

Beiträge der Biologischen Station Lunz zum IHP 1975–1980

Mit 8 Tabellen

Inhalt

1.	Zum Problem der Meromixie von Alpenseen	61
1.1	Einleitung und Vergleich	61
1.2	Ergänzungen zur Morphometrie und Hydrochemie des extrem meromiktischen Krottensees	63
1.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse	63
1.3.1.	Gebirgsseen in Hochlagen	63
1.3.2.	„Übertiefe“ Seen	63
1.3.3.	„Seichte meromiktische“ Seen	64
Literatur	64
2.	Zum hydrochemischen Problem des Neusiedlersees	64
2.1.	Einleitung	64
2.2.	Zusammenfassung der Ergebnisse	66
Literatur	66
3.	Zur hydrochemischen Charakterisierung von Silikat- und Humusgewässern in Niederösterreich	66
Literatur	67

1. Zum Problem der Meromixie von Alpenseen

1.1. Einleitung und Vergleich

Zu Anfang der Dreißigerjahre fanden FINDENEGG (1933) in Kärnten und RUTTNER (1937) im Salzkammergut, daß das Tiefenwasser mancher Alpenseen im Vorfrühling und im Spätherbst in die bei Homothermie und Dichtegleichheit mögliche Zirkulation nicht einbezogen wird, sondern viele Jahre undurchmischt verharrt. Dieser Teil der Wassermasse, von FINDENEGG (1) „Monimolimnion“ genannt, zeigt alle Folgen hydrochemischer und biologischer Natur, wie Sauerstoffschwund und anaerobe Zersetzung. Ein solches „Monimolimnion“ ist charakteristisch für die „meromiktischen“ Seen, fehlt aber in anderen derselben Region, den „holomiktischen“ Seen, wo zweimal im Jahr die homotherme Wassermasse durch Wind und Zuflüsse in Zirkulation versetzt, belüftet und erneuert wird. Auf diese Weise bleibt das Tiefenwasser für tierisches Leben, z. B. Fische und deren Nahrungstiere geeignet, was in meromiktischen Seen nicht der Fall ist.

Das Ausbleiben einer Wasserumwälzung in den Zeiten der Homothermie hat seine Ursache in einer noch verbleibenden Dichteschichtung infolge ungleichen Salzgehalts. Einen solchen Konzentrationsgradienten weisen aber auch die holomiktischen Seen auf, nur daß bei diesen die Wasserbewegungen ausreichen, das meist nur geringe Dichtegefälle bis zum Grund zu überwinden. Es lag nahe, anzunehmen, daß die ungleiche Windexposition verschiedener Alpenseen die Zirkula-

tionsverhältnisse grundlegend bestimmt. Eine einwandfreie Messung würde viele Windmesser, dicht über der Wasseroberfläche und über den ganzen See verteilt, erfordern. Wegen der praktischen Unmöglichkeit einer solchen Anlage wurden an jedem der im Folgenden genannten Seen nur einzelne Windwegmesser aufgestellt, um wenigstens relative Werte zu erhalten.

Neben der nur unzureichend erfaßbaren Windexposition gibt es aber noch andere, besser kontrollierbare Faktoren, die die Schichtungerscheinungen in Alpenseen bestimmen (2).

- 1) Die Wasserfracht, die Summe der Zuflüsse während eines Jahres. Im Verhältnis zum Seevolumen ergibt sich das Ausmaß der Durchflutung.
- 2) Die Art der Zuflüsse. Ein in kompaktem Strome mündender Bach bringt eine große, ein diffus durch Uferpflanzen sich verbreiternder Zufluß eine sehr kleine Bewegungsenergie in den See hinein.
- 3) Die Dichte der Zuflüsse. Aus Temperatur und Leitfähigkeit kann der Dichteverlauf im See und die Dichte der Zuflüsse sehr genau bestimmt werden (3). Daraus ergibt sich die Einschichtungstiefe.
- 4) Die Eisbedeckungszeiten, die für den See Luft- und Windabschluß bedeuten.
- 5) Die Übersichtung mit Schmelzwasser, das weniger mineralisiert ist als das Wasser des Sees.
- 6) Die biogene Entkalkung in den oberen, die Kalklösung in den Tiefenschichten wirken im gleichen Sinne auf ein Konzentrationsgefälle hin.
- 7) Das Verhältnis der maximalen Tiefe z_m zur „reduzierten“ Tiefe $z_{(red)}$, die auf die Oberfläche bezogen wird.

8) Die in der Morphometrie eines Seebeckens begründete Rückwirkung des Schlammes auf die Wasserschichtung in horizontaler Richtung (4,5).

Für die Beobachtungsreihen wurden fünf Alpenseen ausgewählt, von denen es feststand, bzw. zu vermuten war, daß sie in Bezug auf die eben genannten Parameter große und typische Unterschiede aufzuweisen hätten:

- der Lunzer Untersee, holomiktisch, nährstoffarm (oligotroph),
- der Mondsee im Salzkammergut, holomiktisch, eutroph,
- der Lunzer Obersee, meromiktisch im Hauptbecken, oligotroph,
- der Krottensee im Salzkammergut, meromiktisch, oligotroph
- der Längsee in Kärnten, meromiktisch, eutroph.

An jedem See wurden ein Anemometer und ein Pegelschreiber installiert, bzw. die Messungen der hydrographischen Landesämter verwendet, die dankenswerterweise zur Verfügung standen.

Die Messungen zur Feststellung des Schichtungsstatus umfaßten: Temperatur, Leitfähigkeit → Dichte, Sauerstoff und Redoxpotential → Durchmischungsgrenze, Calcium, Magnesium, Alkalinität, pH → biogene Entkalkung, Natrium, Kalium → Ionenbilanz. Ebenso wurden die Zuflüsse analysiert. Als wichtigste Termine galten naturgemäß die Zeiten knapp vor dem Eisschluß und sofort nach dem Wegtauen der Eisdecke.

Aus diesen Daten und aus den mehrjährigen Beobachtungen und hydrochemischen Befunden waren die wesentlichen Faktoren für die Schichtungserscheinungen herauszufinden (Tab. 1).

Die Windexposition – soweit die Meßwerte Vertrauen verdienen – erwies sich für die Zirkulationsver-

hältnisse allein nicht entscheidend. Alpenseen liegen in Gebirgstälern oder in Talkesseln, großräumige Luftströmungen dringen nur gebremst und umgelenkt in die Talrichtung zur Seeoberfläche durch, die Unterschiede von See zu See sind gering. Der holomiktische Lunzer Untersee und der meromiktische Längsee in Kärnten, in Bezug auf Areale (68 und 76 ha), Windwegzahlen (100 und 108) und Eisbedeckung (3 Monate) einander sehr ähnlich, stellen trotzdem gegensätzliche Schichtungsverhältnisse dar.

Auch die übrigen Faktoren wirken nur in bestimmten und individuellen Kombinationen auf die Schichtungsverhältnisse ein. So sind der Lunzer Untersee und der Mondsee holomiktisch, obwohl sie im Einzelnen große Unterschiede aufweisen: Areale 68 und 1421 ha, maximale Tiefe 33.7 und 68 m. Durchflutung 3.2 und 0.46, Volumina 13 und 510 Millionen m³, Eisbedeckung 3 Monate, bzw. meist keine. Ähnlichkeit besteht hingegen in der reduzierten Tiefe 1.17 und 1.11, sowie in der Art der Zuflüsse – kompakt mündende Bäche, deren Bewegungsenergie neben dem Wind die Vollzirkulation antreibt.

Die drei meromiktischen Seen dieser ersten Untersuchungen haben so wenig Gemeinsames, daß sie (wie vermutet) als Vertreter dreier Gruppen meromiktischer Seen, der „Alpenseen ohne Vollzirkulation“ gelten können.

Im Lunzer Obersee ermöglicht im Frühjahr eine mächtige Schmelzwasserschicht mit ihrem Dichtegradienten den unmittelbaren Übergang von der inversen Winter- zur direkten Sommerschichtung. Ausgiebiger Schneefall im Spätherbst kann die einsetzende Zirkulation vorzeitig stoppen, die inverse Winterschichtung und der Eisschluß versetzen den See ohne Voldurchmischung in Winterruhe. Die durchweg sehr kleinen

Tabelle 1
Übersicht über die in Betracht gezogenen Daten der Seen.

	Lunzer Untersee	Mondsee	Lunzer Obersee Hauptbecken	Krottensee	Längsee
Höhenlage [m]	608	481	1113	579	548
Schichtungstyp	holomiktisch	holomiktisch	meromiktisch	meromiktisch	meromiktisch
Trophiegrad	oligotroph	eutroph	oligotroph	oligotroph	eutroph
Oberfläche A ₀ [ha]	68	1421	3.5	8.5	76
Maximale Tiefe z _m [m]	33.7	68.2	15.1	46.5	21.0
Volumen V [Mio. m ³]	13	510	0.17	2.2	8.5
Wasserfracht [Mio. m ³]	42	233	2–3*)	4.4	1.5
Wasserfracht/Volumen	3.2	0.46	10–15	2.0	0.18
Art der Zuflüsse	kompanter Bach	kompanke Bäche	diffuse Rinnsale	kompanke Bäche**)	kleine Rinnsale
Eis- und Schnee	bis 0.5 m	Eisdecke	bis 2.5 m	bis 0.4 m	bis 0.3 m
Dauer	3 Monate	selten	6 Monate	3 Monate	3 Monate
Beckenform	einfache Wanne	lange Wanne	5 Teilbecken***)	steilwandiges Rundbecken	einfache Wanne
Tiefeneinheit A ₀ ^{0.25} [m]	28.7	61.4	13.7	17.1	29.5
reduzierte Tiefe z _(red) = z _m A ₀ ^{-0.25}	1.17	1.11	1.10	2.72	0.71
ΔV/ΔA, Verlauf	bis 28 m	bis 95 m	unter 7 m	bis 43 m	bis 25 m
Wind, Jahresmittel [m/sec]	1.38	1.33	1.03	1.03	1.48
Wind, relativ [%]	100	96	75	75	108

*) Abfluß des Obersees unterirdisch, nicht direkt meßbar.

***) Ein ständiger Bach, bei Schneeschmelze ein zweiter auf der Gegenseite mit etwa 150 l/sec.

****) Teilbecken des Obersees in der Schichtung unabhängig.

$\Delta V/\Delta A$ -Werte ergeben eine hohe Schlammrückwirkung mit Sauerstoffschwund. CO_2 -Produktion und Kalklösung steigern den Dichtegradient. Obwohl die reduzierte Tiefe wenig über 1 beträgt, sind die diffus durch Pflanzenbestände dringenden Zuflüsse zu energiearm, um Schichtungen zu zerstören.

Im Krottensee beträgt die reduzierte Tiefe weit über 1 ($z_{(\text{red})} = 2.7$). Erfahrungsgemäß dringen die von der Oberfläche ausgehenden Turbulenzen nur wenig über $z_{(\text{red})} = 1$ hinunter, das darunter lagernde Tiefenwasser neigt schon bei kleinen Dichteunterschieden zur Dauerstagnation. Der Dichtegradient im Krottensee ist sicher zum Teil biogen bedingt (Kalkfällung im Epilimnion, Kalklösung in der Tiefe), es hat aber auch den Anschein, daß der im Frühjahr wiederholt beobachtete, temporäre Zufluß von der Bergseite her infolge seiner geringeren Dichte den See überschichtet und zeitweise die Stabilität der Schichtung unterstützt. Die Windexposition beträgt wegen der Kessellage nur rund $\frac{3}{4}$ von der des nahen, weit offenen Mondsee.

Der Längsee in Kärnten, in ähnlicher Höhenlage (548 m) wie der Krottensee (579 m), ist von einer Hügellandschaft von keineswegs alpinem Charakter umgeben. Seine Oberfläche ist fast 9 mal größer (78 ha) als die des Krottensees, dennoch liegen die Sauerstoffgrenzen in beiden Seen gleich tief, nämlich bei etwa 17 m unter der Oberfläche. Beim Längsee könnte sie, auf das Areal bezogen, bei fast 30 m liegen. Der Windweg ist sogar länger (108 %) als für irgend einen der übrigen 4 Seen, die Wasser-Boden-Relation verläuft wie sonst bei einer muldenförmigen Wanne und es gäbe kein Hindernis für einen regelmäßig vollaufgemischten Längsee. Durch die Untersuchungen von FREY (6) ist jedoch erwiesen, daß der meromiktische Zustand – vielleicht mit gelegentlichen Unterbrechungen – sich schon seit 4000 Jahren gehalten hat. Die Ursache liegt bei der Art der Zuflüsse: es sind kleine, zum Teil im Uferpflanzenbewuchs versickernde Rinnsale, die fünf-einhalb Jahre brauchen würden, um das Seebecken zu füllen. Die Analyse hat gezeigt, daß es sich um außerordentlich hoch konzentrierte Calcium-Magnesium-Karbonatwässer handelt, die schon an der Atmosphäre, und erst recht unter dem Einfluß assimilierender Pflanzen einen Teil ihres Calciumkarbonats verlieren müssen. In der Umgebung des Sees befindet sich ein leicht zerreiblicher Dolomit, der von der Atmungskohlensäure der Pflanzendecke auch leicht gelöst wird. Ihrer Dichte entsprechend sinken die Zuflüsse in jeder Jahreszeit bis ins Monimolimnion, unter 15 m ab. Der 21 m tiefe See wird ganz langsam von unten aufgefüllt.

2. Ergänzungen zur Morphometrie und Hydrochemie des extrem meromiktischen Krottensees

Am 4. Oktober 1979 wurde der Krottensee im Salzkammergut hydrochemisch noch einmal sehr genau untersucht (7). Das Hauptinteresse galt dabei der Übergangsschicht vom belüfteten, oberen Epilimnion zum anaeroben Monimolimnion und den stöchiometrischen Verhältnissen in der Eisen und Mangan enthaltenden sauerstofffreien Tiefe. Die von REGNAUER (8) 1975 veröffentlichte, 1971 besonders genau hergestellte Tiefenkarte ermöglichte eine verbesserte Darstellung der daraus ableitbaren limnologischen Parameter.

Im Jahre 1962 war der Versuch gemacht worden, den See durch Einblasen von Preßluft in die Tiefe zur Vollzirkulation zu bringen. Der Versuch mußte wegen der weitaus unterschätzten Reduktionskapazität des Tiefenwassers abgebrochen werden (9). Die immerhin tiefgreifende Störung war 8 Jahre später abgeklungen und nun hatte 1979 der See seinen ursprünglichen Zustand, wie er von RUTTNER (10) 1933 beschrieben worden ist, wieder erreicht. Es hat sich aber eine mehrere Meter dicke Zone sehr geringen Sauerstoffgehalts oberhalb des anaeroben Tiefenwassers erhalten, wo früher ein steiler Gradient zu beobachten war. Ähnliche „Dämmerungszonen“ im Sauerstoffgehalt sind aber seit mehreren Jahren auch in anderen meromiktischen Seen aufgetreten. Die chemischen Befunde sind durch den Verlauf des Redoxpotentials bestätigt worden. Es handelt sich um die Mischzone eines nach oben expandierenden Monimolimnions eine Folge der überall wirksamen, schleichenden Eutrophierung.

Die in der Tiefe aus dem Schlamm diffundierenden Eisen- und Manganionen und die stöchiometrischen Relationen zu den Erdalkalien und den Anionen sind ein Anlaß für Analysen des rezenten Tiefenschlamm.

1.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Auf Grund von mehrjährigen Beobachtungen an 5 Alpengseen von sehr ausgeprägtem Schichtungstypus (2 holomiktischen, 3 meromiktischen) wurden die Schichtungserscheinungen besonders in der kritischen Zeit vor dem Zufrieren und knapp nach dem Eisbruch mit den hydrologischen, meteorologischen und limnochemischen Faktoren in Verbindung gebracht und auch mit morphometrischen Eigenheiten der Seebecken zu erklären versucht. Es konnten drei Ursachengruppen für die unvollständige Durchmischung (Meromixie) von Alpengseen unterschieden werden:

1.3.1. Gebirgsseen in Hochlagen

Hohe Schneelage, lange Eisbedeckung, große Schmelzwasserzufuhr über kleine Rinnsale mit geringer Bewegungsenergie, hohe Schlammrückwirkung durch eine Beckenform mit kleinen $\Delta V/\Delta A$ -Werten erzeugen Dichtegradienten im Epilimnion noch vor der thermischen Schichtung, die dann unmittelbar, ohne Mischphase, in die Sommerschichtung überleitet.

Die Herbstzirkulation kann durch plötzlichen Winter einbruch mit starken Schneefällen in den noch offenen See ebenfalls übergangen werden. Die reduzierte Tiefe ($z_{(\text{red})} = z_m A_0^{-0,25}$) ist nicht kleiner als 1.

Beispiel: Lunzer Obersee. Klimatisch-morphometrischer Typus.

1.3.2. „Übertiefe“ Seen

Seen mit großer reduzierten Tiefe, 1.5 und mehr. Windbedingte Turbulenzen wirken kaum über $z_{(\text{red})} = 1$ hinaus. Das Tiefenwasser unter diesem Niveau ist ein potentiell Monimolimnion. Kleine Dichtegradienten durch ungleichen Salzgehalt gegenüber in diesem „übertiefen“ Bereich, um Dauerstagnation zu verursachen. Zuflüsse verschiedener Dichte (Schmelzwasser – Karbonatwasser), Kalk- und Eisenlösung aus dem Schlamm erzeugen Stabilitäten, die nur von sehr bewegungsstarken Zuflüssen zu überwinden wären.

Beispiel: Krottensee, einige der großen Kärntner Seen. Morphometrischer Typus.

1.3.3. „Seichte meromiktische“ Seen

Die reduzierte Tiefe ist 1 oder kleiner. Sehr hoher Kalkgehalt in den sehr kleinen Zuflüssen, ausgiebige aerogene und biogene Kalkfällung schaffen eine genügend stabile Dichteschichtung, die vom Wind auch in den Zeiten der Homothermie nicht überwunden werden kann. Die kalkreichen, diffusen Zuflüsse sinken bis ins Monimolimnion ab.

Beispiel: Längsee in Kärnten. Hydrogeologisch-biochemischer Typus.

Literatur

- 1) FINDENIG, G.: Alpenseen ohne Vollzirkulation. – Int. Rev. ges. Hydr. u. Hydr., **28**, 295–311, 1933.
- 2) BERGER, F. & LANZENBERGER, E.: Schichtung und Umschichtung in Alpenseen. – Jber. Biol. Stat. Lunz, **1**, 88–95, 1977.
- 3) BERGER, F.: Die Dichte natürlicher Wässer und die Konzentrationsstabilität in Seen. – Arch. Hydrobiol. Suppl., **22**, 286–294, 1955.
- 4) ELSTER, H.-J. & SCHMOLINSKY, F.: Morphometrie, Klimatologie und Hydrographie der Seen des südlichen Schwarzwaldes. – Arch. Hydrobiol. Suppl., **20**, 157–211, 1954.
- 5) BERGER, F.: Zur Morphometrie der Seebecken. – Carinthia II, **31**, 29–39, 1971.
- 6) FREY: Längsee: A History of Meromixis. – Mem. Ist. Ital. Idrobiol., **8**, Suppl., 141–146, 1955.
- 7) BERGER, F.: Der Krottensee im Salzkammergut. Ergänzungen zur Morphometrie und Hydrochemie eines extrem meromiktischen Alpensees. – Jber. Biol. Stat. Lunz, **3**, 163–170, 1979.
- 8) REGNAUER: Untersuchungen zum Verhalten pelagischer Crusta im Seeausfluß. – Diss. Univ. München, 1975.
- 9) DANECKER: Die künstliche Durchmischung des Krottensees. – Carinthia II, 41–62, 1971.
- 10) RUTTNER, F.: Untersuchungen über die biochemische Schichtung in einigen Seen der Ostalpen. – Geogr. Jahrb. Österr., **16**, 73–87, 1933.

2. Zum hydrochemischen Problem des Neusiedlersees

2.1. Einleitung

Der Neusiedlersee ist der zweitgrößte Flachsee Mitteleuropas. Seine Tiefe beträgt nur 1 bis 2 Meter, seine Oberfläche mißt 283 km², davon entfallen über 120 km² auf einen Schilfgürtel, der im Westen und Süden ein bis drei Kilometer breit ist. Bei einem Einzugsgebiet von 444 km² und einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 650 mm, wovon 20 % dem See zufließen, ergibt sich ein Zustrom von rund 61 Millionen m³ im Jahr, ein Teil davon fließt als Grundwasseraustritte in den See. Die hydrogeologischen Verhältnisse sind von GATTINGER (1) 1975 eingehend dargestellt worden.

Die hydrochemischen Eigenschaften des Sees (2,3) sind durch eine Besonderheit ausgezeichnet: Sein Wasser hat eine andere Zusammensetzung als die oberflächlichen Zuflüsse. Während die meisten Seen als natürliche Fließwasser-Staue oder als Quellseen gelten können, deren hydrochemische Komponenten dem umgebenden Gestein und dem des Einzugsgebietes entsprechen, zeigt sich das Wasser des Neusiedlersees in den Ionenrelationen davon völlig verschieden. Nun wirken in jedem See die Verdunstung, die biogene Kalkfällung und alle sonstigen Faktoren des belebten Wassers verändernd ein. Diese Veränderungen sind bekannt und bilden die Grundlage der Limnochemie. Anders im Neusiedlersee: es sind keine limnochemischen Vorgänge denkbar, wodurch das Wasser eines

Zuflusses, etwa der Wulka, in Neusiedlerseewasser umgewandelt werden könnte. Es müssen dem See, diffus oder als Grundwasseraustritte, Lösungen zufließen, deren Komponenten von denen der Oberflächenwässer sehr verschieden sind.

Ein charakteristisches Merkmal natürlicher Wässer ist die Differenz zwischen der Summe der Erdalkalien E und dem Karbonatgehalt, der Alkalinität A, also die Differenz E – A in Millival/Liter ausgedrückt. Ist die Differenz positiv, so scheidet sich beim Eindampfen kein Alkalikarbonat ab, da alle Karbonationen von den im Überschuß vorhandenen Calcium- und Magnesiumionen zur Bildung der fast unlöslichen Karbonate CaCO₃ und MgCO₃ verbraucht werden. Ist die Differenz negativ, A größer als E, dann werden sich die überschüssigen Karbonationen auch mit den Natrium- und Kaliumionen zu den leichter löslichen Karbonaten Na₂CO₃ (Soda), bzw. K₂CO₃ beim Eindampfen vereinigen. Und da in den natürlichen Wässern das Natrium in der Regel weitaus überwiegt, kann in erster Annäherung ein negativer (E–A)-Wert (positiv genommen) als „Sodagehalt“ angesprochen werden. Nun sind Soda und verwandte Salze kein Mineralbestandteil von kristallinen Silikat- oder marinen Sedimentgesteinen. Der Sodagehalt natürlicher Wässer entsteht meist sekundär durch hydrothermale Zersetzung von Silikaten, worauf das gelöste Na-Silikat durch Kohlensäure in Soda und freie Kieselsäure umgewandelt wird. Eine andere Art der Sodabildung ist die durch Ionenaustausch an dazu fähigen Tonmineralen.

Eine Eigenheit der „Sodagewässer“ ist es, daß ihre ursprüngliche Besonderheit, nämlich A größer als E, durch Vermischung mit erdalkalihaltigen Wässern, die z.B. Calciumsulfat (Gips) enthalten, verlorengeht, wenn in der Mischung die positiven (E–A)-Werte überwiegen. Dagegen bleibt die Differenz E–A unverändert, wenn Kalk oder Magnesiumkarbonat gelöst oder gefällt wird. Insbesondere hat die „biogene“ Entkalkung keinen Einfluß auf den Zahlenwert von E–A. Wechselt aber das Mischungsverhältnis, so kann das Mischwasser bald sodahaltig, bald sodafrei erscheinen (4). Gerade das ist beim Neusiedlersee der Fall.

Die Oberflächenwässer im Norden, Westen und Süden bringen rund 40 Mio. m³ pro Jahr in den See, im Mittel mit den in Tab. 2 angeführten hydrochemischen Komponenten:

Tabelle 2
Hydrochemische Komponenten der in den Neusiedlersee fließenden Oberflächenwässer.

	Wulka	Kroisbach	übrige
Mio. m ³ /a	33	4.7	2.3
Ionensumme [mval/l]	10.64	9.77	ca. 7
E = Ca + Mg	8.95	8.19	ca. 6
E – A	+2.19	+0.48	ca. +1.2
SO ₄ + Cl	1.69	1.58	ca. 1

Diese Wässer aus den Einzugsgebieten Parndorfer Platte, Leithagebirge, Wulkabecken und Ruster Höhenzug gehören alle dem gleichen Typus an, auch in Bezug auf die Ionensumme.

Aus diesen Wässern entsteht durch Verdunstung, Kalkfällung und Vermischung mit den aus dem Seewinkel diffus einsickernden Wässern das Neusiedler Seewasser. Um die Zusammensetzung der Sickerwässer zu ermitteln, wurde folgendes Verfahren in Gedanken

Tabelle 3

Daten für die Entstehung des Neusiedlerseewassers durch Verdunstung, Kalkfällung und Vermischung mit Sickerwasser (Beispiel vom September 1977).

Ion	Wulka	See	Wulka nach Einengung	CaCO ₃ -Fällung	=	Rest	+	Sickerwasser	=	See
Ca	5.40	1.52	13.61	-12.09	=	1.52	+	0.00	=	1.52
Mg	3.55	10.06	8.94			8.94	+	1.12	=	10.06
Na	1.40	14.38	3.53			3.53	+	10.85	=	14.38
K	0.28	0.83	0.71			0.71	+	0.12	=	0.83
CO ₃ (A)	6.76	11.50	17.04	-12.09	=	4.95	+	6.55	=	11.50
SO ₄	2.89	10.14	7.28			7.28	+	2.86	=	10.14
Cl	0.98	5.15	2.47			2.47	+	2.68	=	5.15
Ionensumme	10.63	26.79	26.79	-12.09	=	14.70	+	12.09	=	26.79
(E-A)	+2.19	+0.08				+5.51		-5.43	=	+0.08

Einengung durch Verdunstung: 26.79/10.63 = 2.52 : 1.

angewendet: Ein Zuflußwasser, z.B. die Wulka, wird durch „Verdunstung“, d.h. proportionale Steigerung der Komponenten auf dieselbe Ionensumme wie im See gebracht.

Nun wird durch „Ausfällung“ von CaCO₃ der Ca-gehalt auf den (niedrigen) Wert im See vermindert, es bleibt ein „Rest“ an Ionen. Diese werden schließlich auf die im See vorhandenen Konzentrationen ergänzt, die Ergänzungslösung entspricht den nicht faßbaren Sickerwässern.

Aus der Tab. 3 (Beispiel vom September 1977) sind konkrete Zahlen zu entnehmen.

2.52 l Wulkawasser werden mit 5.53 mval Soda und einigen anderen Salzen ergänzt und unter Ausfällung von 12.09 mval CaCO₃ in Neusiedler Seewasser verwandelt, zugleich auf 1 Liter eingengt. Ferner muß das Wasser der Ergänzungslösung verdampft werden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die aus dem Seewinkel kommenden 21 Mio. m³ Sickerwässer die Ergänzungs-salze liefern. Entsprechend der Relation 40 : 21 kommen auf 2.52 Liter Wulkawasser 1.32 Liter Sickerwasser, die zusammen auf 1 Liter eingengt werden müssen, d.h. die Verdunstung beträgt 3.84 : 1, ein durchaus plausibler Wert, wobei die auf den See selbst fallenden Niederschläge nicht einbezogen sind.

Aus diesem Beispiel ergeben sich umgerechnet die in Tab. 4 angeführten Salz-mengen, die aus Sickerwässern in den See gelangen.

Tabelle 4
Salzmengen, die aus Sickerwässern in den See gelangen.

	auf 1 m ³ oberirdischer Zuflüsse	auf alle Zuflüsse pro Jahr
	Gramm	Tonnen
Soda	114	4330
Natriumsulfat	81	3080
Natriumchlorid	59	2240
Magnesiumkarbonat	19	720
Kaliumchlorid	3.5	130
Kalkfällung	240	9120

Das Ergebnis der Mischung ist ein sodafreier See mit (E-A) = + 0.08.

20 Jahre vorher, im September 1957, ergab eine Probe an derselben Stelle im See fast genau die gleiche Ionensumme (27.03 statt 26.79), aber einen deutlichen

Sodagehalt von 1.33 mval/l. Die Sickerwässer waren anders zusammengesetzt und reicher an Soda (Tab. 5).

Tabelle 5
Zusammensetzung der Sickerwässer.

	Gramm	Tonnen
Soda	175	6660
Natriumchlorid	94	3580
Natriumsulfat	5	194
Kalkfällung	209	7940

In der Zwischenzeit, um 1970, war der See stark „verdünnt“ worden, die Ionensumme war auf 16.36 mval/l gesunken und der (E-A)-Wert auf +0.19 gestiegen. Trotzdem ergab die Berechnung für die Sickerwässer einen Gehalt an freier Soda von 0.37 mval/l oder 19.6 g Na₂CO₃ neben anderen Salzen, um nach der Ausfällung von 204 g Kalk einen Kubikmeter Zuflüsse dem damaligen Seewasser anzugleichen.

So zeigt sich der Neusiedlersee als eine riesige flache Mischpfanne, der vom Süden, Westen und Norden „gewöhnliche“ Oberflächenwässer, vom Osten aber sodahaltige Salzwässer zufließen oder zusickern. Das erklärt die unregelmäßigen Schwankungen im hydrochemischen Aspekt vorwiegend durch Änderungen der Menge und der Qualität der „Sickerwässer“, während den sichtbaren Bächen und Rinnsalen eine größere Konstanz zuzuschreiben ist. Nicht erklärt ist der Nachschub an sodahaltigem Grundwasser. Sowohl im Seewinkel wie im Porenwasser des Schlammes unter dem See lagern Salzwässer mit hohem Sodagehalt. Aus den Porenwasseranalysen von SCHROLL & KRACHSBERGER (5) ergeben sich hohe negative (E-A)-Werte, bis zu 300 mval/l nur wenige Dezimeter unter der Schlammoberfläche. Ob die vielen tausend Tonnen Soda, die jährlich mit den Sickerwässern in den See gelangen und ihn durch den Abfluß wieder verlassen, aus Tiefenwässern ersetzt werden, ist ungewiß.

Von der Auswertung alter Analysen seien zwei Beispiele erwähnt: SIGMUND und WÜRTZLER (zit. in EMSZ (6)) haben im Jahre 1830 die ersten Analysen des Neusiedlerseewassers durchgeführt. Die etwas umständliche Übersetzung der damals gültigen Apothekergewichte und der Salzkombinationen in heute übliche Einheiten lohnt sich. Je eine Probe aus dem See (die Stellen sind nicht genannt) ergab umgerechnet die in Tab. 6 angegebenen Werte.

Tabelle 6
Zwei Beispiele der Auswertung von Analysen aus dem Jahre 1830.

	SIGMUND	WÜRTZLER
Ionensumme [mval/l]	22.38	21.35
E = (Ca + Mg)	6.83	5.27
A (Karbonat)	16.05	14.01
(E - A) = Soda	-9.22	-8.74

Der See war damals sehr stark sodahältig (41 Äquiv.-%) bei einer eher mittleren Gesamtkonzentration.

Im Jahre 1902 weisen die von EMSZT analysierten Proben von verschiedenen Stellen des Sees enorme Konzentrationsunterschiede auf. Wahrscheinlich hat sich der austrocknende See in einzelne Wasseransammlungen getrennt (Tab. 7).

Tabelle 7
Beispiele der Auswertung von Analysen von Proben aus drei Stellen des Sees aus dem Jahre 1902.

	I	IV (Rust)	V (Rakos)
Ionensumme [mval/l]	49.40	108.4	199.0
E = (Ca + Mg)	20.58	27.18	53.46
A (Karbonat)	16.88	16.09	26.90
(E - A) = Soda	+3.70	+11.09	+26.56

Die durch Verdunstung verschieden stark angereicherten Wasseransammlungen sind frei von Soda.

2.2. Zusammenfassung der Ergebnisse

- Vergleiche zwischen den hydrochemischen Komponenten des Neusiedler Seewassers und jenen seiner oberirdischen Zuflüsse zeigen, daß Verdunstung und Kalkfällung nicht ausreichen, die beobachteten Unterschiede zu erklären. Es müssen Salzwässer besonderer Art unsichtbar in den See einsickern.
- Um die Salze dieser Wässer nach Art und Menge festzustellen, wird (im Gedankenexperiment)
 - a) der Zufluß durch „Verdunstung“ auf die Ionensumme des Sees angereichert,
 - b) durch „Kalkfällung“ = Abzug von Ca und CO₃ der richtige Ca-Wert im See eingestellt,
 - c) die verbleibende Restlösung durch Zusatz der fehlenden Ionen auf die im See beobachteten Konzentrationen „ergänzt“. Diese Ergänzung stellt die Komponenten der nicht erfaßbaren Sickerwässer dar.
- Als wichtigste Komponente erwies sich bei allen Zuflüssen und zu allen Zuständen des Sees die Soda, das Natriumkarbonat Na₂CO₃. Der Zusatz von Natrium- und Karbonat-Ion ist auch dann zur Ergänzung notwendig, wenn die Ionenrelationen den See als sodafrei ausweisen, genauer: wenn die Erdalkaliumsumme die Karbonatsumme übersteigt (E - A = positiv).
- Die absoluten Mengen an Soda, in zweiter Linie an Natriumchlorid, sind beachtlich und betragen im Jahr mehrere tausend Tonnen. Unter der Annahme,

die Sickerwässer entsprechen den aus dem Seewinkel zusickernden Niederschlägen, ergeben sich für diese Ergänzungslösungen ähnliche (mval/l)-Summen wie sie im See angetroffen werden.

- Es hängt von der Wasserführung der Zuflüsse wie auch der Sickerwässer ab, ob im See „freie“ Soda auftritt oder nicht, denn sie wird zur Fällung des CaCO₃ verbraucht. Die Umrechnung auch älterer Analysen auf Na₂CO₃ zeigt, daß die in den letzten Jahrzehnten beobachteten Schwankungen früher auch stattgefunden haben.

Literatur

- 1) GATTINGER, T. E.: Das hydrogeologische Einzugsgebiet des Neusiedlersees. – Verh. Geol. B.-A., 1975, 331–346, 1975.
- 2) BERGER, F. & NEUHUBER, F.: Das hydrochemische Problem des Neusiedlersees. – Jahresber. Biol. Stat. Lunz, 3, 134–137, 1977.
- 3) BERGER, F. & NEUHUBER, F.: The hydrochemical problem. – IN: LÖFFLER (Ed.): Neusiedlersee. The Limnology of a Shallow Lake in Central Europe, 89–99, The Hague – Boston – London (W. Junk-Verlag) 1979.
- 4) BERGER, F.: Zur hydrochemischen Charakterisierung von Sodagewässern. – Sitzber. Österr. Akad. Wiss., mathem.-naturwiss. Kl. I, 179, 171–181, 1971.
- 5) SCHROLL, E. & KRACHSBERGER, H.: Beitrag zur Kenntnis des Chemismus der Porenwässer des Neusiedlerseeschlammes. – Biol. Forsch. Anst. Burgenland, Ber. 24, 35–62, 1977.
- 6) EMSZT: Die Analysen des Wassers aus dem Fertö. – Jahresber. kgl. ungar. geol. Anst. für 1902, 212–224, 1904.

3. Zur hydrochemischen Charakterisierung von Silikat- und Humusgewässern in Niederösterreich

Niederösterreich umspannt geologisch sehr verschiedene Gebiete: im Waldviertel einen Teil der Böhmisches Masse aus Granit, Granulit und Glimmerschiefer, südlich und östlich davon die Molasse-, ferner die Flysch- und Klippenzone und die Kalkalpen im Süden.

Die daraus entspringenden Oberflächenwässer sind naturgemäß ein hydrochemisches Abbild der löslichen Anteile des Quellgesteins, stellenweise modifiziert durch die Pflanzendecke und die obere Bodenschicht, die sie durchsickern. Die Ursprungsgebiete sind zum großen Teil fast unveränderte Wald- oder Felslandschaften und auf Grund bisheriger Erfahrungen ist eine Chemographie der Oberflächengewässer vor deren Eintritt in die landwirtschaftliche oder industrielle Nutzungszone sinnvoll und hydrogeologisch von Interesse.

Nach den analytisch festgestellten Ionenverhältnissen und deren Interpretation lassen sich folgende Gruppen unterscheiden:

- a) Kalk- und Dolomitwässer,
- b) Gipswässer,
- c) Chlorid-Sulfatwässer,
- d) Sodagewässer,
- e) Silikat- und Humuswässer,
- f) Moorwässer.

Silikatwässer sind in der Regel sehr elektrolytarm, sie sind weiche Wässer mit geringem Magnesium- und Calciumgehalt. Aus der Pflanzendecke und den humushaltigen Bodenschichten werden von den Niederschlägen die braungefärbten organischen Abbaustoffe extrahiert, die auf Kalkböden zurückgehalten, auf Silikatge-

steinen aber wegen der geringen Löslichkeit der Calcium- und Magnesiumsilikate nicht gefällt werden. In diesen Brauwässern bleiben aber nicht nur die Humusstoffe transportfähig, sondern auch das Eisen, das in der unteren Bodenschicht durch Reduktionsprozesse in zweiwertiger Form gelöst, dann aber bei Luftzutritt zur dreiwertigen Form oxydiert wird. Bei Gegenwart von Humusstoffen bleibt die Fällung von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ größtenteils aus, humushaltige Oberflächenwässer können Eisen auf weite Strecken hin verfrachten. Erst wenn durch Zuflüsse der Erdalkaligehalt genügend erhöht wird, fallen Humusstoffe und Eisen zusammen aus.

Der analytisch bestimmbare Kieselsäuregehalt eines Wassers steht zu dem des Gesteins oder auch nur der Minerale in keinem einfachen Verhältnis. Silikatgesteine enthalten nicht nur definierte Minerale, sondern auch freie Kieselsäure, die in gar keinem stöchiometrischen Verhältnis zu den Kationen vorhanden, allerdings auch nur spurenweise löslich ist. Die Silikatminerale, die leichter löslich sind und Ionensummen von mehreren Zehntel mval/l erreichen, ergeben „inkongruente“ Lösungen, deren Ionenrelationen gegenüber dem festen Stoff verschoben erscheinen, weil bei der Auflösung des Kristallgitters einige Ionen zu neuen unlöslichen Stoffen zusammentreten. Die Kieselsäure selbst hydrolysiert sehr stark, wird von der Kohlensäure der Bodenatmung und der Atmosphäre verdrängt, bleibt aber kolloidal in Lösung. Bei der Alkalinitätsbestimmung kann zwischen Karbonaten und Silikaten nicht unterschieden werden. Ob das gelöste Mineral ein Karbonat oder ein Silikat oder ob Gemische davon ursprünglich vorhanden waren, kann aber aus dem Quotient Kieselsäure/Alkalinität erschlossen werden. Bezieht man die gemessene Kieselsäure auf mval/l meta-Kieselsäure, so würde ein reines Metasilikat 1 : 1 ergeben, die Salze der Polykieselsäuren können natürlich ein viel höheres Verhältnis, weit über 100 % hinaus, in der Lösung aufweisen.

Für die Charakterisierung der meist humushaltigen Silikatwässer wurden folgende Methoden, bzw. Ableitungen angewendet (1,2):

- 1) Die UV-Absorption bei 240 nm als Maß für die Humussubstanzen, geeicht an einer Lösung von Huminsäure.

- 2) Der Quotient Kieselsäure/Alkalinität in % zur Abschätzung eines möglichen Karbonatanteils.
- 3) Der Eisengehalt in Relation zum Huminsäuregehalt.
- 4) Der Erdalkaliengehalt in Relation zu Eisen und Huminsäure.

Tabelle 8
Gegenüberstellung Kalkbach – Silikatbach.

	Seebach	Ysper
Ionensumme [mval/l]	2.85	0.82
UV-Abs. 240 nm, 10 cm	0.34	1.68
Huminsäure [mg/l]	1.2	6.0
Eisen [mg/l]	0.003	0.26
Kieselsäure [mval/l]	0.02	0.45
Alkalinität [mval/l]	2.34	0.16
$\text{H}_2\text{SiO}_3/\text{Alkalien}$ [%]	0.85	281
$E = \text{Ca} + \text{Mg}$ [mval/l]	2.83	0.65
$\text{Na} + \text{K}$ [mval/kg]	0.02	0.17
$(\text{Na} + \text{K})/E$ [%]	0.7	26.2

- 5) Die Relation Alkalien/Erdalkalien, die mit dem Anteil „leichter“ löslicher Silikate zusammenhängt.

Als Beispiel für die Anwendung dieser Darstellungsform sei eine Gegenüberstellung von Kalkbach zu Silikatbach in Tabelle 8 gegeben. Das Kalkwasser wurde dem oberen Lunzer Seebach entnommen, das Silikatwasser dem Oberlauf der Ysper im Waldviertel.

Diese Art der Auswertung bietet charakteristische und anschauliche Daten für den Vergleich von Wässern verschiedener geologischer Herkunft. Weitere Untersuchungen in Niederösterreich sind geplant mit dem Ziel einer Chemographie der wichtigsten Oberflächengewässer in Beziehung zur Geologie ihres Quellgebietes.

Literatur

- 1) BERGER, F.: Chemographie des Kamp im niederösterreichischen Waldviertel als Beispiel eines Silikatflusses. – Jahresber. Biol. Stat. Lunz, 2, 117–122, 1978.
- 2) BERGER, F.: Zur hydrchemischen Charakterisierung von Silikat- und Humusgewässern. – Jahresber. biol. Stat. Lunz, 4, 211–216, 1980.