

Separatabdruck aus
Geographischer Jahresbericht aus Österreich, XVI. Band
Im Auftrage des Geographischen Institutes der Universität Wien
herausgegeben von Norbert Lichtenecker

Untersuchungen
über die biochemische Schichtung
in einigen Seen der Ostalpen

Von

Franz Ruttner

Leipzig und Wien
F r a n z D e u t i c k e
1933

Inhalt des Gesamtwerkes.

	Seite
Dr. Otto Maull, Professor an der Universität Graz: Grundsätzliche Fragen der Alpengeomorphologie	1
Dr. Eduard Wolfgang Burger, Wien: Strittige Fragen der Glazialmorphologie. (Mit 6 Textabbildungen und 2 Tafeln).....	14
Dr. Wilhelm Schmidt, Universitätsprofessor und Direktor der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien: Kleinklimatische Beobachtungen in Österreich. (Mit 6 Textabbildungen und 1 Tafel) ..	42
Dr. Franz Ruttner, Universitätsprofessor und Leiter der Biologischen Station in Lunz: Untersuchungen über die biochemische Schichtung in einigen Seen der Ostalpen. (Mit 3 Textabbildungen und 1 Tafel).....	73
Dr. Walter Hacker, Universitätsassistent, Wien: Sichttiefe, Wärmegang und Durchlüftung in Hochgebirgsseen. (Mit 6 Textabbildungen und 2 Tafeln).....	88
Dr. Bernhard Fischer, Wien: Höhengrenzen der Vegetation im Schneeberg-Raxgebiet. (Mit 3 Textabbildungen und 4 Tafeln)....	106
Dr. Hermann Wopfner, Professor an der Universität Innsbruck: Wandlungen des Verkehrsnetzes in den Ostalpenländern.....	132
Dr. Friedrich Metz, Professor an der Universität Innsbruck: Die Tiroler Stadt	157

Untersuchungen über die biochemische Schichtung in einigen Seen der Ostalpen.

Von

F. Ruttner, Biologische Station Lunz.

Die Geschichte einer der bedeutungsvollsten Entdeckungen der Limnologie führt uns in das Gebiet der österreichischen Ostalpen. Schon Simony (1850)¹⁾ hat an den Salzkammergutseen die Beobachtung gemacht, daß die Temperaturabnahme nach der Tiefe hin nicht kontinuierlich ist, sondern innerhalb einer bestimmten Schicht sehr plötzlich erfolgt. E. Richter²⁾ hat 40 Jahre später in seinen klassischen Untersuchungen am Wörthersee diese bis dahin kaum beachtete Erscheinung eingehend untersucht und den nunmehr ganz allgemein eingebürgerten Terminus der „Sprungschicht“ geprägt.

Lange Zeit hindurch blieb die diskontinuierliche Schichtung der Wassermassen in einem See ein hydrographisches Problem. Erst nach Beginn unseres Jahrhunderts wurde die Bedeutung offenbar, die der Sprungschicht für die Mehrzahl der Vorgänge und Erscheinungen, die uns in einem Seebecken entgegnetreten, seien es nun Strömungen, stoffliche Umsetzungen oder die Verteilung lebender Organismen, zukommt. Man erkannte, daß die beiden gegenläufigen Prozesse des Stoffwechsels, welche sich unter dem Einfluß von Organismen in einem See abspielen, der Aufbau organischer Substanz und deren Abbau im wesentlichen an die beiden durch die Sprungschicht getrennten Wassermassen, das Epilimnion einerseits und das Hypolimnion andererseits, gebunden sind.

Am klarsten zeigten sich diese Beziehungen zuerst bei den Studien über die Verteilung des im Wasser gelösten Sauerstoffes und der Kohlensäure, die planmäßig an zahlreichen Seen Nordamerikas durch die Wisconsin Lake Survey (Birge and Juday)³⁾ ausgeführt wurden. In Europa war es insbesondere Thienemann,⁴⁾ der die Sauerstoffverteilung in nord- und westdeutschen Seen untersucht und in zahlreichen Arbeiten auf die Bedeutung dieses Faktors für die Beurteilung der Produktionsbedingungen unserer Seen hingewiesen hat.

1) Sitzungsber. Akad. d. Wiss. Wien, 1850.

2) Verh. d. IX. deutschen Geographentages in Wien, 1891.

3) Wisconsin Geological and Natural History Survey XXII, 1911.

4) Verh. Nat. Ver. d. preuß. Rheinlande u. Westfalen 70—71, 1913, 1915. — Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See, Stuttgart 1928 (sowie die dort zitierten Arbeiten).

Hauptsächlich durch Thienemanns Arbeiten angeregt, wurde in der Folgezeit eine verhältnismäßig große Anzahl von Seen teils von fischereilich-praktischen, teils von limnologischen Gesichtspunkten auf ihre Sauerstoffschichtung hin untersucht. Auch aus den Ostalpen liegt eine Anzahl von diesbezüglichen Veröffentlichungen vor, doch ist für die Mehrzahl der Gewässer dieses Gebietes die O₂-Verteilung noch unbekannt.

Es mag für den Fernerstehenden befremdend sein, daß alle diese Untersuchungen sich auf den Sauerstoffgehalt des Wassers — in seltenen Fällen unter Heranziehung des Kohlensäure- oder Eisengehaltes — beschränkten, die anderen im Wasser gelösten Stoffe, vor allem auch lebenswichtige, wie Stickstoffverbindungen und Phosphate, jedoch außer acht ließen. Der Grund liegt darin, daß es bis vor verhältnismäßig kurzer Zeit an geeigneten Methoden mangelte, diese Substanzen quantitativ zu erfassen; denn die üblichen gewichtsanalytischen Verfahren der Chemiker sind für den Limnologen nicht nur zu umständlich, sondern vor allem auch bei den überaus kleinen, im Wasser vorhandenen Mengen zu wenig empfindlich. Die Ausarbeitung geeigneter Methoden, die zum Teil zuerst in der Ozeanographie Verwendung fanden, brachte auch die Seenkunde in dieser Richtung um einen großen Schritt vorwärts. Wir besitzen jetzt für die Mehrzahl der lebenswichtigen Stoffe überaus empfindliche Feldmethoden, die es ermöglichen, in verhältnismäßig kurzer Zeit ein wesentlich umfassenderes Bild von dem chemischen Charakter eines Gewässers und seiner biochemischen Schichtung zu gewinnen, als es bisher möglich war.

Zur Zeit sind es allerdings erst wenige Seengebiete, von denen Untersuchungen vorliegen, welche über die bloße Feststellung der Sauerstoffverteilung in größerem oder geringerem Ausmaß hinausgehen. Es sind dies wiederum nordamerikanische Seen (Wisconsin Lake Survey),⁵⁾ eine Anzahl von tropischen Seen (Deutsche Limnologische Sundaexpedition),⁶⁾ einige Seen Norwegens (Münster-Ström)⁷⁾ und Japans (Yoshimura)⁸⁾ sowie russische Seen. Außerdem wären hier noch die etwas älteren Untersuchungen am Zürichsee und an Talsperren in der Schweiz (Minder,⁹⁾ Riggerbach¹⁰⁾ zu erwähnen.

Im Gebiet der Ostalpen, das wir hier besonders berücksichtigen wollen, wurden planmäßige Studien unter Berücksichtigung aller durch Feldmethoden derzeit erfaßbaren Stoffe — soweit sie für das Leben im See von Bedeutung sind — schon vor einigen Jahren an der Biologischen Station in Lunz begonnen. Die Ergebnisse dieser von H. Müller¹¹⁾ am Lunzer-Ober- und Untersee durchgeführten Arbeiten befinden sich im Druck. In Kärnten hat I. Findenegg¹²⁾ gleichsinnige Untersuchungen in Angriff genommen und interessante Teilergebnisse, auf die wir später noch zurückkommen werden, bereits veröffentlicht.

⁵⁾ l. c. 1928—1932.

⁶⁾ Arch. f. Hydrobiologie, Suppl. „Tropische Binnengewässer“, 1930.

⁷⁾ Naturwissenschaften 1931; Arch. f. Hydrobiol. 1930—1932.

⁸⁾ Arch. f. Hydrobiol. 1932; Jap. Journ. of Geol. and Geogr. 1930—1932.

⁹⁾ Rev. d'Hydrologie 1926; — Verh. Ver. f. theoret. u. angew. Limnologie, 1927.

¹⁰⁾ Rev. d'Hydrologie, 1926.

¹¹⁾ Internat. Rev. d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr., 1933.

¹²⁾ Ebenda 1933; Arch. f. Hydrobiol., 1932.

An einigen Salzkammergutseen arbeitet die Fischereibiologische Bundesanstalt Weißenbach am Attersee, der Hallstättersee wird von Fr. Morton studiert.

Der vergleichenden Forschung eröffnet sich somit auf diesem Gebiet ein weites Feld. Als besonders erwünscht erscheint die wenn auch nicht völlig gleichzeitige, so doch auf einen möglichst kurzen Zeitraum des Spätsommers zusammengedrückte Untersuchung einer größeren Anzahl von Seen, um so Schichtungsverhältnisse zu erfassen, die unter annähernd gleichartigen meteorologischen Außenbedingungen ausgebildet wurden. Die im Spätsommer oder Herbst erreichte Höhe des Schichtungszustandes ist, wie schon Thienemann bezüglich der Sauerstoffverteilung nachgewiesen hat, charakteristisch für jeden See. Sie ist von seiner Größe und Morphologie, von seiner organischen Produktion und vom meteorologischen Charakter der vorhergehenden Periode abhängig. Es können somit auch einmalige Untersuchungen, zur richtigen Zeit ausgeführt und entsprechend gedeutet, in vielen Fällen zur Kennzeichnung des Schichtungstypus ausreichen, zumal dann, wenn Vergleiche mit anderen, zur selben Zeit beobachteten Seen möglich sind.

Diese Umstände haben eine im letzten Herbst von der Biologischen Station in Lunz ausgeführte Untersuchungsfahrt an die Seen des Salzkammergutes veranlaßt, über deren Ergebnisse in den folgenden Zeilen ein vorläufiger Bericht erstattet werden soll. Geplant war eine möglichst vollständige Erfassung der Schichtungsverhältnisse in einer größeren Anzahl von Seen verschiedener Typen, und zwar nicht nur der Temperatur und der gelösten anorganischen Stoffe, sondern auch der Quantität und Verteilung der Planktonorganismen. Ermöglicht wurde die Durchführung dieses umfangreichen Programmes durch ein fahrbares limnologisches Laboratorium, das der Biologischen Station gemeinsam mit der Zentralanstalt für Meteorologie in Wien von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft und vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft in großzügiger Weise zur Verfügung gestellt worden war. Es ist dies ein Lastkraftwagen mit kastenförmigem Aufbau, in dessen Inneres Tische und eine Ausrüstung für limnochemische und biologische Untersuchungen arbeitsbereit eingebaut sind, so daß die nötigen Analysen überall, wo Straßen vorhanden sind, ohne jeden Zeitverlust an Ort und Stelle durchgeführt werden können. Dank dieses in jeder Hinsicht ausgezeichnet bewährten Hilfsmittels ist es gelungen, in der knappen Zeit von zwei Wochen acht Seen eingehend und zwei weitere flüchtig zu untersuchen. Selbstverständlich war dieses Ziel nur durch entsprechende Arbeitsteilung unter den vier beteiligten Personen (Dr. H. Müller, K. Herrmann, stud. phil. A. Ruttner und dem Verfasser) zu erreichen.

An dieser Stelle sollen nur die wichtigsten Ergebnisse hinsichtlich der Temperatur- und chemischen Schichtung in den Seen an der Hand einiger Beispiele kurz erörtert werden. Eine eingehende Darstellung des Gesamtergebnisses, insbesondere auch der biologischen Untersuchungen muß einer späteren Veröffentlichung vorbehalten bleiben.

Die meteorologischen Verhältnisse des Spätsommers und Herbstes 1932 waren für unseren Zweck ganz besonders günstig. Eine lange, kaum unterbrochene Wärmeperiode hatte eine sehr ausgeprägte und stabile Schichtung in den Seen

geschaffen, deren allmählicher Abbau durch die herbstliche Abkühlung nur langsam und ohne wesentliche Störung des Allgemeinbildes vor sich ging. Wir durften also hoffen, in der ersten Hälfte des Oktober, in die unsere Untersuchungen fielen, einen vergleichbaren Zustand in allen Seen anzutreffen.

Daß diese Erwartung nicht getäuscht hat, zeigt ein Blick auf die in ein Diagramm eingezeichneten Temperaturkurven der Abb. 1.¹³⁾ Wir sehen alle 10 Seen in einem Zustand extremer Sommerstagnation mit außerordentlich scharf ausgeprägten Sprungschichten. Der beginnende Abbau der letzteren ist wohl in einigen Fällen (Wolfgangsee, Fuschlsee, Mondsee) deutlich zu erkennen, es zeigt sich aber auch, daß dieser Vorgang am Gesamtcharakter der Schichtung nichts zu ändern vermochte. Selbst die zwei Wochen später (28. X.) von Herrn Dr. Lechler (Weißenbach) auf mein Ersuchen entgegenkommenderweise ausgeführte Temperaturlotung im Attersee verrät außer einem Rückgang der Epilimnion-Temperaturen keinerlei Störung in den tieferen Schichten. — Die leichte Inversion an der Oberfläche im Fuschl- und Mondsee ist auf das kühle Wetter zurückzuführen, bei dem die Messungen ausgeführt wurden.

Das Temperaturgefälle innerhalb der Sprungschicht ist in einigen Fällen ganz ungewöhnlich steil. So betrug der maximale, auf die Tiefenstufe von 1 m entfallende Temperaturunterschied im Mondsee 3·4⁰, im Altausseersee 3·0⁰. Noch auffallender gestaltet sich der Gradient bei enger beieinanderliegenden Messungen. So fanden wir im Altausseersee zwischen 8·0 und 8·5 m eine Differenz von 2·0⁰, im Mondsee zwischen 13·25 und 13·50 m gar 2·5⁰.

Was die Lage der Sprungschicht, bzw. die Mächtigkeit des Epilimnions anbelangt, so ordnen sich die 10 untersuchten Seen des Salzkammergutes deutlich in drei Gruppen. Eine auffallende Übereinstimmung in der tiefen Lage ihrer Sprungschicht und der großen Mächtigkeit des Metalimnions zeigen der Hallstättersee und der Traunsee. Beide werden von der zur Zeit der Schneeschmelze sehr wasserreichen Traun durchflossen und es ist naheliegend, den nur diesen beiden Seen eigentümlichen Charakter der Temperaturverteilung der starken Durchströmung im Frühsommer (einer Zeit, in der die Schichtung sich ausbildet) zuzuschreiben.

Die beiden anderen Gruppen entsprechen — wenn auch nur annähernd — zwei verschiedenen Größenordnungen des Oberflächenareales. In einem Bericht über Ergebnisse der Deutschen Limnologischen Sundaexpedition (l. c.) konnte ich darauf hinweisen, daß die tropischen Seen Niederländisch-Indiens eine sehr deutliche Abhängigkeit der Temperaturschichtung vom Oberflächenareal erkennen lassen. In unserem Gebiet ist dieser Zusammenhang viel weniger klar ausgeprägt als in den unter einem viel gleichmäßigeren und vor allem windstilleren Klima gelegenen Tropenseen. So nimmt in der Gruppe der drei kleinen Becken des Salzkammergutes, die durch eine hochgelegene und nach unten hin besonders scharf abgesetzte Sprungschicht gekennzeichnet sind, der Altausseersee die

¹³⁾ Wegen der Raumersparnis wurden die Tiefen unterhalb 50 m in einem (überdies ungleichmäßig) verkürzten Maßstab gezeichnet.

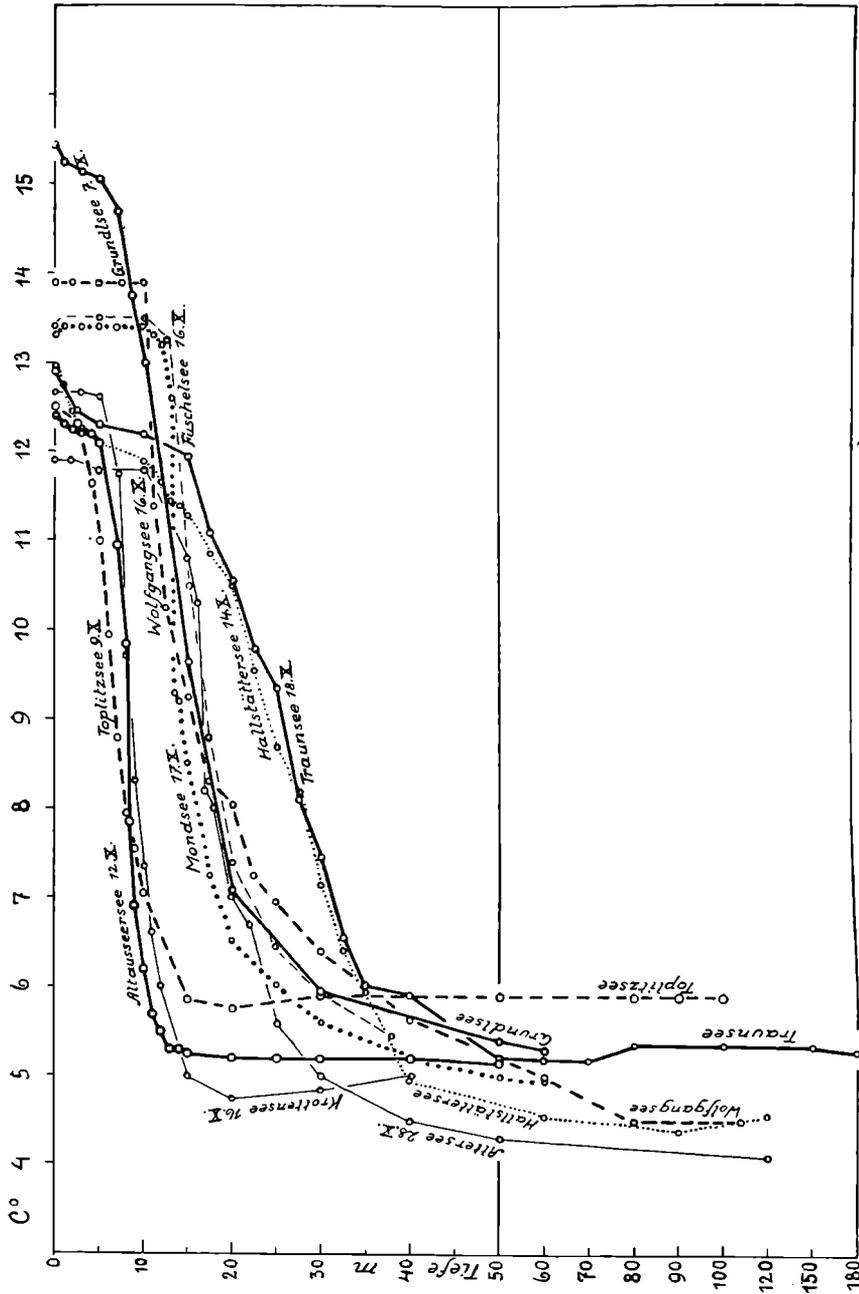


Abb. 1. Temperaturkurven.

extremste Stellung ein, obwohl er der größte ist. In der zweiten Gruppe der mittelgroßen und großen Seen des Gebietes (Mond-, Wolfgang-, Grundl-, Fuschl-, Attersee) ist der Temperaturverlauf im Metalimnion sehr ähnlich und ohne deutliche Beziehung zu den hier vorkommenden Größenunterschieden.

Diese Verhältnisse gehen auch klar aus der folgenden Tabelle hervor, welche, nach den Oberflächenarealen geordnet, die Tiefen enthält, in denen eine Temperatur von 6° erreicht wurde. Diese Tiefe kann man in unserem Fall angenähert als die untere Grenze des Metalimnions betrachten.

	Areal km ²	6° C in der Tiefe von m
Krottensee	0·09	12·0
Toplitzsee	0·51	14·0
Altausseeersee	2·05	10·5
Fuschlsee	2·66	29·5
Grundlsee	4·01	29·5
Hallstättersee	8·34	35·0
Wolfgangsee	12·96	35·0
Mondsee	14·12	25·0
Traunsee	25·09	35·0
Attersee	44·83	24·0

Allerdings ist diese Tiefe, wie auch die Lage der Sprungschicht im allgemeinen, durch einmalige Beobachtungen nicht genau festzulegen, da interne Seiches Verlagerungen der isothermen Schichten um mehrere Meter hervorrufen können. Immerhin scheint es festzustehen, daß in unserem Klima der zweifellos vorhandene Einfluß des Oberflächenareales auf die Gestaltung der Temperaturkurve vielfach durch andere Faktoren, unter denen die Windexposition den ersten Platz einnehmen dürfte, verwischt wird. Nur in kurzen Zwischenräumen im Laufe des Jahres durchgeführte, vergleichende Temperaturbeobachtungen an zahlreichen Seen, welche es gestatten, das Entstehen der Wärmeverteilung in seiner Abhängigkeit von den meteorologischen Faktoren zu verfolgen, dürften über diese Fragen Aufschluß geben können. Solche regelmäßige Messungen sind gemeinsam mit der Zentralanstalt für Meteorologie in Wien und unter freundlicher Mitwirkung daran interessierter Stellen und Personen schon für dieses Jahr in Aussicht genommen worden.

In Abb. 2 sind Summenkurven der Stabilität der Schichtung (nach Schmidt)¹⁴⁾ für Wassersäulen von 1 m² Querschnitt bis zu einer Tiefe von 40 m eingetragen. Man kann daraus die Arbeit in Kilogrammster entnehmen, die vom Wind geleistet werden müßte, um diese Wassersäule bis zu einer bestimmten Tiefe zu durchmischen. Auch hier sind die oben erwähnten drei Gruppen deutlich zu erkennen. In den kleinen Seen (Toplitz-, Krotten- und Altausseeersee) werden schon in 10 m Tiefe beträchtliche Stabilitätswerte erreicht; unterhalb 20 m nehmen dieselben jedoch nur mehr wenig zu. Gerade entgegengesetzt verhalten sich der Hallstätter- und der Traunsee, bei denen der Anstieg der Stabilität infolge der tiefgelagerten Sprungschicht erst unterhalb 20 m steil wird. Bei den übrigen beginnt der Anstieg im allgemeinen bei 10 m und verläuft steil bis zu 40 m. (Beim Grundlsee ist die verhältnismäßig große Stabilität in 10 m Tiefe sowohl auf die in geringerer Tiefe beginnende Sprungschicht als auch auf die am Beobachtungstage im Epilimnion bestehende Schichtung zurückzuführen.)

¹⁴⁾ Internat. Rev. d. ges. Hydrobiol. u. Hydrogr., hydrogr. Suppl., 1915.

Was die Temperaturen des Hypolimnions anbelangt, so fallen vor allem vier Seen (Krottensee, Toplitzsee, Hallstättersee und Traunsee) dadurch auf, daß die Temperatur in einer bestimmten Tiefe wieder zunimmt, daß also eine scheinbar instabile Schichtung vorliegt. Dieser Anstieg beträgt 0·15 bis 0·25°, kann also keineswegs auf Beobachtungsfehler zurückgeführt werden. Ähnliche Fälle, jedoch mit viel auffälligeren Temperaturdifferenzen, sind — auch in den Alpen — schon beobachtet worden (vgl. die Besprechung in der

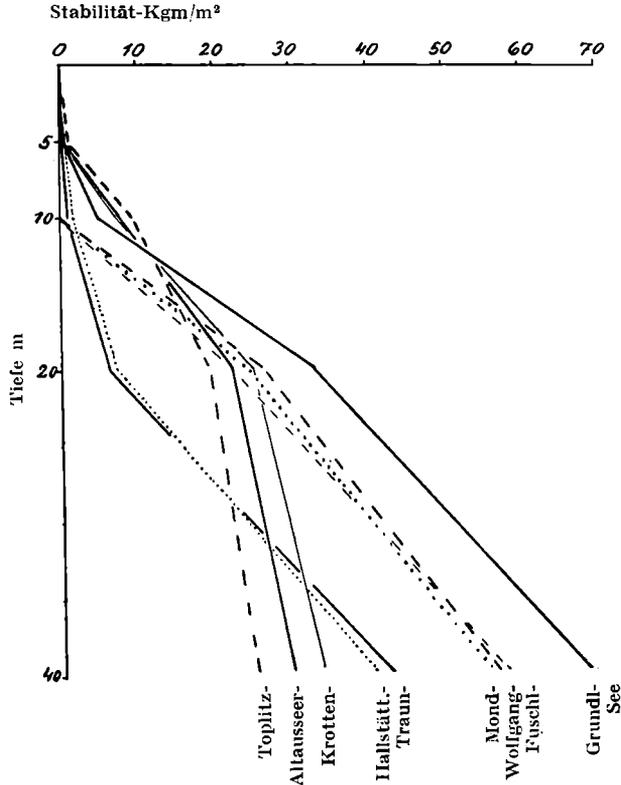


Abb 2. Summenkurven der Stabilität in Wassersäulen von 1 m² Querschnitt.

Seenkunde von Halbfaß, p. 207ff.). Es handelt sich durchwegs um Seen, bei denen das Tiefenwasser einen erheblich größeren Salzgehalt aufweist als das Oberflächenwasser, so daß die durch die Temperaturinversion verursachten Dichtenunterschiede kompensiert werden. Als Beispiel sei das Ulmener Maar angeführt, in dem nach Thienemanns¹⁵⁾ Untersuchungen innerhalb der kritischen Schicht zwischen 16 und 20 m Tiefe die Temperatur von 4·5° auf 6·5°, der Abdampfdruckstand von 242 auf 536 mg im Liter anstiegen. Nun zeigen tatsächlich auch unsere vier Seen verhältnismäßig große Unterschiede der Gesamtkonzentration zwischen Oberfläche und Tiefe. Doch reichen diese Differenzen nicht annähernd an den oben erwähnten Fall des Ulmener Maares heran

¹⁵⁾ Festschr. Med. Nat. Ges., München, 1912.

und es erhebt sich die Frage, ob sie für die Erklärung der Temperaturinversion genügen. In der folgenden kleinen Tabelle habe ich die Gewichtsunterschiede für 1 Liter Wasser, die sich durch die Temperatur einerseits und die Gesamtkonzentration andererseits für die oberen Grenzschichten der Inversion ergeben, zusammengestellt. Der Konzentrationsunterschied wurde nach dem Verfahren von Kohlrausch aus dem elektrolytischen Leitvermögen berechnet ($K_{18} \cdot 10^4 \cdot 75$).

	Unterschied		Gewichtsunterschied von 1 Liter	
	der Temperatur	des Salzgehaltes	durch Temperatur	durch Salzgehalt
Krottensee 20—40 m	4·75—5·0 ⁰	45·4 mg	— 3·5 mg	+ 38·7 mg
Toplitzsee 20—30 m	5·75—5·90 ⁰	16·1 „	— 5·0 „	+ 13·7 „
Hallstättersee 90—120 m . .	4·4 —4·55 ⁰	8·6 „	— 1·5 „	+ 7·3 „
Traunsee 70—80 m	5·2 —5·35 ⁰	7·5 „	— 3·0 „	+ 6·4 „

Aus diesen Angaben geht hervor, daß das Konzentrationsgefälle in allen vier Fällen vollkommen ausreicht, um die durch die Temperaturinversion bedingten Dichteunterschiede wieder auszugleichen, und daß somit von einer instabilen Schichtung nicht gesprochen werden kann. Eine andere Frage ist, wodurch die Temperaturerhöhung des konzentrierteren Tiefenwassers bedingt wird. Man hat hauptsächlich drei Ursachen für die Erscheinung verantwortlich gemacht. 1. Das Auftreten von hochkonzentrierten und relativ warmen Quellen am Grunde des Sees. 2. Die Wirkung der Erdwärme. 3. Die bei der Oxydation organischer Substanzen im Hypolimnion frei werdende Verbrennungswärme. Der derzeitige Stand unserer Kenntnisse gestattet noch kein abschließendes Urteil über die Rolle, die diesen drei Faktoren beim Zustandekommen der Erscheinung, zumal in den von uns untersuchten Seen, zufällt. Voraussetzung bleibt jedoch immer das Bestehen einer Konzentrationsschichtung, da ohne sie die entstandenen Temperaturdifferenzen durch Konvektion wieder ausgeglichen werden müßten.

Quellen mögen unter besonderen Verhältnissen, z. B. in kleineren Becken oder in Kraterseen, wie das Ulmener Maar einer ist, die Ursache sein. Im allgemeinen muß das Aufquellen von Wasser in großer Tiefe als ungewöhnlich bezeichnet werden (vgl. auch Halbfuß,¹⁶⁾ p. 206). Unter den hier besprochenen Fällen kommt mit großer Wahrscheinlichkeit diese Erklärung für den Traunsee in Betracht, doch handelt es sich hier nicht um natürliche Quellen, sondern um künstlich eingeleitete Abwässer der Sodafabrik in Ebensee (Neresheimer und Ruttner).¹⁷⁾ Diese verlassen mit zirka 80⁰ die Fabrik und werden durch eine Rohrleitung in die Tiefe von 15 m des zirka 1·5 km entfernten Sees eingeleitet. Vermöge ihrer Schwere sinken sie ab und bedingen sowohl die Temperatur wie die hohe Konzentration des Tiefenwassers.

Die Annahme der Erwärmung durch den Untergrund hat zumal dort,

¹⁶⁾ Seenkunde, Berlin, 1923.

¹⁷⁾ Zeitschr. f. Fischerei, 1928.

wo die höhere Temperatur innerhalb mächtigerer Schichten auftritt, zur Voraussetzung, daß das Tiefenwasser lange Zeit hindurch stagniert, um bei der geringen Wärmemenge, die vom Boden und den Wänden des Sees in das Wasser eintreten kann, die beobachteten Temperatursteigerungen zu zeigen. Es wird weiter unten gezeigt werden, daß wir im Toplitzsee, im Krottensee und in den tiefsten Schichten des Hallstättersees tatsächlich Gewässer vor uns haben, die aller Wahrscheinlichkeit nach im Herbst und Winter nicht vollständig umgeschichtet werden, deren Tiefenwasser sich also in einem dauernden Zustand der Stagnation befindet.

Viele Seen zeigen eine Temperaturerhöhung nicht wie die bisher erörterten schon in mittleren Tiefen, sondern innerhalb einer dünnen Schicht unmittelbar über dem Grund. Dazu wird auch der Hallstättersee gerechnet, wo die Erscheinung schon von Simony beobachtet und neuerdings wieder von Morton¹⁸⁾ bestätigt wurde. Wie wir jedoch später sehen werden, lassen die chemischen Verhältnisse dieses Sees in deutlichem Anklang an die Verteilungsbilder des Toplitz- und Krottensees erkennen, daß die in Frage stehende Anomalie der Schichtung in der Tiefe von großer Mächtigkeit ist. Übrigens dürfte meines Erachtens auch in allen jenen Fällen, in denen Temperaturanstiege knapp über dem Boden beobachtet wurden, Konzentrationsunterschiede die Ursache sein, wie dies z. B. auch von Hamberg¹⁹⁾ (zitiert nach Halbfuß) schon angenommen wurde. Fast in jedem See hat das Bodenwasser ein erhöhtes elektrolytisches Leitvermögen und es genügen sehr geringe Konzentrationsunterschiede, um die minimalen Dichteänderungen in der Nähe von 4° auszugleichen.

Nach dieser Erörterung der Temperaturverhältnisse, die, wie überall, so auch in unseren Seen die Grundlage aller übrigen Schichtungserscheinungen bilden, seien die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen an der Hand einiger weniger Beispiele kurz dargelegt. Vorher ist es aber wohl nötig, über die Darstellungsform der Tafel IV, in der die hier in Betracht kommenden Daten zusammengefaßt wurden, einige Worte zu sagen. Die graphische Darstellung der Verteilung der einzelnen Stoffe ist hier nicht, wie bisher üblich, durch Linearkurven erfolgt, sondern nach Art der „Kugelkurven“, die von Lohmann in die Planktologie eingeführt wurden und allgemein in Gebrauch sind. Dieses Verfahren geht auf einen Vorschlag des bekannten Physiko-Chemikers Kohlrausch zurück, der empfohlen hat, die Ionendichte in einer Lösung durch Strecken darzustellen, die der dritten Wurzel aus der Volumkonzentration proportional sind. Für die Figuren unserer Tafel wurden nun die dritten Wurzeln der in Tausendtelmilligrammen (γ) ausgedrückten Litergehalte als Durchmesser verwendet, wobei $\sqrt[3]{1}$ in der Zeichnung 0.5 mm entspricht. Überdies wurden die für die einzelnen Tiefen gefundenen Werte als Milligramme im Liter in, bzw. neben die Figuren eingetragen. Diese Darstellungsmethode, die zum erstenmal von H. Müller in seiner im Druck befindlichen Arbeit über die biochemische Schichtung der Lunzer Seen angewendet wurde, bietet den Vorteil größerer Anschaulichkeit dadurch, daß die Verteilung aller Stoffe, gleichgültig in welcher Menge sie auf-

¹⁸⁾ Arch. f. Hydrobiol., 1931.

¹⁹⁾ Petermanns Mitt., 1911.

treten, in demselben Maßstab erfolgen kann. Lediglich bei der Wasserstoffionenkonzentration mußte in der Zeichnung eine zirka 21fache Überhöhung ($H \cdot 10^4$) eintreten, da die Wasserstoffzahl viel zu geringe Werte erreicht. Die (bei H^+) eingetragenen Zahlen bedeuten, wie üblich, den (negativen) Logarithmus der Wasserstoffzahl (p_H). Bei allen übrigen Figuren sind die Durchmesser ein direkt vergleichbares Maß der Verteilungsdichte des betreffenden Stoffes auf den einzelnen Querschnitten einer Wassersäule.

Als erstes Beispiel wollen wir den Wolfgangsee (St. Gilgener Becken) näher betrachten, dessen Schichtungsbilder in der obersten Reihe unserer Tafel eingetragen sind. Sie zeigen den Normaltypus eines subalpinen Sees von oligotrophem Charakter, der mit ganz geringen Abweichungen in der Mehrzahl der bisher untersuchten Fälle wiederkehrt. Von den auf unseren Herbstfahrten eingehender studierten Seen gehören noch hierher: Grundlsee, Altausseersee, Traunsee, ferner im östlichen Gebiet der Erlaufsee und der Lunzer Untersee.²⁰⁾ Dieser Typus ist dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtung der gelösten Stoffe nach der Tiefe hin nur ganz geringfügige Unterschiede aufweist. Wohl ist im Epilimnion — der trophogenen Schicht Thienemanns — unter dem Einfluß der Organismen, insbesondere des Phytoplanktons, eine Verarmung an Nährstoffen festzustellen. Diese äußert sich vor allem in einer Störung des Kohlensäuregleichgewichtes und in einer entsprechenden Verringerung der Wasserstoffionenkonzentration (Anstieg der p_H -Werte). Der Verbrauch der freien Kohlensäure unter der Oberfläche ist durch die Photosynthese der Pflanzen so intensiv, daß die Abspaltung aus den Bicarbonaten nicht Schritt halten kann und ihr Gehalt auf 0 gesunken ist. (Der Gehalt an freier CO_2 , der unter Gleichgewichtsverhältnissen der Bicarbonatkonzentration entsprechend vorhanden sein müßte, ist in der Figur durch den punktierten Umriß angedeutet.) Ferner ist noch eine deutliche Abnahme des Nitrat- und des Kieselsäuregehaltes im Hypolimnion zu erkennen. Aber die Lebenstätigkeit der Organismen hat nicht ausgereicht, um während einer Sommerstagnationsperiode eine merkliche Anhäufung von Abbauprodukten oder eine Abnahme des Sauerstoffgehaltes im Hypolimnion herbeizuführen. Die Sauerstoffkurve, dieser empfindlichste Indikator für solche Vorgänge, zeigt sogar bis zu 80 m hinab einen leichten Anstieg. Nur in der unmittelbar über dem Grund entnommenen Probe (108 m) wurde ein geringerer Wert beobachtet, der aber zweifellos auf die Nähe des Schlammes (Alsterbergs „Mikroschichtung“) zurückzuführen ist. Dasselbe gilt wohl auch von dem leichten Anstieg der Kohlensäure und der Kieselsäure unmittelbar über dem Grund. Bemerkenswert ist ferner das Fehlen von nachweisbaren Phosphatmengen in allen Tiefen (nur über dem Grund wurden Spuren gefunden) und die Tatsache, daß Ammoniak und Eisen in der Mehrzahl der Proben unter der Erfassungsgrenze blieben. Geringfügig ist auch der Anstieg der aus dem elektrolytischen Leitvermögen zu erschließenden Gesamtkonzentration des Wassers.

Der Hallstättersee stimmt bis zu der Tiefe von 90 m in allen wesentlichen

²⁰⁾ Die biochemische Schichtung im Fuschl-, Mond- und Attersee wurde auf unserer Fahrt nicht untersucht; doch dürften diese nach älteren und im Gang befindlichen Beobachtungen Prof. Haempels und der Bundesanstalt in Weißenbach ebenfalls dem oligotrophen Typus angehören.

Punkten mit dem Wolfgangsee überein. (Die Differenzen in den Schichtungsverhältnissen des Epilimnions sind daraus zu erklären, daß die Probenentnahme am Abend eines kühlen Tages erfolgte.) — Die Probe aus 120 m Tiefe zeigt jedoch ein anderes Bild: Der Sauerstoffgehalt ist auf einen sehr geringen Wert gesunken (0,4 mg), der CO₂-Gehalt ist beträchtlich und auch beim Ammoniakstickstoff, beim Phosphor und Eisen treten uns Werte entgegen, die jene des Wolfgangsees wesentlich übersteigen. Der Chemismus dieser Tiefenprobe entspricht somit ganz jenen Verhältnissen, die wir im Hypolimnion schwach-eutropher Seen zu finden gewohnt sind, nur sind hier diese Erscheinungen auf die untersten Wassermassen beschränkt, die eutrophe Schichtung derselben wird von einer viel mächtigeren oligotrophen überlagert. Es liegt nun der Verdacht nahe, daß auch hier lediglich eine „Mikroschichtung“, also um eine Sauerstoffzehrung bzw. um eine Anreicherung von Abbauprodukten in der bodennahen Schicht unter dem Einfluß des Schlammes handle. Daß dies nicht der Fall ist, geht aus den Sauerstoffmessungen Mortons²¹⁾ hervor, die in mehreren Serien den O₂-Gehalt in den tieferen Schichten des Hypolimnions veranschaulichen. Wohl ist das Sauerstoffgefälle unmittelbar über dem Grund besonders steil, so daß in der bodennahen Schicht zweifellos eine Mikroschichtung vorliegt, wie in der Mehrzahl der Seen. Aber die Sauerstoffabnahme wird schon in einer Tiefe von 80 m sehr deutlich und sinkt bei 90 m auf 55%, bei 100 m auf 49%, bei 110 m auf 36% und bei 120 m (3,5 m über dem Grund) auf 20% der Sättigung (Probenentnahme vom 19. VIII. 1930). Die Wassermassen, die eine „eutrophe“ Sauerstoffschichtung zeigen, sind somit mindestens 33 m mächtig und umfassen rund 87 · 10⁶ m³, also 15% des ganzen Seevolumens, Ausmaße, die nicht mehr als Mikroschichtung gedeutet werden können.

Der Hallstättersee erinnert in dieser Hinsicht einigermaßen an die sehr interessanten Schichtungsverhältnisse, die Findenegg²²⁾ in jüngster Zeit an den Kärntner Seen feststellen konnte (Wörthersee, Millstättersee, Weißensee, Klopeinersee). Auch diese sind oligotrophe Seen, deren Hypolimnion einen mehr oder weniger ausgesprochenen Sauerstoffschwund zeigt. Findenegg konnte als Ursache dieser Erscheinung den Umstand nachweisen, daß in diesen Seen, wohl infolge der windgeschützten Lage des Kärntner Beckens, die winterliche Vollzirkulation nicht bis in die größten Tiefen durchgreift. Wassermassen von größerer oder geringerer Mächtigkeit verharren dauernd — oder doch über mehrere Jahresperioden — im Zustand der Stagnation. Die Abbauprozesse, die sich selbstverständlich auch in jedem oligotrophen See, wenn auch viel langsamer als im eutrophen, abspielen, erreichen während der langen Zeitspanne, in welcher sie ungestört wirken können, ein so großes Ausmaß, daß die Bilder eines eutrophen Schichtungstypus vorgetäuscht werden. Interessanterweise zeigen auch diese Kärntner Seen im Hypolimnion jene geringen Temperaturinversionen, über die schon auf S. 79 gesprochen wurde. Es ist nun recht wahrscheinlich, daß auch im Hallstättersee eine fehlende oder mangelhafte Umschichtung des Tiefenwassers die oben beschriebenen Erscheinungen bedingt

²¹⁾ Arch. f. Hydrobiol., 1931.

²²⁾ l. c.

und daß dieser See gewissermaßen den Übergang zu Findeneggs „pseudo-eutrophem“ Schichtungstypus bildet. Untersuchungen, die Reg.-R. Dr. Morton in Hallstatt in Angriff genommen hat, werden zweifellos die Klärung dieser Frage bringen.

Bedürfen die Verhältnisse am Hallstättersee noch einer weiteren Prüfung, insbesondere durch Winterbeobachtungen, so haben wir im Topplitzsee einen Fall vor uns, der schon nach der einmaligen Untersuchung mit größter Wahrscheinlichkeit als Extremfall eines Sees mit Dauerstagnation bezeichnet werden kann. Dieses im Vergleich zu seinem Oberflächenareal (0·51 km²) sehr tiefe Becken liegt, von hohen Felswänden eingeschlossen, wenig mehr als 1 km östlich vom Grundlsee. Die Sauerstoffarmut seines Tiefenwassers ist schon vor längerer Zeit durch Merz, dessen Beobachtungen jedoch meines Wissens unveröffentlicht geblieben sind, festgestellt und neuerdings durch Morton²³⁾ bestätigt worden. — In unseren Beobachtungen fällt schon die Temperaturkurve auf; sie zeigt, neben der schon früher besprochenen Inversion zwischen 20 und 30 m, die hohe Temperatur von 5·9° im ganzen Hypolimnion, während man unter normalen Verhältnissen in einem See von dieser Tiefe nicht viel mehr als 4° erwarten würde. Ferner hat die Kurve des elektrolytischen Leitvermögens, in der die Gesamtkonzentration an Salzen zum Ausdruck kommt, einen sehr eigentümlichen Verlauf: Sie steigt innerhalb und knapp unterhalb der Sprungschicht zu sehr bedeutenden Werten steil an und ändert sich von 30 m an nur mehr wenig. Der (nach Kohlrausch) aus dem Leitvermögen berechnete Konzentrationsunterschied zwischen Oberfläche und Tiefe beträgt 125 mg im Liter und wird hauptsächlich durch einen hohen Chloridgehalt (bis zu 43 mg Cl gegenüber 2 mg an der Oberfläche) bedingt. Wahrscheinlich schneidet das Seebecken salzhaltige Werfener Schiefer an oder es erhält sublakustrisch salzhaltige Zuflüsse. Dieser Konzentrationsunterschied bedingt eine um ungefähr 0·000106 größere Dichte des Tiefenwassers und damit eine erhebliche Stabilität der Schichtung (annähernd gleich jener, die durch den Temperaturunterschied zwischen 4° und 7° verursacht würde). Zieht man noch die außerordentlich windgeschützte Lage des Sees und seinen verhältnismäßig schwachen Durchfluß in Betracht, so kann es nicht wundernehmen, wenn hier tiefgreifende Durchmischungen nur in Ausnahmefällen eintreten.

Darauf deuten auch alle Erscheinungen der biochemischen Schichtung: Der starke und im ganzen Hypolimnion gleichmäßige Sauerstoffschwund und die Anreicherung der Abbauprodukte (freie CO₂, Ammoniakstickstoff, Phosphor, Kieselsäure und Eisen). Der Umstand, daß der Sauerstoffgehalt den Nullwert nicht erreicht, ist bemerkenswert und vielleicht auf eine andauernde, geringe O₂-Zufuhr durch Quellen, die sich in größeren Tiefen einschichten, zurückzuführen. Interessant ist auch der Vergleich der Nitrat- und Ammoniakkurven: Im selben Ausmaß, in dem mit fortschreitendem Sauerstoffschwund der Nitratstickstoff abnimmt, wächst der Gehalt an Ammoniakstickstoff. Diese Tatsache wurde schon von Müller bei seinen Studien am Lunzer Obersee gefunden und beweist, daß das Verhältnis dieser beiden wichtigsten Stickstoffkomponenten

²³⁾ Arch. f. Hydrobiol., 1932.

von Gleichgewichtsverhältnissen beherrscht wird, die von der Sauerstofftension abhängen.

Noch extremere Schichtungsbilder treten uns in dem kleinen, aber immerhin 40 m tiefen Krottensee entgegen, der auf dem Sattel zwischen Wolfgang- und Mondsee gelegen ist. Dieser See ist vor allem durch vollständigen Sauerstoffschwund und durch eine ganz ungewöhnlich große Anhäufung von Abbauprodukten in den unteren Schichten des Hypolimnions gekennzeichnet. Der Gehalt an freier Kohlensäure ist so groß, daß die Wasserproben beim Aufholen heftige Gasblasenentwicklung zeigten. Ein Eisengehalt von 17 mg Fe wurde meines Wissens in Seen — abgesehen vielleicht von Kraterseen — nirgends gefunden. Die auf unserer Tafel verzeichneten Mengen von Ammoniakstickstoff und Phosphor gelangten bisher nur ganz ausnahmsweise in Seen von extrem eutrophem Charakter zur Beobachtung. Auch im Krottensee besteht ein sehr beträchtlicher Anstieg der Gesamtkonzentration mit zunehmender Tiefe. Dieser Umstand, sowie die deutlich ausgeprägte Temperaturinversion und die auf eine lang währende Stagnation deutenden Mengen der Abbaustoffe im Tiefenwasser machen es sehr wahrscheinlich, daß auch dieser See nur in Ausnahm Jahren bis zum Grunde umgeschichtet wird.

Die angeführten Beispiele lassen erkennen, daß der zuerst von Findenegg in Kärnten beobachtete Seentypus, der infolge von Dauerstagnation eine „pseudoeutrophe“ biochemische Schichtung aufweist, im Alpengebiet anscheinend gar nicht so selten ist. Sie zeigen auch die große Bedeutung, die ein an sich nur geringer Konzentrationsanstieg in der Tiefe sonst normaler Seen für die Stabilitätsverhältnisse und damit für den Austausch der Wassermassen und den Stoffhaushalt gewinnen kann. Wie lange die Stagnation währen muß, um in einem oligotrophen See das Schichtungsbild eines eutrophen zu schaffen, dies wird nur durch langwährende Kontrolle festgestellt werden können und von Fall zu Fall sehr verschieden sein. Lehrreich ist in dieser Hinsicht das Experiment, das in letzter Zeit am Traunsee durch Einleitung der Abwässer der Sodafabrik in Ebensee ausgeführt wurde. Wie die Temperatur- und Leitfähigkeitsbeobachtungen des genannten Werkes zeigen, ist der See in den Wintern 1930/31 und 1931/32 nur bis zu Tiefen von zirka 60 m vollständig umgeschichtet worden. Bei unserer Untersuchungsfahrt im Oktober 1932 fanden wir seine chemische Schichtung nach dieser mindestens 2½ Jahre währenden Stagnation wohl kaum verändert; sie zeigte ausgesprochen oligotrophen Charakter, doch war eine geringe Abnahme des Sauerstoffgehaltes in den Tiefen unterhalb 60 m nicht zu verkennen. — Es sei noch einmal hervorgehoben, daß alle bisher festgestellten Fälle mit pseudoeutropher Schichtung schon an der in der Tiefe vorhandenen Temperaturinversion kenntlich sind.

Es sind nun noch einige Worte über die Gesamtkonzentration und den Anteil zu sagen, der den gelösten Bikarbonaten des Kalziums und — zum geringeren Teil — des Magnesiums an derselben zukommt. Um zahlreiche Gewässer in dieser Beziehung bequem zu vergleichen, wird man zweckmäßig ein Koordinatensystem verwenden mit Bikarbonat-Konzentrationen als Abszissen und elektrolitischen Leitfähigkeiten als Ordinaten. In Abb. 3 wurden nun 10 Seen des Salzkammergutes nach diesen beiden Größen eingetragen, und zwar für

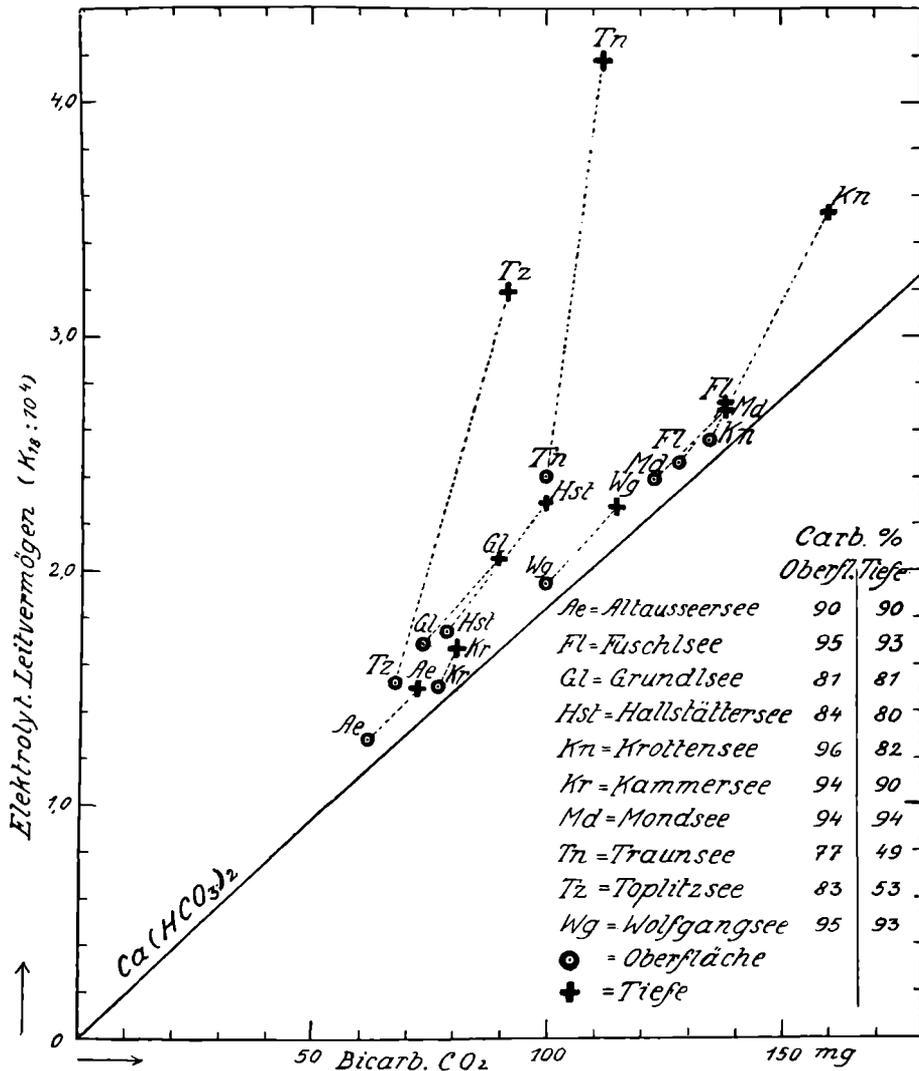
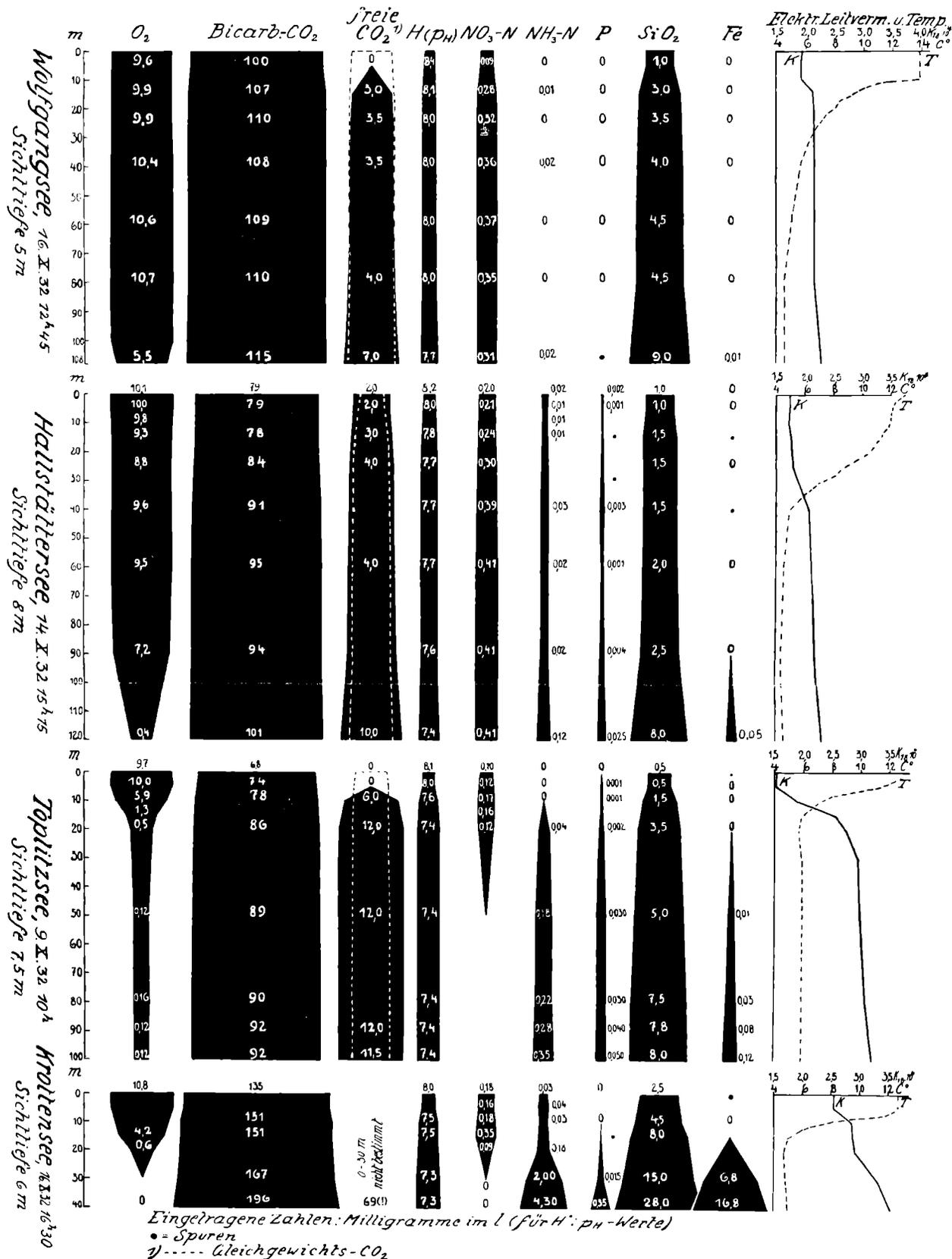


Abb. 3. Anteil der Bicarbonate an der Gesamtkonzentration der Seen.

jeden See die beiden Extreme (Oberflächen- und Tiefenwasser). Die ausgezogene Linie ist die Kurve des elektrolytischen Leitvermögens reiner Bikarbonatlösungen bei steigender Konzentration. Je näher also der Punkt eines Gewässers an dieser Linie gelegen ist, desto größer ist der Anteil der Bicarbonate an seinem Gesamtsalzgehalt, desto geringer die Menge der anderen Elektrolyte, vor allem der Chloride und Sulfate. Ein Blick auf unsere Abb. zeigt, daß die Oberflächenproben von 6 Seen (Altausseer-, Kammer-,²⁴⁾ Wolfgang-, Mond-, Fuschl- und Krottensee) sehr nahe an der Bikarbonatlinie liegen. 90 bis 96% ihres Salz-

²⁴⁾ Ein kleiner Quellsee von 6 m Tiefe knapp östlich des Toplitzsees.



Eingetragene Zahlen: Milligramme im l (für H: pH-Werte)
 • = Spuren
 1) ---- Gleichgewichts-CO₂

Verlag von Franz Deuticke, Leipzig und Wien.

gehalten sind Bikarbonate. Vier Seen (Toplitz-, Grundl-, Hallstätter- und Traunsee) fallen aus dieser Reihe heraus, bei ihnen beträgt der Bikarbonatanteil nur 77 bis 84%. Es sind dies die Seen des Salzgebietes, die an Chloriden reiche Zuflüsse erhalten. Bemerkenswert ist, daß im Ausseer Gebiet beide Typen (Grundl- und Toplitzsee einerseits, Altausseer- und Kammersee andererseits) unmittelbar nebeneinander vorkommen. Die Tiefenproben sind zwar durchwegs konzentrierter (die Unterschiede im Salzgehalt sind aus der Tabelle ohne weiteres ersichtlich), aber ihr Bikarbonatanteil ist bei der Mehrzahl kaum verschieden von dem der Oberflächenproben. Ganz abweichend verhalten sich jedoch der Toplitz-, Traun- und Krottensee. Diese Seen zeigen nicht nur die höchsten Konzentrationen, sondern auch die niedrigsten Bikarbonatprozent im Tiefenwasser. — Ferner ist aus der Darstellung noch zu ersehen, daß alle untersuchten Seen in den Bereich der mittleren und hohen Konzentrationen fallen, alle sind gut gepuffert. Immerhin sind bemerkenswerte Unterschiede vorhanden. So bilden die im Ursprungsgebiet der Traun gelegenen Seen eine Gruppe von relativ niedriger Konzentration, während die Becken des Vorlandes einen wesentlich höheren Salzgehalt besitzen.

Es braucht wohl nicht betont zu werden, daß wir diese Untersuchungen, von denen einige Ergebnisse hier mitgeteilt wurden, nicht als abgeschlossen betrachten, sondern die Absicht haben, sie bei späteren Fahrten zu ergänzen und weiter auszudehnen.

Lunz am See, Biologische Station, Jänner 1933.