

# Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Großen Arbersee

Glühverlust,  $^{14}\text{C}$ -Datierung, Isotope, Alkali-, Erdalkali-, Erd- und Schwermetallgehalte

Günther Michler, München

*Sedimente sind – je nach Situation – mehr oder minder gut geeignet, Einblicke in die geologischen, klimatologischen, hydrologischen und biologischen Gegebenheiten im Erosions-, Transport und Akkumulationsraum zu geben. Besonders günstig hierfür sind die Sedimente in Stillgewässern, also den Seen und Meeren, da dort in der Regel eine vergleichsweise ungestörte Sedimentation erfolgt und zerstörerische Phasen, etwa Erosionsvorgänge, in geologisch kurzen Zeiträumen (also in Tausenden von Jahren) relativ selten sind. So werden unsere Seen gerne als „Geschichtsbücher der Natur“ angesprochen. Diese pointierte Aussage soll nicht heißen, dass durchaus sehr verwickelte Sachverhalte vorliegen können und das Lesen dieses „Geschichtsbuchs“ recht schwierig werden kann.*

Im Rahmen der in der Zeitschrift „Der Bayerische Wald“ begonnenen Serie über die Sedimente der Seen des Bayerischen und Böhmisches Waldes soll hier über die Untersuchungen an Sedimentkernen des Gr. Arbersees berichtet werden. Die Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an das International Geological Correlation Program (IGCP), Project No. 158 mit dem Titel „Palaeohydrological changes in the temperate zone in the last 15000 years“, vorgelegt beim Treffen der „EuroSiberian Subcommission on Studies of the Holocene“ während der INQUA in Bratislava 1976, Teil b, „Seen u. Moore“, das mittlerweile mehrfach unter ähnlicher Bezeichnung eine Neuauflage erlebte. Die erste Bohrkernentnahme erfolgte bereits 1981, über deren Teilergebnisse von G. MICHLER, R. PRÖMPEL, W. RAUERT, W. STICHLER u. M. WOLF (1982) in „Beiträge über hydrologische Tracermethoden und ihre Anwendungen“ (GSF-Bericht R 290) berichtet wurde. Dieser Studie über die Isotope liegt die Diplom-Arbeit von R. Prömper zugrunde. Dieser sym-

pathische und fähige junge Diplom-Geograph ist – kurz nach dem erfolgreichem Abschluß seiner Arbeit durch einen Wespenstich auf tragische Weise ums Leben gekommen. Der erste Teil dieses Berichtes („Isotope“) geht auf diese im Institut für Geographie durchgeführte Diplom-Arbeit, der zweite Teil (Metallgehalte) auf eine Mitte der 90er Jahre erfolgte, noch unveröffentlichte Untersuchung von Sedimentbohrkernen aus dem Großen Arbersee zurück.

## Untersuchungsgebiet

Der Große Arbersee (Lageplan s. Abb. 1, Fläche 6,7 ha, Meereshöhe 928 m ü. NN) gliedert sich in ein durch glaziale Übertiefung geschaffenes Karbecken von 9 m Tiefe, dessen Hintergrund die steile, meist glattgehobelte Seewand (Karwand) westlich des Sees bildet und das talwärts von einer glatten, felsigen Karschwelle (erkennbar an einer Felshalbinsel im See) abgeschlossen wird (s. auch Abb. 2, Querprofil). Während des Vereisungsmaximums reichten die bis zu 50 m mächtigen Gletscher aus dem Geigen- und Bärenbachtal

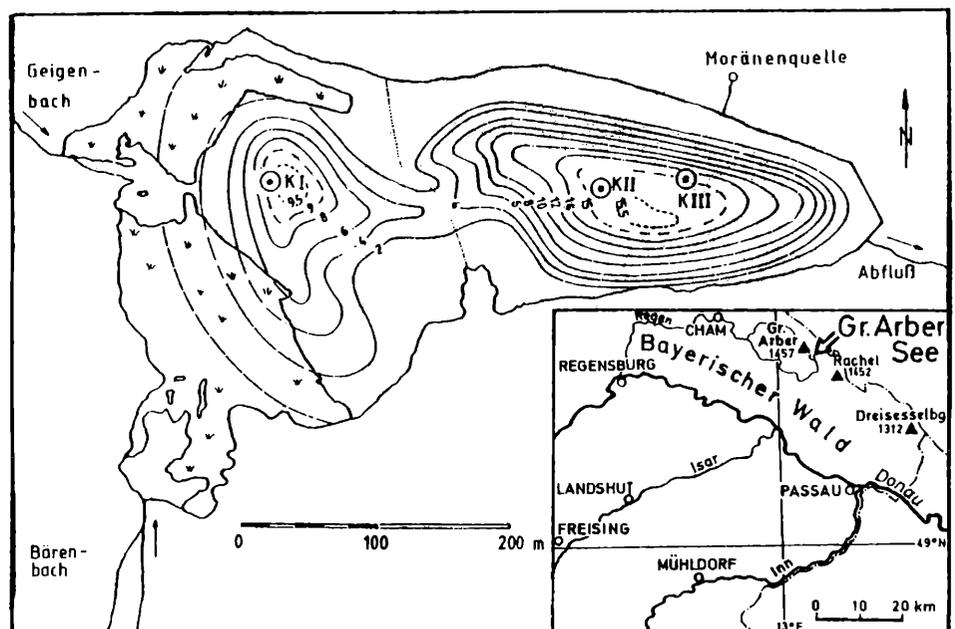


Abb. 1: Tiefenkarte des Großen Arbersees (mit Angabe der Tiefe in m). Dargestellt sind die Entnahmestellen KI - KIII (Punkt in Kreis), die Grenze zwischen westlichem Karbecken und östlichem Moränenbecken (punktiierte Linie in Kartenmitte) sowie Schwimmrasen bzw. Randmoor (Rasensignatur im linken Seebereich). Die Tiefelinien unter dem Schwimmrasen und die Abgrenzung Schwimmrasen/Randmoor sind hypothetisch.

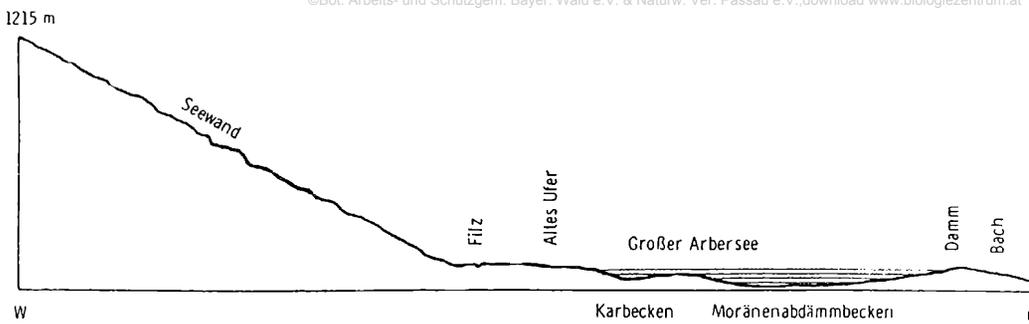


Abb.2: Längsprofil des Großen Arbersees

bis zu 2 km über die Karschwelle hinaus und bis 830 m ü. NN herunter und haben wallartige, grobblockige Seiten- und Endmoränen bzw. flächenartige Grundmoränen abgelagert. Noch heute sind bis zu sieben Endmoränenwälle erkennbar, deren innerster Gürtel das vordere, straßenseitige Seebecken (Moränenbecken) abgedämmt hat, welches gegenwärtig bis zu 15,5 m tief ist (s. Abb. 1 u. 2). Das unmittelbare Einzugsgebiet von 2,74 km<sup>2</sup> wird vornehmlich aus Biotit-Plagioklas-Metatexiten (vorwiegend Cordierit-Sillimanit-Gneis) aufgebaut, deren mittlerer Stoffbestand naturgemäß die Zusammensetzung des dem See zugeführten anorganischen Materials bestimmt und z.B. in den Diagrammen der Schwermetallkonzentrationen im Sediment den jeweiligen „spätglazialen Standard“ prägt.

Für eine Abschätzung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet stehen 30-jährige Mittel der Niederschlagsmessungen des Deutschen Wetterdienstes an den Stationen Großer Arber und Großer Arbersee zur Verfügung, nach denen die durchschnittliche jährliche Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet 1840 mm beträgt. Ferner kann die Höhe der Verdunstung im Grenzkambereich des Nationalparkgebietes Bayerischer Wald von 420 mm (APEL u. FAUTH 1977) auch für das Einzugsgebiet als repräsentativ betrachtet werden. Schon Messungen von BAUMGARTNER 1958 am Gr. Falkenstein haben gezeigt, daß zumindest während des Sommerhalbjahres in Kammnähe mit einer beträchtlichen Erhöhung des Niederschlagangebots durch Nebelniederschlag gerechnet werden muß (Schätzwert für das Sommerhalbjahr +50%). Aus diesen Werten ergibt sich für das 2,74 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet eine durchschnittliche Abflußspende von ca. 45 l/(s km<sup>2</sup>) und unter Berücksichtigung des Seevolumens von 420000 m<sup>3</sup> eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 40 Tagen.

### Probennahme

Die Sedimentkerne wurden jeweils mit einem Großrammkolbenlot (System Züllig, modifiziert) gezogen. Es fanden zwei Bohrkernentnahme-„kampagnen“ statt: die erste zur Untersuchung der Isotope bereits in 1981 (Lage s. Abb. 1), die zweite 1995 (Lage und Bezifferung sind mit der ersten Entnahme praktisch identisch). Die Lage der Sedimentkerne im See wurde von der Bootsplattform aus durch Kompaßpeilung (Rückwärtseinschnitt) ermittelt. Als Ramm-

lot diente jeweils ein 5 m-PVC-Rohr von 36 mm lichter Weite als Sedimentbehälter, das für den Rammvorgang in ein Stahlrohr eingeschoben wurde. Nach vorsichtigem Aufschneiden des PVC-Rohres wurde das eingeschlossene Sediment verprobt. Durch das Hochschieben des Sediments im

PVC-Rohr während des Rammvorgangs wurde an der PVC-Wand etwas Sediment „verschleppt“, so daß es ratsam war, die randlichen Partien des Sedimentkerns zu verwerfen. Außerdem war zu berücksichtigen, daß – je nach Konsistenz des Sediments – 10-30 cm des oberflächennahen, stark wasserhaltigen Sediments leider verspült wurden oder verlorungen. Außerdem wurden Wasserproben für <sup>2</sup>H-, <sup>18</sup>O- und <sup>3</sup>H-Messungen in Glasflaschen mit Polyäthylendichtung abgefüllt.

## Meßergebnisse der Isotopenmessungen

### Kohlenstoff-14-Meßergebnisse (<sup>14</sup>C)

Die an den Sedimenten von drei verschiedenen Kernen des Großen Arbersees (erste Bohrkampagne, s. Lageplan Abb. 1) bestimmten <sup>14</sup>C-Alter sind zusammen mit den <sup>13</sup>C-Meßwerten in Tab. 1 zusammengestellt. Die nur <sup>13</sup>C-korrigierten <sup>14</sup>C-Modellalter (s. nächstes Kapitel) sind gegenüber den nach SUESS (1970) und STUIVER (1970) bzw. BARBETTI (1980), zitiert in MICHLER et al. 1982, korrigierten <sup>14</sup>C-Modellaltern um bis zu 800 Jahre zu jung. Abb. 3 zeigt den Verlauf der <sup>14</sup>C-Alter mit der Tiefe des Sediments. Die <sup>14</sup>C-Alter stimmen mit pollenanalytisch bestimmten Altern (persönl. Mitt. von M. RÖSCH, damals Geobot. Inst. Bern)

Tabelle 1

Tiefe (cm)	Proben-	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	<sup>14</sup> C-korr. Alter (J. .h. x 10 <sup>3</sup> )
0 bis 10		-27,71	-119,4	1,8
50 bis 60	24	-28,05	-119,0	2,4
100 bis 110		-28,05	-115,9	3,3
160 bis 170		-27,68	-112,9	5,3
210 bis 220	8	-28,30	-118,3	8,2
240 bis 247,5		-28,67	-120,3	10,5
247,5 bis 255	4	-27,44	-107,2	11,3
255 bis 260	3	-27,76	-103,3	12,0
260 bis 265	2	-26,43	-101,6	12,5
265 bis 270		-27,10	-104,9	13,2

$\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^2\text{H}$ -Werte von Sedimentproben (Einzelproben) des Kerns K II mit jeweiliger Tiefe im Sedimentkern (von oben) und dem zugehörigen korrigierten <sup>14</sup>C-Alter

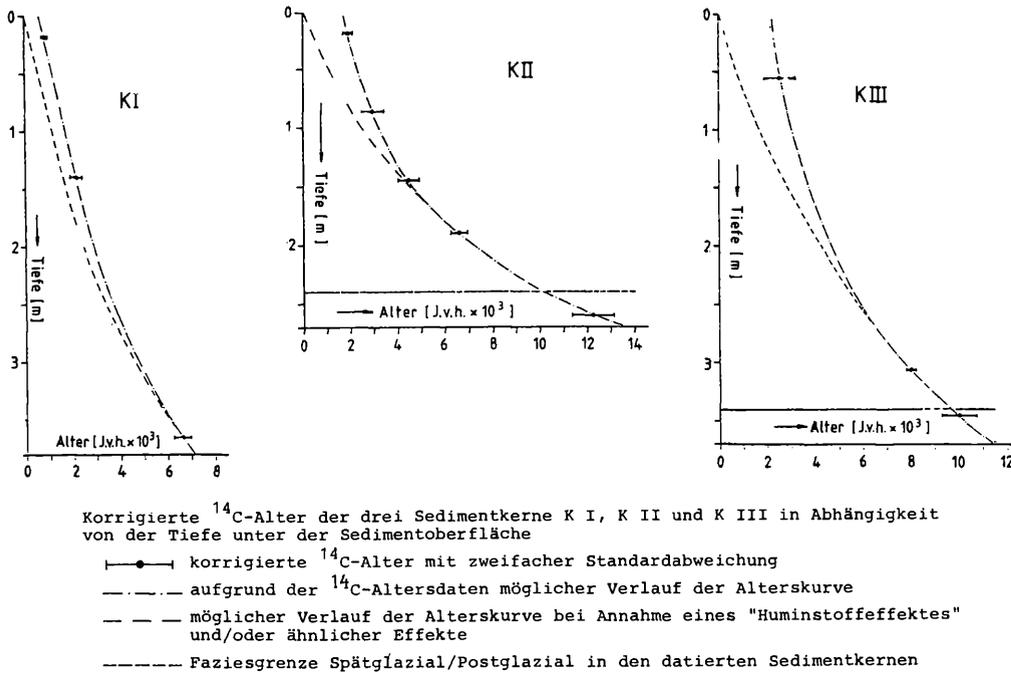


Abbildung 3

im älteren Bereich gut überein, während im jüngeren Bereich die  $^{14}\text{C}$ -Alter systematisch höher sind. Dies könnte z.B. durch eine Durchmischung der relativ lockeren, jeweils obersten Sedimentschicht über einen bestimmten Altersbereich oder durch Einbau älterer Huminstoffe aus dem Einzugsgebiet ins Sediment erklärt werden. Dagegen kann der Hartwassereffekt (Einbau von geologisch altem, durch Zerfall  $^{14}\text{C}$ -abgereichertem Kohlenstoff aus den Karbonatgesteinen des Einzugsgebietes, s. MÜNNICH 1957) aufgrund des kristallinen Einzugsgebietes mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Auch Isotopenaustauschvorgänge mit dem im Wasser gelösten  $\text{CO}_2$  bzw. über Methanbildung erscheinen wenig wahrscheinlich. Für die Gültigkeit der  $^{14}\text{C}$ -Alter im Bereich von ca. 10000 J.v.h. spricht außerdem der Schnittpunkt der Alterskurven von K II und K III mit dem Fazieswechsel von Spätglazial zu Postglazial, der in Skandinavien auf 10300+/-300 J. v. h. datiert wurde (u.a. VOGEL 1970, 1980) und offensichtlich auch im Großen Arbersee in den Zeitraum 9600-10000 J.v.h. fällt. Dieser Fazieswechsel zeichnet sich im Großen Arbersee durch einen relativ scharfen Wechsel von grauen bis hellbraunen, fast ausschließlich minerogenen Sedimenten des Spätglazials zu schwarzbraunen, stark organischen Mudden des Postglazials aus (s. auch den Glühverlust = Gehalt an organischer Substanz in Abb. 6 u. 7). Um diesen Zeitverlauf landschaftsgeschichtlich etwas zu erhellen, sei in Tab. 2 eine Gliederung der Spät- und Nacheiszeit in Mitteleuropa aus SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL von 1979 wiedergegeben.

### Deuterium- und Kohlenstoff-13-Meßergebnisse

( $\delta^2\text{H}$  u.  $\delta^{13}\text{C}$ )

In Tab. 1 sind die  $\delta^2\text{H}$ - sowie weitere  $\delta^{13}\text{C}$ -Meßergebnisse von K II enthalten und in Abb. 4 zusammen mit den in Tab. 1 enthaltenen  $\delta^{13}\text{C}$ -Meßwerten gegen das  $^{14}\text{C}$ -Alter

der Sedimentproben aufgetragen. Dabei wird das  $^2\text{H}/^1\text{H}$ -Verhältnis mit dem üblichen Standard SMOW (Standard Mean Ocean Water) verglichen und die Abweichung in ‰ ( $\delta^2\text{H}$ ) in Abb. 4 aufgetragen. Das stabile Kohlenstoffisotop  $^{13}\text{C}$  ist im natürlichen Kohlenstoff ungefähr im Verhältnis 1:99 enthalten. Durch physikalisch-chemische Prozesse, vor allem Photosynthese, kann eine Fraktionierung stattfinden, d.h. das  $^{13}\text{C}$ -Isotop wird an- oder abgereichert. Beim  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis wird die Abweichung in ‰ vom PDB-Standard ( $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalt von Belemniten,

einer bestimmten Formation in South Carolina) angegeben. Man nimmt nun an, daß das noch schwerere  $^{14}\text{C}$ -Isotop (das bekanntlich in der höheren Atmosphäre durch kosmische Strahlung aus  $^{14}\text{N}$ -Stickstoff (+n, -p) gebildet und in den allgemeinen und damit auch biogenen Stoffkreislauf gerät) in gleicher Weise wie  $^{13}\text{C}$ , aber verstärkt, fraktioniert wird, und benutzt nun den massenspektrometrisch ermittelten  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert, um den probenspezifischen  $^{14}\text{C}$ -Gehalt hinsichtlich der oben genannten Fraktionierungsprozesse festzulegen und daraus das Alter der Probe zu bestimmen (s. im einzelnen die umfangreiche Fachliteratur). Außer zur Korrektur des  $^{14}\text{C}$ -Gehaltes können die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte auch zur Abschätzung der Herkunft des Probenmaterials dienen. So lassen sich beim Vergleich der  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Altersbereich von 2000-8000 J.v.h. für jeden Kern fast konstante  $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalte feststellen, die sich mit zunehmender Entfernung der Kernentnahmestelle vom Zufluß zu geringeren  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten verschieben. Dieser Effekt könnte durch einen geringeren Gehalt terrestrischer organischer Substanz ( $\delta^{13}\text{C}$  ca. -27‰ bei dem im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Pflanzenkleid (z.B. OSMOND u. ZIEGLER 1975, DEINES 1980) und einen höheren Gehalt an limnischem Plankton ( $\delta^{13}\text{C}$  ca. -30‰ (PEARSON u. COPLEN 1978, s. jeweils in MICHLER et al. 1982)) in größerer Entfernung vom Zufluß erklärt werden. Beim Vergleich der  $^2\text{H}$ - und  $^{13}\text{C}$ -Altersprofile von K II fällt der nahezu gleichsinnige Gang der Gehalte beider Isotope im Altersbereich über 2000 J.v.h. auf. Innerhalb des Postglazials besitzen beide Isotopenganglinien bei ca. 5000 J.v.h. ein – allerdings nur durch eine Probe belegtes – Maximum, welches möglicherweise auf das Klimaoptimum zurückzuführen ist. Für  $^{14}\text{C}$ -Alter über ca. 11000 J.v.h. steigen die  $\delta^2\text{H}$ - und  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte deutlich an (lies: geringere Minus-‰-Werte!), d.h. die Isotopenzusammensetzung wird schwerer, da der Anteil des schwereren Isotops zunimmt. Dieses Phänomen

**Gliederung der Spät- und Nacheiszeit in Mitteleuropa (aus SCHEFFER, F. u. SCHACHTSCHABEL, P. 1979, S. 379)**

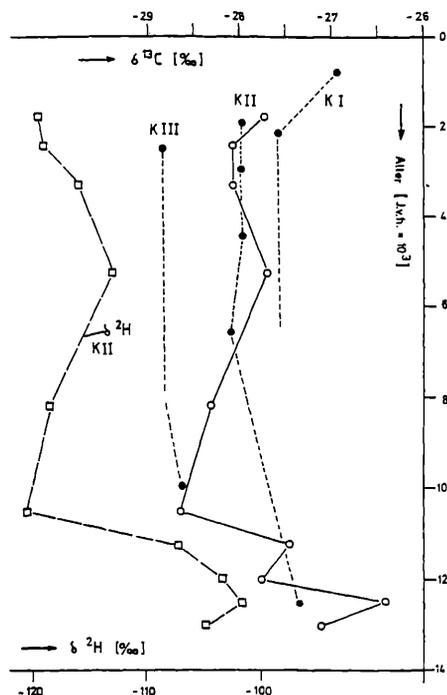
Geologische Gliederung	Zeit (angenähert)	Klima	Vegetationskundliche und prähistorische Gliederung	
Holozän	Gegenwart	Heutiges gemäßigt-humides Klima (ozeanisch)	Buche, Eiche, Fichte. Rodung während Eisenzeit und historischer Zeit	
	Subatlantikum (Nachwärmezeit)	600 v. Chr.		
	Subboreal (späte Wärmezeit)	2500 v. Chr.	Warm, einzelne trockenere Perioden (kontinental)	Eichenmischwald mit Buche und Fichte. Bronzezeit
	Atlantikum (mittlere Wärmezeit)	5500 v. Chr.	Warm, feucht (Klimaoptimum) (ozeanisch)	Eichenmischwald. Rodungen seit Beginn des Neolithikums
	Boreal (frühe Wärmezeit)	6800 v. Chr.	Warm, trocken (kontinental)	Birken-Kiefern-Wälder mit Hasel-Maximum
Würm-Spätglazial	Präboreal (Vorwärmezeit)	8500 v. Chr.	Erwärmung (kühl, kontinental)	Kiefern-Birken-Wälder. Beginn des Mesolithikums
	Jüngere Dryaszeit		Kalt	Parktundra mit Birke. Ende des Paläolithikums
	Allerödzeit	9000 v. Chr.	Vorübergehend wärmer	Schütterer Wald mit Birke und Kiefer
	Ältere Dryaszeit	9800 v. Chr.	Kalt	Tundra
	Böllingzeit	10 300 v. Chr.	Geringe Erwärmung	Parktundra mit Birke
	Älteste Dryaszeit	10 800 v. Chr.	Kalt (arktisch)	Tundra
	14 000 v. Chr.			

**Ende des Würm-Hochglazials (Pommerscher Eisvorstoß)**

ist schwer zu erklären und läuft gängigen Modellvorstellungen zuwider: so nimmt man an, daß bei niederen Temperaturen in physikalischen, aber auch biogenen Prozessen die schwereren Isotope weniger „berücksichtigt“ werden, so z.B. bei der Verdunstung über den Weltmeeren, als in den Eiszeiten der Anteil von schwerem Wasser im Niederschlag ( $^2\text{H}$ , aber auch  $^{18}\text{O}$ ) gegenüber den Warmzeiten abgereichert war ( $\delta^2\text{H}$ -Werte also nach Minus verschoben sind). Auf die von PRÖMPER (1982) und MICHLER et al. (1982) diskutierten – diffizilen - Sondereffekte für dieses Phänomen soll hier nicht weiter eingegangen werden. Für die im Spätglazial abgereicherten  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte lassen sich Erklärungen außerhalb der Temperaturproblematik leichter finden, schließlich liegt im Spätglazial nur ein geringer Anteil organischer Substanz vor, die wohl aus der spärlichen Vegetation des Spätglazials stammt (oder fossil aus einem wärmeren Interstadial) und damit dem  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert des stark terrestrisch beeinflussten Kerns K I gleicht.

**Bestimmung der Sedimentationsrate**

Aus den  $^{14}\text{C}$ -Altersprofilen der Kerne I, II und III lassen sich die Sedimentationsraten im Großen Arbersee für die vergangenen ca. 13000 Jahre bestimmen. Tab. 3 enthält Mindestsedimentationsraten, die für vergleichbare Altersbereiche an den drei Kernen abgeschätzt wurden.



$\delta^2\text{H}$ - und  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Sedimentproben aus dem Großen Arbersee in Abhängigkeit vom korrigierten  $^{14}\text{C}$ -Alter

- $\delta^2\text{H}$ -Werte des Kerns K II } Einzelproben aus
- $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des Kerns K II } 5-10 cm-Abschnitten
- $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Kerne K I - K III, Mischproben aus ca. 30 - 40 cm-Abschnitten

Abbildung 3

Kern-Nr.	Altersbereich	Arbeits- und Schutzgem. Bayer. Wald e.V. & Naturw. Bau- und Umweltforschungsstationen	Arbeits- und Schutzgem. Bayer. Wald e.V. & Naturw. Bau- und Umweltforschungsstationen
5000-7000	0-2000	0-7000 J.v.h.	
K I	0,3	0,8	0,5
K II	0,2	0,4	0,3
K III	0,3	0,6	0,4

Tab. 3: Sedimentationsraten (mm/a) in verschiedenen Altersbereichen (vgl. Abb. 3). Schätzwerte der Mindestsedimentationsraten, ermittelt aus den durch den Nullpunkt gelegten Kurven in Abb. 3. (J.v.h. = Jahre vor heute).

Die mittlere Sedimentationsrate im Zeitraum 0-7000 J.v.h. ist im Karbecken (K I) – in das die beiden Zuflüsse Geigenbach und Bärenbach münden – sowohl der Aufhöhung nach in mm/a als auch – allerdings um etwa ein Drittel geringer – in Bezug auf die sedimentierte Masse – halb bis doppelt so groß wie im anschließenden Moränenbecken. Das Moränenbecken dürfte demnach im Spätglazial ca. 19 m (gerechnet vom heutigen Wasserspiegel), das Karbecken ca. 15-17m tief gewesen sein. Außerdem läßt sich eine gewisse Zunahme der Sedimentationsrate in mm/a von den tieferen (älteren) zu den oberen (jüngeren) Sedimentbereichen feststellen: im Karbecken (K I) etwa um das 2,5 fache, im Moränenbecken bei K II und K III etwa um das Doppelte, in Bezug auf die Masse immerhin noch um das 1 1/2fache. Die Sedimentation besteht – wie in jedem See – aus der allochthonen Schwebstoffzufuhr aus dem Einzugsgebiet und der autochthonen Ausfällung aus dem Wasserkörper des Sees bzw. der Ablagerung von Organismen (als organische Verbindungen oder – mineralisiert – als anorganische Stoffe). Da die zugeführten Schwebstoffe vorrangig nahe den Mündungen – also im Karbecken – sedimentieren, muß die (der Masse nach möglicherweise nur geringfügige) Zunahme der Sedimentationsrate im Moränenbecken wohl mehr der autochthonen Sedimentation zugeschrieben werden, die möglicherweise einer höheren Bioproduktion entstammen dürfte. Darauf weisen auch die mehr auf autochthone Sedimentation deutenden  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von K III (s. Abb. 4) hin.

### Aussagen zur Bioproduktion

Durch die absolute Altersdatierung der Sedimentkerne lassen sich auch zur Entwicklung der Bioproduktion im Großen Arbersee verhältnismäßig gut datierte Aussagen machen. Für den Gr. Arbersee läßt sich eine Zunahme der Bioproduktion ab 10000 J.v.h. an der Erhöhung des Anteils organischer Substanz im Sediment feststellen (Abb. 5 u. 6). Das Maximum der organischen Sedimentation liegt bei ca. 4500-5000 J.v.h., d.h. an der Wende des wärmeren Atlantikums zum kühleren Subboreal. Denkbar ist jedoch ebenfalls eine erhöhte Zufuhr organischer Schwebstoffe (Huminstoffe) aus der Vegetationsdecke des Einzugsgebietes, die während des Klimaoptimums (besonders in dieser Höhenlage) allgemein einen höheren Stoffumsatz aufwies als heute.

### Röntgenfluoreszenzanalytische Bestimmung der Schwermetallgehalte im Sediment

Im Rahmen der chemisch-analytischen Untersuchungen

wurde dem Vergleich verschiedener Analyseverfahren (insbesondere Atomabsorptionsspektrometrie versus Röntgenfluoreszenzanalyse/RFA) sowie den Aufschlußverfahren besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Für die Kerne aus dem Großen Arbersee ergaben sich aus den stark unterschiedlichen Proben aus dem Spätglazial (stark mineralogen) und dem Postglazial (überwiegend organisch, dazu hoher Wassergehalt und folglich geringe Substanzmenge) heterogene Voraussetzungen für die einzelnen Analyseverfahren. Röntgenfluoreszenzanalyse eignet sich

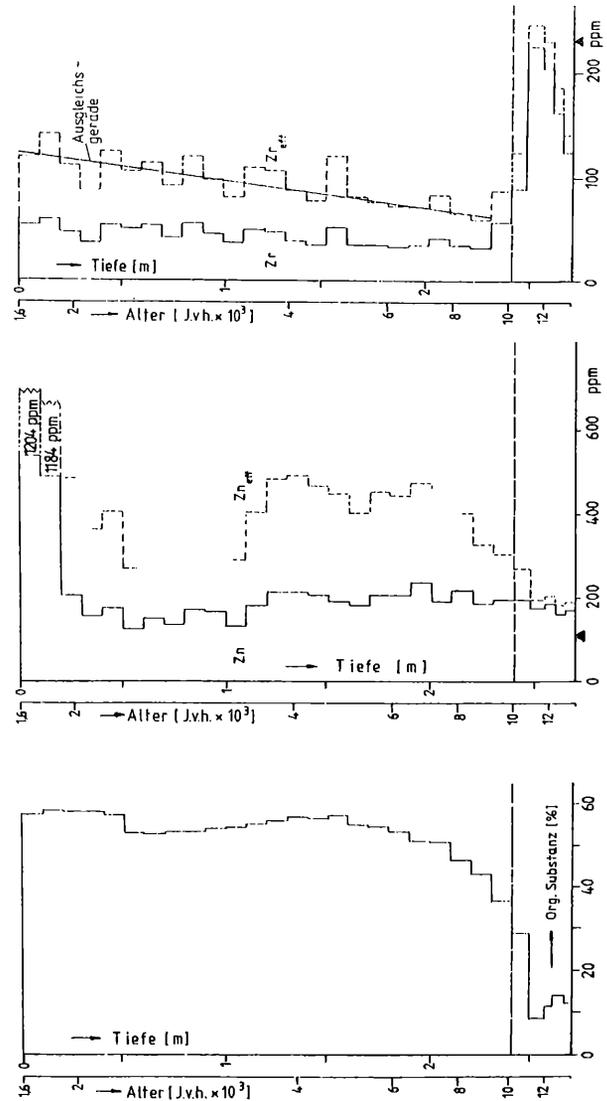


Abbildung 5: Gehalt (in Gew.-%) an organischer Substanz, Zn und Zr im Sediment des Kerns K II, aufgetragen gegen die Tiefe unter der Sedimentoberfläche bzw. gegen korrigierte  $^{14}\text{C}$ -Alter. Durchgezogene Linie: Gehalt, bezogen auf Trockensubstanz; gestrichelte Linie: Gehalt, bezogen auf Glührückstand. Schwarze Dreiecksmarkierung bezeichnet den „Moränenstandard“ (mittlerer Zn- bzw. Zr-Gehalt im Moränenmaterial).

vornehmlich für rein minerogene Proben, Flammenphotometrie und Atomabsorptionsspektrometrie sowie Atomemissionsspektrometrie sowohl für anorganische wie organische Proben, doch sind dann unterschiedliche Aufschlüsse anzuwenden, wodurch ebenfalls unterschiedliche Meßresultate auftreten können.

Die Königswasser-Aufschlüsse, gemessen in der Atomabsorptions- und Atomemissionsspektrometrie, liefern die präziseren Ergebnisse, lassen aber die Metallkonzentrationen in der unverwitterten silikatischen Fraktion nahezu unberücksichtigt. Wenn das Ziel die Ermittlung der Gesamtkonzentration ist, so ist die Röntgenfluoreszenzanalyse für minerogene Proben die elegante Wahl, wenngleich auch hier noch sehr von der Güte der verfügbaren Standards abhängig. Auf die gesamte Problematik kann hier nicht weiter eingegangen werden. Bei der folgenden Vorstellung der Ergebnisse aus beiden Verfahren muß noch bedacht werden, daß die röntgenfluoreszenzanalytischen Ergebnisse aus der ersten Bohrkernentnahme, die AAS- u. AES-Ergebnisse aus der zweiten Bohrkernentnahmekampagne stammen.

Die am Kern II der ersten Kernentnahme röntgenfluoreszenzanalytisch gemessenen Elemente Cu, Pb, Sr und Zn (Abb. 5) weisen in den obersten 20 cm (2 Proben) eine starke Anreicherung der Elemente Cu, Pb, Sr und Zn auf, obwohl der Anteil minerogener Substanz (s. Abb. 5) sogar eher leicht zugenommen hat. Hier erwies sich der hohe Anteil der organischen Matrix als meßtechnisch sehr störend. Sicher scheint jedoch, daß die Elemente Co, Fe, Sr und Zn im Sediment von der klimatischen Entwicklung im Spät- und Postglazial beeinflusst werden. Besonders die Gehalte an Co und Fe, in abgeschwächter Form aber auch von Sr und Zn. (Beispiel in Abb. 5) nehmen von den Basis-sedimenten des Spätglazials bis zum Klimaoptimum in gleicher Tendenz wie der Gehalt an organischer Substanz zu und anschließend wieder leicht ab. Dieses Verhalten dürfte einerseits mit dem erhöhten Angebot an diesen Elementen durch Zunahme der Bodenbildung während des Klimaoptimums mit hohem Anteil an Tonmineralbildungen im Einzugsgebiet zusammenhängen, andererseits auch mit der erhöhten Bioproduktion im See selbst, die zu einer verstärkten Schwermetallanreicherung in den planktischen Organismen und damit auch im Sediment führt.

Von umweltökologischem Interesse ist die massive Zunahme von Zn (Abb. 5) und Pb in den obersten Sedimentpartien, bei denen leider die Ergebnisse der  $^{14}\text{C}$ -Datierung nicht eindeutig interpretiert werden können. Diese Anreicherung ist überproportional stärker als in dem in der AAS (Pb, Cd) bzw. AES gemessenen Kern der zweiten Bohrkampagne (s. Abb. 12) und wahrscheinlich auf die ganz unterschiedlichen Meßverfahren zurückzuführen, die ganz andere Kompartimente der Schwermetallgehalte erfassen, z.T. aber auch auf die Unsicherheiten der röntgenfluoreszenzanalytischen Methode bei stark organischen Substanzen.

Diese überaus starke Anreicherung könnte auf das Anschneiden von stark Zn- und Pb-haltigen Gesteinen im schwer-

mineralreichen Einzugsgebiet zurückzuführen sein, wofür es allerdings keine unmittelbaren Anhaltspunkte gibt. Wahrscheinlicher sind jedoch für das Mittelalter belegte anthropogene Eingriffe (Rodung, Holzgewinnung für das Silberbergwerk Bodenmais (stark Zn- und Pb-haltige Erze) oder für die zahlreichen Wanderglashütten). Auch an eine prähistorische Erzverhüttung muß gedacht werden. Sicher geht ein Teil des jüngeren Zn- und Pb-Eintrags auf die Verwendung fossiler Brennstoffe zurück. Durch die Verbrennung der relativ schwermetallreichen Kohle wird seit etwa 200 Jahren über die Flugasche Zn, aber auch Pb und in geringerem Maße Cadmium in die Atmosphäre gebracht und über den Niederschlag in die Sedimente der Binnenseen (auch weitab der Industrie- und Bevölkerungsballungsräume) und Ozeane eingelagert (z.B. FÖRSTNER 1976). Auch der Große Arbersee macht hier sicherlich keine Ausnahme. Doch die hohen Absolutwerte wie auch der hohe Anreicherungsfaktor, die beide – insbesondere bei Pb – nicht in das in anderen Seen beobachtbare Bild der Schwermetallsedimentation passen, machen die Suche nach anderen schwermetallliefernden Prozessen erforderlich. Neuerdings kommt dabei der zunehmenden Versauerung des Bodens durch saure Niederschläge und die damit einhergehende erhöhte Mobilität der Schwermetalle in die Diskussion – ein Effekt, der sich gerade bei kristallinem Untergrund besonders bemerkbar macht.

Als weiteres Anwendungsbeispiel sei der Konzentrationsverlauf des Elements Zirkonium (Zr) im Sediment des Kerns II (Abb. 5) herausgegriffen. Während des Spätglazials werden Zr-Gehalte erreicht, die in der Nähe des Gehalts des Ausgangsgesteins (ca. 230 mg/kg) liegen. Gegen Ende des Spätglazials und zu Anfang des Postglazials setzt ein Rückgang auf ca. 60 mg/kg ein, worauf ein mehr oder weniger stetiger Anstieg durch das ganze Postglazial hindurch auf das Doppelte (120 mg/kg) erfolgt. Dieses ausgeprägte Verhalten des vor allem in dem äußerst verwitterungsbeständigen Mineral Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ) enthaltenen Elements Zr könnte so gedeutet werden: Liegen die Zirkonminerale des Ausgangsgesteins hauptsächlich als Grobschluff- und Feinsand vor, so wird mit dem Anstieg der Baumgrenze und der Festigung der Vegetationsdecke zu Beginn des Postglazials (wodurch Transport und Sedimentation dieser relativ grobkörnigen Partikel erschwert werden) die Sedimentation der Zirkonminerale gehemmt. Die im weiteren Verlauf erfolgende, allmähliche Anreicherung von Zr während des ganzen Postglazials ist als relative Anreicherung gegenüber den anderen gesteinsbildenden Komponenten im Zuge einer selektiven Verwitterung zu sehen.

### See- und Quellwasser

Auf die zur Bestimmung des  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehaltes wünschenswerten Messungen des  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Gehalts im Seewasser mußte im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden, da diese aufgrund der geringen Konzentration des anorganischen Kohlenstoffs im Wasser des Gr. Arbersees. (wegen des karbonatfreien Einzugsgebietes maximal nur

Probennahme- stelle	$^3\text{H}$ (TU)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^3\text{H}$ (TU)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$^3\text{H}$ (TU)
Probennahme:	27. Mai 1980			26./27. August 1980			
Zufluß	50,4±3,4	-85,9	-12,02	61,0±4,0	-79,5	-11,43	
Moränenbecken	52,9±3,6	-80,7	-11,39	60,5±4,0	-83,3	-11,49	
Abfluß	53,7±3,6	-83,3	-11,70	58,6±3,9	-79,0	-11,01	
Quelle	77,1±5,3	-78,2	-11,33	71,6±4,7	-81,2	-11,46	
Probennahme:	2. Dezember 1980			21. April 1981			5./6. Juni 1981
Zufluß	54,2±4,2	-82,3	-11,85	39,5±4,3	-81,2	-11,34	56,3±4,6
Moränenbecken							48,0±4,6
Abfluß	46,0±3,7	-80,2	-11,12	45,9±4,0	-80,7	-11,39	48,0±4,6
Quelle	70,9±5,3	-80,9	-11,55	64,7±4,9	-80,5	-11,37	66,3±4,9

$^3\text{H}$ -Gehalte sowie  $\delta^2\text{H}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Wasserproben aus dem Zufluß (Geigenbach), dem Moränenbecken (in 10 m Tiefe) und dem Abfluß des Großen Arbersees sowie aus einer benachbarten Quelle (Moränenquelle)

Tabelle 4

einige mg/l) einen erheblichen Aufwand bei der Probenahme erfordert hätten. Die ursprünglich lediglich zur Ergänzung der  $^{14}\text{C}$ -Messungen gedachten Ergebnisse von  $\delta^2\text{H}$ -,  $^3\text{H}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen des See- und Quellwassers sind in Tab. 4 zusammengestellt. Die  $\delta^2\text{H}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen in einem für das Untersuchungsgebiet charakteristischen Bereich und angenähert auf der Niederschlagsgeraden  $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$  (CRAIG 1961), die für meteorische Wässer charakteristisch ist. Daraus folgt, daß die Verdunstung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Eine geringe Verdunstungsrate ist beim Gr. Arbersee u.a. durch kurze Verweildauer des Seewassers, die klimatischen Bedingungen sowie die windgeschützte und schattige Lage erklärbar. Die  $^3\text{H}$ -Gehalte (Tritium) von Zufluß, See und Abfluß stimmen am jeweiligen Entnahmetag innerhalb der Meßfehler überein (gute Durchmischung!) und lassen auch einen leichten Jahresgang erkennen. Dieser könnte durch eine Mischung verschiedener Anteile von jungem Niederschlag (Regen bzw. Schneeschmelzwasser) mit relativ älterem Wasser erklärt werden, das einen höheren  $^3\text{H}$ -Gehalt besitzt, wie er z.B. in der Moränenquelle gefunden wird. Eine Abschätzung nach dem Exponentialmodell (SIEGENTHALER 1971) ergibt für das Seewasser bei einer mittleren  $^3\text{H}$ -Konzentration von 52 TU in Zufluß, See und Abfluß eine mittlere Verweilzeit von ca. 1+-1 Jahr und bei der Moränenquelle bei einer mittleren  $^3\text{H}$ -Konzentration von 70 TU (mit leicht fallender Tendenz) eine mittlere Verweilzeit von ca. 2+-1 Jahren. Für die Bestimmung der mittleren Verweilzeit aus den jahreszeitlichen Schwankungen des  $^2\text{H}$ - und  $^{18}\text{O}$ -Gehaltes in den Niederschlägen und im Seewasser reichten diese vorläufigen Meßwerte allerdings nicht aus.

### Bestimmung von Alkali-, Erdalkali und Erdmetalle sowie der Schwermetalle mit spektroskopischen Methoden (AAS, AES)

#### Schwermetalle – Problemstellung

Die Sedimentationsräume sind nach ZÜLLIG (1956) die „Kehrichtdeponien des Stoffumsatzes“ Daher können durch

die Untersuchung von Seesedimenten – aufgrund ihres hohen Alters im Vergleich zur Zivilisationsgeschichte - das Ausmaß, die Verteilung und die Herkunft von zivilisatorischen Belastungen unserer Umwelt durch Schadstoffe, z. B. Schwermetalle, seit deren Verwendung oder Erzeugung durch den Menschen im Einzugsgebiet des jeweiligen Sees bzw. bei atmosphärischem Eintrag auch in weiterem Umkreis – bei Beachtung aller Einschränkungen – erstaunlich gut aufgezeigt werden. Andererseits läßt eine stoffliche Veränderung der Sedimentablagerung in einem See auch zahlreiche Rückschlüsse auf natürliche Veränderungen von Klima, Gewässer und Vegetation im Einzugsgebiet zu. Die vom Institut für Geographie durchgeführten Untersuchungen über den Gehalt an Schwermetallen in Sedimenten südbayerischer Binnengewässer haben daher zum Ziel,

- die Entwicklung der anthropogenen Schwermetall "pollution" im Wasserkörper, im Einzugsgebiet oder durch atmosphärischen Eintrag für einen längeren Zeitraum zu erfassen, soweit sie sich in Sedimenten widerspiegelt.
- historische und gegebenenfalls auch präzivilisatorische Eingriffe des Menschen in das Wirkungsgefüge des hydrologischen Systems bzw. des Einzugsgebietes (z.B. Rodungen mit anschließend erhöhter Erosionsrate bzw. vermehrter allochthoner Sedimentation im See) u.a. auch anhand der Schwermetallsedimentation zu erfassen und zu beschreiben.
- natürliche Veränderungen klimatischer, hydrologischer, geomorphologischer oder biogener Art im Einzugsgebiet bzw. im See selbst aus der Sedimentation von Schwermetallen zu erkennen.

Sicherlich ist es schwierig, anthropogene Schwermetall"pollution" von den in b und c beschriebenen Phänomenen zu trennen. Die sedimentierten anorganischen Partikel setzen sich aus mineralischen Partikeln aus dem Einzugsgebiet (z.B. Schichtsilikate, Quarz, im Bayer. Wald fast nicht: Calcit, Dolomit u.a.) zusammen. Die sedimentierten organischen Partikel stammen von terrestrischem bio-

genem Material (z.B. Huminstoffe) oder von aquatischen Organismen (z.B. Plankton). Jede Veränderung natürlicher oder anthropogener Art in den Anteilen führt in der Regel auch zu mehr oder minder großen Veränderungen im Schwermetallgehalt der Sedimente. Insbesondere die Fähigkeit der Organismen, Schwermetalle selektiv und zudem je nach Art verschieden stark - anzureichern, erschwert die Interpretation von Schwermetalluntersuchungen von Seesedimenten. Anreicherungen um das 100000fache gegenüber den Schwermetallkonzentrationen im freien Wasser sind keine Seltenheit. Diese angereicherten Konzentrationen sind größer/kleiner als die im anorganischen geochemischen Milieu des Einzugsgebietes, so daß bei gleichzeitiger Sedimentation von anorganischen Partikeln und Organismenresten letztere zwar Schwermetalle gegenüber dem Wasser angereichert, doch gegenüber den anorganischen Sedimentpartikeln durchaus abgereichert haben können oder umgekehrt. Bearbeitet man den Problembereich „Schwermetallverschmutzung“ - z.B. anhand von Sedimentkernen - , wäre die Lösung folgender Fragen besonders wünschenswert:

- a. *Trennung des lokalen vom regionalen und überregionalen Schwermetalleintrag,*
- b. *Bestimmung der Herkunftsgebiete (Lage der Emittenten) der überregionalen Schwermetallzufuhr. Lokale Emittenten lassen sich dagegen relativ leicht ermitteln.*
- c. *Berücksichtigung seenspezifischer Besonderheiten bei der Schwermetallsedimentation auf quantitativer Grundlage.*

Inwieweit hier angesichts der sehr komplexen Sedimentationsprozesse in Seen durch Untersuchung von Seesedimenten eindeutige Ergebnisse erzielt werden können, ist umstritten. So müßte an den Schwermetallen ihrer Herkunft markiert sein, was natürlich nicht der Fall ist. Nur im Falle von Blei bietet sich die Möglichkeit, durch Messung der Isotopengehalte über die Herkunft Aussagen zu machen (HORN, P., MICHLER, G. u. TODT, W. 1987).

Eine Zunahme von Schwermetallgehalten in den oberen Sedimentschichten kann daher nur dann als ein anthropogen verursachter, zusätzlicher Schwermetalleintrag in das Ökosystem gewertet werden, wenn folgende Minimalvoraussetzungen für den Sedimentationszeitraum erfüllt sind:

- a. *Die Anteile von organischer und anorganischer Sedimentation bleiben konstant*
- b. *Die mineralischen Bestandteile der anorganischen Sedimentation bleiben konstant (z.B. Quarzgehalt, Schichtsilikate, Karbonatgehalt, in den Alpen z.B.: Ca/Mg-Verhältnis als Ausdruck des Calcit-Dolomit-Verhältnisses)*
- c. *Die Artenzusammensetzung der (sedimentierten) Organismen bleibt hinreichend konstant. Diese letzte Voraussetzung ist - wenn überhaupt - nur mit hohem Aufwand an biochemischer Analytik überprüfbar und kann behelfsmäßig durch eine regional vergleichende Analyse ersetzt werden.*

d. *Sind derartige Schwermetallanreicherungen in Sedimenten vieler Seen festzustellen und korreliert das Ausmaß der Anreicherung mit der in etwa bekannten Schwermetallfreisetzung im Einzugsgebiet, so wäre eine selektive Schwermetallanreicherung durch Verschiebungen bei der Artenzusammensetzung der Organismen überzufällig.*

Die Einflußparameter auf den Sedimentationsprozeß sind in der Regel maßstabsabhängig. Die Sedimentation wird gesteuert von

- a. *supra-regionalen, d.h. globalen Faktoren (z.B. Klimaschwankungen, Eiszeiten)*
- b. *regionalen Faktoren des Einzugsgebietes (z.B. Klimazonen)*
- c. *lokalen und/oder individuellen Merkmalen des Sees oder des Einzugsgebietes (nicht selten atypische Charakteristika, z.B. Höhenlage, Morphologie des Seebeckens).*

### **Mechanismen der Schwermetallionen-Anreicherung**

Die Möglichkeit der Anreicherung von Schwermetallen und die verschiedenen Bindungsarten sind weitgehend bekannt (erste große Zusammenfassung in FÖRSTNER u. MÜLLER 1974). Weitaus schwieriger ist es jedoch, von einer Anreicherung oder Abnahme auf die Prozesse zu schließen, die hierzu geführt haben, da es meist eine Vielzahl von Möglichkeiten gibt.

In der Regel eindeutig sind die An- und Abreicherungsmechanismen von Mangan und Eisen. Unter anaeroben Bedingungen können bestimmte Mangan- und Eisenverbindungen aus dem Sediment rückgelöst werden, während im sauerstoffreichen Milieu Eisen (III) und Mangan (II) ausflocken und sedimentieren. So ist z.B. im Pilsensee, einem bis in jüngste Zeit hinein polytrophen See mit Sauerstofffreiheit ab 6 m Wassertiefe im Sommer, in 0-35 cm Sedimenttiefe eine Eisen- und Manganverarmung zu erkennen, die wohl auf Sauerstofffreiheit des Bodenwassers zurückgeht (MICHLER u. STEGER 1985).

Nach einem Eintrag von Metallionen in einen See liegen diese z.T. gelöst im Wasser, z.T. ungelöst im Sediment vor. Nach CHESTER (1987) lassen sich folgende Bindungsarten der Schwermetalle in Seesedimenten unterscheiden:

- a. *Kationenaustausch und adsorptive Bindung an Oberflächen feinkörniger Partikel (insbesondere Tonminerale, Fe- u. Mn-Oxide; organische Substanzen)*
- b. *Bindung als Ko-Präzipitat in Fe-u. Mn-Oxiden bzw. Hydroxiden; Diese Verbindungen entstehen beim Zusammentreffen von Metallen mit Fe- und Mn-haltigen Lösungen unter aeroben Bedingungen*
- c. *Organische Bindung: das Schwermetall ist Spurenbestandteil von organischen Makromolekülen (Huminsäuren).*
- d. *Mineralische Bindung: Das Schwermetall ist in Mineralen inkorporiert (oxidische, sulfidische, karbonatische sulfatische und silikatische Bindungen).*

Daher ist für alle Schwermetalluntersuchungen charakteristisch, daß das jeweilige Aufschlußverfahren quasi das Ergebnis „bestimmt“. Ein Aufschluß in verdünnten Säuren wird nur die Schwermetallkompartimente **a** u. z.T. **b** enthalten, Aufschlüsse in konzentrierten Säuren, insbesondere Königswasser, enthalten die Anteile von **a-c** und in Teilen auch von **d** (die rein silikatischen Verbindungen ausgenommen). Erst wenn das Sediment nach einem Königswasseraufschluß auch noch einem Flußsäureaufschluß unterworfen wird, kann der Gesamtgehalt an Schwermetallen ermittelt werden. Es bleibt die Frage, ob man das Wissen dieses Gesamtgehalts als Erkenntnis ansieht. Je nach Fragestellung wird man auch den Aufschluß wählen: will man die mobilen, d.h. auch auf einfache chemische Weise wirksam werdenden Schwermetalle konzentrationsmäßig ermitteln, so würde man nur einen leichten Aufschluß wählen (die in silikatischen Kristallstrukturen eingeschlossenen Schwermetallatome sind dann nicht relevant).

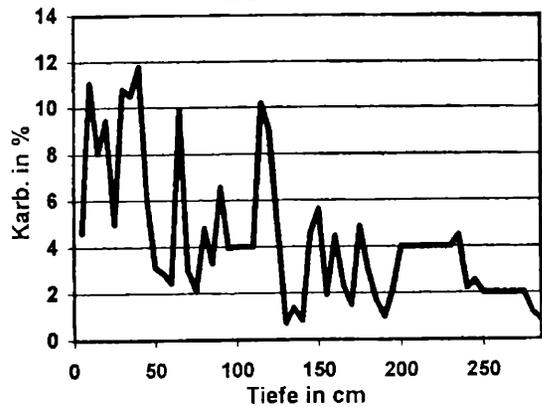
Für eine Ermittlung des Gesamtgehalts an Schwermetallen bietet sich neben den aufwendigen chemischen Aufschlußverfahren auch die Röntgenfluoreszenz-Analyse an (s. Abb. 5), die allerdings bei komplex zusammengesetzten Materialien aus der Natur immer mit der Eichung (Erstellen der richtigen „Standards“) zu kämpfen hat. Der fluoreszenzanalytische Wert liegt im Spätglazial um 1/3, im Postglazial um das Doppelte, im jüngsten Sediment um mehr als das Fünffache höher. Diese beiden Verfahren für den Einsatz an Sedimenten des Gr. Arbersees gegeneinander abzuwägen, bedarf noch eingehender systematischer Untersuchungen.

Die erste Untersuchung von Schwermetallgehalten in einem längeren Sedimentkern aus einem bayerischen See erfolgte am Ammersee (MICHLER et al. 1980). Weitere Untersuchungen in bayerischen und alpinen Seen zeigen ein sehr variantenreiches Bild der Schwermetallgehalte und der möglichen Ursachen. Die Seen des Bayerischen und Böhmerwaldes bilden darin eine eigene Gruppe, sind sie doch die einzigen Seen Bayerns, deren Einzugsgebiet in kristallinem Gestein liegt und die daher einen ganz anderen mineralischen Background im Einzugsgebiet und einen von den karbonatreichen Seen des Alpenvorlandes recht verschiedenen Wasserchemismus aufweisen.

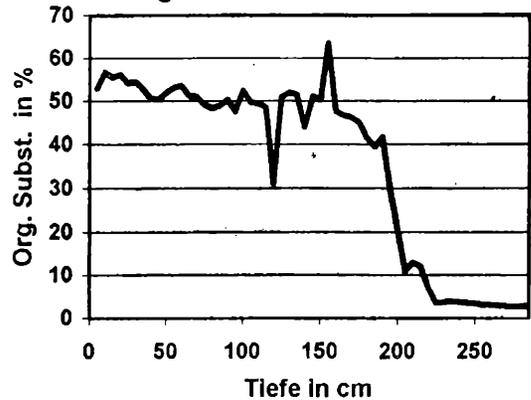
### Organische Substanz (ermittelt anhand des Glühverlustes) und Karbonatgehalt

Der Glühverlust (in etwa dem Gehalt an organischer Substanz entsprechend) der beiden Kerne (Abb. 6) aus dem Großen Arbersee zeigt zwei deutliche Abschnitte: sehr geringe Gehalte im Spätglazial bis in 330 cm (Kern 2) bzw. 225 cm (Kern 1) Sedimenttiefe, hohe Gehalte bis über 60% im Postglazial. Der Anstieg, d.h. der Übergang von minerogener zu organischer Sedimentation erfolgt binnen weniger Zentimeter. Das zeigt auf, daß auch im Arberseegebiet die Erwärmung des Sees und das daraus resultierende Algenwachstum wie auch die Entwicklung einer vor starker Erosion schützenden Vegetationsdecke vergleichsweise rasch verlaufen sein muß. Einzelne Ausreißer-Peaks sind in diesem

Großer Arbersee Kern 1  
Karbonat in %



Großer Arbersee Kern 1  
Organische Substanz in %



Großer Arbersee Kern 2  
Organische Substanz in %

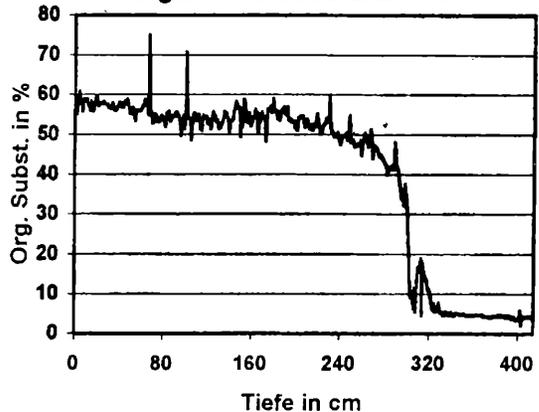


Abbildung 6

kleinen See nicht verwunderlich, da immer wieder größere anorganische oder organische Partikel in einem singulären Ereignis (Hochwasser, Wind usw.) in den See gelangen können.

Der Karbonatgehalt (gemessen mit der Methode nach Scheibler) ist im Sediment des Großen Arbersees mit Gehalten von 2-10% sehr gering. Die starken Schwankungen in erster Linie im organischen Sediment des Postglazials - sind wahrscheinlich auf das Analyseverfahren (manometrische

Methode nach Scheibler) zurückzuführen, bei dem neben dem aus Karbonat entwickeltem  $\text{CO}_2$  auch andere Gase, die in dem stark organischen Material entstehen können, z.B.  $\text{H}_2\text{S}$ , gemessen werden.

### Phosphor

Der Gehalt an Phosphor (Abb. 7), gemessen nicht als Anion  $\text{PO}_4$ , sondern mittels Atomemissionsspektroskopie (AES), zeigt, daß im Spätglazial das minerogene Sediment sich aus recht unterschiedlichen Partikeln mit ebenso unterschiedlichen Phosphorgehalten zusammensetzt (mittlerer Gehalt bei etwa 5 g/kg, während im Postglazial die vorwiegend organische Sedimentation einen recht gleichmäßigen Gehalt von rd. 3 g/kg aufweist).

### Alkalimetalle Lithium, Natrium, Kalium

Die Alkalimetalle (Leichtmetalle, Abb. 8) sind chemisch weitaus mobiler als Schwermetalle. Ihr Konzentrationsverlauf ist daher auch in vielen Abschnitten gegenläufig. Lithium und Kalium zeigen einen fast identischen Konzentrationsverlauf, was die chemische Ähnlichkeit dieser Elemente und ihre „Gleichbehandlung“ durch die Natur dokumentiert. Natrium sollte ebenfalls ein ähnliches Bild erwarten lassen, doch die Abweichungen sind beachtlich und erklärungsbedürftig. Der spätglaziale Background liegt über den postglazialen Konzentrationen, die allerdings zur Sedimentoberfläche wieder zunehmen - möglicherweise Ausdruck einer stärkeren Alkaliverwitterung im Einzugsgebiet (durch sauren Regen?).

### Calcium und Magnesium

Interessant ist das gegenläufige Verhalten von Calcium und Magnesium (Abb. 9). Magnesium liegt im Spätglazial mit 10

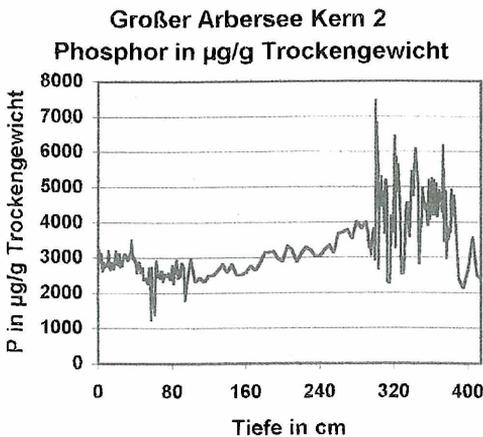
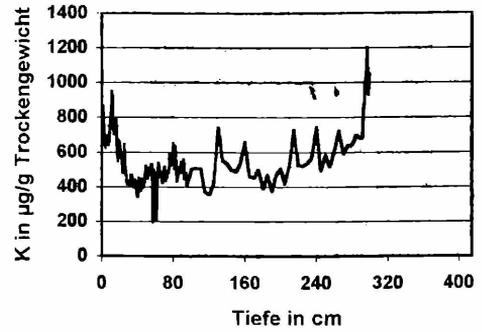


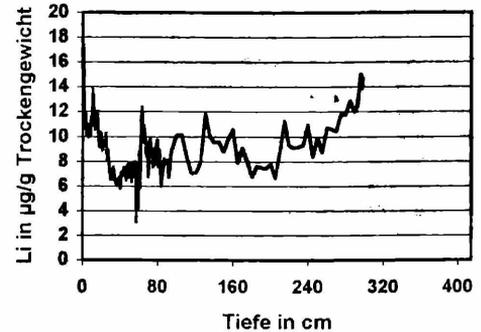
Abbildung 7

g/kg vor, Calcium nur mit rd. 4 g/kg. Dann folgt insbesondere bei Magnesium eine abrupte Abnahme zum Postglazial von 12 g/kg auf 2 g/kg, bei Calcium eine Zunahme von 4 g/kg auf rd. 8 g/kg, ohne diesen scharfen Übergang zu zeigen. Im anorganischen Sediment des Spätglazials liegt

### Großer Arbersee Kern 2 Kalium in µg/g Trockengewicht



### Großer Arbersee Kern 2 Lithium in µg/g Trockengewicht



### Großer Arbersee Kern 2 Natrium in µg/g Trockengewicht

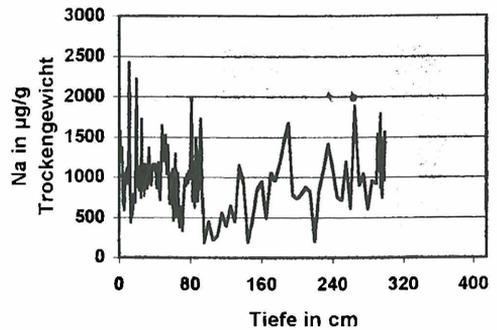


Abbildung 8

demnach das Verhältnis der beiden Erdalkalimetalle Mg/Ca bei 5:1, im Postglazial jedoch bei 1:4.

### Aluminium und Bor

Die beiden Erdmetalle Aluminium und Bor (Abb. 10) zeigen teilweise einen ähnlichen Konzentrationsverlauf, z.B. im frühen Postglazial (Al bei 10 g/kg, B nur 5 mg/kg), dann den Anstieg im mittleren Postglazial, anschließend sinkt Bor wieder ab, während Aluminium auf gleichen Konzentrationsniveau von ca. 20 g/kg verharrt. Der spätglaziale Gehalt an Al von rd. 20-25 g/kg weist erhebliche Schwankungen auf, was wohl auf die doch beachtlich variierenden Partikel der allochthonen Schwebstoffzufuhr zurückzuführen ist.

	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	Mn	Fe
Tongestein	0,2	20	45	95	68	90	850	47200
Basalt	0,22	6	87	105	130	170	1500	86500
Granit	0,13	19	30	60	15	22	540	29600
Karbonatgestein	0,04	9	4	20	20	11	1100	3800
Gr. Arbersee Spätglazial		15	70	125	65	70	600	35000
Gr. Arbersee Postglazial		15	50	65	20	35-60	*500	12000

Durchschnittskonzentrationen, jeweils in mg/kg

### Eisen und Mangan

Die beiden chemisch sehr ähnlichen Elemente Eisen und Mangan (s. Abb. 11), in der Erdkruste im Verhältnis 10:1 vorkommend, treten im minerogenen Sediment des Spätglazials mit 4 g/kg (Fe) bzw. 0,5-1 g/kg (Mn) auf, also im Verhältnis 8:1 (mit einzelnen Ausreißern). Im Übergang zum Postglazial nimmt Eisen sehr deutlich von 4 g/kg auf rd. 1,5 g/kg ab und sinkt zur Sedimentoberfläche hin auf fast 1 g/kg. Mn weist im Übergang zum Postglazial eher einen kleinen, durchaus scharfen Anstieg auf 0,75 g/kg auf und sinkt bis zur Sedimentoberfläche hin allmählich auf 0,2 g/kg ab.

### Vertikale Verteilung von Schwermetallen (Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, V, Ti)

Der untersuchte Sedimentkern wurde in drei Bereiche mit verschiedenen Analysedichten aufgeteilt. Bis zu einer Tiefe

von 100 cm wurde jeder Zentimeter, bis 25 cm jeder dritte und bis zum unteren Ende jeder zweite Zentimeter untersucht.

Die Ergebnisse für die Schwermetalle Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, V, Ti sind graphisch in den Abb. 12-14 dargestellt.

Für das minerogene Spätglazial läßt sich folgende Reihung bezüglich der Konzentration aufstellen:

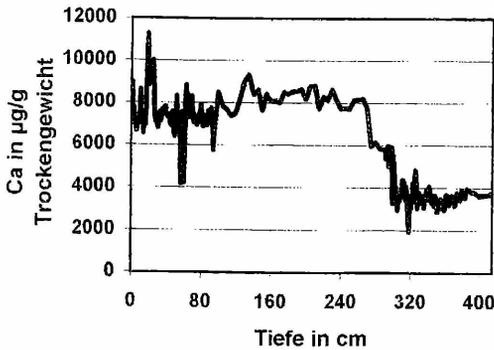
Fe > Al > Mg > Ca > Ti > Na > K > Mn > Zn > V > Cr > Cu > Ni > Pb > Li > 12 > B

Für das organische Sediment des Postglazials sieht diese Reihung folgendermaßen aus:

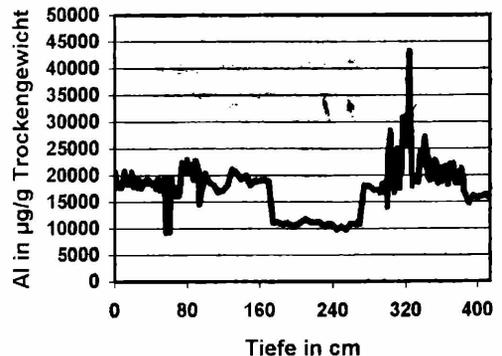
Al > Fe > Ca > Mg > Ti > Na > Mn > K > Zn > Cu >> V > Cr > Ni > Pb > Li > B

Im einzelnen liegen folgende Konzentrationen vor:

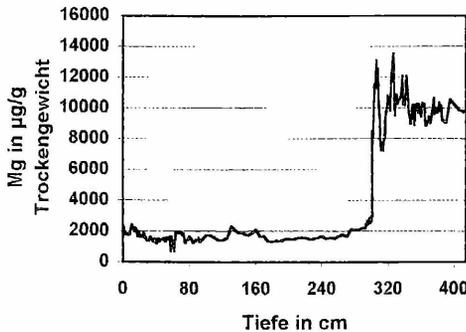
Großer Arbersee Kern 2  
Calcium in µg/g Trockengewicht



Großer Arbersee Kern 2  
Aluminium in µg/g Trockengewicht



Großer Arbersee Kern 2  
Magnesium in µg/g Trockengewicht



Großer Arbersee Kern 2  
Bor in µg/g Trockengewicht

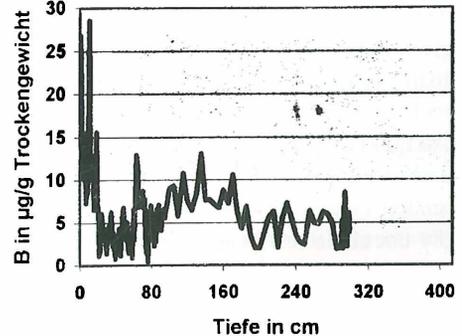


Abbildung 9

Abbildung 10

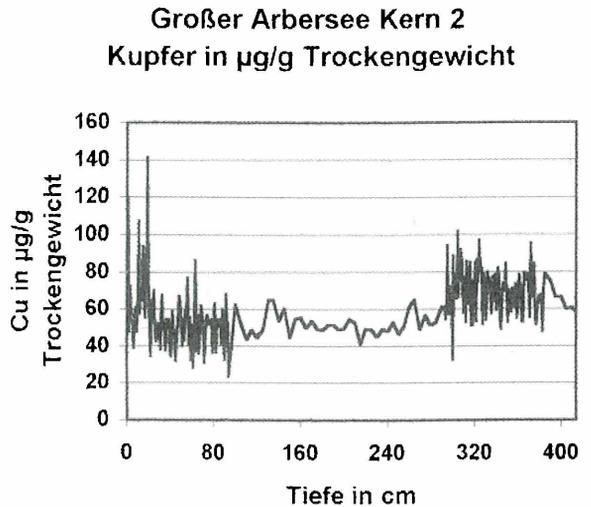
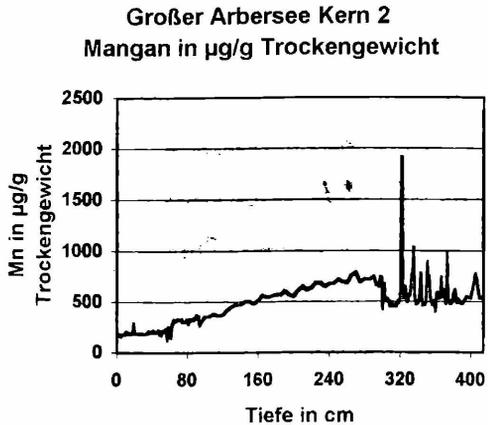
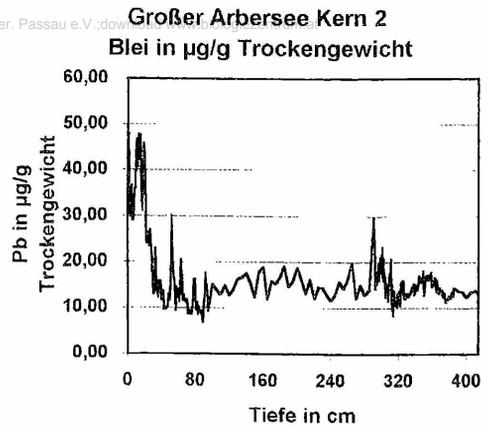
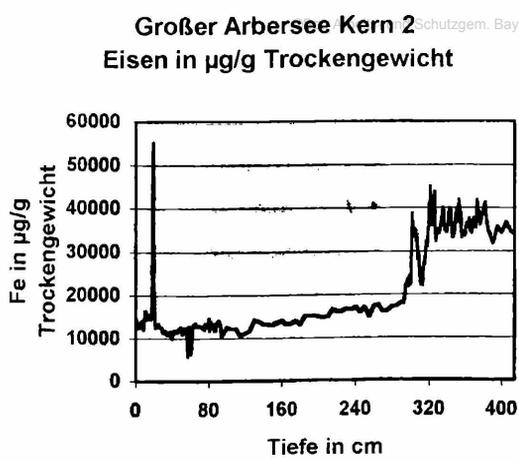


Abbildung 11

### Zink, Blei und Kupfer

Diese Schwermetalle (Abb. 12) sind die wesentlichen und von Menschen schon frühzeitig eingesetzte Schwermetalle, die in höheren Konzentrationen toxisch sind. Außerdem werden sie bei der Verbrennung von Holz, aber auch von fossilen Brennstoffen freigesetzt. Sie können also (zusammen mit Cadmium) als die typischen Schwermetall“pollutants“ gelten. Zink liegt im Spätglazial mit rund 110-150 mg/kg vor, sinkt dann im Übergang zum Postglazial auf 60-80 mg/kg, um dann in jüngster Zeit doch ganz erheblich und ziemlich signifikant auf bis zu 200 mg/kg anzusteigen. Eine ähnlich signifikante Zunahme in jüngster Zeit ist auch bei Blei zu beobachten von 10 mg/kg auf bis zu 50 mg/kg. Die spätglaziale Konzentration von Blei liegt mit rd. 10-18 mg/kg - man muß wohl sagen - mehr oder minder zufällig ähnlich hoch wie im weiteren Verlauf des Postglazials. Bei Kupfer beträgt die Konzentration im Spätglazial kräftig schwankend zwischen 55 und 85 mg/kg, verläuft im anschließenden Postglazial sehr gleichmäßig um 45 mg/kg und steigt - ebenfalls mit beachtlichen Schwankungen - in jüngerer Zeit auf bis zu 140 mg/kg. Ob die Abnahme der Konzentration der drei Schwermetalle in der obersten Sedimentschicht schon auf eine Verringerung des Schwermetalleintrags schließen läßt, sei dahin gestellt. Zu viele Nebeneffekte können diese Abnahme bewirkt haben, auch solche der Probennahme: schließlich ist das Sediment

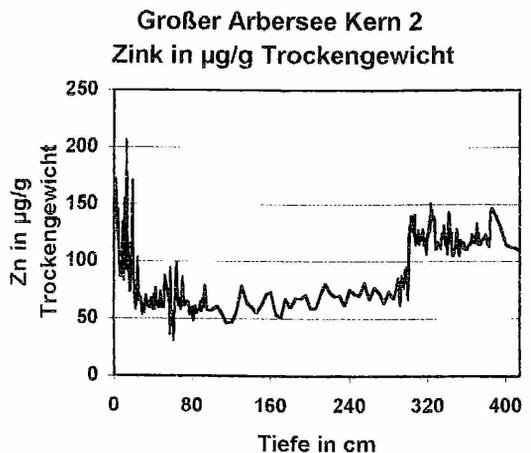
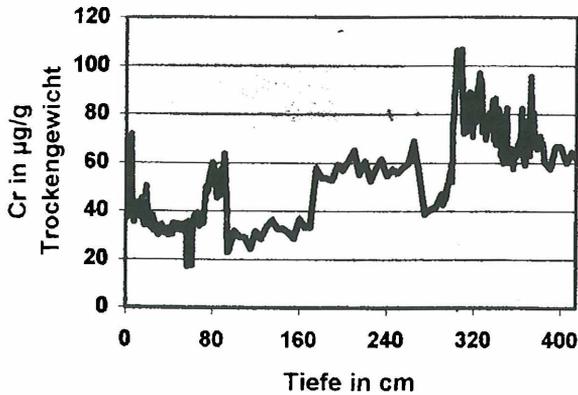


Abbildung 12

das im Bereich des Postglazials mit seinem organischen Sediment einen Wassergehalt bis zu 90% aufweist - kaum ungestört aus dem Sedimentkern zu entnehmen. Einige Zentimeter des oberflächennahen Sediments sind meist „verspült“ und geben nicht mehr die originale Situation am Seeboden wieder. Daher ist geplant, mit einem eigens hierfür entwickelten Instrument kurze, aber möglichst ungestörte Kerne der oberflächennahen Schicht zu entnehmen.

**Großer Arbersee Kern 2**

**Chrom in µg/g Trockengewicht**



**Großer Arbersee Kern 2**

**Nickel in µg/g Trockengewicht**

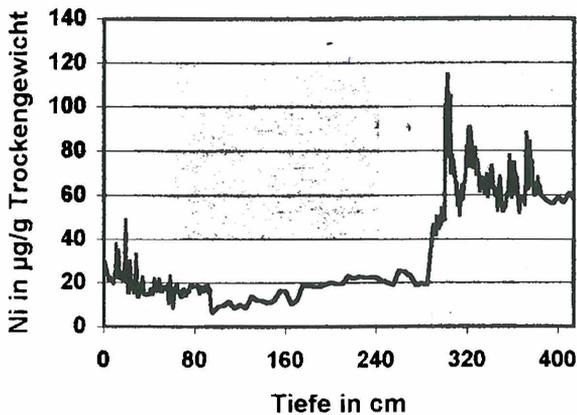


Abbildung 13

**Nickel und Chrom**

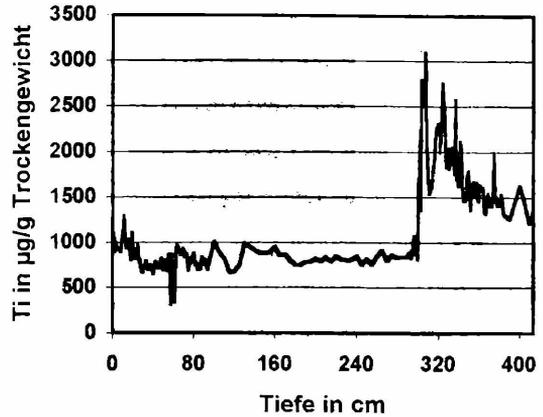
Beide Schwermetalle (Abb. 13) sind mit 60-100 mg/kg im minerogenen Sediment des Spätglazials enthalten und weisen in diesem Bereich einen durchaus ähnlichen Konzentrationsverlauf auf. Das organische Sediment des Postglazials enthält beide Elemente nur noch mit 20 mg/kg (Ni) bzw. 40-60 mg/kg (Cr), wobei Ni wesentlich konstantere Konzentrationen aufweist als Cr. Beide Elemente - Cr weit stärker als Ni - weisen einen Anstieg in jüngerer Zeit auf, der aber bereits im Postglazial phasenweise erreicht wurde und noch erheblich unter dem spätglazialen Niveau bleibt. Die weitaus stärkere „Unruhe“ der Konzentrationen im Postglazial von Cr werden von Ni nur schwach, aber durchaus sehr exakt „nachgezeichnet“

**Titan und Vanadium**

Titan (Abb. 14) kommt im kristallinen Gestein des Bayerischen Waldes mit beachtlichen Konzentrationen vor, so daß es nicht verwunderlich ist, daß im minerogenen Sediment des Spätglazials auch Konzentrationen von 1,5 bis 3 g/kg zu messen sind, im mehr organischen Sediment des Postglazials jedoch nur noch weniger als 1 g/kg. Verblüffend ist

**Großer Arbersee Kern 2**

**Titan in µg/g Trockengewicht**



**Großer Arbersee Kern 2**

**Vanadium in µg/g Trockengewicht**

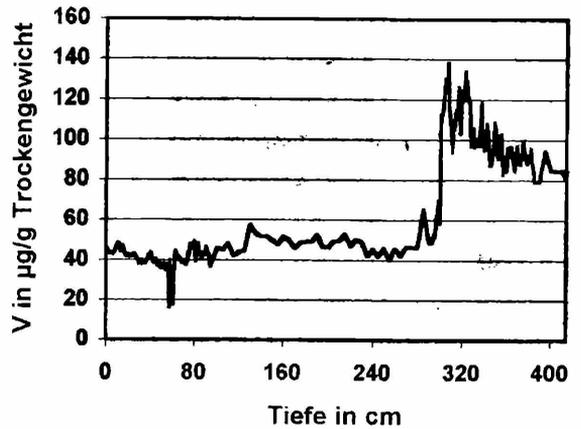


Abbildung 14

der nahezu kongruente Verlauf mit dem Element Vanadium, das nur in geringen Konzentrationen von 80-120 mg/kg (Spätglazial) bzw. rd. 45 mg/kg (Postglazial) auftritt. Zwar sind beide chemisch einander sehr ähnlich und werden wohl auch von den Prozessen der Natur (Verwitterung, Transport, Sedimentation sowie organische Anreicherung) praktisch gleichbehandelt. Man kann aus dieser großen Ähnlichkeit auch folgen, daß das Aufschlußverfahren wie auch die Analyse unter vergleichsweise konstanten Bedingungen durchgeführt worden sind.

**Diskussion**

Betrachtet man zunächst den Glühverlust als Indikator für das Verhältnis an organischer zu anorganischer (minerogener) Sedimentation, so wird deutlich, daß in 325 cm Sedimenttiefe der mineralische Anteil mit 90-98% Anteil weit überwiegt. Dieser Kernabschnitt ist eindeutig dem Spätglazial zuzuordnen, wengleich eine weitere Unterscheidung in die bekannten wärmeren und kälteren Perioden ohne Pollenanalyse nicht möglich ist (für <sup>14</sup>C-Analysen reicht der C-Gehalt nicht aus). Das nahezu vegetationsfreie, durch die Arbeit des Eises schuttbedeckte Gelände lieferte damals viel

anorganischen Eintrag (Schwebstoff) in den See, eine organische Sedimentation war zumindest mengenmäßig im Verhältnis zur anorganischen Sedimentation völlig untergeordnet. Auch die meisten Kationen (Alkali-, Erdalkali- und Schwermetalle) zeigen in ihrem Konzentrationsverlauf deutlich diesen großen Klimaeinschnitt, bedingt durch den Wechsel von allochthoner anorganischer Sedimentation aus dem Einzugsgebiet im Spätglazial und autochthoner organischer Sedimentation im Postglazial.

Interessant ist natürlich die Frage, welche Ursache für den Anstieg der Konzentrationen von Zn, Pb, Cu, Cr u.a. Schwermetallen im obersten, d.h. jüngsten Sedimentabschnitt dingfest gemacht werden kann, vor allem, ob eine anthropogene Ursache vorliegt.

So gibt es im Kristallin des Bayerischen Waldes normalerweise nur geringe Pb-Konzentrationen (die Lagerstätten des Silberberg in Bodenmais abgesehen), weshalb Pb auch in den mineralischen Sedimenten des Spätglazials mit rund 20 mg/kg vergleichsweise gering vertreten ist. Der starke Anstieg bis zu einem Maximum von 150 mg/kg in den obersten 30 cm des Sediments ist allerdings augenfällig. Diese aus dem rund 2,74 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet des Gr. Arbersees schwerlich zu erklärende Zunahme um das 3-4fache ist möglicherweise anthropogenen Faktoren zuzuschreiben. Ähnliche Zunahmen um das 3-4fache findet man bei Cadmium. Die gemessenen Zunahmen decken sich mit denen aus vielen anderen Seen Südbayerns, aber auch aus anderen Seeregionen der Erde (Nordamerika, Skandinavien) und weisen insbesondere, da global beobachtbar auf einen zusätzlichen anthropogenen Schwermetalleintrag hin. Erschwerend für eine Interpretation ist die geringe Sedimentationsrate. Die Kerne umfassen mit knapp 3 m Länge gut 11000-15000 Jahre, so daß die zeitliche Auflösung gering ist. Zudem ist in dem stark wasserhaltigen organischen Sedimentmaterial des Postglazials mit Diffusionsvorgängen zu rechnen. Die Geschichte des Bayerischen Waldes bietet allerdings einige Hinweise für mögliche Erklärungen. So dürfte die anthropogene Schwermetallbelastung ab dem 14. Jh. eine größere Bedeutung spielen, als im Bayerischen Wald Glashütten errichtet wurden. Gerade für die Herstellung der erforderlichen Pottasche (als Flußmittel) wurden ungeheure Holzmassen verbrannt: nur 0,06-1,5% aus dem Volumen von 1 m<sup>3</sup> Fichte oder Buche verblieben als Pottasche. Auch zur Beheizung von Schmelzöfen verwendete man Holz, doch ein Vielfaches an Holz wurde für die Pottaschegewinnung verbraucht. Beim Verbrennen von Holz und beim Schmelzen des Sandes wurden zahlreiche Stoffe, u.a. sicher auch Schwermetalle, in die Atmosphäre emittiert und in mehr oder weniger großen Mengen mit dem Niederschlag direkt oder aus dem Einzugsgebiet über die Zuflüsse in den See eingetragen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß in historischer Zeit (im Harz schon für prähistorische Zeit nachgewiesen!) durch die damaligen Prozesse der Metallverarbeitung lokal große Umweltschäden angerichtet wurden (so auch vom Silberberg in Bodenmais bekannt). Dagegen ist es Charakteristikum unserer Zeit, daß zwar durch zunehmende Verbesserung der technischen Prozesse und der Einführung von Umweltschutzmaßnahmen die lokale Umweltverschmutzung

verringert werden konnte. Dafür hat die regionale und globale Umweltbelastung aufgrund der immensen Ausweitung dieser Ressourcennutzung durch den Menschen zugenommen.

Die weitere Anreicherung der Metalle Zn, Pb, Cu, Cd, Ni, Cr u.a. nach 1900 muß wohl mehr auf regionale und globale Schwermetallzufuhr (Abgase aus Kraftverkehr, Hausbrand, Hüttenbetriebe usw.) zurückgeführt werden, möglicherweise auch auf die Säurezufuhr aus der Atmosphäre. Durch die pH-Erniedrigung des Bodens kommt es zu einer verstärkten Auswaschung der Metalle, von denen ein Großteil über das Gewässernetz dem See zugeführt werden. Es ist auch bekannt, daß gerade die Hochlagenfichtenwälder auf den Kämmen des Bayerischen Waldes aus der allgemeinen West-Ost-Luftströmung die Schadstoffe „auskämmen“, einerseits über die hohen Niederschläge, andererseits durch Nebel und Partikeltransport, wovon die Einzugsgebiete der glazial geschaffenen Karsen des Bayerischen und Böhmerwaldes auf der SO-Seite ihrer jeweiligen Bergmassivs besonders viel erhalten. Die Abnahmen der Schwermetallgehalte direkt an der Sedimentoberfläche können auf Rücklösungsprozesse aus dem Sediment hindeuten, bedingt durch die pH-Erniedrigung des Seewassers in den vergangenen Jahrzehnten, aber auch Probenentnahme bedingt sein (Verspülung an der Sedimentoberfläche).

Ob eine Zunahme von Schwermetallgehalten im Sediment durch unmittelbaren anthropogenen Eintrag, durch indirekte Eingriffe des Menschen in den Stoffhaushalt oder durch natürliche Prozesse im Einzugsgebiet bzw. Anreicherungsprozesse im Sediment zustande kommt, läßt sich anhand einer isolierten Untersuchung einiger weniger Seen nicht ausreichend beantworten, insbesondere, wenn keine Prozesse des Schwermetalltransports in den See durch weitere aufwendige Untersuchungen qualitativ und quantitativ dingfest gemacht werden. Es ist daher nie ganz auszuschließen, daß unbekannte oder nicht einkalkulierte natürliche Prozesse eine anthropogene „Schwermetallanreicherung“ im Sediment „vortäuschen“. Durch Vergleich mit den Schwermetallgehalten in anderen Seen - regional oder sogar global - kann hier etwas mehr Klarheit geschaffen werden. Durch den Vergleich mit den Schwermetallgehalten in anderen Seen kann hier etwas mehr Klarheit geschaffen werden und das Ausmaß der Schwermetallakkumulation in Seesedimenten für eine ganze Region mit einer größeren Sicherheit abgeschätzt und zu bekannten Emissionszentren bzw. belasteten Regionen in Beziehung gesetzt werden (auch wenn einzelne Seen wegen singulärer Sedimentationsprozesse nicht in das allgemeine Schema passen).

## Literatur

APEL, R. u. FAUTH, H. (1977): Hydrogeologie Erläuterungen zur geologischen Karte des Nationalparks Bayerischer Wald (Blatt Nr. 7046, 7047, 7147). München, S. 137-152

FÖRSTNER, U. u. MÜLLER, G. (1974): Schwermetalle in Flüssen u. Seen. Berlin, Heidelberg, New York

HORN, M., MÜLLER, G. u. TÖDT, H. (1977): Die anthropogene Blei-Belastung im Raum München, ermittelt aus Pb-Isotopenmessungen von Wasser- und Sedimentproben. In: Mitt. Geogr. Ges. München, Bd. 72, München, S. 105-117.

MICHLER, G. (1977): Untersuchungen über die Schwermetallgehalte in Sedimentbohrkernen aus südbayerischen Seen. In: ANL Berichte, H. 7, Laufen, S. 151-159.

MICHLER, G., PRÖMPER, R., RAUERT, W., STICHLER, W. u. WOLF, W. (1982): Isotopenmessungen an Sedimenten des Großen Arbersees/Bayerischer Wald, GSF-Bericht R 290, München, S. 202-225

MICHLER, G., SIMON, K., STEINBERG, C. u. WILHELM, F. (1980): Vertikale Verteilung von Metallen im Sediment eines Alpenvorlandsees als Zivilisationsindikatoren, Arch. Hydrobiol., 88, 1, Stuttgart

PFAFFL, F. (1988): Glazialmorphologische Untersuchungen im Rachel-Nordkar und am Gr. Arbersee im Bayerischen Wald. In: Geolog. Blätter von NO-Bayern, 38

PRÖMPER, R. (1982): Element- und isotopenspezifische Sedimentation im Einzugsgebiet des Großen Arbersees (Bayerischer Wald) während des Spät- und Postglazials unter besonderer Berücksichtigung rezenter Veränderungen im Ökosystem. Dipl.-Arbeit am Inst. f. Geogr. München

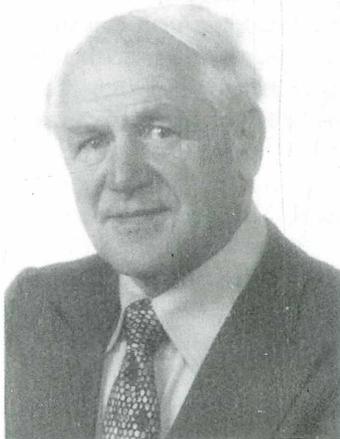
SCHEFFER, F. u. SCHACHTSCHABEL, P. (1979): Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart

TUREKIAN, K. K. u. WEDEPOHL, K. H. (1961): Distribution of the elements in some major units of the earth crust. - Bull. Geol. Soc. Am., 72, S. 175-192

Anschrift des Verfassers:

Dr. Günther Michler  
Inst. f. Geographie  
Luisenstraße 37  
80333 München  
g.michler@geographie.uni-münchen.de

## Naturkundlicher Kreis Bayerischer Wald Vereinsnachrichten



Am 18. Dezember 1999 ist schnell und völlig unerwartet Forstamtsrat i. R. Alois Preißer in Passau-Salzweg verstorben. Gemeinsam mit seiner Frau Stefanie zählte er zu den Gründungsmitgliedern des Naturkundlichen Kreises Bayerischer Wald (gegr. 1975) e.V., dem er auch einige Jahre als 2. Vorsitzender gedient hat. Nachrufe würdigten sein hohes Fachwissen und seine naturnahen waldbaulichen Kenntnisse in der Waldbauernvereinigung Passau und beim Jagdschutzverein Passau, wo er 27 Jahre in der Jungjägerausbildung tätig war. Seine Fachkenntnis sowie seine bescheidene, fürsorgliche Art brachten ihm hohe Anerkennung ein. Seine Liebe zur Natur und deren Hege und Pflege war für uns Vorbild.

gez. Fritz Pfaffl

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

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Der Bayerische Wald](#)

Jahr/Year: 2000

Band/Volume: [14\\_2](#)

Autor(en)/Author(s): Michler Günther

Artikel/Article: [Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Großen Arbersee -  
Glühverlust, <sup>14</sup>C-Datierung, Isotope, Alkali-, Erdalkali-, Erd- und  
Schwermetallgehalte 3-17](#)