© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Ber. nat.-med. Ver. Innsbruck	Band 56 Festschr. Steinböck	S. 143—161	Innsbruck, Dez. 1968

Beschleunigte Eutrophierung im Pipurger See, Tirol

von

Roland PECHLANER

(Aus dem Institut für Zoologie [Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Heinz JANETSCHEK] und der Alpinen Forschungsstelle Obergurgl [Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Werner HEISSEL] der Universität Innsbruck)*

Accelerated Eutrophication in the Piburger See, Tyrol.

Synopsis: Piburger See is a meromictic lake, situated in a forested area on the northern border of the Ötztaler Alpen. Physical and chemical data (Temperature, oxygen, conductivity, alkalinity, pH, PO_4-P, total-P, nitrate- and ammonia-nitrogen, and silica) from 1963 to 1968 are compared with similar information available for the years 1931 to 1933. Although protected by conservation laws, this trout lake suffers from pollution. Obviously phosphorus is the key nutrient. The concentrations of phosphorus are not very high (total-P between February 1966 and 1967 averaging 19,5 μg/l (45 analyses), mean concentration of phosphate being 2,6 μg PO_4-P/l (42 analyses), but by the increasing availability of this nutrient organoproduction and oxygen consumption have reached already a critical level. Winter kills are predicted for the near future, if eutrophication is not stopped or reversed. For the optical properties, for phytoplankton and pelagic primary production of Piburger See the reader is referred to the paper of I. FINDENEGG (1968, Ber. nat.-med. Ver. Innsbruck, **56**: 163—176); the fish population is discussed by W. KOLDER (Acta Hydrobiol. (Cracow), in press).

Lage, Morphometrie, Hydrographie

Der Piburger See liegt an der linken Seite des äußeren Ötztales, in einer relativ kleinen, landschaftlich überaus reizvollen Senke, die als Seenschutzgebiet weitgehend unverbaut blieb. Über die Umgebung des Sees liegt eine Karte im Maßstab 1:5.000 vor, die von Leopold PFAUNDLER im Jahre 1900 vollendet und spätestens 1904 durch die Auslotung des Piburger Sees ergänzt wurde. Abb. 1a zeigt die Isobathen des Piburger Sees, sowie die Lage der 54 Lotungspunkte, auf die sich diese Tiefenlinien stützen. PFAUNDLER fand 24,2 m als größte Tiefe, LEUTELT-KIPKE (1934, p. 330) gibt 27 m als Maximaltiefe an, nach unseren Beobachtungen ist der See jedoch nicht tiefer als 24,7 m.

* Die Auswertung des Materials vom Piburger See erfolgte im Rahmen eines Aufenthaltes am Department of Zoology der University of Wisconsin in Madison, U. S. A. Die vorliegende Arbeit ist in regem Kontakt mit den Mitarbeitern des Laboratory of Limnology dieser Universität entstanden. Ich habe für diese Hilfe vor allem Herrn Prof. Dr. Arthur D. HASLER, dem Leiter dieses Instituts, sehr zu danken.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Die Uferböschung ist im Nordwesten und Südosten ziemlich flach, im Nordosten ist die Halde jedoch teilweise sehr steil. Die Ufergestaltung ist also durchaus nicht so ebenmäßig, wie dies aus der hypsographischen Kurve (Abb. 1b) geschlossen werden könnte.

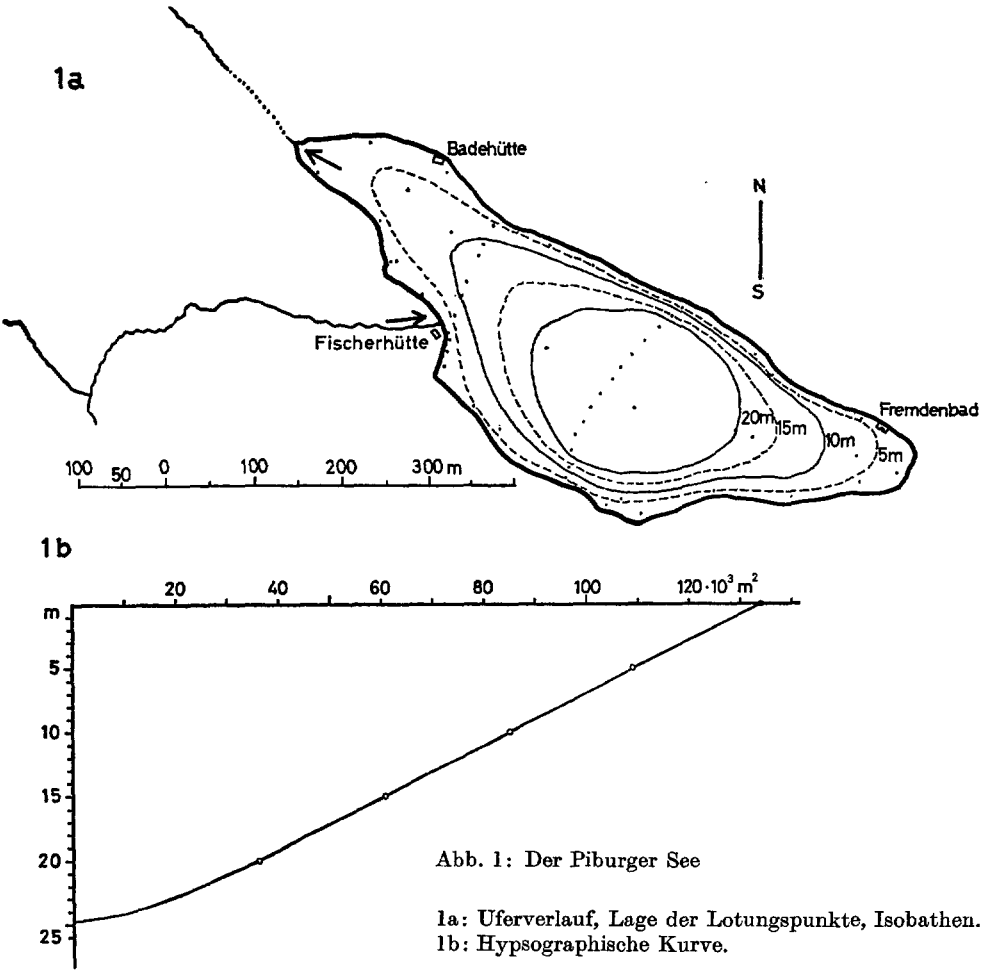

Abb. 1: Der Piburger See

1a: Uferverlauf, Lage der Lotungspunkte, Isobathen.
1b: Hypsographische Kurve.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten morphometrischen Parameter zusammengestellt[1].

Tab. 1: Meereshöhe und morphometrische Parameter des Piburger Sees.

Meereshöhe (m)	Fläche (m^2)	Volumen (m^3)	Länge (m)	Breite (m)	Maximale Tiefe (m)	Mittlere Tiefe (m)	Relative Tiefe (m)
915	134.000	1,748.000	800	250	24,7	13,0	5,98

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Die für das äußere Ötztal gültigen Niederschlagsdaten erlauben keine Abschätzung des Wasserzuflusses, da in der von Felstrümmern durchsetzten Umgebung des Piburger Sees höchstens ein Teil der im scheinbaren Einzugsgebiet des Sees versickernden Niederschläge diesen tatsächlich erreichen. Nach einer nur groben Schätzung macht der jährliche Wasserdurchfluß etwa 10% des Seevolumens aus[2].

Thermik

Die Temperaturprofile des Piburger Sees wurden mit einem Wasserschöpfer (nach RUTTNER) aufgenommen, in den ein in Zehntelgrade geteiltes Thermometer eingebaut war. Für den 30. Juni 1966 wurde von Univ.-Prof. Dr. I. FINDENEGG mit Hilfe eines Thermistors (Oxytester der Fa. ZÜLLIG, Schweiz) eine Vergleichsmessung durchgeführt. Die Konfrontation beider Serien ergab, daß die Temperaturablesungen für hypolimnisches Wasser mit der „Schöpfmethode" bis zu 0,4° C höher ausfielen, als bei einer „in situ"-Messung mit dem elektrischen Thermistor. Der Ursache dieser Diskrepanz, der unerwartet starken Erwärmung hypolimnischen Wassers am Weg des Schöpfers durch das warme Epilimnion, wurde bei der Auswertung und Wiedergabe der Temperatur-Daten Rechnung getragen: Alle 1966 zur Zeit der Sommerstagnation aufgenommenen Profile wurden in der Weise korrigiert, daß von der Ablesung in 8 m 0,1° C, in 10 m 0,2° C, in 12 m 0,3° und in 15—24 m 0,4° C abgezogen wurden.

Eine Auswahl der 1966/67 aufgenommenen Temperaturprofile ist in Abb. 2 wiedergegeben; Abb. 3 zeigt vergleichbare Tautochronen aus den Jahren 1931 und 1932 nach LEUTELT-KIPKE (1934). Die Kurven zeichnen das für einen See der gemäßigten Breiten typische Bild: Eine inverse thermische Winterschichtung geht nach dem Eisbruch über einen homothermen Zustand in die direkte stabile Schichtung der Sommerstagnation über. Zur Zeit der Sommerschichtung werden die obersten 3—5 m des Piburger Sees vom warmen, mehr oder weniger homothermen Epilimnion eingenommen. Die darunter liegende Schicht bis ca. 8 m Tiefe ist als Metalimnion, der restliche Wasserkörper als Hypolimnion zu bezeichnen.

Die epilimnischen Wassertemperaturen des Jahres 1966 liegen sicher unter dem mehrjährigen Durchschnitt, da der Sommer 1966 besonders kalt und regenreich war. Dies erklärt deutliche Unterschiede zwischen den thermischen Verhältnissen des Piburger Sees in unserer Untersuchungsperiode und den Beobachtungen von LEUTELT-KIPKE (1. c.): Am 30. Juni 1966 betrug die Temperatur der obersten Meter 17,5° C, am 19. Juni 1932 aber hatte sich der See bereits auf 19°C erwärmt; am 19. Juli 1966 besaß der Piburger See ein 4 m dickes Epilimnion von knapp 18° C, am 24. VII. 1931 maß dieselbe Schicht im Durchschnitt 19,3° C. Bis zum 21. VIII. 1966

[1] Diese Angaben beruhen auf z. T. unveröffentlichten Aufzeichnungen von Univ.-Prof. Dr. Leopold PFAUNDLER, die mir freundlicherweise von seiner Enkelin, Frau Elisabeth REINKENHOF geb. PFAUNDLER, zur Verfügung gestellt wurden.

[2] Im Herbst 1968 wurden am einzigen oberirdischen Zufluß sowie am Abfluß des Sees Meßpegel installiert. Durch die damit erfolgenden Zu- und Abflußmessungen, für deren Durchführung dem Hydrographischen Dienst beim Amt der Tiroler Landesregierung sehr zu danken ist, wird sich die Hydrographie des Piburger Sees in naher Zukunft verläßlicher beurteilen lassen.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

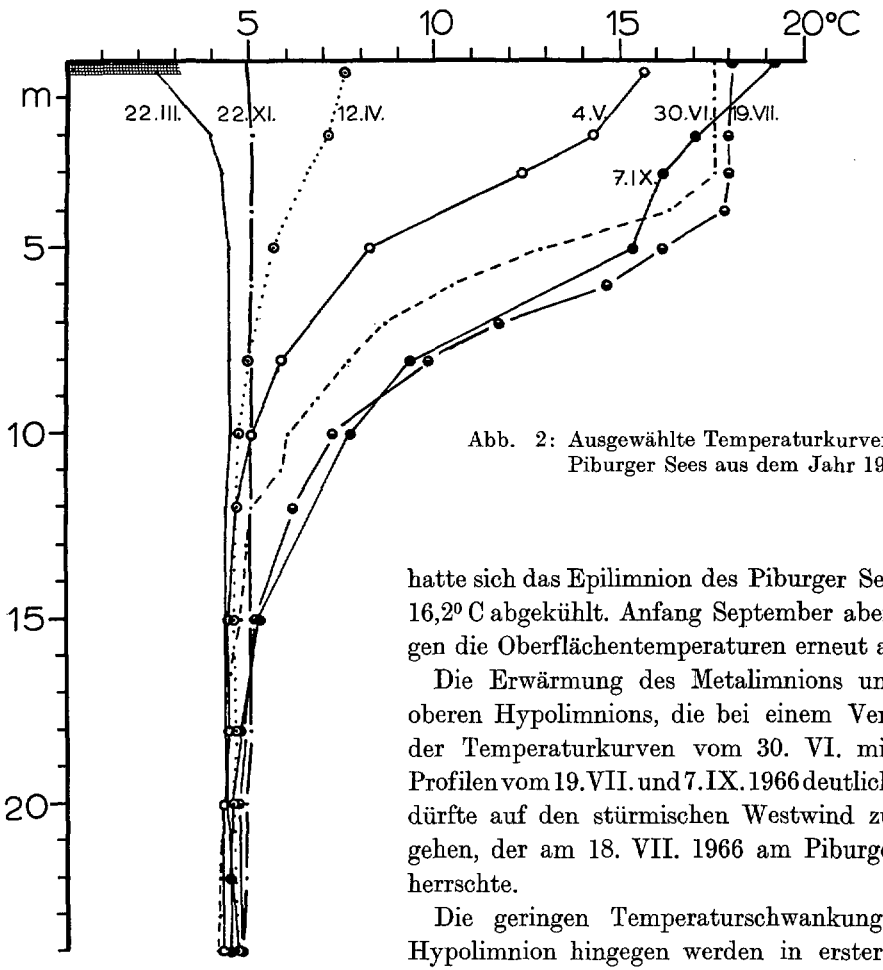

Abb. 2: Ausgewählte Temperaturkurven des Piburger Sees aus dem Jahr 1966.

hatte sich das Epilimnion des Piburger Sees auf 16,2° C abgekühlt. Anfang September aber stiegen die Oberflächentemperaturen erneut an.

Die Erwärmung des Metalimnions und des oberen Hypolimnions, die bei einem Vergleich der Temperaturkurven vom 30. VI. mit den Profilen vom 19. VII. und 7. IX. 1966 deutlich wird, dürfte auf den stürmischen Westwind zurückgehen, der am 18. VII. 1966 am Piburger See herrschte.

Die geringen Temperaturschwankungen im Hypolimnion hingegen werden in erster Linie mit dem Jahresgang der Temperatur der unterirdischen Zuflüsse zusammenhängen.

Die Eisbedeckung des Piburger Sees dauert in der Regel 4 Monate; der See friert normalerweise in der ersten Dezemberhälfte zu und wird Mitte April wieder eisfrei. Die Winterdecke dürfte im März ihre maximale Dicke erreichen. Sie maß im März 1932 55 cm (LEUTELT-KIPKE l. c.), 1963 45 cm, 1966 35 cm und 1968 76 cm (Eisdecke 44 cm, Schnee 32 cm). Nach Auskunft von Herrn Gottlieb PERLE (Ötz) lag 1966 am 2. Dezember im nordwestlichen Teil des Sees Eis, das ca. 2 cm stark war, wegen warmer Witterung aber einige Tage stationär blieb, sich erst am 6. 12. in den Hauptteil des Sees auszudehnen begann und den Piburger See am 8. Dezember gänzlich deckte. Im Vorwinter blieb die Eisdecke nahezu schneefrei. Ende Jänner aber wurden ca. 10 cm Altschnee registriert. Der Eisbruch begann am 13. April 1967; am 17. April war der See gänzlich eisfrei.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

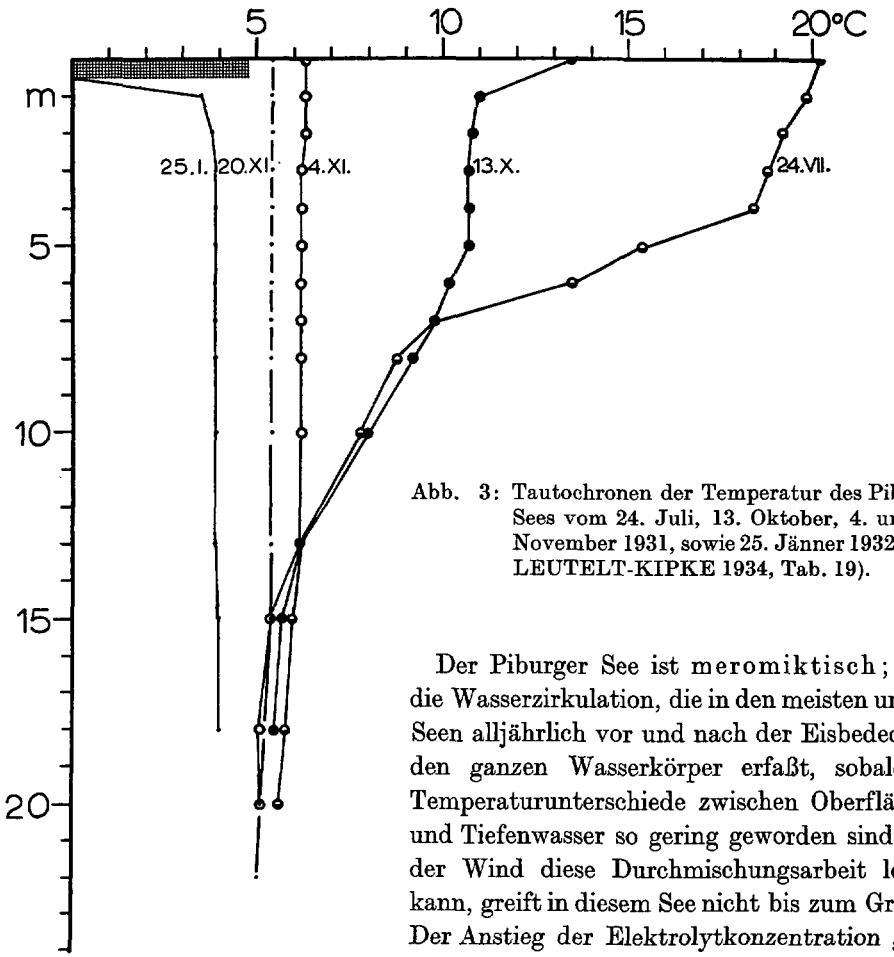

Abb. 3: Tautochronen der Temperatur des Piburger Sees vom 24. Juli, 13. Oktober, 4. und 20. November 1931, sowie 25. Jänner 1932 (nach LEUTELT-KIPKE 1934, Tab. 19).

Der Piburger See ist meromiktisch; d. h. die Wasserzirkulation, die in den meisten unserer Seen alljährlich vor und nach der Eisbedeckung den ganzen Wasserkörper erfaßt, sobald die Temperaturunterschiede zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser so gering geworden sind, daß der Wind diese Durchmischungsarbeit leisten kann, greift in diesem See nicht bis zum Grunde. Der Anstieg der Elektrolytkonzentration gegen die Tiefe hin erzeugt im Piburger See eine durch chemische Gradienten bedingte Stabilität, die der Wind selbst dann, wenn Homothermie herrscht (in Abb. 2 am 22. XI. 1966, in Abb. 3 am 20. XI. 1931 annähernd verwirklicht) und damit keinerlei temperaturbedingte Dichteunterschiede bestehen, wegen des ungünstigen Verhältnisses zwischen dem Oberflächenareal und der Tiefe dieses Gewässers nicht ganz überwinden kann. Die Meromixie des Piburger Sees wird bereits durch die relativ hohen Tiefentemperaturen sehr wahrscheinlich gemacht, die sich zwischen dem 22. 3. und 12. IV. 1966, sowie dem 22. XI. 1966 und dem 31. I. 1967 nicht geändert haben (in 24 m Tiefe 4,7 bzw. 4,8° C) und dafür sprechen, daß zumindest im tiefsten Bereich des Sees die bodennahe Schicht nicht in die Zirkulation mit einbezogen wurde. Und die Berücksichtigung des Jahresganges der Sauerstoffschichtung (Abb. 6 u. p. 149ff.) läßt keinen Zweifel darüber, daß die Volldurchmischung im Herbst dieses Jahres lediglich bis etwa 20 m Tiefe, im Frühjahr sogar nur bis ca. 15 m Tiefe gereicht hat.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 4 belegt am Beispiel eines Profils vom 22. 3. 1966, daß die Schichtung der Elektrolyte im Winter ausreicht, trotz einer Tiefentemperatur, die 0,7° C über dem Dichtemaximum reinen Wassers liegt, eine stabile inverse Temperaturschichtung zu gewährleisten, was in Anbetracht der geringen absoluten Konzentrationen dieses weichen Wassers in Zweifel gezogen werden könnte.

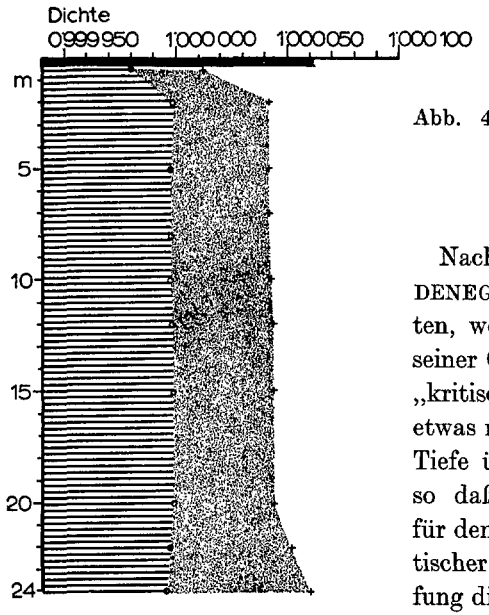

Abb. 4: Thermisch (schraffiert) und chemisch (punktiert) bedingte Dichte im Vertikalprofil des Piburger Sees vom 22. März 1966.

Nach einer Faustregel von BERGER (FINDENEGG 1963, p. 88) ist Meromixie[1] zu erwarten, wenn die Tiefe eines Sees die 4. Wurzel seiner Oberfläche erreicht oder übersteigt. Diese „kritische Tiefe" würde für den Piburger See etwas mehr als 19 m betragen; seine maximale Tiefe übersteigt diesen Wert um fast 6 Meter, so daß die morphologischen Voraussetzungen für den kontinuierlichen Fortbestand meromiktischer Zustände gegeben sind. Eine Überprüfung dieses Postulates an Hand der für 1931/32 vorliegenden Temperaturprofile (LEUTELTKIPKE l. c.) ist nicht möglich, da Messungen aus den tiefsten Wasserschichten fehlen. Die Daten über den damaligen Chemismus des Sees sprechen jedoch sehr dafür, daß im Herbst 1931 nur ein kleiner, im Frühjahr 1932 aber ein erheblich größerer Wasserkörper von der Vollzirkulation ausgeschlossen war.

Chemismus

Sämtliche Sauerstoffanalysen wurden mit dem Jod-Differenzverfahren nach OHLE (1953a) ausgeführt. Bei der Berechnung der relativen Sättigung, also dem in Prozenten ausgedrückten Verhältnis zwischen der aktuellen Sauerstoffsättigung und der bei der gegebenen Wassertemperatur und dem mittleren Luftdruck über dem See zu erwartenden Sauerstoffsättigungskonzentration, dienten die von FOX bestimmten und dem Normogramm von SCHMASSMANN (1948, p. 174) zugrunde liegenden Löslichkeitswerte für Sauerstoff als Bezugsgrößen. Die Sauerstoffsättigungskonzentrationen von TRUESDALE und DOWNING, die seit den diesbezüglichen Empfehlungen von MORTIMER (1956) für einige Jahre in limnologischen Arbeiten bevorzugt für Sättigungsberechnungen herangezogen wurden (vgl. HUTCHINSON 1957, p. 579), sind nach neueren Untersuchungen viel zu niedrig. Auch die nach den Daten von FOX berechneten Werte für die Löslichkeit molekularen Sauerstoffs in destilliertem Wasser

[1] Gemeint ist „biogene Meromixie" (HUTCHINSON 1957, p. 481)

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

sind nicht genau; sie liegen etwas höher als die neuesten Sättigungskonzentrationen (CARPENTER 1966, p. 272), doch macht der Unterschied im Temperaturbereich von 0—20° C weniger als 0,05 mg/l aus. Diese Differenz ist zu gering, bzw. für die meisten limnologischen Fragestellungen zu unwesentlich, um den Vorteil aufzuwiegen, daß mit der Weiterverwendung der Daten von FOX die unmittelbare Vergleichbarkeit mit einer sehr großen Zahl wissenschaftlicher Arbeiten erhalten bleibt, in denen diese Bezugsbasis gewählt wurde. Eine ausführliche Diskuskussion der bei der Berechnung relativer Sauerstoffsättigung möglichen Genauigkeit gibt SCHMASSMANN (1949).

Bei der Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit (in reziproken Megohm oder Mikrosiemens (μ S bei 25° C)), der Alkalinität (Bikarbonate in Milligramm-Äquivalenten pro Liter), der Wasserstoffionenkonzentration (pH), sowie bei der Analyse der Proben auf ihren Phosphat- und Gesamt-Phosphorgehalt, auf Nitrat-Stickstoff- und Siliciumkonzentration wurde mit den bei PECHLANER (1966) beschriebenen Methoden gearbeitet. Die Bestimmungen des Ammoniak-Stickstoffs (30.Juni 1966) wurden von M. TILZER mit NESSLER-Reagens durchgeführt.

Die Versorgung des Piburger Sees mit Sauerstoff sei zuerst besprochen, da die Sauerstoffkonzentrationen, bzw. ihre Veränderungen in Raum und Zeit, für die Beurteilung der Lebensbedingungen und der Lebensvorgänge im See besonders wichtig sind.

In Abb. 5 wurde für 8 Untersuchungstage zwischen dem 24. VII. 1931 und dem 23. IX. 1932 (Angaben nach LEUTELT-KIPKE 1934 und MÜLLER 1934), in Abb. 6 für 10 Daten zwischen dem 22. II. 1966 und dem 31. I. 1967 die Tiefenverteilung des Sauerstoffs (in mg/l) eingetragen. Durch Vertikalschraffierung wurde in beiden Abbildungen jener Bereich gekennzeichnet, in dem weniger als 4 mg Sauerstoff pro Liter gelöst sind, der also als adäquater Lebensraum für alle jene Tiere ausscheidet, die höhere Sauerstoffspannungen verlangen (wie etwa Bach- und Regenbogenforellen bei normaler Aktivität, aber auch wirbellose Tiere mit hohen Sauerstoffansprüchen). Durch zusätzliche Punktierung ist außerdem jene Zone kenntlich gemacht worden, in der weniger als 0,5 mg Sauerstoff pro Liter gelöst sind, also praktisch anaerobe Bedingungen herrschen.

Ein Vergleich der Abbildungen 5 und 6 macht deutlich, wie sehr sich die Sauerstoffbedingungen im Piburger See innerhalb der letzten 35 Jahre verschlechtert haben: Früher fanden Salmoniden und andere polyoxybionte Tiere während des Sommers bis 12 m Tiefe genügend Sauerstoff, heute müssen sie bereits den gesamten Bereich unterhalb der 10-m-Isobathe meiden; die Obergrenze der anaeroben Zone stieg 1931 und 1932 im Verlauf der Sommerstagnation nur bis zur 15-m-Marke an, 1966 aber war der Piburger See bereits ab 12 m Tiefe praktisch sauerstofffrei; im Winter 1931/32 wurde der während der Herbstzirkulation in die Tiefe transportierte Sauerstoff nur langsam aufgezehrt, 1966/67 jedoch bewirkten verschiedene Faktoren, die weiter unten näher besprochen werden, daß wenige Wochen nach Beginn der Eislegung nur in einer auf die obersten 3 m beschränkten Wasserschicht mehr als 4 mg Sauerstoff pro Liter gelöst waren.

Für eine detailliertere Diskussion der Ursachen für die aktuelle Sauerstoffversorgung des Piburger Sees wurden die Graphiken in Abb. 7a-d angefertigt. An Hand dieser Diagramme lassen sich verschiedene biogene und abiogene Faktoren demon-

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

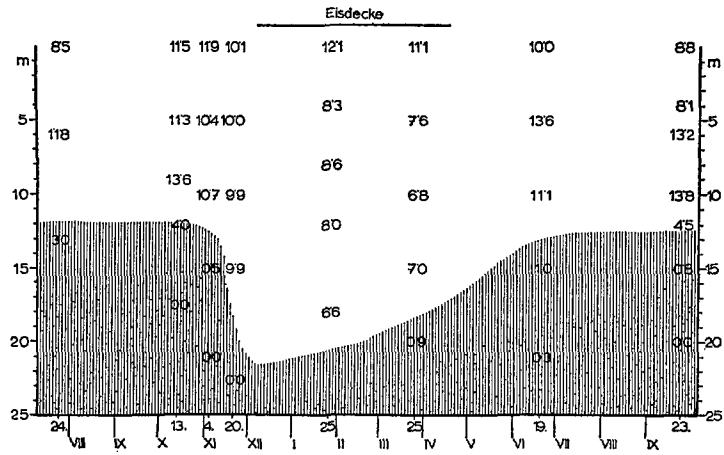

Abb. 5: Sauerstoffkonzentration (in mg/l) im Piburger See zwischen 24. Juli 1931 und 23. September 1932. Schraffierter Bereich: weniger als 4 mg Sauerstoff pro Liter; punktiert: wenigerals 0,5 mg O_2/l.

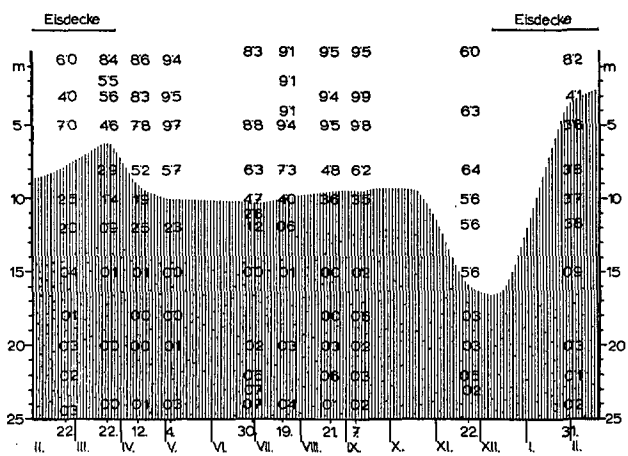

Abb. 6: Jahresgang der Sauerstoffkonzentration (in mg/l) im Piburger See 1966/67. Legende wie Abb. 5.

strieren, die teils in synergistischer, teils in antagonistischer Wirkung für das Zustandekommen der beobachteten Sauerstoffkonzentrationen verantwortlich sind:

Fast alle im Zuge der gegenwärtigen Untersuchungen des Piburger Sees analysierten Proben ergaben ein mehr oder weniger starkes Sauerstoffdefizit. Sauerstoffsättigung oder -übersättigung trat nur in Serien vom Mai bis September 1966 auf, und blieb auf die obersten 5 m, also auf das Epilimnion beschränkt. Abb. 7b gibt mit der Situation vom 7. September 1966 den höchsten Grad der Übersättigung wieder, der in unserer Untersuchungszeit beobachtet wurde. Abb. 8 (nach MÜLLER 1934) zeigt jedoch für den 26. September 1933 ein epilimnisches Sauerstoffmaximum bis zu 159% der relativen Sättigung. Das Ausbleiben entsprechender O_2-Maxima bzw. der ihnen zugrunde liegenden Primärproduktionsraten im Jahre 1966 muß mit den ungünstigen Witterungsbedingungen dieses Sommers in Zusammenhang gebracht werden.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

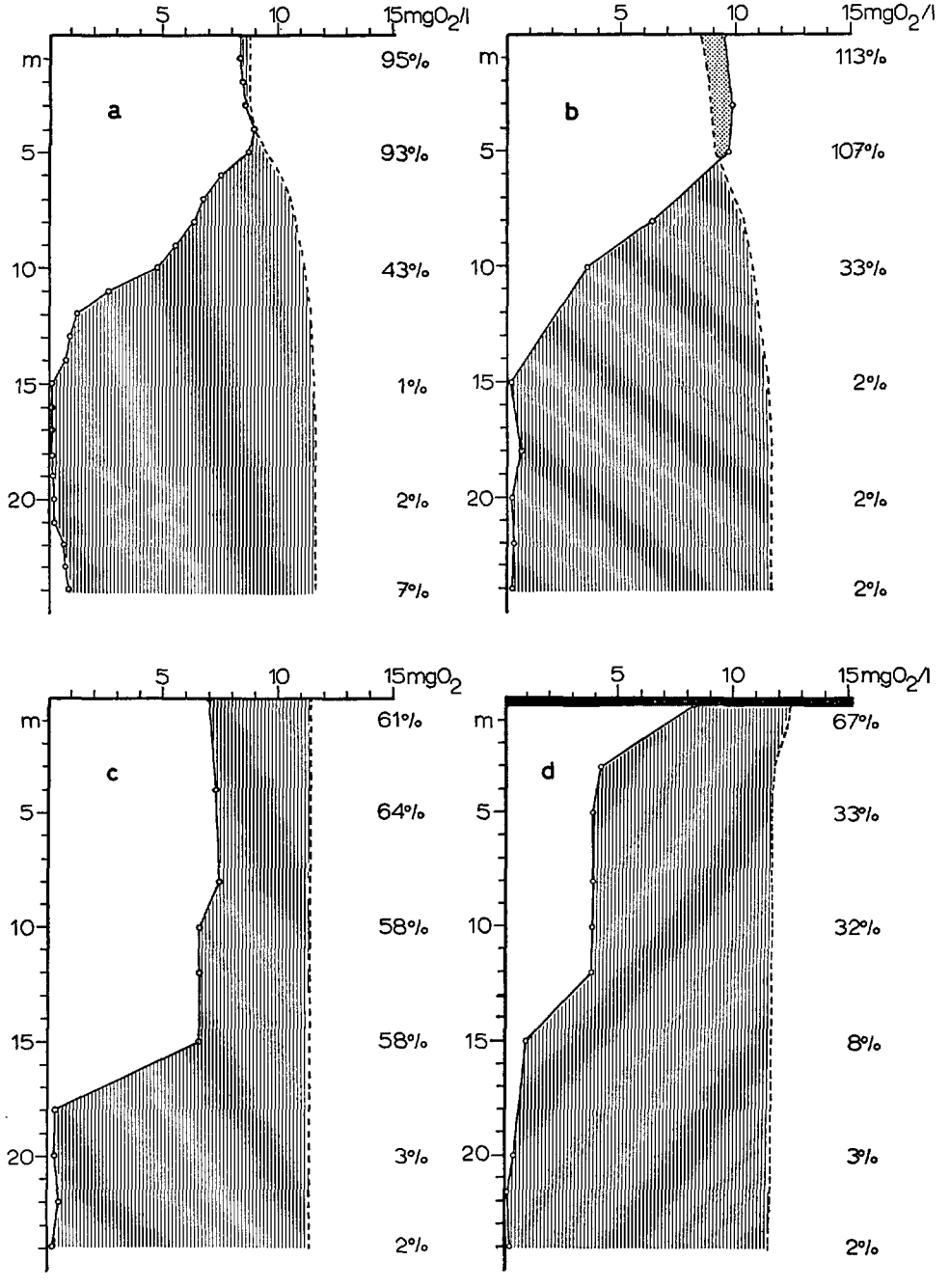

Abb. 7, a-d: Aktueller Sauerstoffgehalt (ausgezogene Kurve), Sättigungskonzentration (strichliert verbundene Punkte) und % relativer Sättigung im Piburger See am 30. Juni 1966 (a), 7. September 1966 (b), 22. November 1966 (c) und 31. Jänner 1967 (d).

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

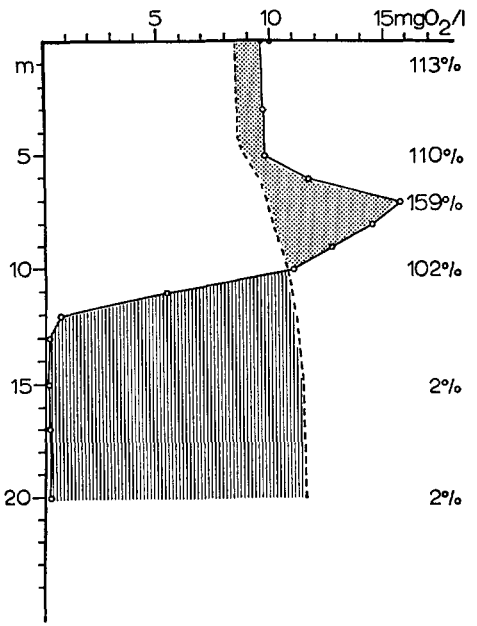

Abb. 8: Aktueller Sauerstoffgehalt (ausgezogene Kurve), Sättigungskonzentration (strichliert verbundene Punkte) und % relativer Sättigung im Piburger See am 26. September 1933 (nach MÜLLER 1934).

Die Sauerstofferzeugung durch Phytoplankton und Bodenflora kann nur in jenem Bereich des Sees erfolgen, in dem die eindringende Strahlung die zur Photosynthese notwendige Energie bereitstellt (hinsichtlich der Strahlungsdurchlässigkeit des Piburger Sees, sowie des Artenspektrums, der Biomasse und der Produktionsrate seines Phytoplanktons sei auf FINDENEGG (1968) verwiesen). Dieser Sauerstofffreisetzung durch pflanzliche Organismen steht als biogener Einfluß auf die Sauerstoffbilanz des Sees der Sauerstoffverbrauch für die Atmung aller Lebewesen des Piburger Sees (soweit sie nicht Luftatmer sind) gegenüber, unter denen die autochthone und allochthone organische Substanz abbauenden Bakterien eine besondere Rolle spielen. Am Sauerstoffvorrat des Sees zehren aber auch andere mit der Mineralisation organischer Substanz zusammenhängende Vorgänge, wie z. B. die Freisetzung von Schwefelwasserstoff, der bei seiner Oxydation zu Sulfat die Sauerstoffkonzentration des Wassers erniedrigt. In den aeroben Zonen des Piburger Sees wird der Schwefelwasserstoff gleich nach seiner Bildung oxydiert, in der Tiefe des Sees aber kommt es wegen der anaeroben Bedingungen zu einer Anreicherung von Schwefelwasserstoff und damit zu einem über 100% hinausgehenden Sauerstoffdefizit, also zur Anhäufung einer Sauerstoffschuld, die getilgt werden muß, ehe Sauerstoff in molekular gelöster Form im Wasser bestehen kann. Diese Sauerstoffschuld wird z. T. auf Kosten jenes Sauerstoffs beglichen, der mit unterirdischen Zuflüssen in dieses anaerobe Wasser gelangt[1], sie macht sich aber vor allem dann bemerkbar, wenn in den Zirkulations-

[1] Diese Oxydation erfolgt nicht augenblicklich. Außerdem ist damit zu rechnen, daß in dem turbulenzarmen Hypolimnion Microzonen mehr oder weniger lange nebeneinander bestehen und so voneinander unabhängig chemische Eigenschaften aufweisen können, die sich in einem vollkommen durchmischten Wasserkörper gegenseitig ausschließen würden. Jede dieser beiden Ursachen würde erklären, warum in Abb. 6 in vielen Fällen unterhalb einer völlig sauerstofffreien Zone ein neuerlicher Sauerstoffanstieg (auf 0,1 bis 0,7 mgO_2/l) zu beobachten ist, obwohl in Proben aus denselben Tiefen Schwefelwasserstoff qualitativ nachzuweisen war. Der Verlauf

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

perioden die äußeren Voraussetzungen für eine rasche Ergänzung des Sauerstoffvorrates des Sees gegeben wären. In diesen Zeiten tiefgreifender Winddurchmischung wird der eingetragene Sauerstoff zunächst für die Oxydation des Schwefelwasserstoffs abgefangen. Dies führt dazu, daß sich im Piburger See erstens die Frühjahrs- und Herbstzirkulation im Sauerstoffregime weniger tief bemerkbar machten als im Jahresgang der hypolimnischen Temperatur (ähnliche Verhältnisse fand z. B. FINDENEGG (1963) im Goggausee in Kärnten). Dies ist zweitens aber auch wesentlich dafür verantwortlich, daß — wie Abb. 7c zeigt — im Herbst 1966 der zirkulierende Wasserkörper 2 Wochen vor der Eislegung die Sauerstoffsättigung bei weitem noch nicht erreicht hatte: Die Winddurchmischung ermöglicht zwar regen Kontakt des Mixolimnions mit der Atmosphäre und fördert damit die Sauerstoffaufnahme untersättigten Wassers; einer rascheren Erhöhung der Sauerstoffkonzentration des gesamten umgewälzten Wasserkörpers wirkt aber — neben dem anhaltenden Sauerstoffverbrauch der gesamten Lebewelt — die Tatsache entgegen, daß laufend Tiefenwasser in die Zirkulation mit einbezogen wird, das nicht nur fast oder gar keinen Sauerstoff mitbringt, sondern durch Oxydation seiner Schwefelwasserstoff-Fracht zu Sulfat außerdem stark zehrt.

Schwefelwasserstoff entsteht im Falle des Piburger Sees nur biogen. Auch die Oxydation von Schwefelwasserstoff zu Sulfat im Zuge der Mineralisation organischer Substanz geht nur unter Beteiligung farbloser oder photosynthetischer Bakterien vor sich. Während aber der zweite Schritt dieser Oxydation, die Bildung von Sulfat aus elementarem Schwefel, ausschließlich in Gegenwart dieser Bakterien erfolgt (ähnlich wie die Oxydation des Ammonium- Ions über Nitrit zu Nitrat — ein anderer mit der Mineralisation gekoppelter sauerstoffzehrender Vorgang — die Anwesenheit spezialisierter Bakterien erfordert), kann der erste Schritt, die Oxydation von H_2S zu S, auch spontan, ohne Beteiligung von Bakterien, ablaufen.

Eine weitere Reaktion, die im Piburger See zu der beobachteten Sauerstoffzehrung beiträgt, ist rein chemischer Natur: ein Teil des zweiwertigen Eisens, das MÜLLER (1934, Tab. 2 und 5) in der Tiefe des Piburger Sees nachgewiesen hat, gelangt ohne Zweifel mit dem Grundwasser in dieser reduzierten Form in den See. Der mit der Oxydation dieses Eisens verbundene Sauerstoffverbrauch ist also ein vollkommen abiogener Prozeß. Das übrige zweiwertige Eisen (und Mangan), das in der anaeroben Zone des Piburger Sees zu finden (bzw. auf Grund entsprechender Hinweise zu erwarten) ist, wurde im See selbst zufolge der niedrigen hypolimnischen Sauerstoffspannungen reduziert und geht damit letztlich auf biogene Prozesse zurück. Es wäre interessant, aber im Falle unseres Sees technisch sehr schwierig, die mit den reduzierten

---

dieser Sauerstoffprofile spricht dafür, daß sich im Piburger See unterirdische Quellen in mehr als 18 bis 20 m Tiefe einschichten und daß diese im Juni besonders viel Wasser führen.

Grundwasser weist generell ein mehr oder weniger starkes Sauerstoffdefizit auf. Wie hoch der Sauerstoffgehalt der unterirdischen Zuflüsse des Piburger Sees ist, bzw. innerhalb welcher Grenzen er schwankt, läßt sich gegenwärtig nicht sagen. Durch das im Westen mündende Wiesenbächlein hingegen wird dem Piburger See das ganze Jahr hindurch sauerstoffgesättigtes Wasser zugeführt.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

anorganischen Substanzen des Grundwassers „importierte" Sauerstoffzehrung von dem mit Produktions- und Abbauvorgängen im See zusammenhängenden Sauerstoffverbrauch durch direkte chemische Analysen zu trennen. Auf einem anderen Weg aber läßt sich zeigen, daß dieser speziellen, die Produktivität des Sees nicht steigernden Komponente des Grundwassers heute sicher nur ein geringer Anteil an der Gesamtzehrung im See zukommt:

Für den Piburger See kann angenommen werden, daß die Zufuhr reduzierender Substanzen aus dem edaphischen Substrat seines Einzugsgebietes zwar von dem Jahresgang bzw. der Jahresmenge des Grundwasserstroms abhängt, außer diesen niederschlagsbedingten Fluktuationen aber in den letzten Jahrzehnten unverändert blieb. Ein regelmäßiges Ansteigen der Sauerstoffzehrung im See würde dagegen auf zunehmende Eutrophierung schließen lassen, ja geradezu als Maß für diese gelten können.

Daß die Zehrungsvorgänge im Piburger See zugenommen haben, lehrt bereits ein Vergleich der Abbildungen 5 und 6. Das beschleunigte Fortschreiten dieser Verschlechterung wird aber durch die in Abb. 9 zusammengefaßten Tautochronen der Sauerstoffverteilung im Spätwinter von 4 Jahren noch deutlicher: Am 25. März 1932 waren im Piburger See im Durchschnitt 5,64 mg Sauerstoff pro Liter gelöst — wenn man das bei LEUTELT-KIPKE (1934) nur bis 20 m Tiefe reichende Profil bis 24 m extrapoliert —, das sind 48% der bei 4° C und unter dem in 915 m Meereshöhe herrschenden Luftdruck löslichen Sauerstoffmenge. Am 14. März 1963 betrug die Durchschnittskonzentration 2,28 mg O_2/l (=20%), am 22. März 1966 2,12 mg O_2/l (=18%), und am 16. März 1968 2,6 mg/l (das sind 22% der bei Vollzirkulation möglichen Sättigungskonzentration).

Daß die geologischen und hydrologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes des Piburger Sees als Ursache für dieses starke Anwachsen des winterlichen Sauerstoffdefizits ausscheiden, wurde bereits oben betont. Auch andere natürliche Einflüsse der Umgebung auf den See, wie die Zufuhr produktionssteigernder organischer und anorganischer Stoffe, oder der Sauerstoffverbrauch für die Mineralisation eingewehter oder eingeschwemmter organischer Substanzen laufen so langsam ab, daß sie niemals den beobachteten rasanten Anstieg der direkt oder indirekt biogenen Zehrung im See bedingen können. Die rasche Verschlechterung der Sauerstoffbilanz des Piburger Sees in den letzten Jahren ist nur als Effekt menschlicher Einwirkungen auf den See erklärbar.

Eine befriedigende Analyse der einzelnen Komponenten dieser zivilisatorischen Einflüsse würde umfangreichere Untersuchungen voraussetzen, als sie mir bisher möglich waren. Eine Reihe von Hinweisen liegen jedoch bereits in den 1966/67 erarbeiteten chemischen Daten, die im folgenden in gedrängter Form vorgelegt und in der Konfrontation mit anderen Resultaten diskutiert werden sollen, deren Veröffentlichung aber außerdem eine weitere Vergleichsbasis für spätere Untersuchungen des Piburger Sees schaffen will.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

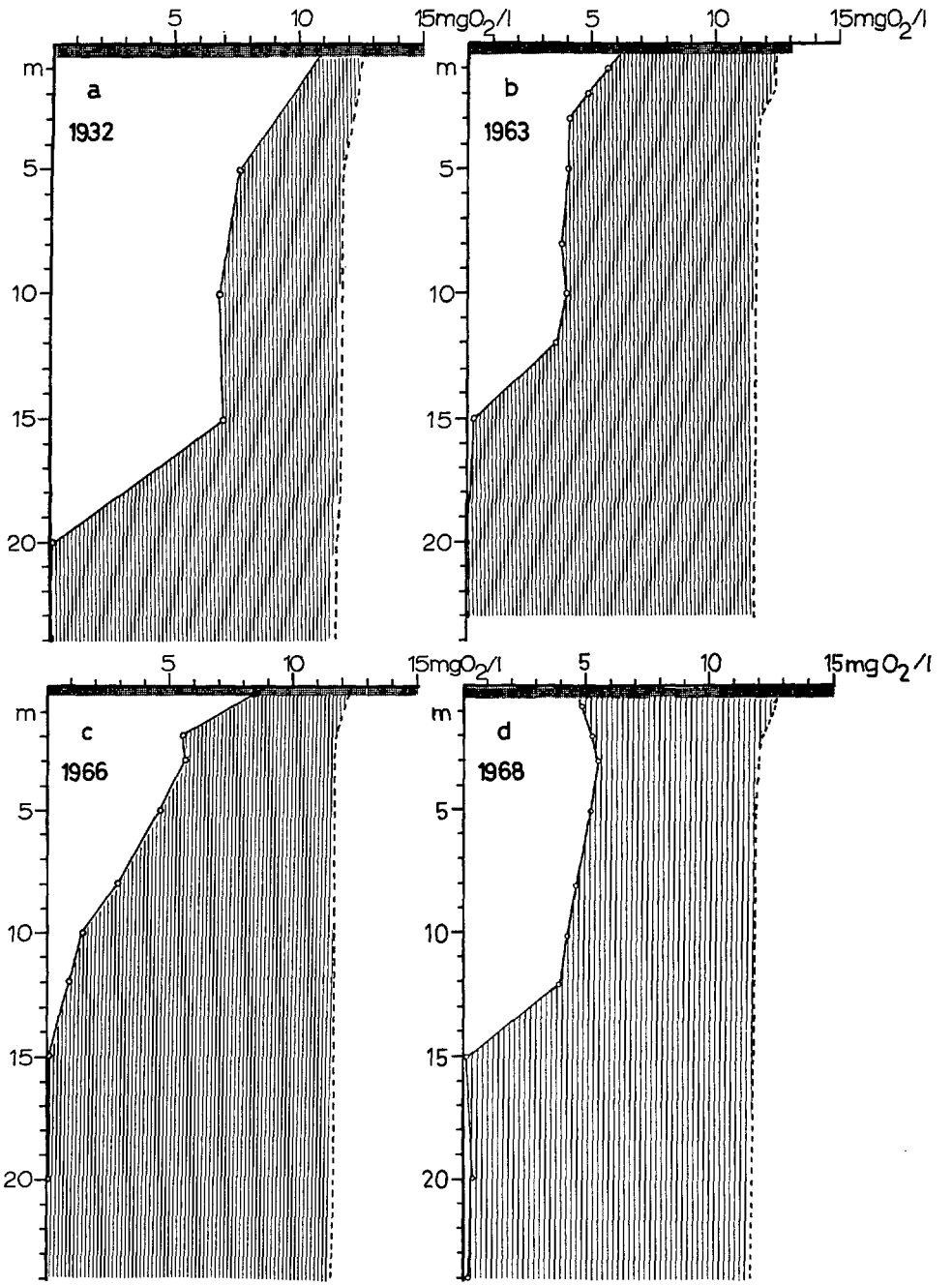

Abb. 9, a-d: Aktueller Sauerstoffgehalt (ausgezogene Kurve) und Sättigungskonzentration (strichliert verbundene Punkte) im Piburger See am 25. März 1932 (nach LEUTELT-KIPKE 1934), 14. März 1963, 22. März 1966 und 16. März 1968.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

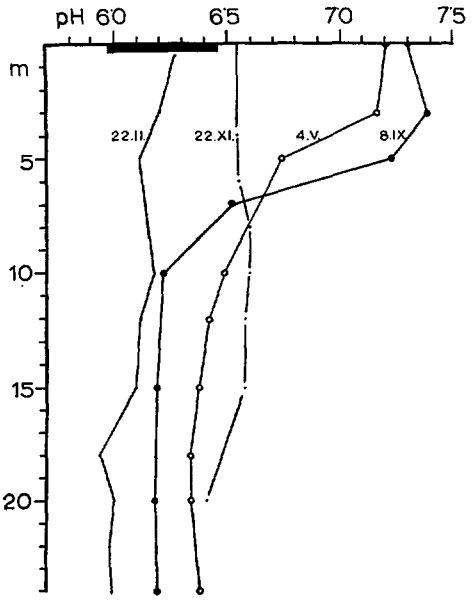

Abb. 10: Ausgewählte Profile der Wasserstoffionenkonzentration im Piburger See 1966.

Der pH des Piburger Sees liegt meist unter dem Neutralpunkt (Abb. 10). Der niedrigste Wert für die Wasserstoffionenkonzentration wurde am 22. Februar 1966 gefunden, wo in 18 m Tiefe ein pH von 5,94 gemessen wurde und das Mittel bei 6,1 lag. Aus der Zeit der Frühjahrszirkulation liegen keine Messungen vor. Im Verlauf der Sommerstagnation stellte sich im Hypolimnion ein ähnlich niederer pH ein wie im Winter über das ganze Profil; im Epilimnion aber ließ der CO_2-Verbrauch der Primärproduzenten den pH deutlich ansteigen. Wie schon bei der Diskussion der Sauerstoffkurven betont wurde, war jedoch 1966 die photosynthetische Aktivität nicht sehr rege: der pH überschritt an keinem der Untersuchungstage 7,4 Einheiten, während LEUTELT-KIPKE (1. c.) am 21. Juli 1931 für 6 m Tiefe pH 8,2 verzeichnet. Die epilimnischen pH-Werte sind raschen Änderungen unterworfen und daher nicht geeignet, langzeitige Veränderungen seit den Jahren 1931/32 erkennen zu lassen. Vergleicht man jedoch den Mittelwert für die Wasserstoffionenkonzentration nur des Hypolimnions im Sommer sowie der Gesamtheit der während Herbstzirkulation und Winterstagnation analysierten Proben unserer Untersuchungen (pH: 6,3) mit den Zahlen von LEUTELT-KIPKE (1934) und MÜLLER (1934) (pH: 6,7), so zeigt der Rückgang des pH um durchschnittlich 0,4 Einheiten jene zunehmende Kohlensäureanreicherung im Piburger See, die nach der oben besprochenen Verschlechterung der Sauerstoffbilanz zu erwarten ist.

Die elektrolytische Leitfähigkeit des Wassers des Piburger Sees ist in Abbildung 11 für je 2 Tage der Winter- und Sommerstagnation eingetragen. Als punktierte Fläche ist in jeder dieser Graphiken jene Leitfähigkeit eingezeichnet, die auf das Leitvermögen der Bikarbonate entfällt (die untere Skala ermöglicht außerdem, aus diesen Abbildungen die Bikarbonat-Konzentration in mval/l abzulesen). Die Abbildungen zeigen, daß sowohl die elektrolytische Leitfähigkeit als auch die Alkalinität gegen die Tiefe hin ansteigen, daß aber die „Restleitfähigkeiten" im bodennahen Bereich schwinden. Der Alkalinitätszuwachs läßt sich damit erklären, daß in der anaeroben Tiefe zu den (in sauerstoffreichem Wasser allein beständigen) Kalzium- und Magnesiumbikarbonaten noch mit Ferro-Eisen assoziierte Bikarbonate treten. Daß die Gesamtleitfähigkeit gegen den Grund hin weniger ansteigt als das

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

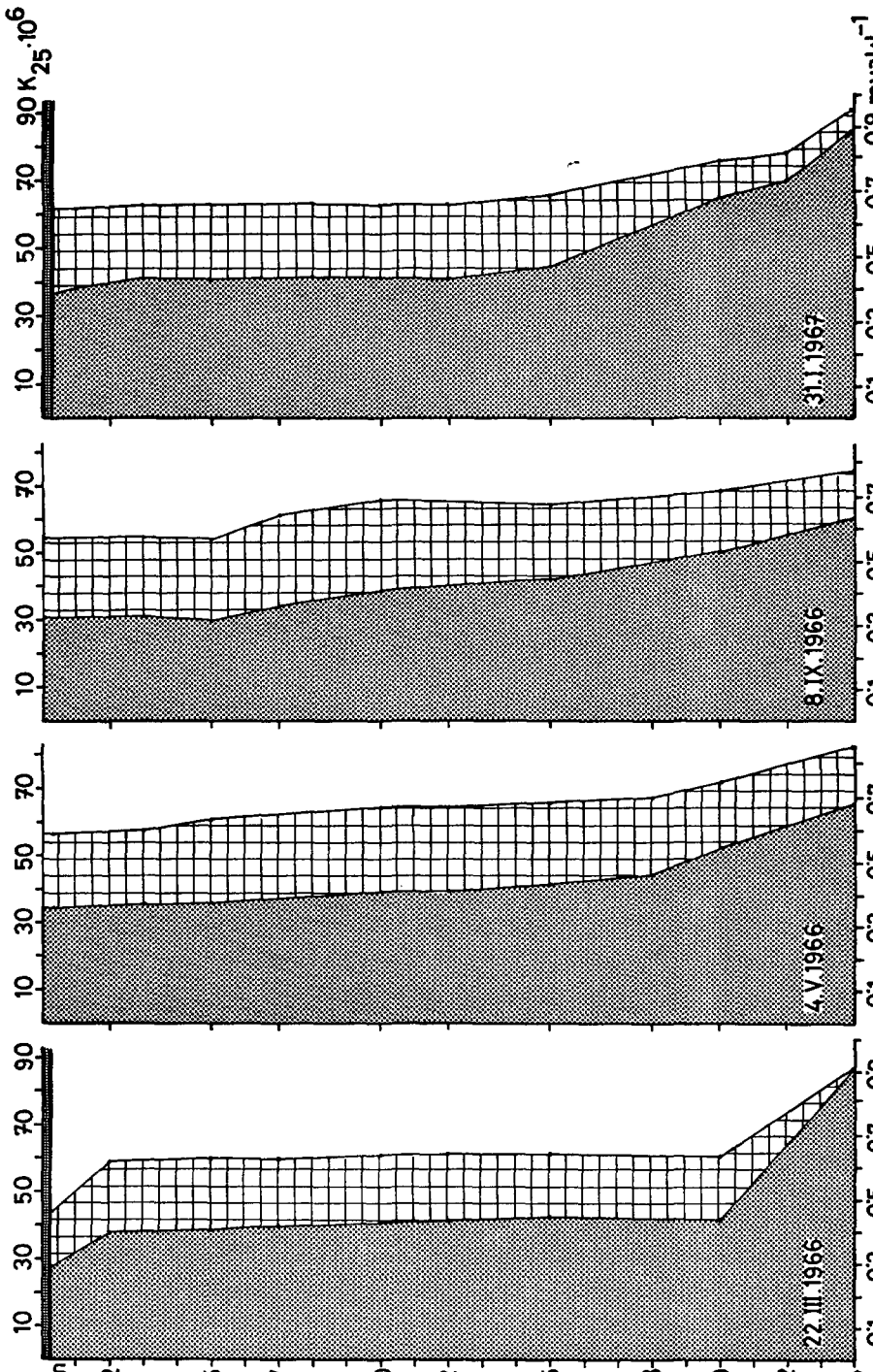

Abb. 11: Alkalinität (punktiert), Leitfähigkeit (rechte Kurve) und Restleitfähigkeit (schraffierter Bereich) im Piburger See am 22. März 1966, 4. Mai 1966, 8. September 1966 und 31. Jänner 1967.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Bikarbonatleitvermögen und damit die Restleitfähigkeit zurückgeht, hängt damit zusammen, daß das Sulfat-Ion in größeren Tiefen mehr und mehr durch Schwefelwasserstoff abgelöst wird.

Die niedere Leitfähigkeit und Alkalinität des Oberflächenwassers am 22. März 1966 läßt sich z. T. auf die Einschichtung elektrolytarmen Bachwassers zurückführen (Alkalinität: 0,23 mval/l; Leitfähigkeit: 48 μS), wird aber auch durch die Verdünnung des Seewassers mit Schmelz- und Niederschlagswasser verursacht, das von der Eisdecke stammt oder durch diese eindringt.

Schließlich sei darauf hingewiesen, daß die Sulfatresorption des Phytoplanktons während der Sommerstagnation im Epilimnion zu einer zwar geringen, aber doch bemerkbaren Abnahme der Restleitfähigkeit führt.

Phosphor tritt im Piburger See heute in deutlich höheren Konzentrationen auf als vor 35 Jahren. In 12 der 19 Analysen, die LEUTELT-KIPKE (l. c.) 1931/32 durchführte, war Phosphat überhaupt nicht nachweisbar. Nur in Proben aus mehr als 12 m Tiefe konnte mit der damals verwendeten Methode, deren Nachweisbarkeitsgrenze etwas unter 2 μg PO_4-P/l lag, Phosphat gefunden werden; seine Konzentration überstieg aber nie 2 μg/l.

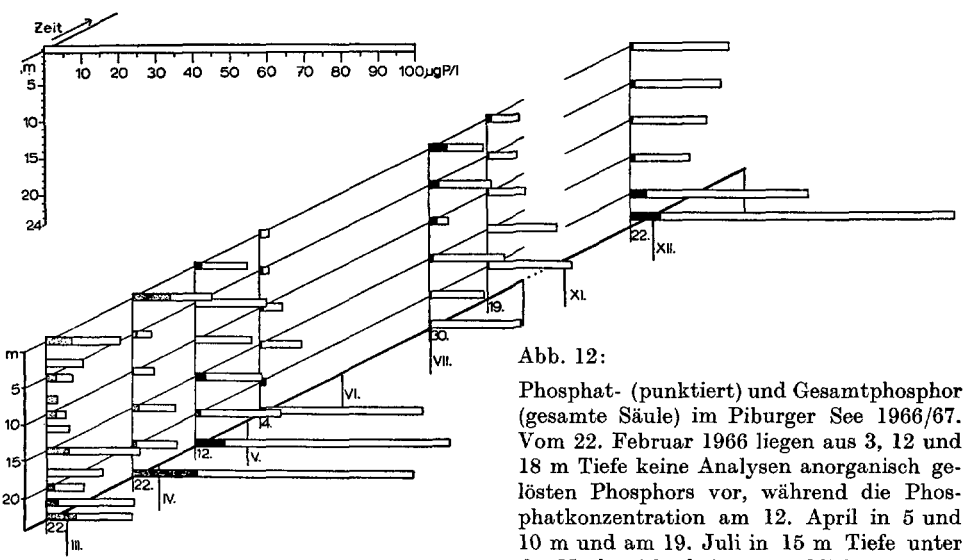

Abb. 12:

Phosphat- (punktiert) und Gesamtphosphor (gesamte Säule) im Piburger See 1966/67. Vom 22. Februar 1966 liegen aus 3, 12 und 18 m Tiefe keine Analysen anorganisch gelösten Phosphors vor, während die Phosphatkonzentration am 12. April in 5 und 10 m und am 19. Juli in 15 m Tiefe unter der Nachweisbarkeitsgrenze blieb.

Für 1966/67 ergab sich für Gesamt- und Phosphatphosphor folgendes Bild: Der Mittelwert von 45 Gesamtphosphorproben betrug 19,5 μg/l, der Durchschnitt der 42 Phosphatanalysen 2,6 μg PO_4-P/l. Wie Abb. 12 zeigt, nimmt der Gesamtphosphorgehalt gegen die Tiefe hin sehr stark zu. Unregelmäßigkeiten in diesem Verlauf können im Hinblick auf die starke Gebundenheit der Gesamtphosphorwerte an die

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

inhomogen verteilten Organismen des Sees bzw. ihre Abscheidungen und Abbaustadien sowie an verschiedene Einschwemmungen nicht überraschen.

Die mitgeteilten Phosphat-Werte sagen über die wirkliche Phosphatanreicherung im Piburger See nicht so viel aus, da die Konzentration anorganisch gelösten Phosphats sehr stark von der Stoffwechselaktivität im See und ihren physikalisch-chemischen Begleiterscheinungen abhängt, deren Dynamik in vielen Fällen aus Einzelanalysen nur schwer oder gar nicht zu beurteilen ist. Der Rückgang der Phosphatkonzentrationen in 5 und 10 m Tiefe vom 22. März (1,5 und 0,5 μg PO_4-P/l) bis 12. April 1966 (an dem anorganisch gelöstes Phosphat mit unserer noch 0,2 μg PO_4-P/l erfassenden Methode nicht nachweisbar war), ist z. B. zweifellos ein Ausdruck für die rege Phosphatresorption des nach dem Eisbruch stark produzierenden Phytoplanktons, läßt aber die Frage nach der Umsatzgeschwindigkeit des Phosphors in dieser Zeit offen. Daß 1966 im späteren Verlauf der Sommerstagnation im Epilimnion stets einige Zehntel μg PO_4-P/l nachweisbar waren (die Resultate vom 30. Juni 1966 sind wegen des bei dieser Analyse aufgetretenen hohen Blindwertes unsicher) deutet darauf hin, daß in diesem Sommer nicht so sehr das Nährstoffangebot, als vielmehr die ungünstige Witterung die Entfaltung des Phytoplanktons eingeschränkt hat.

In der Tiefe des Sees bestimmen neben der Mineralisation absinkender organischer Substanz vor allem rein chemische Fällung und Lösung, sowie adsorptive Bindung und Freisetzung in Abhängigkeit von Redoxpotential und pH die Anwesenheit freien Phosphates im Wasser. Nicht nur die Phosphorzufuhr, auch die verstärkte Schaffung verschiedener Voraussetzungen, unter denen Phosphat im See mobilisiert und den Produktionsprozessen zur Verfügung gestellt wird, kennzeichnet den Vorgang der beschleunigten Eutrophierung des Piburger Sees.

Das Fehlen von Gesamtphosphorwerten aus früherer Zeit und die geringe Empfindlichkeit der von LEUTELT-KIPKE (1934) angewendeten Phosphatbestimmungsmethode machen es schwer, den Grad der Nährstoffzunahme des Piburger Sees in Zahlen zu fassen. Ein Vergleich des Durchschnitts des 1931/32 im Hypolimnion des Piburger Sees meßbaren anorganisch gelösten Phosphors (1,6 μg PO_2-P/l, wobei die in Tab. 20 von LEUTELT-KIPKE (1934) als „<0,002 mg/l" eingetragenen Werte mit 1,5 μg PO_4-P/l in die Rechnung eingesetzt wurden) mit den heute in denselben Tiefen anzutreffenden Phosphatkonzentrationen (im Durchschnitt 3,4 μg/l) erlaubt immerhin eine gewisse Quantifizierung der erfolgten Veränderungen.

Phosphor ist zweifellos der „Initialfaktor" (OHLE 1953b) der Eutrophierung auch des Piburger Sees. Die Herkunft des Phosphors zu detaillieren, lag außerhalb der Möglichkeiten dieser Studie[1].

---

[1] Doch seien hier die Resultate von 6 Analysen der Phosphorfracht des Piburger Baches festgehalten: Mit Ausnahme des 12. April, wo der Bach — vermutlich im Zusammenhang mit der Kunstdüngung der angrenzenden Wiesen — 6,5 μg Phosphat und 56,5 μg Gesamtphosphor führte, schwankten die Werte für PO_4-P im Jahresgang zwischen 1,6 und 2,7 μg/l, für Gesamtphosphor zwischen 15 und 20 μg.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Stickstoff: Die vorliegenden Stickstoff-Analysen lassen keinen signifikanten Unterschied zwischen heute und der Situation vor 35 Jahren erkennen. Nitratkonzentrationen von 0,06 bis 0,13 mg NO_3-N/l im Epi- und Metalimnion und das Ansteigen der Ammoniumgehalte von 0,05 mg/l in 10 m auf 0,80 mg/l in 24 m, die im Mai und Juni 1966 gemessen worden sind, entsprechen weitgehend den von MÜLLER (1934) für den 23. September 1932 gegebenen Werten. Der Piburger Bach führte am 4. Mai 1966 0,28 mg/l, am 30. Juni 0,20 mg NO_3-N/l. Aussagen über den Stickstoffzyklus im Piburger See sind erst möglich, wenn der Jahresgang des Auftretens von Nitrat-, Nitrit-, Ammonium- und Gesamtstickstoff untersucht ist. Der Umstand, daß in diesem See mit der Bindung molekular gelösten Stickstoffs zu rechnen ist, und die Beobachtung von GOERING und DUGDALE (1966), daß im Zuge des Sauerstoffverbrauchs in einem stagnierenden Wasserkörper Nitrat bevorzugt zu N_2 denitrifiziert wird und in dieser Form den See bei Kontakt mit der Atmosphäre verlassen kann, läßt aber erkennen, daß ein Gewässer wie der Piburger See hinsichtlich seiner Stickstoffbilanz gegen die Atmosphäre hin offen ist. Seine Versorgung mit diesem Nährstoff ist damit einerseits nur sehr schwierig zu erfassen, und sie ist andererseits durch mehrere Regulationsmechanismen flexibel gestaltet. Direkt oder indirekt anthropogene Stickstoffzufuhr wird darum für die Produktionssteigerung des Piburger Sees bei weitem nicht jene Konsequenzen haben wie die Anhebung des Phosphorgehaltes.

Silikat wurde nur am 4. Mai 1966 bestimmt. Die Konzentration von 1,24—3,08 mg Si/l (Mittel von 9 Analysen: 2,23 mg Si/l = 4,77 mg SiO_2/l; Bach: 3,42 mg Si = 7,32 mg SiO_2) bewegen sich im Rahmen der bereits von LEUTELT-KIPKE (1934) aufgezeigten zeitlichen und räumlichen Schwankungen dieses für Kieselalgen wesentlichen Nährstoffes.

Ausblick

Sollte es nicht möglich sein, die Zufuhr produktionssteigernder Substanzen zum Piburger See zu stoppen bzw. einem unvermeidlichen Rest von Nährstoffeintrag durch Entnahme eines Teiles der organischen Produktion des Sees entgegenzuwirken, wird die weitere Verschlechterung der Sauerstoffbilanz im Winter schon in naher Zukunft in diesem See zu einem Fischsterben führen (bezüglich des Fischbestandes des Piburger Sees vgl. KOLDER, W., Acta Hydrobiologica, Krakau, in Druck) werden die Folgen der Eutrophierung aber auch den sommerlichen Aspekt dieses schönen Sees folgenschwer verändern. Sollten die Sanierungsmaßnahmen im Einzugsgebiet des Sees zu spät kommen, könnte in Anbetracht der besonderen lokalen Verhältnisse das von OLZEWSKI (1961 u. a.) angewendete Verfahren zur Ableitung des nährstoffreichen Tiefenwassers mit gutem Erfolg eingesetzt werden.

Es wird in den kommenden Jahren in verstärktem Maße erforderlich sein, den Piburger See limnologisch unter Kontrolle zu halten, um die Wirkung bereits eingeleiteter Schutz- und Sanierungsmaßnahmen ermessen bzw. den Bedarf und die Dimensionierung weiterer Vorkehrungen ableiten zu können.

© Naturwiss.-med. Ver. Innsbruck; download unter www.biologiezentrum.at

Zitierte Literatur

CARPENTER, J. H. (1966): New measurements of oxygen solubility in pure and natural water. Limnol. Oceanogr. **11**: 264—277.

FINDENEGG, I. (1963): Ein meromiktischer Kleinsee, der Goggausee in Kärnten. Österr. Akad. Wiss. Sitzungsber., math.-nat. Kl. **7**, 1963: 85—95.

FINDENEGG, I. (1968): Das Phytoplankton des Piburger Sees im Jahre 1966. Ber. nat.-med. Ver. Innsbruck **56**: 163—176.

GOERING, J. J. and V. A. DUGDALE (1966): Estimates of the rates of denitrification in a subarctic lake. Limnol. Oceanogr. **11**: 113—117.

HUTCHINSON, G. E. (1957): A Treatise on Limnology. Bd. **1**: 1—1015. Geography, Physics and Chemistry. — John Wiley and Sons, Inc., New York; Chapman and Hall, Ltd., London.

LEUTELT-KIPKE, Senta (1934): Ein Beitrag zur Kenntnis der hydrographischen und hydrochemischen Verhältnisse einiger Tiroler Hoch- und Mittelgebirgsseen. Arch. Hydrobiol. **27**: 286—352.

MORTIMER, C. H. (1956): The oxygen content of air-saturated fresh waters, and aids in calculating percentage saturation. Mitt. internat. Ver. Limnol. **6**: 1—20.

MÜLLER, H. (1934): Über das Auftreten von Nitrit in einigen Seen der österreichischen Alpen. Int. Rev. ges. Hydrobiol. **30**: 428—439.

OHLE, W. (1953a): Die chemische und elektrochemische Bestimmung des molekular gelösten Sauerstoffs der Binnengewässer. Mitt. internat. Ver. Limnol. **3**: 1—44.

OHLE, W. (1953b): Phosphor als Initialfaktor der Gewässereutrophierung. Vom Wasser **10**: 11—23.

OLSZEWSKI, P. (1961): Versuch einer Ableitung des hypolimnischen Wassers aus einem See. Ergebnisse des ersten Versuchsjahres. Verh. internat. Ver. Limnol. **14**: 855—861.

PECHLANER, R. (1966): Die Finstertaler Seen (Kühtai, Österreich). I. Morphometrie, Hydrographie, Limnophysik und Limnochemie. Arch. Hydrobiol. **62**: 165—230.

PFAUNDLER, L. (1900): Karte Piburger See und Umgebung, 1:5.000.

SCHMASSMANN, H. (1948): Die chemisch-technologische Beurteilung natürlicher Wässer hinsichtlich ihrer Aggressivität auf Eisen und Mangan. Schweiz. Arch. angew. Wissensch. **14**: 169—177.

SCHMASSMANN, H. (1949): Die Sauerstoffsättigung natürlicher Wässer, ihre Ermittlung und ihre Bedeutung in der Hydrologie. Schweiz. Z. Hydrol. **11**: 430—462.

Anschrift des Verfassers: Univ.-Doz. Dr. Roland PECHLANER, Institut für Zoologie der Universität Innsbruck, Universitätsstraße 4, A-6020 Innsbruck.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck

Jahr/Year: 1968

Band/Volume: 56

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

Artikel/Article: Beschleunigte Eutrophierung im Pipurger See, Tirol. 143-161