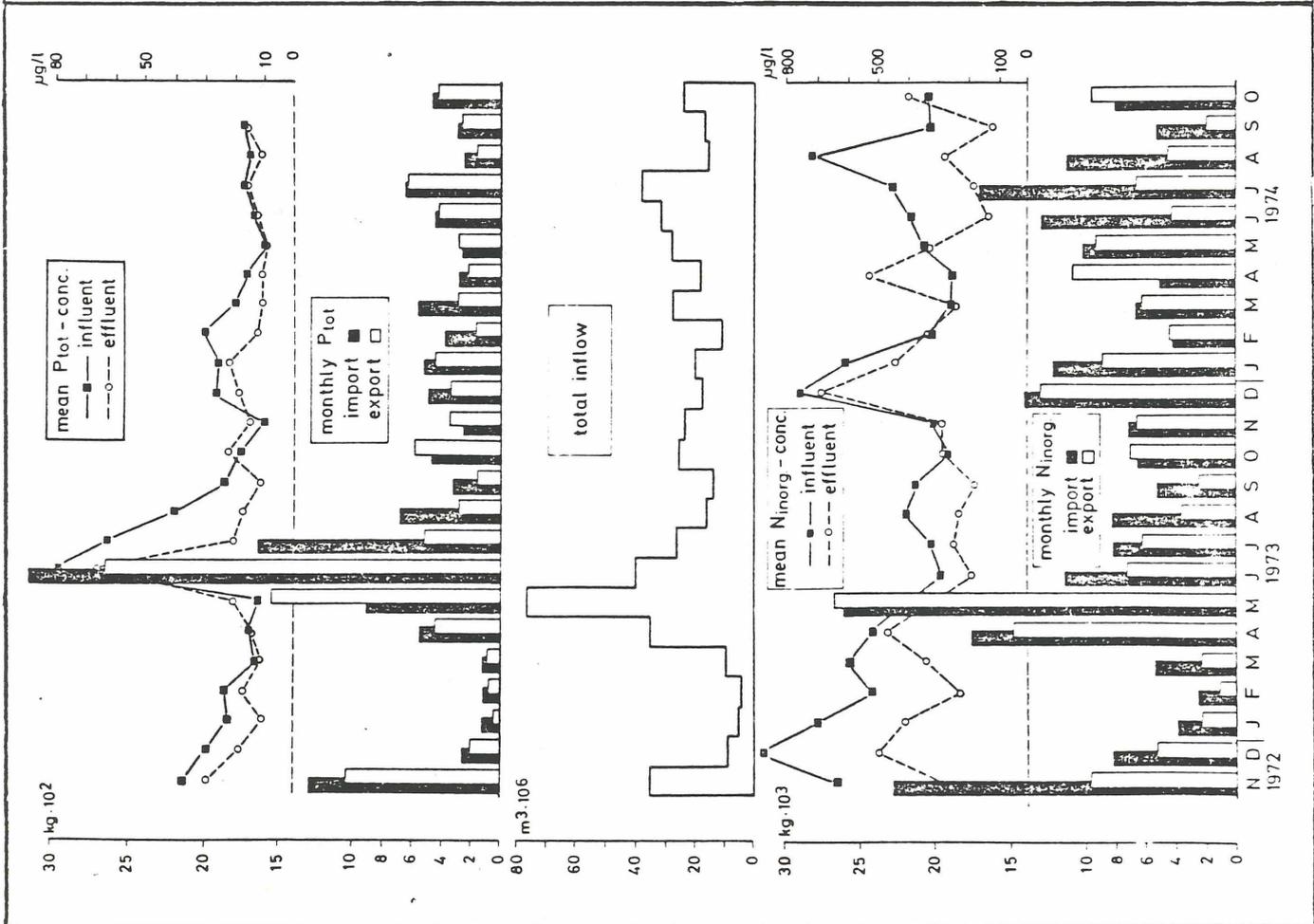
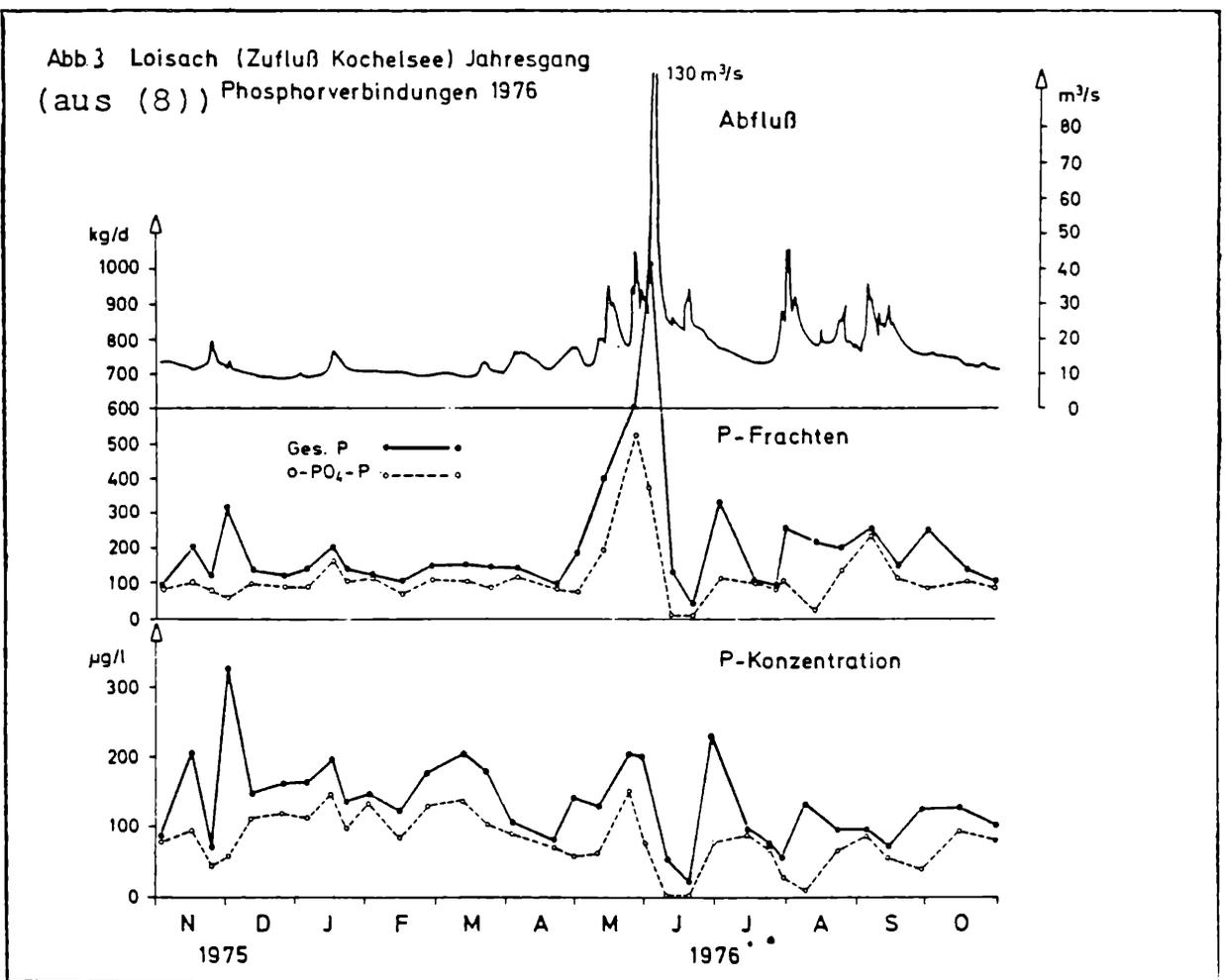


Abb.1: Nährstoffbilanz Tegernsee  
(aus (6))

kraft auch hinsichtlich z.B. der Frage nach der Größe der Remobilisierung von Nährstoffen aus dem Sediment, steht und fällt aber natürlich mit der Genauigkeit der Frachtermittlungen. Beim Vergleich der Differenzen von Phosphoreintrag und -austrag aus dem See, die als Seeretention zu bezeichnen ist, mit den gleichzeitigen Stoffbilanzen aus den Sedimentationsmessungen ergaben sich z. B. Unterschiede, die nicht größer als der Fehler der Frachtermittlungen waren. Daher war es nicht möglich, auf die Höhe der Remobilisierung von Nährstoffen aus dem Sediment, die beim Schliersee als wesentlichste Ursache der verzögerten Gewässergüteverbesserung nach Abwasserfernhaltung angesehen wurde, zu schließen.



#### 4. Kochelsee

Im Zusammenhang mit Beiträgen für die wasserwirtschaftliche Rahmenplanung Isar folgte 1976 eine Untersuchung der BayLWF am Kochelsee. Auch bei diesem Untersuchungsprogramm - mit dem Ziel einer Gesamterfassung der Limnologie dieses Sees - möchte ich hier nur auf die Frage der Herkunft der Nährstoffe und die Nährstoffbilanz im See eingehen. Der Kochelsee ist der am stärksten durchströmte natürliche See Bayerns, wobei Loisach und Walchenseeabfluß sich in der Wassermenge etwa zur Hälfte teilen. Der Zufluß der übrigen kleinen Bäche liegt nur bei rd. 5 % vom Gesamtzufluß.

Die Nährstoffbelastung des Sees wurde wieder durch Stichprobeentnahmen in 13tägigem Abstand, mit Zwischenprobeentnahmen bei besonderen Abflußereignissen, untersucht. Die Loisach bringt die Hauptphosphorfracht, wobei rd. 80 % auf Abwasser-P entfallen. Abb. 3 zeigt, wie z. B. die Phosphorfrachten in der Loisach bei Mündung in den See mit dem Anstieg der Wasserführung bei Schneeschmelze und Hochwasser ansteigen. Besonders beachtenswert ist aber auch der Konzentrations- und Frachtabfall im Anschluß an das Juni-Hochwasser, der in die damals außergewöhnlich lange Schönwetterphase fiel. Die Ursache lag wahrscheinlich in der nun sehr intensiven Bindung der Pflanzennährstoffe im Aufwuchs des Flußbettes.

Man erkennt somit, daß der Phosphoreintrag eines Gewässers ein dynamischer Prozess ist und dementsprechend die P-Belastung des Sees ebenfalls keine im Jahresablauf konstante Größe darstellt. Ähnlich wie bei Tegernsee und Schliersee wurde nun auch beim Kochelsee eine Nährstoffbilanzierung aufgrund von Monatsfrachtwerten durchgeführt (Abb. 4). Während in den Wintermonaten die monatlichen Zu- und Abflußfrachten nahezu identisch sind, steigt die Retention im Frühjahr mit der Entwicklung der Biomasse im See stark an.

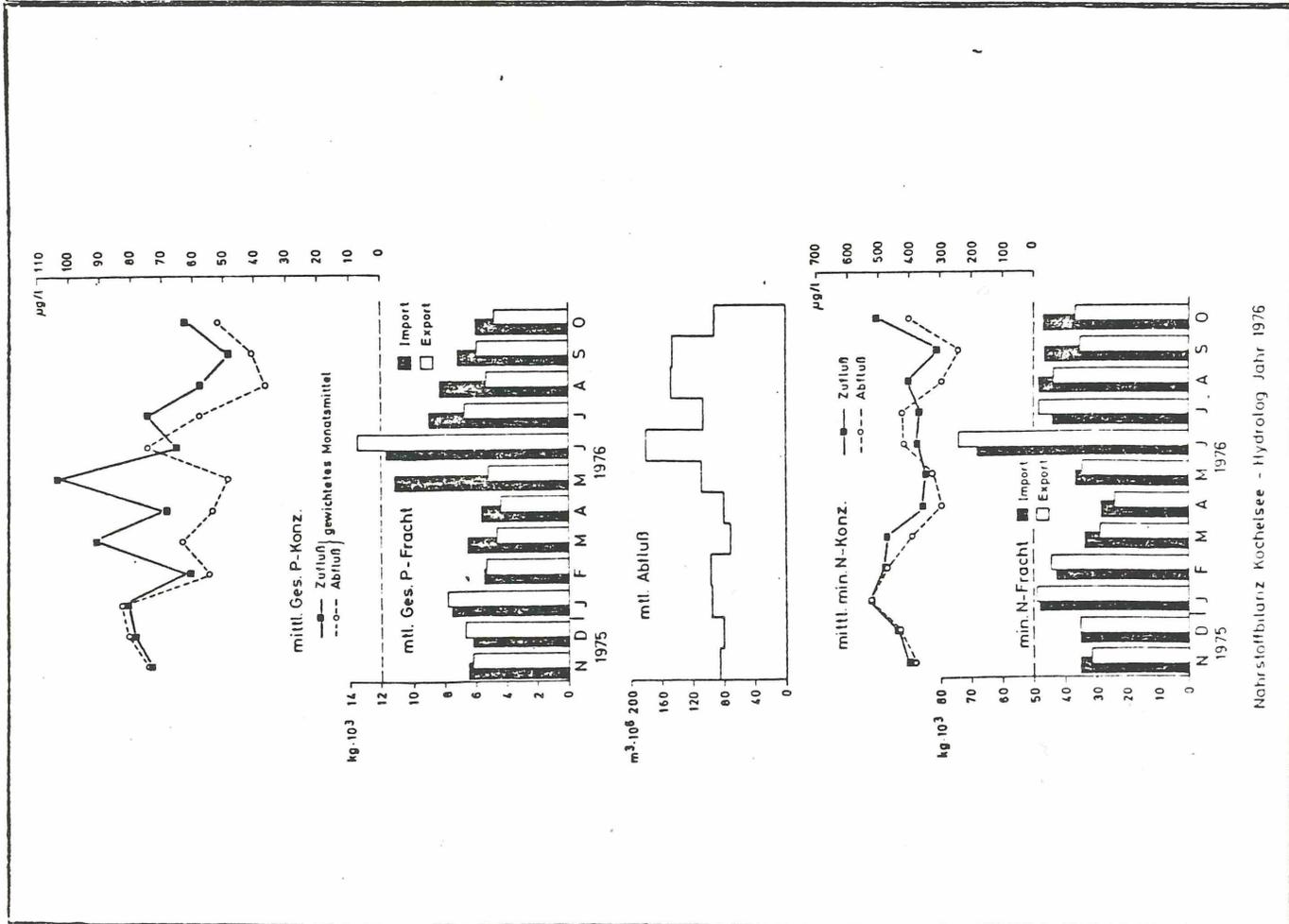


Abb.4: (aus (8))

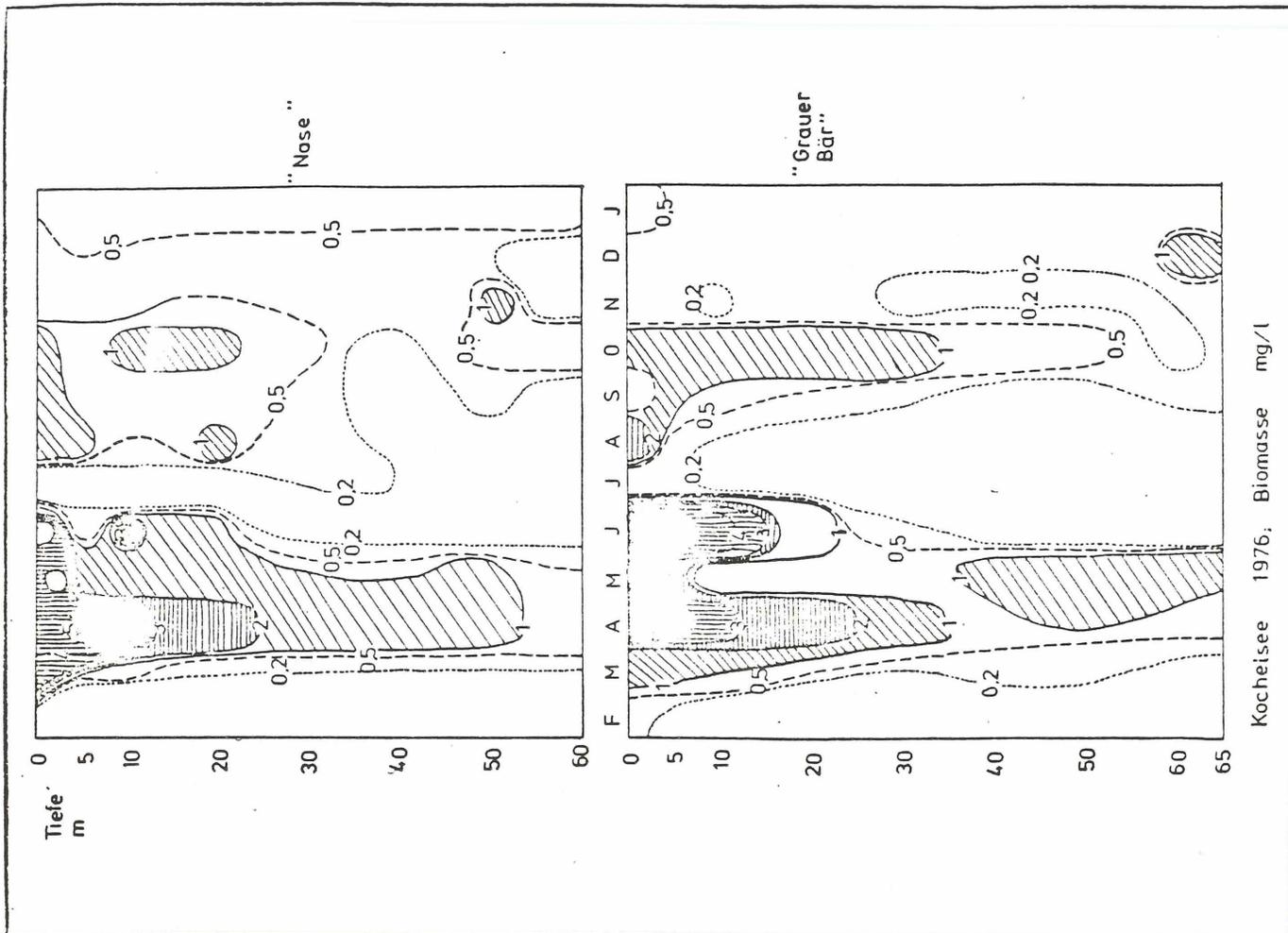


Abb.5: (aus (8))

Im Juli, nach dem Hochwasser, erhöhte sich beispielsweise jedoch wieder die Ges.P-Fracht im Abfluß und überstieg den gleichzeitigen Zuflußwert. Die erhöhte Wasserführung unserer Alpenflüsse im Sommer führt zu einer Auswaschung der Biomasse im See (wobei gleichzeitig auch wahrscheinlich die Freßtätigkeit des Zooplanktons eine wichtige Rolle spielt, evtl. auch ein Mitreißen des Planktons bei der Nährstoff-sedimentation).

Wie sehr die Biomassenentfaltung in einem solchen See variiert, macht Abb. 5 deutlich. Nach einem außerordentlich hohen Frühjahrsmaximum, hervorgerufen vor allem durch *Asterionella formosa* und verschiedenen *Cyclotella*-Arten, kam es im Sommer zu einem völligen Zusammenbruch des Phytoplanktons mit einem Aufklaren des Wassers, bei dem z.B. im Jahre 1976 am Kochelsee eine Sichttiefenänderung von 1,50 m im Juni auf 11 m im Juli erfolgte. Solche Vorgänge können wir auch an anderen voralpinen Seen regelmäßig beobachten. Sie wurden kürzlich auch von LAMPERT und SCHÖBER (7) am Bodensee eingehend limnologisch bearbeitet.

Bei einem derartig instabilen, in seinem Stoffhaushalt in stetem Wechsel begriffenen See, reicht auch der bisher verwendete Untersuchungsrythmus für eine differenzierte Betrachtung des Geschehens nicht aus. Notwendig ist hier die Schaffung entsprechender Einrichtungen lückenloser Stoffmessungen und eine besonders enge Verbindung der Hydrologie und Hydro-mechanik mit den Stoffhaushaltsuntersuchungen. Dieser Verbund ist nun im Sonderforschungsbereich 81, Teilprojekt A 5, "Erfassung der Strömungsverhältnisse und des Stoffhaushaltes eines stark durchströmten voralpinen Sees" gefunden worden, wobei diese Arbeiten nun ebenfalls am Kochelsee weitergeführt werden (8). Sie bilden das gegenwärtig größte Seenforschungsprogramm an unserer Anstalt, zusammen mit dem Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München und anderen beteiligten Institutionen.

Ziel ist die Gewässermodellierung am Beispiel des stark durchströmten Voralpensees. Dieser ist in unserem Nordalpenbereich ja der verbreitetste Seentyp.

## 5. Berechnung der Nährstoffbelastung von Seen

Parallel zu den Bestrebungen, Verbesserungen der Messung der Nährstoffbelastung und Nährstoffbilanzierung von Seen methodisch zu erreichen, ist es aber auch nötig, die Möglichkeiten zu verbessern, Nährstoffberechnungen durchzuführen. Es ist bei der Kapazität der staatlichen Dienststellen völlig ausgeschlossen, bei den zahlreichen Seen, die wir in Bayern haben, auf Jahre hinaus die Nährstoffbelastungen meßtechnisch zu erfassen. Aus den vorangegangenen Ausführungen haben Sie gesehen, welcher großer Aufwand hinsichtlich der Feldarbeit als auch der Laborarbeiten nötig ist, um solche Messungen durchzuführen. Auch um langfristige Entwicklungen an Seen verfolgen zu können, muß man nach Möglichkeiten suchen, mit relativ einfachen Mitteln die Nährstoffbelastung rechnerisch mit vertretbaren Fehlerbreiten zu erfassen.

Es gibt zwei Wege, die Belastung von Seen zu berechnen:

- a) Verwendung flächenbezogener, spezifischer Austragswerte und einwohnerspezifischer Lastwerte;
- b) Ermittlung der Stoffbelastung aus input-output-Seemodellrechnungen.

## 5.1 Phosphorbilanz des Bundesgebietes

Ein Forschungsauftrag des Bundesminister des Innern und Bundesminister für Forschung und Technologie an den Hauptausschuß Phosphate und Wasser in der Fachgruppe Wasserchemie der GdCH, eine sog. Phosphorstudie des Bundesgebietes zu erstellen, ergab Gelegenheit, all das zusammenzutragen, was hinsichtlich der Phosphorbilanzierung von Bedeutung war. Ein Gesamt-Phosphor-Modell der Bundesrepublik Deutschland konnte erstellt werden. Das Modell ergab beispielsweise, daß der wichtigste Weg des Phosphorkreislaufes von den Rohphosphaten und Phosphorsäure mit den Düngemitteln zum Boden verläuft, von dort über die Futterpflanzen zum Tier und als wirtschaftseigener Dünger wieder zurück auf den Boden. Ein Teil davon geht über die Nahrung zum Menschen und damit ins Abwasser (fäkales Phosphat). Ein anderer wichtiger Weg läuft über die Waschmittel zu Mensch und Haushalt und ebenfalls ins Abwasser. Im Bundesdurchschnitt wurden im Bezugsjahr 1975 vom Menschen 1,9 g P/d an fäkalem Phosphat und 3,0 g P/d an Waschmittel-P abgegeben. Dabei ist allerdings zu sagen, daß in den letzten Jahren nach einem erheblichen Anstieg bis etwa 1975 der Waschmittelanteil stagniert oder sogar leicht rückläufig ist. Auch haben wir in Bayern bei unseren Bilanzen stets weniger, nämlich etwa 2,1 g P/d aus Waschmitteln, insgesamt also rd. 4 g P/EW, d gerechnet, weil sonst Berechnungen und Messungen bei weitem nicht aufgehen. Regionale Unterschiede im Waschmittelverbrauch spielen hier eine Rolle; genauere Zahlen dazu gibt es jedoch nicht.

Bekanntlich ist vorgesehen, den Waschmittel-Phosphor durch eine gesetzliche Phosphathöchstmengeverordnung im Waschmittelgesetz durch Einsatz von Ersatzstoffen zu verringern, wobei in der 2. Stufe sich etwa eine Verminderung des Waschmittel-P um 45 % ergeben kann.

Das Teilsystem "Gewässer" für das Bundesgebiet zeigt Abb. 6. Hier sind die einzelnen Quellen der Phosphorzufuhr mengenmäßig dargestellt. Eigentliche, anthropogen völlig unbeeinflusste Grundfracht im ganz strengen Sinne sind lediglich Grundwasser, Streuanfall und ein Teil des Regenwassers, das oberflächlich in die Gewässer gelangt. Man erkennt, daß diese Grundfrachtanteile außerordentlich gering sind. Dränung, Erosion, oberflächlicher Abfluß von Regenwasser durch zunehmende Versiegelung der Erdoberfläche, vor allem auch die Erosion (Flächenerosion) in Ackerbaugebieten, die Abschwemmung tierischer Ausscheidungen und sonstige direkte Einträge in die Gewässer sind anthropogen bedingt. Auch ist ein erheblicher Teil der Phosphorbelastung aus Niederschlag anthropogen bedingt. Die vorgenannten Quellen zusammen werden als diffuse Quellen bezeichnet. Den absoluten Hauptteil, global für die Gewässer des Bundesgebietes gesehen, bildet allerdings der Abwasser-Phosphor über Kanalisation und Kläranlagen.

## 5.2 Regionalbilanzen von Seeinzugsgebieten

Diese Gesamtbilanz der Phosphorbelastung des Bundesgebietes sagt aber für die regionalen Eutrophierungsprobleme wenig aus. Bei verschiedenen Einzugsgebieten können sich die jeweiligen Anteile in jede Richtung verschieben. Einem ursprünglichen See, wie z.B. dem Rachelsee im Bayerischen Wald, werden praktisch nur durch Niederschlag auf die Seeoberfläche, Grundwasser, oberflächennaher Abfluß und Streuanfall Nährstoffe zugeführt. Am anderen Ende steht z. B. der Speichersee bei München, bei dem Abwasser nahezu die einzige Phosphorquelle ist. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Anteile der Phosphorbelastung aus Abwasser und diffusen Quellen an verschiedenen bayerischen Seen, wie sie sich aus einem, Ende 1978 fertiggestellten Bericht an den bayerischen Landtag (10), gefertigt gemeinsam von den drei in Bayern mit

dieser Thematik befaßten Dienststellen (Landesamt für Wasserwirtschaft, Landesamt für Bodenkultur und Pflanzenbau und Landesanstalt für Wasserforschung) ergibt. Damit ist auch in etwa das abgeschlossene Untersuchungsprogramm zur Nährstoffbelastung an bayerischen Seen dargestellt.

Am Beispiel des Hopfensees wurde in der Phosphorstudie eine Regionalbilanzierung durchgeführt, ähnlich, wie sie für das ganze Bundesgebiet erstellt wurde. Die Nährstoffbelastung des Hopfensees wird zum größten Teil geprägt aus den Abwassungen aus der Landwirtschaft, spez. der intensiven Vieh- und Weidewirtschaft, die hier zu 53 % an der Gesamt-P-Belastung beteiligt ist. Gegenwärtig sind wir dabei, solche Regionalbilanzen auch für andere See-Einzugsgebiete zu erstellen. Die aus verschiedenen Richtungen zusammengetragenen Werte sind daraufhin zu prüfen, ob sie sinnvoll zusammenpassen und können dann gesicherte Rechengrundlagen bilden für die rechnerische Ermittlung der Nährstoffbelastung und der Anteile aus den verschiedenen Quellen.

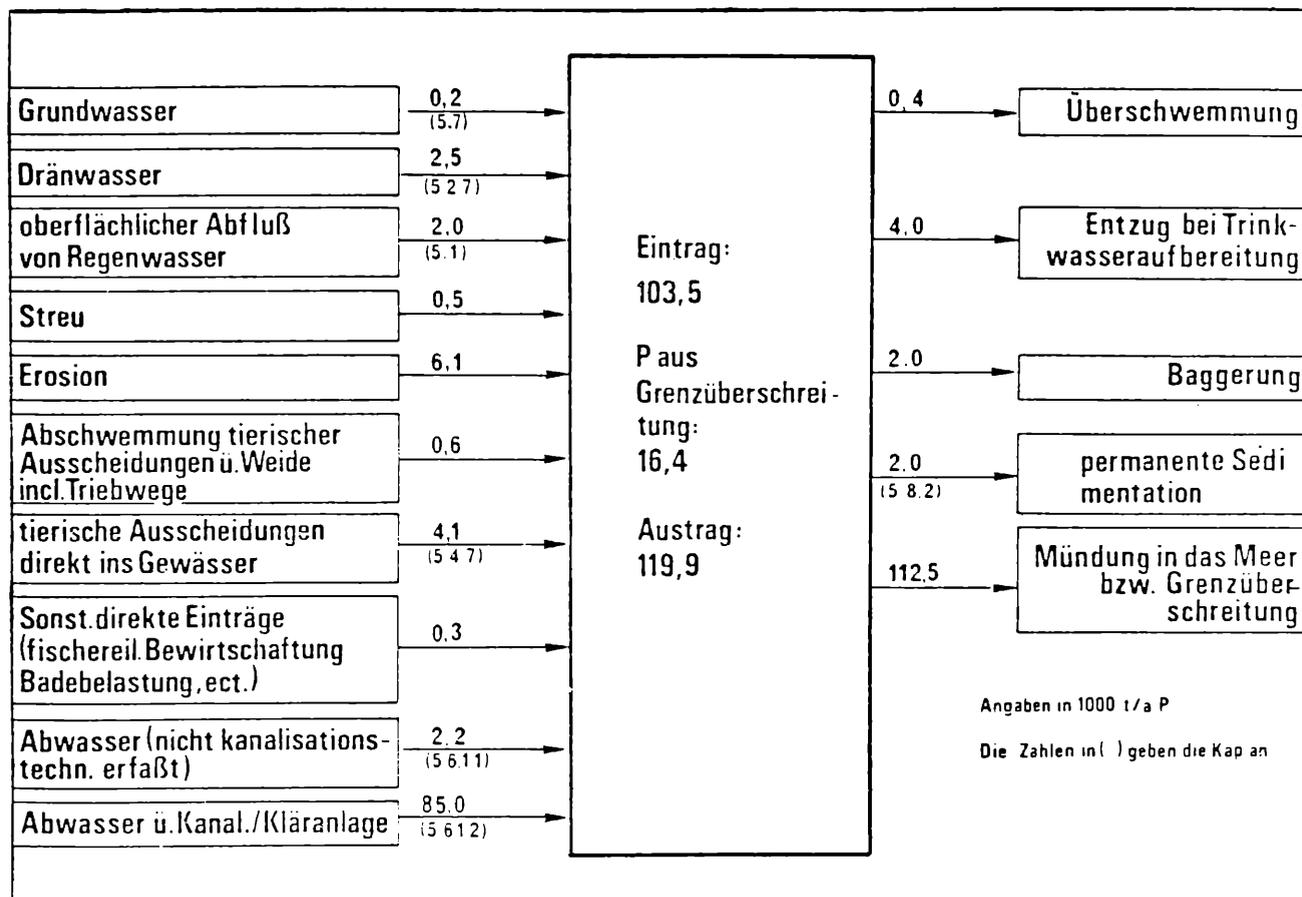


Abb.6: Phosphorbilanz der Bundesrepublik Deutschland, Teilsystem Gewässer; aus 9)

Tab. 4: Anteile an der P-Belastung in % (aufgerundet)  
bei verschiedenen bayerischen Seen

	aus Ab- wasser	aus Einzugs- flächen
Chiemsee (1972/74)	70	30
Ammersee (1975/76)	65 - 70	30 - 35
Tegernsee (1973/74)	< 5	> 95
Schliersee (1973/74)	15	85
Simssee (1969/70)	60	40
Walchensee (1975/77)	70	30
Hopfensee (1972/73)	30	70
Bannwaldsee (1972/73)	60	40
Weißensee (1972/73)	10	90
Niedersonthofener See (Obersee - 1971/72)	45	55
Bodensee/Obersee (1971/72)	65	35

### 5.3 Flächenbezogene Phosphorausträge

Das Zusammentragen aller möglichen Informationen über die flächenbezogenen Austräge, die von vielen Forschungsprogrammen von verschiedenen Seiten und den unterschiedlichsten Gebieten untersucht wurden und werden, läßt heute gewisse Generalisierungen zu. Dabei sind im allgemeinen an flächenbezogenen Phosphorausträgen zu rechnen (vgl. Lit. 9, 11 und 12):

	kg/ha, a Ges.P
Wald (auf Urgestein)	0,05
Wald und Gebirge im alpinen Bereich incl. extensiver Alm- u. Weidewirtschaft	0,10 - 0,20
Wiese ohne Weidenutzung	0,20
ackerbaulich genutzte Flächen	0,40
Weiden incl. Triebwege	0,80
Niederschlag auf Seeoberfläche	0,40 - 2,00 (nur in Ballungs- gebieten)

Mit diesen Zahlenwerten kann man heute ganz gut arbeiten, wobei selbstverständlich Untersuchungen zur weiteren Differenzierung immer noch ggf. erforderlich sind. Hingewiesen sei noch darauf, daß der hohe Wert für Phosphorbelastung aus Niederschlag bei der Berechnung nicht für das ganze Einzugsgebiet, sondern nur auf die Seeoberfläche zu rechnen ist.

## 6. Berechnung der Phosphorbelastung aus der Phosphorkonzentration im See bzw. Seeabfluß

Der zweite Weg, die Phosphorbelastung von Seen zu berechnen, geht von den in den letzten Jahren insbesondere von VOLLENWEIDER und anderen Limnologen entwickelten Stoffhaushaltsmodellen von Seen aus. Es soll hier auf diese Seemodelle nicht näher eingegangen werden, sondern nur ein Weg der Anwendung in Bezug auf unsere Fragestellung diskutiert werden. Viel weniger schwierig und aufwendig als die Messung der Phosphorbelastung von Seen aus den verschiedenen Zuflüssen ist es nämlich, eine mittlere Seewasserkonzentration bzw. Konzentration im Seeabfluß zu untersuchen. In der Regel sind an den Seeabflüssen auch Dauerpegelstellen errichtet, so daß genaue Abflußwerte vorliegen. Wenn es mit einem gewissen Fehlerbereich möglich ist, daraus die Phosphorbelastung des Sees zu berechnen, kann man besonders die langjährigen Seentwicklungen mit einfachen Mitteln verfolgen.

Die Berechnung kann, unter Umkehrung der von VOLLENWEIDER (13) durchgeführten input-output-Modellrechnung erfolgen nach:

$$L_p = \frac{[P]_{\infty} \cdot q_s}{(1 - R_{\text{exp}})} \quad \text{wobei}$$

$$L_p = \text{Phosphorflächenbelastung in mg/m}^2, \text{a}$$

$$[P]_{\infty} = \text{Phosphorkonzentration zur Vollzirkulation}$$

$$q_s = \text{Zu/Abflußhöhe in m/a} = \frac{Q}{A_0} = \frac{\text{Jahres-Wassermenge}}{\text{Seefläche}}$$

$$q_s = \frac{\bar{z}}{t_w} = \frac{\text{mittlere Tiefe}}{\text{Aufenthaltszeit}}$$

$$R_{\text{exp}} = \text{experimenteller Retentionskoeffizient} = \frac{\text{Jahres-Zufluß-Fracht an Phosphor}}{\text{Jahres-Abfluß-Fracht an Phosphor}}$$

$R_{\text{exp}}$  kann aus Nährstoffbilanzuntersuchungen bekannt sein. An Hand von umfangreichen Korrelationsvergleichen haben LARCEN und MERCIER (16)  $R_{\text{exp}}$  auch nach hydrologischen Daten berechnet.

Die Autoren fanden folgende, gut korrelierte lineare Gleichung:

$$R_{\text{exp}} = 0,86 - 0,143 \ln q_s$$

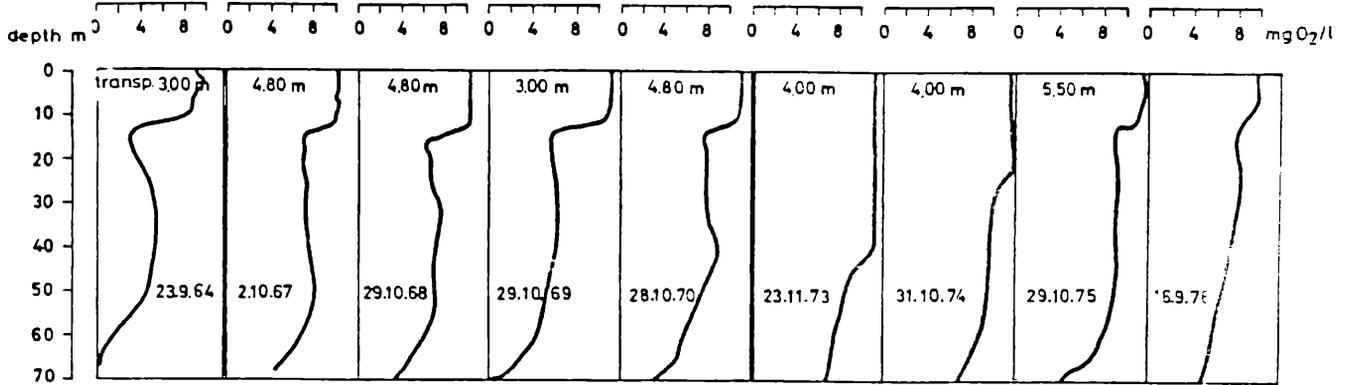
Diese Berechnung gilt für Seen mit mittleren P-Konzentrationen unter 25 µg/l; die Gültigkeit ist für flache Seen bzw. Seen mit besonders langer oder besonders kurzer (≲ 5 Tage) Aufenthaltszeit eingeschränkt.

Für Tegernsee und Schliersee errechnete sich beispielsweise  $R_{\text{exp}}$  nach vorgenannter Formel mit 0,36 bzw. 0,44; gemessen wurde 0,19 und 0,49. Beim Tegernsee war die tatsächliche Retention also geringer. Beim stark durchströmten Kochelsee berechneten sich 1976 0,09; gemessen wurden 0,16. Es gibt also Abweichungen und es wird zweckmäßig sein, weitere solche Vergleiche an unseren bayerischen Alpen- und Voralpenseen anzustellen. Zu beachten ist aber auch, daß der Schwankungsbereich des  $R_{\text{exp}}$ -Wertes sich bei relativ hohem  $q_s$  nicht sonderlich stark in vorgenannter Gleichung bemerkbar macht.

Mit Hilfe dieser Formeln konnte bei Tegernsee und Schliersee die Entwicklung der Phosphorbelastung von 1967 bis heute durchgehend berechnet werden (15). Zugrunde lagen die Jahresabflüsse und die festgestellte mittlere Jahres-P-Konzentration im Seeabfluß, die in der Regel aus monatlichen, z.T. 14tägigen Untersuchungen, ermittelt wurde (Abb. 7 und 8). Mit den Meßjahren 1973 und 1974 ergaben sich dabei hervorragende Übereinstimmungen, die uns zur Schlußfolgerung berechtigen, daß mit diesen einfachen Mitteln die langjährige Verfolgung von Belastungszuständen der Seen tatsächlich möglich ist.

Abb. 7 und 8 geben gleichzeitig auch einen Überblick, wie sich die Verhältnisse am Tegernsee und Schliersee in der Zeit nach der Abwasserfernhaltung entwickelt haben. Beim Tegern-

Oxygen-curve Sept./Oct.- Secchi-disc transparency



Annual mean content of P<sub>tot</sub> in epilimnion resp. lake outflow

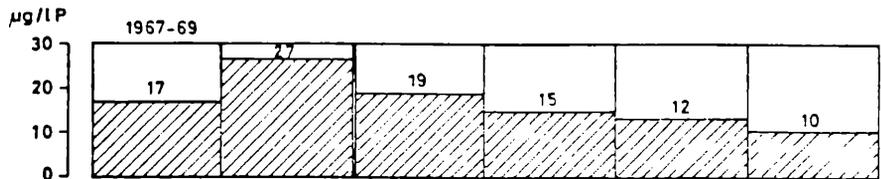
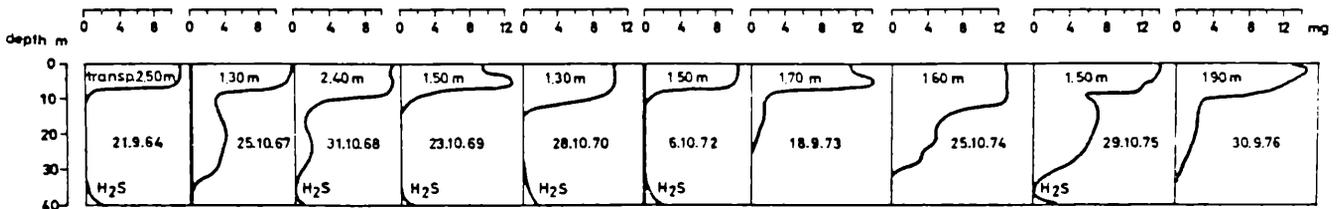


Abb.7: Entwicklung des Tegernsees nach der Abwasserfernhaltung sowie mittl. P-Konzentrationen im Seeabfluß (aus (6)).

1. Oxygen-curve Sept./Oct.- Secchi-disc transparency



Annual mean content of P<sub>tot</sub> in epilimnion resp. lake outflow

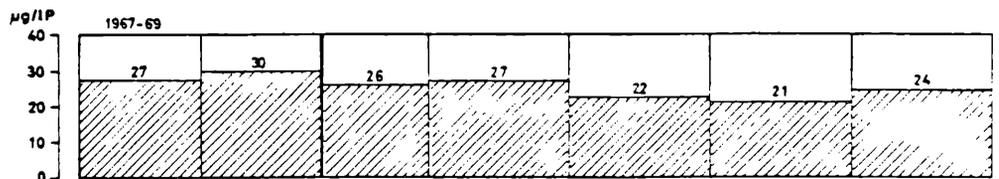


Abb.8: Entwicklung des Schliersees nach der Abwasserfernhaltung sowie mittl. P-Konzentrationen im Seeabfluß aus 6 .

see wurde eine von Jahr zu Jahr fortschreitende Oligotrophierung erreicht, kenntlich in der Abnahme der mittleren P-Gehalte bis auf nunmehr 10 µg/l und an den Sauerstoffverhältnissen, wobei sowohl das metalimnische Sauerstoffminimum als auch die Sauerstoffzehrung vom Boden her immer mehr abgebaut wurde. Auch die Sichttiefen haben deutlich zugenommen. Die früher dominante Burgunderblutalge *Oscillatoria rubescens* ist weitgehend verschwunden. Mit dem Nährstoffgehalt von rd. 10 µg/l Ges.P gehört heute der Tegernsee, nach dem Königssee, zum nächstnährstoffärmsten aller größeren bayerischen Seen.

Beim Schliersee ist jedoch eine durchgreifende Verbesserung dieser Art bis heute noch ausgeblieben. Der mittlere Nährstoffgehalt liegt mit etwas über 20 µg/l noch immer im leicht eutrophen Bereich; die hohen Planktondichten, vor allem durch die Blaualgen *Lyngbya limnetica* und *Oscillatoria*-Redeckel verleihen dem See immer noch eine geringe Sichttiefe. Die Nährstoffremobilisierung aus dem Sediment ist nunmehr weitgehend zurückgegangen und konnte auch bei den Bilanzierungsuntersuchungen 1973/74 nicht quantitativ erfaßt werden. Im Grunde ist es nicht ganz klar, warum sich die hohen Planktondichten im Schliersee so lange halten. Unter den besonderen Bedingungen des Schliersees ist offenbar ein sehr langdauernder Prozeß der Güteverbesserung anzunehmen.

Die Entwicklung an beiden Seen, insbesondere am Schliersee, wird von der Landesanstalt weiter verfolgt.

## 7. Kritische Grenzwerte der Phosphorbelastung von Seen

In diesem Zusammenhang ist natürlich die Frage nach den kritischen Grenzwerten der Phosphorbelastung von Seen von besonderer Bedeutung. Sie ist wesentlicher Inhalt der bereits erwähnten Arbeiten von VOLLENWEIDER u. a. Autoren und eines der Zentralthemen der heutigen Limnologie. VOLLENWEIDER hat in der Arbeit von 1976 (14) die kritische Grenzbelastung von Seen ( $L_c$  in  $\text{mg P/m}^2, \text{a}$ ) neu definiert und zwar nach:

$$L_c = [P]_c^{sp} \cdot q_s \left( 1 + \sqrt{\frac{\bar{z}}{q_s}} \right)$$

wobei  $[P]_c^{sp}$  (P-Konzentration zur Vollzirkulation im Frühjahr) zwischen 10 - 20  $\mu\text{g/l}$  P liegt. Diese Konzentration beschreibt den Übergangsbereich vom nährstoffarmen zum nährstoffreichen See. Nach dieser Formel wird heute allgemein für die Zielvorstellung der Seenreinhaltung gearbeitet. Es gibt selbstverständlich gewisse Einschränkungen der Anwendung, z.B. bei stark durchströmten Seen, wie dem Kochelsee, bei meromiktischen Seen und bei Seen, die sich nicht im steady state befinden. Im großen und ganzen hat sich aber gezeigt, daß man mit diesen Modellvorstellungen gut auch an unseren oberbayerischen Seen arbeiten kann.

Diese Grenzbelastungen der Seeneutrophierung sind äußerst niedrig. Im übrigen sind sie abhängig insbesondere von der mittleren Tiefe und Durchflußrate des Sees. Grob gesprochen kann gesagt werden, daß ein See um so mehr mit Phosphor belastet werden kann, je tiefer er ist und um so geringer seine Aufenthaltszeit ist. Deshalb sind andererseits Flachseen und Seen mit langer Aufenthaltszeit besonders eutrophierungsgefährdet.

Die Beziehungen zwischen Nährstoffaustrag aus dem Einzugsgebiet ( $P_{EZ}$ ) und Seeflächenbelastung wurden von HAMM (15) kürzlich dargestellt.

Tab. 5: Unter- bzw. Überschreitung der kritischen Phosphorbelastung (obere Grenze) nach VOLLENWEIDER (1976) in Abhängigkeit von  $\bar{Z}$  und  $T_w$ . Abflußspende im Einzugsgebiet 500 mm/a.

$P_{EZ}$ in kg/ha, a	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,60	0,80	1,00
$\bar{Z}$ (m)	zuzüglich $60 \text{ mg/m}^2 A_0$ , a Niederschlag auf die Seeoberfläche							
1	Unterschreitung bei $T_w < 130$ Tage	$< 40$ Tage	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g					
5	$T_w < 4,2$	$< 2,7$	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g					
10	$T_w < 14$	$< 11$	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g					
20	$T_w < 50$	$< 40$	1,6 - 25	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g				
30	$T_w < 110$	$< 100$	10 - 60	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g				
50	$T_w < 500$	$T_w < 500$	1,0 - 300	15-170	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g			
100	s t e t s Ü n t e r s c h r e i t u n g		3,6->500	10->500	40->500	130->500	s t e t s Ü b e r s c h r e i t u n g	

Die Phosphorflächenbelastung eines Sees hängt naturgemäß von der Größe des Einzugsgebietes, dessen spezifischer Abflußspende und flächenspezifischem Nährstoffaustrag ab. Die kritische Phosphorflächenbelastung des Sees wird darüberhinaus von der mittleren Tiefe des Sees und der Zuflußsummenhöhe, resp. Aufenthaltszeit, beeinflußt. Man kann somit für Seen verschiedener mittlerer Tiefen und Aufenthaltszeiten die flächenbezogenen Phosphorausträge des Einzugsgebietes angeben, die nicht überschritten werden dürfen, wenn die kritischen Flächenbelastungen eingehalten werden sollen. Die Tabelle 5 bringt beispielhaft dazu eine Zusammenstellung bei Abflußspenden aus dem Einzugsgebiet von 500 mm/a.

Man erkennt, daß bei Seen mit mittleren Tiefen von weniger als 20 m schon bei Flächenausträgen über  $10 \text{ mg/m}^2, \text{a}$   $\text{EZ} = 0,1 \text{ kg/ha, a}$  an Phosphor die kritischen Grenzbelastungen überschritten werden; das bedeutet, wenn man die Tabelle auf Seite 33 vergleicht, Flächenausträge aus Wald, allenfalls sehr extensiver Alm- und Weidewirtschaft. Bei den meisten unserer Alpen- und Voralpenseen mit größeren mittleren Tiefen und einer Aufenthaltszeit von  $>1$  Jahr ist ein flächenspezifischer Phosphoraustrag in der Größenordnung vom  $0,2 - 0,3 \text{ kg/ha, a}$  P-zuträglich. Bei Einzugsgebieten mit höherer Abflußspende verschiebt sich der Unterschreitungsbereich etwas nach rechts, d.h. es sind höhere flächenspezifische Phosphorausträge möglich.

## 8. Schlußbetrachtungen

Ich hoffe, daß diese Ausführungen über Herkunft und Rolle des Phosphors als wesentlicher Eutrophierungsfaktor von Seen deutlich gemacht haben, daß wir zwar bereits über schon weitgehende Kenntnisse darüber verfügen, andererseits noch manche Fragen offen bleiben. Für das Verständnis der Rolle des Phosphors, speziell im stark durchströmten See, wird man von der starren Betrachtung von Jahresfrachtwerten abgehen müssen, da einerseits bei dem spezifischen Abflußgeschehen in unserem Alpen- und Voralpenraum im Jahresverlauf der P-Eintrag in das Gewässer starken Schwankungen unterworfen ist, andererseits die Rolle des Phosphors im Stoffhaushalt des Sees ebenfalls stark jahreszeitlich geprägt wird. Hierzu ist die enge Verbindung von Hydrologie und Stoffuntersuchungen nötig. Gegenwärtig - mit dem Ziel von Modellentwicklungen - geschieht dies im Programm am Kochelsee im Sonderforschungsbereich 81, Teilprojekt A 5. - Die Darlegungen, besonders im letzten Punkt, haben vielleicht auch gezeigt, wie niedrig kritische Phosphorflächenbelastungen liegen und zwar bei Seen geringer mittlerer Tiefe und länger Aufenthaltszeit im Bereich der Grundfrachten. Es wird sicherlich zu überdenken sein, ob bei solchen Seen ein oligotropher Zustand als Zielvorstellung des Gewässerschutzes überhaupt zweckmäßig ist; und ob nicht solche Seen eher als Landschaftsseen mit geringer Eignung für Baden und Erholung anzusehen sind.

Vorerst bleibt uns jedoch, für die großen und tieferen Seen Bayerns, als wichtigste Schlußfolgerung diejenige, die im gemeinsamen Merkblatt für den Chiemsee gezogen wurde: "Auf jede Tonne Phosphor, die dem See ferngehalten wird, kommt es an."

Literatur

- (1) LIEBMANN, H. und HAMM, A.: Eutrophierung und Eutrophierungsverminderung an bayerischen Seen; Gas- und Wasserfach, Wasser/Abwasser H. 113 (1972)
- (2) BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WASSERFORSCHUNG; Untersuchung zur Nährstoffbelastung des Simssees - Unveröffentlichter Bericht (1970)
- (3) HAMM, A.: Untersuchungen zur Nährstoffbilanz am Tegernsee und Schliersee nach der Abwasserfernhaltung - zugleich ein Beitrag über die diffusen Nährstoffquellen im Einzugsgebiet bayerischer Alpen- und Voralpenseen; Z. f. Wasser- und Abwasser-Forschung, 9. Jg., H. 4/H. 5 (1976)
- (4) TREUNERT, E., WILHELMS, A. und BERNHARDT, H.: Einfluß der Probeentnahme-Häufigkeit auf die Ermittlung der Jahres-Phosphor-Frachtwerte mittlerer Bäche - Hydrochem. u. Hydrogeol., Mitt. 1 (1974)
- (5) BERNHARDT, HAMM, HURLER, KOPPE, MALZ, SAIFERT, SCHMEING, WIESELSBERGER: Technische Maßnahmen gegen die Eutrophierung von Oberflächengewässern in Deutschland; Jb. Vom Wasser, Bd. 39 (1972)
- (6) HAMM, A.: Nutrient load and nutrient balance of some sub-alpine lakes after sewage diversion - Verh. Internat. Verein. Limnol. 20 (1978)
- (7) LAMPERT, W. und SCHOBER, K.: Das regelmäßige Auftreten von Frühjahrsalgenmaximum und "Klarwasserstadium" im Bodensee als Folge von klimatischen Bedingungen und Wechselwirkungen zwischen Phyto- und Zooplankton; Arch. Hydrobiol. 82 (1/4) (1978)
- (8) Sonderforschungsbereich 81 der Technischen Universität München: Erfassung der Strömungsverhältnisse und des Stoffhaushaltes eines stark durchströmten voralpinen Sees - Vortragsveranstaltung 14.2.79
- (9) Hauptausschuß "Phosphate und Wasser" in der Fachgruppe Wasserchemie der GdCh: Phosphor - Wege und Verbleib des Phosphors in der Bundesrepublik Deutschland - Aspekte der Rohstoffversorgung und des Umweltschutzes; Verlag Chemie (Weinheim/New York) (1979)

- (10) Bericht an den Bayerischen Landtag der Staatsministerien des Innern, Landesentwicklung und Umweltfragen sowie Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Dez. 1978)
- (11) HAMM, A.: Zur Nährstoffbelastung von Gewässern aus diffusen Quellen - Flächenbezogene P-Abgaben - eine Ergebnis- und Literaturzusammenstellung - Z. f. Wasser und Abwasser-Forschung 9/1 (1976)
- (12) HAMM, A.: Ursachen und Quellen der Phosphorbelastung unserer Oberflächengewässer - Kongreß Wasser Berlin 1977, Kongreßvorträge, Colloquium-Verlag, Berlin
- (13) VOLLENWEIDER, R.: Input-output-models. With special reference to the phosphorus loading concept in limnology - Schweiz. Z. f. Hydrol. 37, 53 - 84 (1975)
- (14) VOLLENWEIDER, R.: Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication - Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 33 (1976)
- (15) HAMM, A.: Phosphorbelastungsmodelle von Seen in Beziehung zur Nährstoffbelastung aus diffusen Quellen - Münchener Beiträge 8. Abwasser-, Fischerei- und Flußbiol., Bd. 31 (1979) (im Druck)
- (16) LARCEN, D.P. und MERCIER, H.T.: Phosphorus Retention Capacity of lakes - J. Fish. Research Board, Canada, 33 (1976)

Anschrift des Verfassers:

Reg.Direktor Dr. A. Hamm

Bayer. Landesanstalt für

Wasserforschung

Kaulbachstr. 37

8000 München 22

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1979

Band/Volume: [3\\_1979](#)

Autor(en)/Author(s): Hamm A.

Artikel/Article: [Herkunft und Rolle des Phosphors als wesentlicher Eutrophierungsfaktor von Seen 15-43](#)