

Der Krottensee im Salzkammergut

Ergänzungen zur Morphometrie und Hydrochemie eines
extrem meromiktischen Alpensees

Franz B e r g e r

Seit der Entdeckung FINDENEGGs (1933), daß manche Alpenseen keine Vollzirkulationen aufweisen und nachdem RUTTNER (1937) den gleichen Typus im Salzkammergut am Krottensee vorgefunden hatte, sind noch viele dieser interessanten Gewässer bekannt geworden. Infolge der Dauerstagnation ihres Tiefenwassers wird auch in oligotrophen Seen der verbrauchte Sauerstoff fast gar nicht erneuert und der anaerobe Zustand dieser Zone ermöglicht eine Kette von anorganischen und biochemischen Reduktionsprozessen. Dabei spielt das Eisen eine wichtige Rolle, etwa für die Bindung oder Freisetzung des Phosphats (EINSELE 1938, 1941) oder für die Festlegung des aus dem Sulfat bakteriell reduzierten Sulfids.

In der folgenden Darstellung werden einige morphometrische Daten dieses Sees ergänzend zur Kenntnis gebracht und einige stöchiometrische Beziehungen betrachtet, die an der hydrochemischen Schichtung dieses natürlichen Musterbeispiels erkennbar sind.

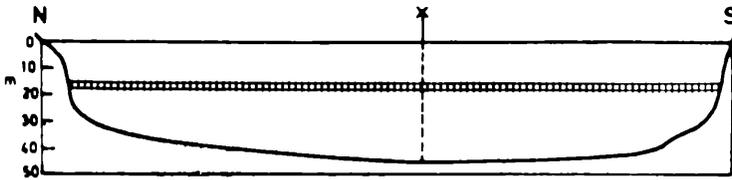
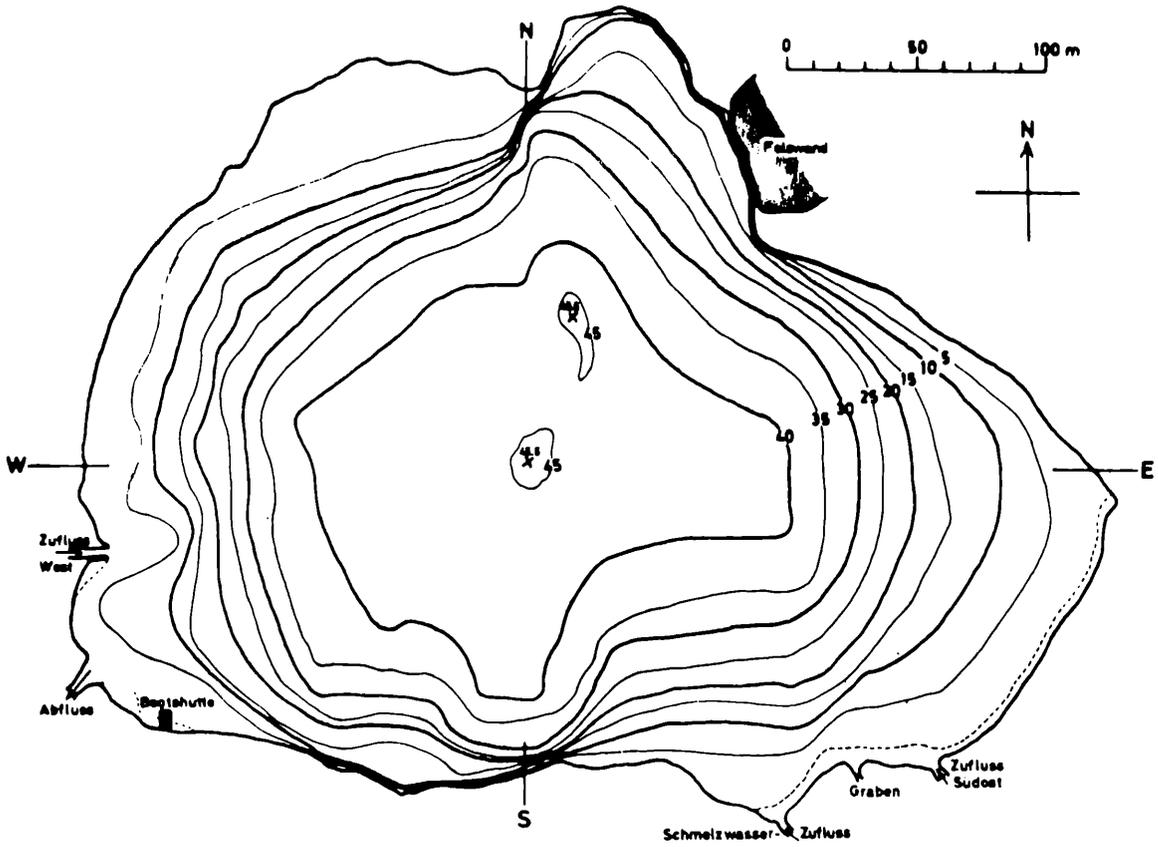
Zur Morphometrie des Seebeckens: Eine sehr sorgfältige Ausmessung und eine danach detailliert ausgeführte Tiefenkarte ist A. REGNAUER (1975) zu verdanken. Sie ist in Abb.1 wiedergegeben. Die beiden Hauptachsen Nord-Süd und Ost-West liefern zwei charakteristische Querschnitte, die unter der Karte dargestellt sind und zwar ohne Übertiefung, also geometrisch richtig. Der See ist eine tiefe Pfanne mit z.T. ausserordentlich steilen Wänden. Die größte Tiefe mit 45,5 m entspricht 13,8% des mittleren Durchmessers des Oberflächenareals (330 m), eine Verhältniszahl, die nur von wenigen Seen der Erde übertroffen wird.

In den Querschnittzeichnungen und in den übrigen Diagrammen der Abb. 1 ist durch Rasterung eine Schicht angedeutet, die man als "kritische Tiefe" bezeichnen kann. Die von der Oberfläche ausgehenden Strömungen und Turbulenzen dringen in den Zeiten der Homothermie in die Tiefe vor, bis eine höhere Dichte des Wassers infolge höheren Mineralgehalts nicht mehr überwunden werden kann. Für die meisten Alpenseen der gemäßigten Zone liegen die Bedingungen so, daß die von der Oberfläche ausgehende Bewegungsenergie mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt und von einer gewissen Tiefe an die während der Sommer-, bzw. Winterstagnation entstandene "Chemokline" bestehen läßt. Diese für eine Vollzirkulation kritische Tiefe ist der Quadratwurzel aus dem mittleren Durchmesser proportional (oder der 4. Wurzel aus dem Seeareal, BERGER 1955). Für den Krottensee ergibt sich so die eingezeichnete Zone zwischen 17 und 19 m Tiefe.

Im Diagramm der Volumskurve ist der totale Sauerstoffschwund durch senkrechte Schraffen angedeutet, darüber ist durch Punktierung eine etwa 5 m mächtige Zone gekennzeichnet, die bei den Messdaten vom 4. Oktober 1979 kommentiert wird.

Das letzte Diagramm stellt den Verlauf der Wasser-Boden-Relation $\Delta V/\Delta A$ dar (ELSTER und SCHMOLINSKY 1954, BERGER 1971). Dieser Quotient zeigt an, wieviel Kubikmeter Wasser mit je einem Quadratmeter Schlammoberfläche in horizontalem Austausch stehen können (die Dimension $m^3/m^2 = m$, Meter). Zahlenwerte unter 10 bedeuten, wie die Erfahrung lehrte, eine hohe, über 20 eine verschwindend kleine Schlammrückwirkung auf das Wasser. Die Tiefenskala ist rechts in m, links in den Einheiten der "reduzierten" Tiefe eingetragen. Nimmt man als Einheit die Meterzahl der kritischen Tiefe (4. Wurzel aus dem Oberflächenareal A_0 in m^2), so lassen sich verschiedene Seen im Hinblick auf ihre Durchmischbarkeit vergleichen, soweit dieser Parameter (maximale Tiefe: kritische Tiefe) eine Rolle spielt. Diese auf die Oberfläche reduzierte Tiefe $z(\text{red})$ beträgt beim Krottensee 2,67, ähnlich jener, die bei tiefen Kärntner Seen festgestellt werden kann.

Der Unterschied zwischen "relativer" und "reduzierter" Tiefe, also von $100 z_m/\bar{d}$ und $z_m/\sqrt{\bar{d}}$, ist der einer geometrisch-geographischen Größe und einer, die auf das limnische Geschehen Bezug nimmt.



Querschnitte,
 nicht übertieft

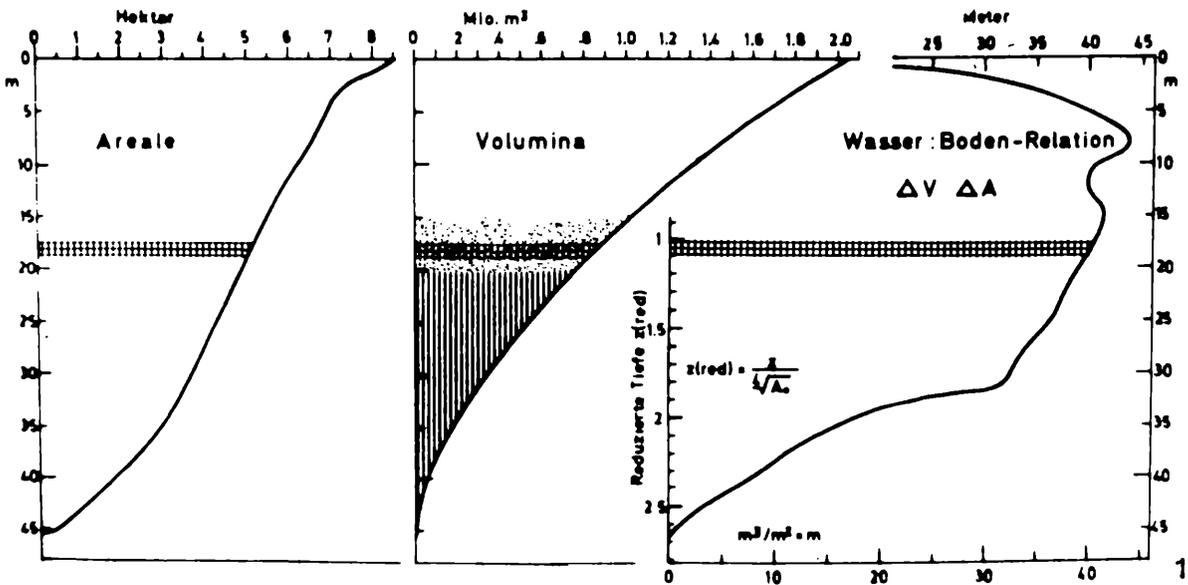
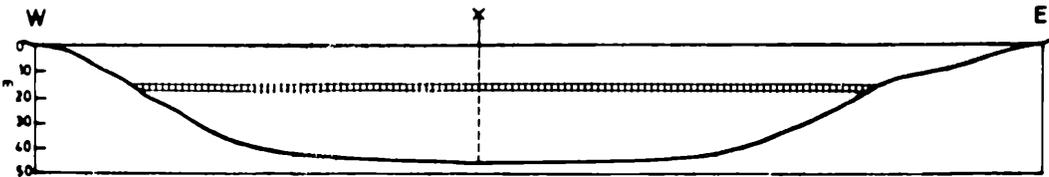
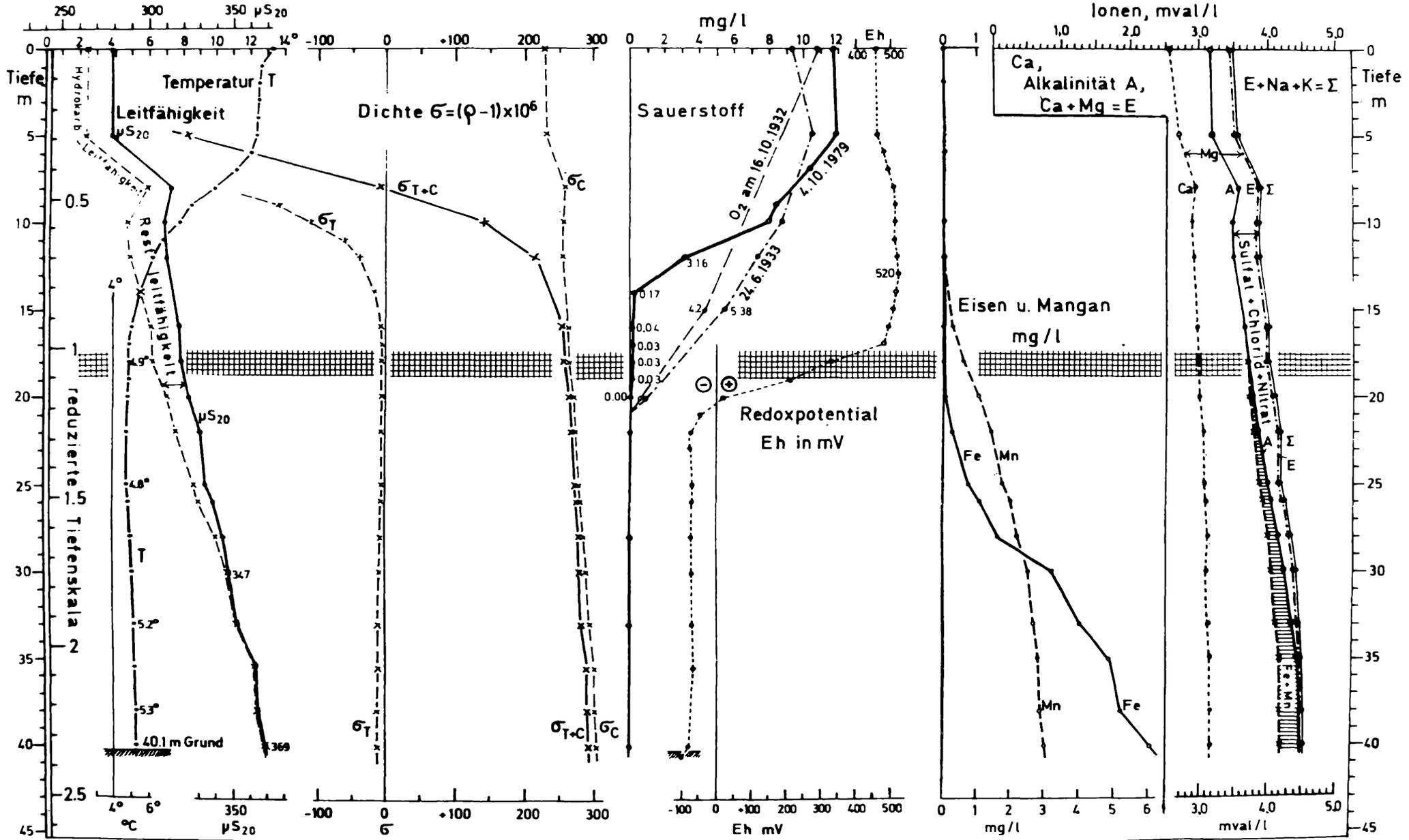


Abb. 2

KROTTENSEE, Schichtung am 4.10.1979.



Bemerkungen zu den Meßdaten vom 4. Oktober 1979 (Abb. 2):

Der Temperaturverlauf zeigt ein homogenes Epilimnion, das im Herbst durch Abkühlungskonvektion und Windwirkung an Mächtigkeit gewinnt. Die anschließende Sprungschicht reicht bis zur reduzierten Tiefe 1 (18 m), der Untergrenze primärer Zirkulation. Im Hypolimnion ist unterhalb 25 m eine deutliche Inversion von einem halben Grad zu bemerken. Das beweist das Vorhandensein einer Chemokline, die für meromiktische Seen charakteristisch ist, aber nicht notwendigerweise eine Temperatur-Inversion zur Folge hat.

Die Leitfähigkeit nimmt zwischen 5 und 8 m Tiefe um mehr als 30 μS zu infolge einer Erhöhung des Ca-Hydrokarbonats, wie aus dem Diagramm rechts ersichtlich (Ca und A). Da sowohl Leitfähigkeit wie auch Kationen-Summe Σ in 8 m ein leichtes Maximum aufweisen, ist die Einschichtung von Bachwasser die wahrscheinlichste Ursache. Die unter dem Maximum folgende Inversion wird von der temperaturbedingten Dichte σ_T weitaus kompensiert.

Die Dichteschichtung σ_{T+C} , aus Temperatur und Leitfähigkeit ermittelt (BERGER 1955), ist oberhalb der reduzierten Tiefe 1 in 18 m zu dieser Jahreszeit noch überwiegend von der Temperatur bestimmt, unterhalb dieser Zone praktisch nur von der Leitfähigkeit, also dem Salzgehalt

Sauerstoff und Redoxpotential: Übereinstimmend mit den ältesten Analysen vom Herbst 1932 und vom Frühjahr 1933 (RUTTNER 1937) beginnt der totale Sauerstoffschwund unterhalb der 20-m-Isobathe. Während aber damals die belüftete Zone unmittelbar an die anaerobe angrenzte, hatte sich schon im Jahre 1962 eine "Sauerstoff-Dämmerungszone" von mehreren Metern Mächtigkeit dazwischengeschoben, die auch heute noch besteht. DANECKER (1971) bezeichnete sie als 'Spurenschicht'. Durch die Messung des Redoxpotentials in situ läßt sich beweisen, daß die außerordentlich kleinen Analysenwerte nach der Winkler-Methode richtig sind. Solange noch eine Spur an freiem Sauerstoff vorhanden ist, bleibt die Spannung positiv. Erst mit dem Verschwinden molekular gelösten Sauerstoffs schlägt die Spannung ins Negative um, entsprechend der Stärke des wirksamen Redoxsystems. Wie das Diagramm zeigt, ist in der Zone der analytisch gefundenen Minimalwerte das Redoxpotential positiv und bestätigt damit diese Resultate.

Im Jahre 1962 wurde von EINSELE der Versuch gemacht, durch Einblasen von Luft in das Hypolimnion in 33 m Tiefe eine Belüftung und Durchmischung zu erzwingen. Darüber liegt ein Bericht von DANECKER (1971) vor. Die Belüftung erfolgte in zwei Phasen: vom 1. bis zum 13. und vom 25. bis zum 31. Oktober 1962. Mit dem Erreichen der Homothermie im Dezember darauf hatte sich die Sauerstoffgrenze bis in die Tiefe von 41 m verlagert.

Acht Jahre später, im Oktober 1970, war von diesem Erfolg fast nichts mehr zu bemerken. Die O₂-Schichtung war mit allen Teilerscheinungen wieder zu jener Form gelangt, die sie vor dem 1. Oktober 1962 gezeigt hatte. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht.

Tiefe m	Sauerstoff mg/l			
	1.Okt.62 (DANECKER)	19.Dez.62	31.Okt.70 (BERGER)	4.Okt.1979
14	1,51	3,85	1,07	0,17
16	0,23	3,70	0,60	0,04
18	0,04	3,38	0,06	0,03
20	0,03	3,00	0	0
30	0	2,62	0	0
40	0	1,62	0	0

Beachtlich ist nicht nur die Resistenz der Schichtung gegen den tiefreichenden Eingriff, sondern auch die Wiederherstellung des alten Zustands. Dabei ist der Dichtegradient im Hypolimnion relativ klein und nahezu konstant, er beträgt nur 1,6 g pro Kubikmeter. Es hat den Anschein, als wirkten nicht nur endogene Ursachen (Kalkfällung - Kalklösung), sondern auch ektogene (Zuflüsse verschiedener Dichte) an dem Aufbau dieser so markanten und beständigen Schichtung mit.

Die Äquivalent-Leitfähigkeit der Kationen-Summe ist zwar keine streng definierte physikalische Größe, hat sich aber bei Analysen natürlicher Wässer als Kontrollzahl sehr brauchbar erwiesen. Der Quotient aus der Leitfähigkeit μS_{20} und der Summe Ca + Mg + Na + K in mval/l liegt für mittlere Hydrokarbonat-Sulfatwässer bei 80. Der Mittelwert für die 17 Bestimmungen der Tiefenserie war 79,8 bei einer Standardabweichung von 0,6. Obwohl sich die Wasserqualität von epilimnischem und Tiefenwasser sehr weitgehend unterscheidet, war in den kleinen Abweichungen kein Gang festzustellen.

Die Restleitfähigkeit ist die Differenz zwischen Gesamtleitfähigkeit und der aus der Alkalinität abgeleiteten Hydrokarbonat-Leitfähigkeit. Sie entspricht dem Anteil der Salze starker Säuren (Sulfate, Chloride und Nitrate). Da im Wasser des Krottensees Nitrate und Chloride äquivalentmäßig unbedeutend sind, entspricht die Restleitfähigkeit praktisch dem Sulfatgehalt, dargestellt durch den Zwischenraum der beiden Leitfähigkeits-Kurven. Genauer ist der Sulfatgehalt repräsentiert durch die Differenz von Kationensumme und Alkalinität ($\Sigma - A$) im Ionendiagramm. Beide Formen der Darstellung lassen die Abnahme des Sulfatgehalts mit der Tiefe übereinstimmend erkennen. Das Sulfat wird reduziert, der entstandene Schwefelwasserstoff aber von dem reichlich vorhandenen Eisen abgefangen. Obwohl das Löslichkeitsprodukt von FeS bei 10^{-19} liegt, ist H_2S doch in Spuren nachweisbar.

Eisen und Mangan zeigen sehr anschaulich die schon von EINSELE 1940 bemerkte und erklärte Schichtung. Beim diffusen Aufsteigen aus der Schlammzone wird das Ferro-Hydrokarbonat von den geringsten Spuren Sauerstoff oxydiert und das außerordentlich kleine Löslichkeitsprodukt des $Fe(OH)_3$ in der Größenordnung von 10^{-38} ergäbe beim pH von 7 theoretisch eine Fe-Konzentration von 10^{-17} mol/l, praktisch bedeutet das eine totale Ausfällung. (Der Humusgehalt natürlicher Wässer hält eine vom organischen Gehalt abhängige Menge Ferri-Eisens in Lösung.) Die Eisen-Schichtung endet daher im allgemeinen an der Sauerstoffgrenze, während Mangan nicht nur ein höheres Löslichkeitsprodukt seines Hydroxyds aufweist (10^{-18}), so daß bei pH 7 noch eine Mn-Konzentration von 10^{-4} Mol, das ist rund ein halbes Milligramm im Liter, beständig wäre, sondern dieses Hydroxyd geht erst allmählich in die höhere Oxydationsstufe über und fällt dann als MnO_2 aus. Das Mangan vermag daher bis in schwach sauerstoffhaltige Schichten aufzusteigen.

Im Ionen-Diagramm sind Fe und Mn so wie die anderen Komponenten in mval/l eingetragen. Es zeigt sich, daß ihre Hydrokarbonate bei der Alkalinitätsbestimmung unter N_2 -Begasung exakt miterfaßt werden, denn die Alkalinität reicht in der Tiefe bis an die Gesamtkonzentration heran. Die Summe Fe + Mn bildet auch einen Teil der Gesamthärte, die um diesen Betrag zu vermindern ist. Analytisch wurde unter den angewendeten Bedingungen mit Komplexon (EDTA) Ca + Mg + Fe + Mn gemessen.

Jede limnochemische Schichtung ist die Resultierende vieler Faktoren. Diese ergeben beim Krottensee im Verein mit der Beckenform ein Gesamtbild von eindrucksvoller Beständigkeit.

The morphometry of the basin of Krottensee (Salzkammergut, Austria) is completed by some diagrams. Certain facts about the extremely settled meromixis of this small lake are taken under consideration together with remarks on the stoichiometry of the hydrochemical stratification.

Literatur

- Berger, F. (1955) Die Dichte natürlicher Wässer und die Konzentrationsstabilität in Seen. - Arch. Hydrobiol. 22, 286 - 294
- (1971) Zur Morphometrie der Seebecken.- Carinthia II, Sonderh. 31, Festschrift für I. Findenegg, 29 - 39
- Danecker, E. (1971) Die künstliche Durchmischung des Krottensees.- Carinthia II, Sonderh. 31, Festschr. Findenegg, 41 - 62
- Einsele, W. (1938) Über chemische und kolloidchemische Vorgänge in Eisen-Phosphatsystemen unter limnochemischen und limnogeologischen Gesichtspunkten.- Arch. Hydrobiol. 33, 361 - 387
- (1940) Versuch einer Theorie der Dynamik der Mangan- und Eisenschichtung im eutrophen See.- Die Naturwissenschaften 28, 257 - 264, 280 - 285
- Elster, H. J., und F. Schmolinsky (1954) Morphometrie, Klimatologie und Hydrographie der Seen des südlichen Schwarzwaldes.- Arch. Hydrobiol., Suppl. 20, 157 - 211
- Findenegg, I. (1933) Alpenseen ohne Vollzirkulation. - Intern. Rev. ges. Hydrobiol. 28, 295 - 311
- Regnauer, A. (1975) Untersuchungen zum Verhalten pelagischer Crustaceen im Seeausfluß. - Diss. Univ. München.
- Ruttner, F. (1937) Limnologische Studien an einigen Seen der Ostalpen. - Arch. Hydrobiol. 32, 167 - 319

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahresbericht der Biologischen Station Lunz](#)

Jahr/Year: 1979

Band/Volume: [1979_003](#)

Autor(en)/Author(s): Berger Franz

Artikel/Article: [Der Krottensee im Salzkammergut 163-170](#)