

Bleiisotope und Remobilisation von Erzlagerstätten

Von V. KÖPPEL*) und E. SCHROLL**)

Mit 2 Abbildungen, 1 Tabelle

Abstract

The use of Pb isotope ratios and trace elements applied to the problem of remobilization of ores and mobilization of metals from source beds by endogenic and exogenic processes is discussed.

Examples from the literature are reviewed and new data especially of gold deposits of the Penninic area (Tauern window) in the Eastern Alps are presented. The results indicate a significant Alpidic remobilization of metals from deposits of the Hohe Tauern area with the addition of radiogenic rock lead and antimony to the ore now present in vein type deposits of the crystalline core and the younger schist cover of the Tauern window.

1. Vorbemerkung

Die Konzentration seltener Elemente in nutzbaren Erzmineralisationen ist meist ein komplexer Prozeß, der nur dann richtig verstanden werden kann, wenn die gesamte geologische Entwicklung jenes Teiles der Erdkruste in die genetische Betrachtung einbezogen wird, in dem die geochemische Konzentration auftritt (vgl. ROUTHIER, 1969). In vielen Fällen scheint die Bildung von Lagerstätten auf geochemischen Voranreicherungen zu beruhen, welche bereits als Erzvorkommen ausgebildet sein können. Der Mobilisation von Elementen aus positiven geochemischen Anomalien und der Remobilisation von Erzvorkommen resp. -lagerstätten kommen daher eine große Bedeutung zu. Neben endogenen können exogene Prozesse gleichermaßen wirksam werden.

*) Adresse: Institut für Kristallographie und Petrographie, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

***) Adresse: Geotechnisches Institut der Bundesversuchsanstalt Arsenal Wien, Obj. 214, A-1031 Wien P.O.B. 8.

Soweit endogene Remobilisation im Gesteinsverband im weitgehend geschlossenen System vor sich geht, sind der Wegsamkeit enge Grenzen gesetzt, die sie auf die Dimensionen im Meterbereich beschränken (VOKES, 1971). Remobilisation durch Anatexis und Palingenese entziehen sich als magmatogene Vorgänge der direkten Beobachtung. Weiträumigere Wegsamkeit setzt Hohlrumbaildungen voraus, die als Folge tektonischer Prozesse entstehen.

Der exogene geochemische Zyklus bietet außerordentliche Möglichkeiten für Stofftransporte, Stofftrennung und Konzentration, auch dann, wenn die Tendenz zur Dispersion in klastischen und chemischen Sedimenten oft ausgeprägter erscheint als die der Konzentration.

Remobilisierte Erzmineralisationen lassen sich in günstigen Fällen sowohl durch charakteristische Änderungen im Chemismus der beteiligten Mineralphasen als auch durch Änderungen in der Isotopenzusammensetzung gewisser Elemente erkennen.

So bieten sich an:

A. *Chemismus*

- a) Fraktionierung geochemisch kohärenter Elementpaare oder Gruppen wie Ni/Co im Pyrit, Ga/Ge im Sphalerit, SEE im Fluorit (SCHROLL, 1976; MÖLLER et al., 1981, u. a.)
- b) Zufuhr von Spurenelementen

B. *Isotopenzusammensetzung*

- a) Isotopenfraktionierung bei leichten Elementen (H, O, C, S) bedingt durch Änderungen der Bildungstemperatur oder des Lösungsmediums, Salinität etc.
- b) Änderung der Isotopenzusammensetzung schwererer Elemente (Sr, Pb) bedingt durch Zufuhr radiogener Isotope, wie ^{87}Sr , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb .

Wenn auch in der Folge die Betrachtungen auf die Entwicklung der Bleisotopen bezogen sind, die zweifellos den besten Einblick in die Migration eines Elementes vom Erdmantel in die Erdkruste bis zur Konzentration in Erzlagerstätten vermitteln, so muß doch im Sinne dieser Ausführungen vermerkt werden, daß zwischen der Bleisotopenzusammensetzung, anderen isotopengeochemischen Daten und Spurenelementen kausale *Zusammenhänge* bestehen können. Erst in der kombinierten Anwendung eines umfangreicheren geochemischen Datenmaterials liegt der Schlüssel zur genetischen Klärung (SCHROLL, 1980).

2. Geochemische Migration und Evolution des Bleis und seiner Isotope

Blei ist in den gesteinsbildenden Mineralen in erster Linie an kalium- und dann an calciumhaltige Silikate gebunden:

Kaliumfeldspäte (19) ca. 50 ppm Pb, pegmatitische Mikroline (219) (ohne die bleireichen Amazonite) 100 ppm, Biotite (259) 20 ppm, Muskovite (32) 25 ppm, Plagioklase (61) 20 ppm und Amphibole (85) 15 ppm (WEDEFOHL, 1974 a, Anzahl der Daten in Klammern).

Hauptwirtminerale für Blei in magmatischen Gesteinen sind die Feldspäte („Feldspatblei“).

Die Mineralisation dieses Metalls erfolgt im wesentlichen in Form des Sulfides Galenit („Erzblei“).

Heiße NaCl-haltige Wässer vermögen 60 bis 100% des magmatogenen „Gesteinsbleis“ zu extrahieren. In vulkanogenen Exhalationen ist das Chlorid PbCl_2 eine stabile Transportphase (WEDEPOHL, 1974 a und b).

Auch bei der Verwitterung granitischer Gesteine können 60% und mehr des Gesteinsbleis mobil werden. Für den Transport in Verwitterungslösungen ist der pH-Wert und die Löslichkeit von Hydroxylpyromorphit und Cerussit bestimmend. In Sedimenten wird Blei vorzugsweise an Kaolinit, dann Montmorillonit und Illit sorptiv gebunden. In Karbonatgesteinen ist die Bleikonzentration niedrig und überwiegend in der Ton- und Siltfraktion enthalten (WEDEPOHL, 1974 a).

Mit der Isotopengeochemie des Bleis ist die Geochemie der beiden radioaktiven Mutterelemente U und Th eng verbunden, da die drei radioaktiven Familien ^{238}U , ^{235}U und ^{232}Th seit der Nukleogenese stabile Bleiisotope, ^{206}Pb , ^{207}Pb und ^{208}Pb , produzieren. Wie Abb. 1 zeigt, sind die Elementverteilungen Pb/U/Th in den Massengesteinen im Durchschnitt nicht allzu variant. Die Unterschiede in der Verteilung im ozeanischen Mantel, in der kontinentalen Unter- und Oberkruste, reichen aber aus, um die jeweilige Herkunft des Bleis aus diesen drei geochemischen Einheiten abzuleiten (DOE und ZARTMAN, 1979), vorausgesetzt, daß die Verweilzeit der U-Pb- und Th-Pb-Systeme in den betreffenden Milieus lange genug dauerte. Das geochemische Variationsdiagramm (Abb. 1) zeigt, daß die Elementverteilung in Tongesteinen und Graniten ähnlich ist und daß die für die Unterkruste charakteristische Granulitfazies eine gewisse Ähnlichkeit mit Sandsteinen aufweist.

In erster Näherung läßt sich jedes „normale“ Blei als eine Mischung von zwei Komponenten beschreiben; eine Komponente bildet das Urblei, das bereits bei der Bildung der Erde vorhanden war, und die andere Komponente ist der zeitabhängige radiogene Zuwachs an ^{206}Pb , ^{207}Pb und ^{208}Pb , der zudem noch abhängig vom U/Pb resp. Th/Pb-Verhältnis ist.

Heute genügt diese erste Näherung nicht mehr zur Beschreibung der Entwicklung von Erzblei oder Gesteinsblei. Zwei relativ einfache Modelle beschreiben die Entwicklung von „normalem“, d. h. durchschnittlichem Krustenblei hinreichend genau:

STACEY und KRAMERS (1975) nehmen eine erste Phase der Pb-Isotopenentwicklung in einem Mantel mit relativ niedrigem U/Pb- und Th/Pb-Verhältnis an. Ab ca. 3,7 Milliarden Jahren setzte sich dann aber die Entwicklung vor allem in kontinentaler Kruste fort mit einem höheren U/Pb- und Th/Pb-Verhältnis.

CUMMING und RICHARDS (1975) nehmen eine kontinuierliche Anreicherung von U und Th aus dem Mantel in der Kruste an.

Beide Entwicklungsmodelle liefern in der Regel für schichtgebundene vulkanogen-sedimentäre Lagerstätten mit anderen Methoden der Altersbestimmung konkordante Modellalter.

DOE und ZARTMAN (1979) stellten ein Pb-Isotopen-Entwicklungsmodell auf für bezüglich der U/Pb- und Th/Pb-Verhältnisse unterschiedliche geotektonische

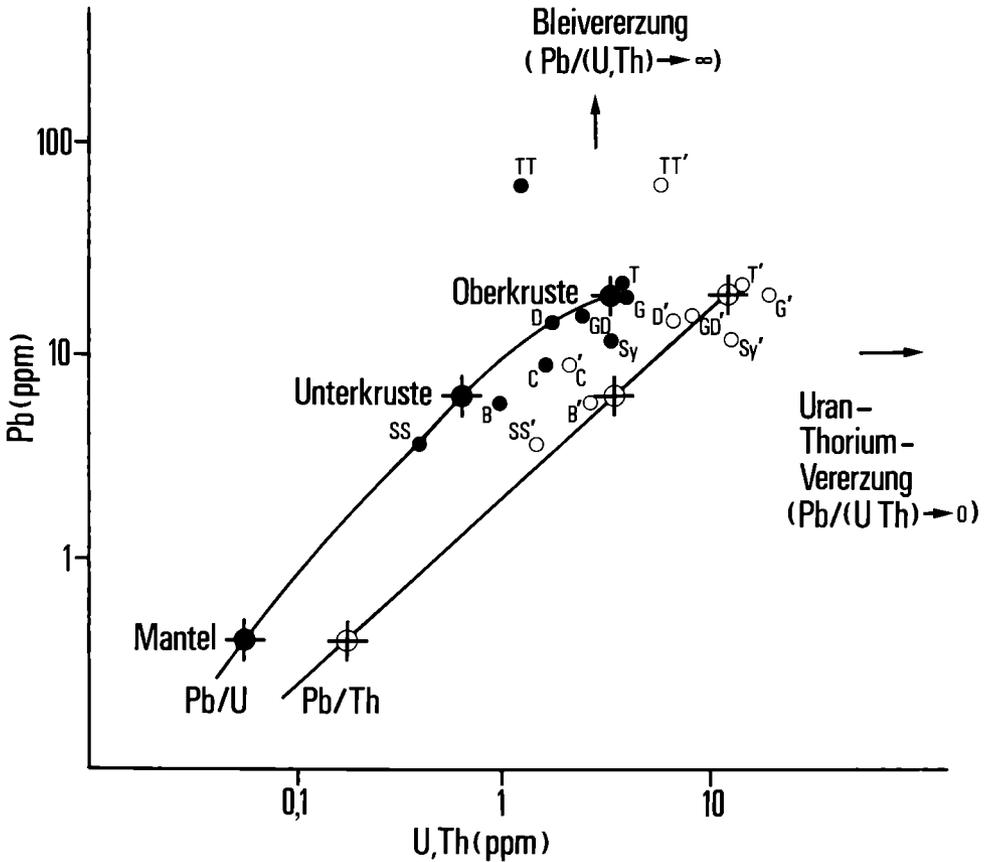


Abb. 1. Variationsdiagramm U und Th gegen Pb. Daten für Mantel, Unter- und Oberkruste (DOE und ZARTMAN, 1979), übrige Daten TUREKIAN und WEDEPOHL, 1961. Durchschnittsgehalte für U: Granite (G), Granitoide (GD), Diorite und Andesite (D), Syenite (Sy), Basalte (B), Tongesteine (T), Tiefseetone (TT), Karbonatgesteine (C) und Sandsteine (SS). Durchschnittsgehalte für Th analog: G', GD', D' ... SS'. Man beachte das Defizit an U in der Unterkruste (Granulitfazies) und Sandsteine, während das Pb/U-Verhältnis eine Regressionsgerade aufweist.

Einheiten, nämlich für kontinentale Oberkruste (hohe U/Pb- und Th/Pb-Verhältnisse), kontinentale Unterkruste in Granulitfazies (Th/Pb-Verhältnisse werden in der Granulitfazies wenig verändert und bleiben relativ hoch, falls die granulitfaziellen Gesteine vorher Oberkrustengesteine gewesen sind. Niedrige U/Pb-Verhältnisse), Mantel (niedrige Th/Pb- und U/Pb-Verhältnisse) und Orogenzonen, wo sich durch Mischungsprozesse kurzfristig Pb-Isotopenverhältnisse einstellen, welche durchschnittlichem Krustenblei entsprechen.

Ausführliche Darstellungen der Pb-Isotopengeochemie finden sich in DOE (1970), KÖPPEL und SAAGER (1976), KÖPPEL und GRÜNENFELDER (1979), DOE und ZARTMAN (1979), ZARTMAN und DOE (1981).

Aus den Pb-Isotopenverhältnissen lassen sich folgende Größen bestimmen: die $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - und $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Modellalter und die zeitintegrierten U/Pb- und Th/Pb-Verhältnisse. Aus diesen Parametern lassen sich Rückschlüsse auf die Entwicklungsgeschichte und damit auf die Herkunft des Bleis ableiten.

Im Falle von Remobilisierungsprozessen ist zu erwarten, daß sich neben Erzblei auch Blei aus Feldspäten und anderen Mineralien mit unterschiedlichem U/Pb und Th/Pb mobilisiert und mischt. Das zu betrachtende geochemische Milieu kann vom Durchschnitt erheblich abweichen. Es kann ein Bleiüberschuß bestehen: $\text{Pb} \gg (\text{U}, \text{Th})$ und die Elementverhältnisse Pb/U und $\text{Pb}/\text{Th} \rightarrow \infty$ werden. Dies kann dazu führen, daß überhaupt kein meßbarer Zuwachs an radiogenem Blei feststellbar ist. Dagegen kann bei Überschuß an U und Th (Pb/U , Th/Pb) und bei bevorzugter Mobilisierbarkeit des radiogenen Bleis schon in relativ kurzen Zeiten ein vorwiegend aus radiogenem Blei bestehendes Mischblei gebildet werden. Die bevorzugte Mobilisierbarkeit von radiogenem Pb beruht einerseits auf der oft leichten Löslichkeit von U- und Th-haltigen Mineralphasen und andererseits auf dem Auftreten von U und Th im Intergranularbereich.

3. Beispiele für remobilisiertes Erzblei

In der Folge werden einige Beispiele aus der Literatur und unveröffentlichtem Datenmaterial von Bleiisotopenuntersuchungen in den Süd- und Ostalpen gebracht.

3.1. Endogene Remobilisation

Magmatogen-bedingte Remobilisationen größeren Ausmaßes sollten aufgrund der Homogenisierung bei anatektischen Prozessen wieder zu einem gewöhnlichen Blei führen. Die Untersuchungen von ZARTMAN (1974) zeigen, daß in den westlichen USA das Pb kretazischer bis tertiärer magmatischer Gesteine und mit ihnen assoziierte Lagerstätten Isotopenverhältnisse aufweist, welche regionale Unterschiede im Aufbau der Kruste widerspiegeln: Mittelproterozoische bis archaische Unterkruste dominiert im Osten, phanerozoische Oberkruste in einem mittleren Abschnitt und junge Kruste im Westen.

Skarnlagerstätten sind interessante Studienobjekte. So haben VINOGRADOV et al. (1959) vom seltenen Fall einer präkambrischen Bleivererzung in China berichtet, die durch eine Intrusion karbonen Alters mobilisiert worden sein soll. Das jüngere Blei soll noch ein dem präkambrischen Blei entsprechendes Modellalter aufgewiesen haben.

Die theoretischen Möglichkeiten bei Remobilisationen in hydrothermalen Ganglagerstätten reichen von einer unveränderten Bleiisotopenzusammensetzung im U-Th-armen Milieu, vor allem bei kurzem Zeitintervall, bis zu Überschüssen an radiogenem Blei im U-Th-reichen Milieu.

Das Auftreten normaler Bleie deutet eher auf magmatogen-hydrothermale Prozesse. In Freiberg/Erzgebirge (Sachsen) zeigt die ältere variszische kb (kiesigblendige) Formation ein variszisches Modellalter, die jüngere fba (fluor-barytische)

Formation jüngere Modellalter, die auch anomal sein können (PILOT und Mitarbeiter, 1970).

Als Beispiel für Remobilisation gilt der Thackaringa-Typ. Im weiteren Umkreis der polymetamorphen schichtgebundenen Pb-Zn-Cu-Lagerstätte von Broken Hill/N.S.W. (Australien) mit einem mittelproterozoischen Alter von rund 1800 Ma treten in den Metamorphiten des Willyama-Komplexes erzarme Ganglagerstätten auf, wie die Thackaringa-Mine, Umberumberka-Mine u. a. Die Gänge durchschlagen graphitische Chloritschiefer und enthalten im wesentlichen Quarz und Eisen-späte. Untergeordnet kommen Sulfide und Arsenide vor, wie Pyrit, Chalkopyrit, Bleiglanz mit geringen Ag-Gehalten, Zinkblende und Löllingit. Kurzzeitig wurden extrem Ag-reiche Oxidationszonen abgebaut, die Kerargyrit und Embolit geführt haben.

Die Bleiisotopenzusammensetzung von Broken Hill zeigt ein normales gewöhnliches Blei mit einem Modellalter von 1625 Ma; das Blei des Thackaringa-Typs ist anomal. Die Datenpunkte liegen auf einer Isochrone mit dem Pb vor Broken Hill als Ausgangspunkt. Demnach handelt es sich wahrscheinlich um eine Mischung von remobilisiertem Erzblei von Broken Hill und einer radiogenen Komponente, die sich im Zeitabschnitt zwischen ca. 1600 und 800 Millionen Jahren entwickelt hat. Vor 810 ± 22 Millionen Jahren entstanden die Erzvorkommen vom Thackaringa-Typ (REYNOLDS, 1971).

Auch die Schwefelisotopen, die zwar beim Thackaringa-Typ eine größere Streuung aufweisen, aber im Mittelwert mit den Erzen von Broken Hill übereinstimmen (BOTH und RUTLAND, 1976), deuten auf eine Remobilisation von Broken-Hill-Erz.

In den nordamerikanischen Kordillern zeigen jüngere silberreiche Bleierzgänge, z. B. im Cootenay Range, aber auch in schichtgebundenen Vererzungen, z. B. Metalline, anomales Blei. Der schichtige Erzkörper der Sullivan-Mine mit $12 \cdot 10^6$ t Pb enthält Blei mit präkambrischem Modellalter. Mit zunehmender Entfernung zum kordillernen Orogen wird das Blei radiogener (SHAY-LEE und FOLINSBEE, 1974). SINCLAIR (1960) meinte, daß dies eine Mischung von Blei des Typs Sullivan mit einer radiogenen Komponente wäre. Auch nach ZARTMAN (1974) entspricht das Modellalter des ältesten Bleis den lokalen präkambrischen Kristallinkomplexen.

Ein eindrucksvolles Beispiel der Bildung von Mischblei hat GRAESER (1969) gegeben. Die Bleierze aus dem Dolomit des Binnatales (Wallis) gehen im wesentlichen Stoffbestand auf schichtgebundene Vererzungen der Trias zurück. In den Bleiglanzen ist eine Korrelation zwischen den $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Verhältnissen und den Bi- bzw. Sb-Gehalten festzustellen. Die radiogene Bleikomponente, die mit den Bi-Konzentrationen zu korrelieren ist, wird metamorphogen von Gneisen abgeleitet, während die andere, mit Sb korrelierbare Bleikomponente der schichtgebundenen Triasvererzung zuzuordnen ist.

Bleiglanze aus dem Pennin der Ostalpen zeigen in der Bleiisotopenverteilung vier verschiedene Gruppierungen (vgl. Tab. 1 und Abb. 2).

a) „Altalpine Goldvererzung“ vom Typ Schellgaden: Sie weisen Modellalter von 150–300 Ma und μ_2 -Werte von 9,5 bis 9,7 auf.

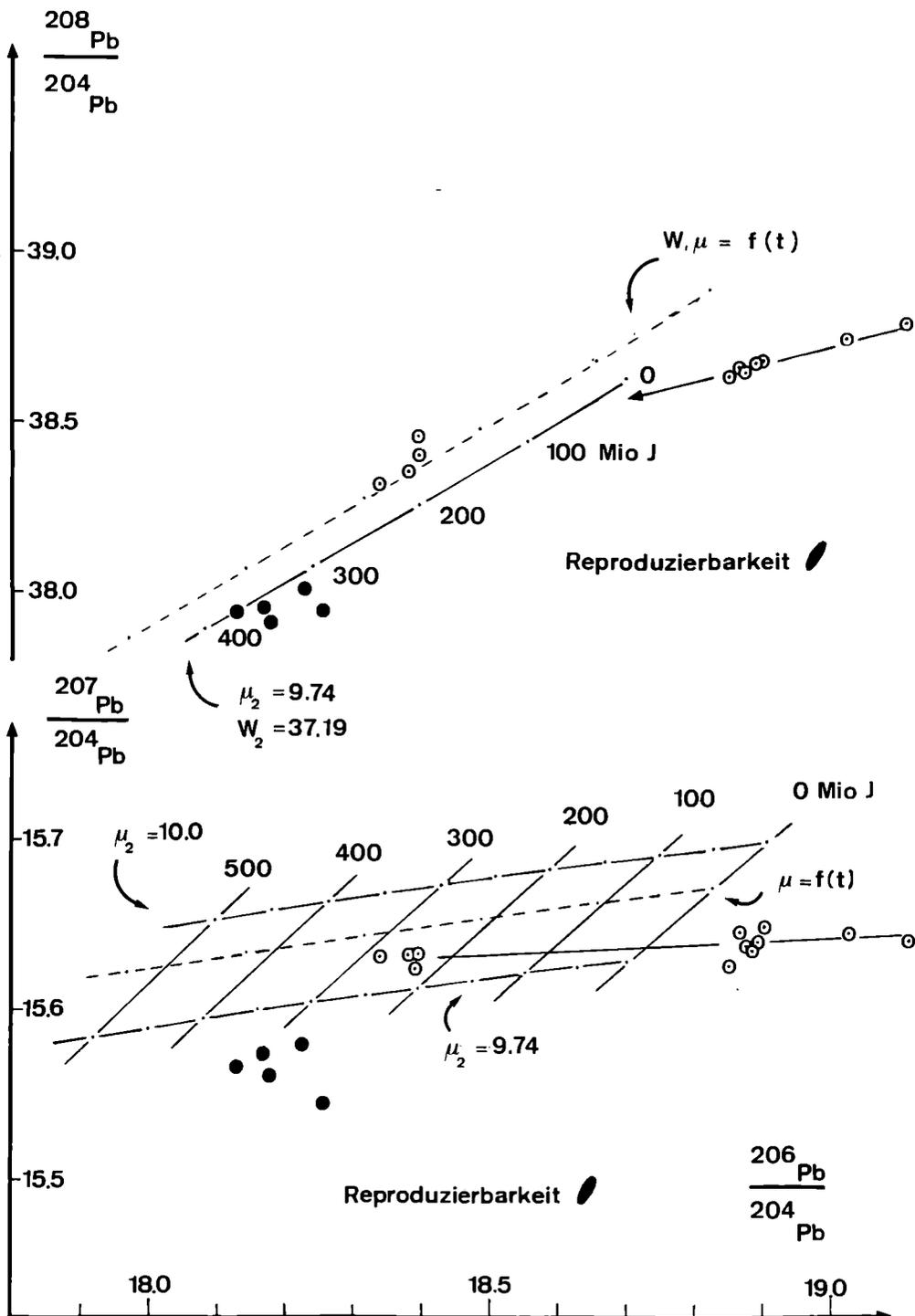


Abb. 2. Ausgefüllte Kreise: PbS-Datenpunkte von Vorkommen des Typs Schellgaden; offene Kreise PbS von gangförmigen Vorkommen der Hohen Tauern (vgl. Tab. 1). Die gestrichelten Wachstumskurven mit μ ($=^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) und W ($=^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$) als Funktion der Zeit (t) entsprechen dem Modell von CUMMING und RICHARDS (1975); die ausgezogenen Kurven mit $\mu_2 = 9,74$ und $W_2 = 37,19$ demjenigen von STACEY und KRAMERS (1975). Die innerhalb der Reproduzierbarkeit lineare Anordnung der Datenpunkte mit $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18,8$ in beiden Diagrammen weist auf eine Mischung eines radiogenen Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 9,1$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38,8$) mit einem normalen Pb hin ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} 18,3-18,4$ und $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} 38,3-38,5$).

- b) „Junge Goldquarzgänge der Hohen Tauern“, deren Modellalter mit 240–280 Ma etwa den Rb/Sr-Altern der Zentralgneise entsprechen. Die μ_2 -Werte von 9,7 bis 9,9 entsprechen dem Krustendurchschnitt.
- c) „Junge Goldquarzgänge der Hohen Tauern“ und die Ag-Pb-Zn-reichen Gangfortsetzungen in der Schieferhülle mit anomalem Blei (Modellalter –120 bis –160 Ma).
- d) Vererzungen aus der Schieferhülle im Bereich des Habachtales (Karalm) mit noch stärker anomalem Blei (Modellalter –545 Ma).

Die Bleie a) und b) sind präalpinen Vererzungen zuzuordnen. Die Bleie c) und d) verdanken ihren erhöhten Anteil von radiogenem Pb Prozessen der alpidischen Metamorphose. Man darf aus der Lage der Bleie der Gruppe b) in Diagrammen der Bleiisotope (Abb. 2) und vielleicht auch d) (Tab. 1) mit hoher Wahrscheinlichkeit schließen, daß eine Remobilisierung variszischer Vererzungen vorliegt.

Das vorliegende Ergebnis bestätigt die Vermutung der ersten Isotopenuntersuchung an Bleiglanzen der Goldvererzung der Hohen Tauern (GRÖGLER et al., 1961), daß auch präalpidische Modellalter nachweisbar sind und ein Hinweis auf eine ältere Anlage der Vererzung gegeben sein könnte.

Aus Abb. 2, die nur die Datenpunkte der Gruppen a), b) und c) enthält, ist ersichtlich, daß die Datenpunkte mit erhöhtem Anteil an radiogenem Pb in beiden Pb-Pb-Diagrammen eine lineare Anordnung zeigen, deren Extrapolation zu den Datenpunkten mit „normalem“ Pb führt. Daraus und an der geringen Steigung der Geraden im $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Diagramm, welche ein negatives $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -Isochronenalter ergäbe, ist zu schließen, daß die Geraden das Resultat einer Mischung von Erzblei und einem relativ hoch radiogenen Gesteinsblei darstellen. Solche Mischungen können schon primär entstehen. Da aber bis jetzt noch kein „normales“ Pb in Proben aus der alpidisch-metamorphisierten Schieferhülle gefunden wurde, ist der Schluß naheliegend, daß eine alte Vererzung während der alpinen Metamorphose remobilisiert wurde. In der Schwefelisotopenzusammensetzung sind zwischen den Gruppen b) und c) keine auffallenden Unterschiede zu vermerken. Die Bleiglanze sind vorzugsweise Bi- und Te-reich, wobei die Gruppe c) auch höhere Sb-Gehalte zeigt. Die gleichfalls Bi-reichen Bleiglanze aus der Gruppe d) sollten aus ihrer geologischen Position eher auf Vererzungen vom Typ Greinerrinne oder Achselalpe bezogen werden, die in ihrer Bleiisotopenzusammensetzung dem variszischen Bleityp entsprechen. Zwischen negativen Modellaltern und der remobilisierten Bleimenge scheint eine Beziehung zur Menge des in Erzen mineralisierten Bleis zu bestehen. Mit abnehmender Menge Bleierz wird das Modellalter radiogener.

Anomale Modellalter sind in den Ostalpen in jenen Vererzungen gefunden worden, die als alpidisch zu bezeichnen sind. Meist handelt es sich um so unbedeutende Erzmineralisationen, so daß die Annahme eines remobilisierten Erzbleis bisweilen überhaupt fraglich erscheint (siehe Tab. 1). Solche Bleie trifft man im Bereich des Pennin an, wie im metamorphen Mesozoikum der Matreier Zone an Uranmineralisationen gebunden mit einem extrem negativen Modellalter von –2090 Ma. Aber auch im Bereich des unterostalpinen Deckensystems des Semmerings im Myrthengraben (–480 Ma), in der oberostalpinen Grauwackenzone aus einer Kleinmineralisation in der Graphitlagerstätte Kaisersberg/Steiermark (–150 Ma) und in

Tabelle 1. Bleiisotopenzusammensetzung von Galeniten aus dem Penninikum und Ostalpin der Ostalpen

Fundort	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	t_2 (Mio. J.)	μ_2
a) Schellgaden	18,128	15,567	37,946	305	9,61
Oberdorf, Katschberg	18,225	15,580	38,013	260	9,65
Radlgraben (1)	18,168	15,575	37,960	295	9,63
Radlgraben (2)	18,178	15,562	37,918	260	9,57
Zaneischg	18,262	15,545	37,934	155	9,48
Zaneischg	18,255	15,546	37,949	165	9,48
b) Radhausberg, Unterbaustollen					
Lager Wiesgen	18,394	15,624	38,405	225	9,79
Badgastein, Paselstollen	18,395	15,633	38,467	240	9,83
Badgastein, Hotel Europa	18,383	15,633	38,361	250	9,84
Wurtental	18,339	15,632	38,325	280	9,84
c) Badgastein, Radhausberg (1)	19,025	15,645	38,749	-210	9,75
Badgastein, Radhausberg (2)	19,113	15,641	38,792	-290	9,73
Silberpfennig	18,884	15,636	38,674	-120	9,74
Pochartsee Naßfeld (1)	18,893	15,640	38,679	-120	9,75
Pochartsee Angertal (1)	18,867	15,646	38,664	-85	9,79
Pochartsee Angertal (2)	18,853	15,626	38,638	-120	9,70
Pochartsee Naßfeld (2)	18,876	15,638	38,652	-110	9,75
Goldzeche Frauenstollen	18,901	15,649	38,678	-105	9,79
d) Karalm, Habachtal	19,443	15,643	38,442	-545	9,69
Matrei, Osttirol	21,979	15,842	39,044	-2090	10,29
Obernberg, Brenner	18,810	15,676	38,645	15	9,93
Myrthengraben, Semmering	19,480	15,681	38,602	-480	9,84
Kaisersberg, ob. Leoben (Graphitbergbau)	19,106	15,699	38,912	-150	9,96
Mitterberg, Mühlbach	20,071	15,793	42,078	-665	10,22

Die Isotopenverhältnisse sind korrigiert für Fraktionierung aufgrund der Messungen des „NBS common lead standards SRM 981“. Der statistische Fehler der Messungen ist in jedem Fall kleiner als 0,1%. Die Reproduzierbarkeit der $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - und $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Verhältnisse liegt innerhalb 0,1% und jene des $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Verhältnisses innerhalb 0,2%.
 $t_2 = (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}\text{-Modellalter})$ und $\mu_2 = (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$, gerechnet nach dem Modell von STACEY und KRAMERS (1975).

den Kupfererzgängen weisen in Mitterberg konkordante Pechblende-Alter von 90 ± 5 Ma auf eine Remobilisation der Uranvererzungen im Permo-Karbon hin (PAAR und KÖPPEL, 1978), wobei offensichtlich radiogenes Blei freigesetzt wurde, das heute im Bleiglanz mit einem Modellalter von -665 Ma gebunden vorliegt.

Ein Modellalter nahe Null ($15 \pm$ Ma) wurde für Blei aus der metamorphen Tribulauntrias aus dem Erzvorkommen von Obernberg am Brenner gefunden. Im Fall einer Remobilisierung einer triassischen schichtgebundenen Vererzung, was allerdings noch nicht eindeutig bewiesen ist, müßte die Aufnahme von radiogenem Blei angenommen werden. Die Vererzung von Obernberg am Brenner ist sicher eine höherthermale Bildung (>200 °C).

Die Bleiglanze mit anomalen Bleien aus dem Pennin, des Unter- und Oberostalpins sind durch Spurenelementgehalte an Se oder Bi und Te gekennzeichnet.

Die Ergebnisse von möglichen Remobilisationen im Penninikum dieser ersten Untersuchungen rechtfertigen eine Fortsetzung, wobei insbesondere auch vermehrt Gesteinsblei zu berücksichtigen sein wird.

3.2. Exogene Remobilisation

Wie man heute weiß, sind große Urankonzentrationen des Präkambriums auf mehrfache Remobilisation zurückzuführen, wobei magmatogene, sedimentogene und metamorphogene Prozesse wirksam geworden sind (DAHLKAMP, 1979).

Es ist nicht abwegig zu überlegen, ob und wie beim Blei (und Zink), wenn auch in anderer Form, über den sedimentären Zyklus bedeutende Lagerstätten entstehen könnten.

Die schichtgebundenen Knottenerzvorkommen vom Typ Mechernich, im Hauptbuntsandstein am Nordrand der Eifel einschließlich des Maubacher Erzberges, führen in erzführenden Konglomeraten Gangquarzgerölle mit ausgelaugten Hohlräumen, die ursprünglich Sulfide und karbonatische Gangart enthielten. Die Bleianreicherung im Hauptbuntsandstein wird von erodierten Erzgängen der Eifel abgeleitet. Die Bleiisotopenuntersuchungen widersprechen nicht der Identität der Bleie, soweit dies mit der damaligen Meßmethodik ausgesagt werden kann. (EHRENBERG und MÜRTZ, 1955). Dieses bekannte Beispiel zeigt, daß der Verwitterung von Pb-Zn-Lagerstätten eine größere Bedeutung zukommen kann. Der Metallinhalt des Buntsandsteines liegt in der Größenordnung von 10^6 t.

An verkarstete Karbonatgesteinsoberflächen sind zur Zeit stratigraphischer Hiats verschiedene Lagerstättentypen, darunter auch Pb-führend polymetallische Sulfidminerale, gebunden. Sie werden meist als Bildungen des Verwitterungskreislaufes erklärt. In den Ost- und Südalpen sind derartige Erzmineralisationen an der Grenze Devon/Karbon der Karnischen Alpen und Karawanken bekannt (ASSERETO und Mitarbeiter, 1976).

Eine Überschlagrechnung ergibt auch, daß 1 km^3 Granit mit 20 ppm Blei 54.000 t silikatisch gebundenes Blei enthält. Eine Lagerstätte in der Größenordnung von 10^5 t oder 10^6 t Blei könnte bei ihrem Abtrag und der sedimentären Genese eines Mischbleis ins Gewicht fallen.

Alle PbS-führenden Vererzungen in den Ost- und Südalpen sind seit dem Altpaläozoikum bis in die Trias hinein durch Erzblei gekennzeichnet, das bei einem hohen μ_2 -Wert von 10,0–10,2 Modellalter aufweist, die 100 bis 250 Ma im Vergleich zum stratigraphischen Alter zu hoch erscheinen (KÖPPEL, im Druck). Nach bisher noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen der Bleiisotope in Massengesteinen und Feldspäten wurde ein Blei mit vergleichbar hohen μ_2 -Werten in Feldspäten an postmetamorphen Magnetiten der Südalpen und aus Metasedimenten des Altkristallins der Südalpen gefunden. Möglicherweise haben die gleichen „source beds“ zu verschiedenen Zeiten Metalle geliefert. Denkbar ist aber auch die Hypothese, daß altpaläozoisches Erzblei bei der Bildung gewisser schichtgebundener Vererzungen in Karbonatgesteinsabfolgen, wie im permischen Bellerophonkalk oder später in der kalkalpinen Trias, im Anis und Ladin/Karn, eine Rolle gespielt haben könnte. Die gleichen „source beds“ zu verschiedenen Zeiten Metalle geliefert haben. Zum Beispiel enthält eine schichtgebundene altpaläozoische Lagerstätte in den Karawanken (Koprein) ein Pb, das isotonmäßig fast übereinstimmt mit der synsedimentären Lagerstätte im Muschelkalk (Topla). STRUČL (1974) hat für die Herkunft der Metalle für die Lagerstätte Topla Erosionsprodukte älterer Lagerstätten nicht ausgeschlossen.

Die Bildung von Mischblei sehr homogener Zusammensetzung wie in der Trias der Süd- und Ostalpen wäre über die Tonkomponente durchaus vorstellbar. Dafür würde auch sprechen, daß vom Anis zum Ladin/Karn eine Tendenz zu einem höheren Homogenisierungsgrad der Bleiisotope festzustellen ist. Damit parallel geht auch die Tendenz zum Auftreten größerer Metallanreicherungen. Wenn auch die Hypothese eine detailliertere Ausarbeitung und Fundierung benötigt, so sollte man doch die Möglichkeit der Wirksamkeit exogener Prozesse bei Remobilisationen nicht ausschließen, die flächen- und lineamentmäßig wirksam sind.

Als Unterstützung dieser Hypothese ließe sich abschließend anführen, daß in den Westalpen sowohl altpaläozoische bleiführende Vererzungen als auch nennenswerte Pb-Zn-Vererzung im Mesozoikum praktisch fehlen.

Danksagung

Für die Überlassung von zusätzlichem Probenmaterial danken wir vor allem Herrn Prof. Dr. O. SCHULZ (Univ. Innsbruck), ferner Herrn Dr. G. NIEDERMAYR (Naturhistorisches Museum, Wien), Doz. Dr. O. ERKAN (Montanuniversität Leoben), Herrn Bergdir. i. R. Dr. H. SPATZEK (Kaisersberg), Herrn Dr. TISCHLER (dzt. Transkei) und Herrn G. REDEN (Wien).

Literatur

- ASSERETO, R., BRIGO, L., BRUSCA, C., OMENETTO, P., ZUFFARDI, P. (1976): Italian ore mineral deposits related to emersion surfaces—a summary. — *Mineral. Deposita*, *11*, 170–179.
- BOTH, R. A., RUTLAND, R. W. R. (1976): The problem of identifying and interpreting stratiform ore bodies in highly metamorphosed terrains: The Broken Hill example. *In*: WOLF, K. H. (ed.), *Handbook of strata-bound and stratiform deposits*, Vol. 4, 261–326. — Elsevier Sci. Publ. Co. Amsterdam-Oxford-New York.

- CUMMING, G. L., RICHARDS, J. R. (1975): Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth. — *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 28, 155–171.
- DAHLKAMP, F. J. (1979): Die zeit- und schichtgebundene Lagerstättenbildung des Urans in der Erdgeschichte. — *Gesellschaft Deutscher Metallhütten- u. Bergleute*, 79–100 (Clausthal-Zellerfeld).
- DOE, B. R. (1960): Lead isotopes. — Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- DOE, B. R., ZARTMAN, R. E. (1979): Plumbotectonics, The Phanerozoic. *In*: BARNES, H. L. (ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd edition. — J. Wiley & Sons, New York, 22–70.
- EHRENBERG, H. R., MÜRTZ, H. H. (1955): Massenspektrochemische Untersuchungen an Bleiglanzen. *Forschungsberichte des Landes Westfalen (Köln)* 969, 1–31
- GRAESER, S. (1969): Minor elements in sphalerites and galena from Binnatal. — *Contr. Min. Petrol.*, 24, 156.
- GRÖGLER, N., GRÜNENFELDER, H., SCHROLL, E. (1961): Isotopenmessungen in Bleiglanzen aus den Ostalpen. — *Anz. d. Österr. Akad. d. Wiss., mathem.-naturw. Kl.*, 106–111.
- KÖPPEL, V., GRÜNENFELDER, M. (1979): Isotope geochemistry of lead. *In*: JÄGER, E., HUNZIKER, J. C. (eds.), *Lectures in isotope geology*. — Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 134–153.
- KÖPPEL, V. (in press): Summary of lead isotope data from ore deposits of the Eastern and Southern Alps: Some metallogenic and geotectonic implication.
- KÖPPEL, V., SAAGER, R. (1976): Uranium-, Thorium- and lead-isotope studies of strata-bound ores. *In*: WOLF, K. H. (ed.), *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, Vol. 2. — Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam-Oxford-New York, 267–316.
- MÖLLER, P., DULSKI, P., SCHLEY, F., LUCK, J., & SZACKI, W. (1981): A new way of interpreting trace element concentrations with respect to modes of mineral formation. — *Journal of Geochem. Exploration*, 15, 271–284.
- PAAR, W., KÖPPEL, V. (1978): Die Uranknollen-Paragenese von Mitterberg (Salzburg, Österreich). — *N. Jb. Miner. Abh.*, 131/3, 254–271.
- PILOT, J., LEGIERSKI, J., RÖSLER, H. J. (1970): Pb- und S-Isotopenuntersuchungen an Erzberger und anderen Erzlagerstätten. — *Geologie (Berlin)*, 19/1, 41–55.
- REYNOLDS, P. H. (1971): A U-Th-Pb-study of rocks and ores from Broken Hill, Australia. — *Earth Plan. Sci. Letters*, 12, 215–223.
- RUSSEL, R. D., FARQUAR, R. M. (1960): Lead isotopes in geology. — *Interscience Publ.* New York-London.
- ROUTHIER, P. (1969): Sur trois principes généraux de la métallogénie et de la recherche minérale. — *Mineral. Deposita (Berlin)*, 4, 213–218.
- SCHROLL, E. (1976): *Analytische Geochemie. Band II – Grundlagen und Anwendungen.* — Ferdinand-Enke-Verlag, Stuttgart.
- SHAY-LEE KUO, FOLINSBEE, R. L. (1974): Isotope geology of mineral deposits spatially related to the Tintia Trench, Yukon Territory. — *Econ. Geol.*, 69/6, 806–813.
- SINCLAIR, A. J. (1960): Anomalous leads from Kootenay Arc, B. C. *In*: *Tectonic history and mineral deposits of the Western Cordillera. Canad. Inst. Mining Met., Special Vol. 8*
- STACEY, J. S., KRAMERS, J. D. (1975): Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. — *Earth Plan. Sci. Lett.*, 26, 207–221.
- STRUČL, I. (1974): Die Entstehungsbedingungen der Karbonatgesteine und Blei-Zink-Vererzungen in den Anissschichten von Topla. — *Geologija Ražpravne in Poričila (Ljubljana)*.
- TUREKIAN, K. K., WEDEPOHL, K. H. (1961): Distribution of the elements in some mayor units of the Earth's crust. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 72, 172–202.
- VINOGRADOV, A. D., TUGARINOV, A. I., ZHIROVA, A. V., SYKOV, S., KNORRE, K.,

- LEBEDEV, V. (1959): Über das Alter der Granite und Erzvorkommen in Sachsen. — Freiburger Forschungshefte, 73.
- VOKES, F. M. (1971): Some aspects of the regional metamorphic mobilization of preexisting sulphide deposits. — Mineral. Deposita (Berlin), 6, 122–129.
- WEDEPOHL, K. H. (1974): Basic geochemical data of Zn, Pb and Cu and hydrothermal ore genesis. — Schriftenreihe d. Erdwiss. Komm. d. Österr. Akad. Wiss., Band 1, 160–173.
- WEDEPOHL, K. H. (1974): Blei C-O. In: WEDEPOHL, K. H. (ed.), Handbook of geochemistry. — Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- ZARTMAN, R. E. (1974): Lead isotopic provinces in the Cordillera of the Western United States and their geological significance. — Econ. Geol., 69/6, 792–805.
- ZARTMAN, R. E., DOE, B. R. (1981): Plumbotectonics—the model. — Tectonophysics, 75, 135–162.