

Geochemie erzführender Provinzen in phanerozoischen Plattformen

Kingsley *Dunham**

Zusammenfassung

Einige Merkmale metallführender Provinzen, wie sie von W. E. *Petrascheck* (1965) unter der Bezeichnung „stabile Tafeln“ und „Bedeckung der starren Tafeln“ beschrieben wurden, werden untersucht. Typisch für die Ausbildung dieser Provinzen sind sedimentäre Abfolgen bis 3500 m mächtig. Sie liegen diskordant auf altem, stark gestörtem Grundgebirge. Bruchtektonik kann, muß aber nicht eine Rolle spielen. Eine einfache Folge von Elementen erreicht wirtschaftliche Konzentrationen in dieser Art von Vorkommen, besonders Cu, Zn, Pb, U, Ba, F. Diese Vorkommen sind vielleicht mit Permeabilitätskanälen, wie sie z. B. in Sandsteingrundwasserleitern oder verkarsteten Kalken zur Verfügung standen, oder mit regionalen Spaltensystemen in Beziehung zu setzen. Die Geochemie der auftretenden Elemente ist viel einfacher als die der Orogene oder der präkambrischen kratonischen Provinzen. Die Ablagerung von Sedimenten in epikontinentalen Meeren, die die Plattformen überfluteten, enthalten einige wirtschaftliche Vorkommen, besonders Fe und Cu.

Abstract

„Geochemistry of Metalliferous Provinces in Phanerozoic Platforms“

Some features of metalliferous provinces grouped by W. E. *Petrascheck* under the titles „Stabile Tafeln“ and „Bedeckung der Starren Tafeln“ (1965) are examined. The typical geological setting is in a sedimentary sequence up to 3500 m. thick, no more than gently folded, unconformably overlying highly distorted ancient basement rocks. Block faulting may or may not be important. A simple

* Ausländisches korrespondierendes Mitglied der Osterreichischen Akademie der Wissenschaften, Sir Kingsley *Dunham*, Prof. Dr., Institute of Geological Sciences, Exhibition Road, South Kensington, London SW 7/2 DE, Great Britain.

suite of elements reaches economic concentrations in this setting, notably Cu, Zn, Pb, U, Ba, F; these may be related to permeability channels provided for example by sandstone aquifers or karst features in limestone; or to regional fissure systems. The geochemical assemblage of associated elements is noticeably simpler than in the mobile belt, or Pre-Cambrian cratonic provinces. Sediment deposition in the epicontinental seas which spread over the platforms included some economic concentrations, notably of Fe and Cu.

Metallogenetische Provinzen und globale Tektonik

Professor *Petrascheck* diskutierte in seinem Vortrag 1964 vor der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin und in seiner anregenden Veröffentlichung (1965) über metallogenetische Provinzen unter anderem die Eigenschaften erhaltiger Regionen, die in drei größeren, kontrastierenden, megatektonischen Einheiten auftreten: 1. in Orogenen, 2. in metamorphen Schilden, 3. in Plattformen, in denen Grundgebirge von kaum gestörten Sedimenten überlagert wird. Kontinente werden hier als eine Kombination, aufgebaut aus diesen drei Einheiten, betrachtet. Folgt man dem Konzept der Kontinentalverschiebung, das im letzten Jahrzehnt stark in den Vordergrund getreten ist, so liegen rezente Orogene anerkannterweise an Kontinentalrändern, wo ozeanische Kruste unter den Kontinent abtaucht oder eine kontinentale Platte eine andere überfährt. Obwohl tiefe, lang ausgezogene Tröge, die große Sedimentmächtigkeiten erreichen können (gemeint sind Geosynklinalen im Sinne *Dana-Hall*), oftmals an Kontinentalränder gebunden sind, hat man nun erkannt, daß Orogenesen nicht allein an geosynklinale Tröge gebunden sind. Es ist klar, daß mobile Zonen und Orogene in ihrer aktiven Zeit Gebiete höchst intensiver physikochemischer Prozesse in der Kruste sind, was sich in intensiver Faltung und Metamorphose der Gesteine ausdrückt und von magmatischen Intrusionen und Extrusionen begleitet wird. *Petrascheck* weist darauf hin, daß die begleitenden metallogenetischen Provinzen wie die Orogengürtel lineare Erstreckung zu haben scheinen. Viele Autoren haben kürzlich darauf aufmerksam gemacht, wie wichtig der aktive Kontinentalrand in Beziehung zur Mineralisation ist (z. B. *Guild* 1971, *Mitchell & Garson* 1972, *Sillitoe* 1972, *Dunham* 1973).

Die metamorphen Schilde wurden weitgehend, wie viele annehmen, durch eine Aufeinanderfolge früherer Orogenesen gebildet, als deren Ergebnis metamorphisierte, granitisierte und intrudierte Gesteine zusammengeschweißt wurden und so die Basis der stabilen Plattformen bildeten. Die Entwicklung dieser Plattformen beinhaltet ebenfalls das Konzept tiefer Abtragung, die zur Peneplainisierung aufgrund mariner oder fluviatiler Einwirkung führte. Doch nicht alle präkambrischen Gebiete der Erdkruste unterlagen diesen Bedingungen. Sie formen heute große Gebiete mit niedrigem Relief wie z. B. in N-Kanada, Karelien und Sibirien, oder Hochplateaus wie in Afrika. Metallogenetische Provinzen in diesen Schilden haben normalerweise, wie *Petrascheck* ausführte, sehr unregelmäßige

Grenzen und sind sehr stark von den jeweiligen geologischen Gegebenheiten abhängig.

Zu verschiedenen Zeiten im Präkambrium und besonders im Proterozoikum erhielten die eingeebneten kristallinen Gesteine eine Sedimentbedeckung, die stellenweise kaum gestört ist. Das war im wesentlichen noch mehr der Fall im Phanerozoikum, als Gebiete, die sich mindestens über die Hälfte der Kontinente erstrecken, von epikontinentalen Meeren überflutet und mit Sedimenten bedeckt wurden, die, obwohl hauptsächlich im Flachwasserbereich abgelagert, Mächtigkeiten von 3000 m und mehr erreichten, wo die Absenkung entsprechend war. Professor *Petrascheck* sowie vor ihm *Blondel* (1937) lenkten unsere Aufmerksamkeit auf die *Bedeckung der starren Tafeln*. *Blondel* hob als erster die weitverbreitete aber relativ einfache Art der Mineralisation solcher Gebiete hervor; und *Petrascheck* bemerkte, daß die metallogenetischen Provinzen in dieser Art von Ausbildung, allgemein gesprochen, lateral extensiv sind, ganz im Gegensatz zur linearen Ausbildung in den Orogenen.

Mir scheint, daß einige Gefahr darin liegt, daß man vom metallogenetischen Gesichtspunkt dem mobilen oder orogenen Typ der Mineralprovinzen oder ihren metamorphisierten Äquivalenten in den alten Schilden zu große Bedeutung beimißt im Vergleich zu denen in bedeckten Plattformen. Niemand bezweifelt natürlich die große Bedeutung der aktiven Kontinentalränder in der Metallogeneese; hier findet man die weitest verbreiteten und höchst komplizierten Lagerstätten der Grundmetalle und einiger wertvoller Metalle und im besonderen die der Porphyrkupfererze. *Kelly & Turneure's* Beschreibung (1970) der Mineralisation der östlichen bolivianischen Anden gibt die Kompliziertheit im mineralogischen Bereich recht gut wider. Die meisten der Lagerstätten stehen in mehr oder weniger enger Beziehung zu magmatischen Vorgängen. Größere Konzentrationen all der Elemente, die ich in meiner rezenten Klassifikation unter *Ferride* und *Agricolide* zusammengefaßt habe, sind zu finden. Zum anderen sind wertvolle Erzlagerstätten sicherlich nicht auf derzeitige oder ehemalige Orogene beschränkt; große Anteile der weltweiten Produktion an Blei, Zink, Uran, Fluor, Barium stammen von den bedeckten Plattformen, zum geringeren Teil Kupfer, Kobalt, Quecksilber und Vanadium. Ein kurzer jedoch unvollkommener Abriss der führenden Provinzen wird weiter unten gegeben, um diesen Punkt hervorzuheben. Spezielle genetische Probleme werden ebenfalls diskutiert.

Die phanerozoische Bedeckung der Plattformen

Die Deckgesteine können in sechs Kategorien unterteilt werden:

1. Karbonate marinen Ursprungs,
2. sandige Ablagerungen, teilweise oder überwiegend marinen Ursprungs; kontinentale Rotsedimente bilden hier die wichtigste Fazies,
3. „coal measures“, gewöhnlich mit zahlreichen alternierenden Lagen sandiger toniger Schichten, die Kohlen und Eisenstein enthalten; diese Fazies ist eben-

falls weitgehend non-marine oder brackisch, kann aber u. U. mit Schelfablagerungen verzahnt sein,

4. überwiegend Schiefer, abgelagert unter euxinischen Bedingungen;
5. teilweise Evaporite und verwandte Ablagerungen in abgeschlossenen marinen Becken;
6. Plateau-Laven, überwiegend basaltischen Charakters.

Im Hinblick auf die erzführenden Provinzen sind Fazies 1. und 2. bei weitem wichtiger als alle anderen.

1. Bedeckte Plattformen mit überwiegend karbonatischen Ablagerungen finden sich in dem großen Dreieck, das das Innere des nordamerikanischen Kontinentes bildet. Schwach geneigte oder horizontal gelagerte Dolomite und Kalke vom Kambrium bis Perm bedecken die Fortsetzung des kanadischen Schildes nach Süden. Diese Karbonate sind sicherlich nicht einheitlich mineralisiert. Aber *Heyl* (1967) bemerkt, daß Erzlagerstätten in fast allen paläozoischen Sedimenten auftreten, falls sie nicht erodiert wurden. Es sind jedoch viele Lücken zwischen den zahlreichen Erzdistrikten vorhanden. Alle Haupterzbezirke sind auf Karbonate beschränkt: der Bonnetterre-Dolomit (Kambrium) im alten und neuen Bleigürtel Missouri; mittelordovizische Kalke in Wisconsin; Kalke des Mississippian in der Tri State- und Illinois/Kentucky-Provinz; devonische Riffkalke in Pine Point, Kanada. Hinzuzufügen wären die ordovizische Kingsport Formation in Tennessee und der unterordovizische Kalk von Friedensville, wenn, wie viele glauben, die Erzvorkommen der Appalachen in Plattformkalken vor der Orogenese (*Hoagland*, 1971) gebildet wurden.

Die Form der Erzkörper wurde von *Callaban* (1967) zusammenfassend beschrieben. Er zeigte, daß sie a) in einer spezifisch sedimentären Fazies wie z. B. in Talus, auskeilenden Schichten, unterschiedlich kompaktierten Schichten und Riffen auftreten, die mit dem topographischen Relief der unterlagernden Diskordanz in Beziehung steht, b) in Lösungsbrekzien, die zu einer überlagernden Diskordanz in Beziehung stehen (möglicherweise Merkmale einer Verkarstung) und in den charakteristischen Wisconsin-Strukturen auftreten, die durch immer schwächer werdende Lösungen in bestimmten Horizonten gebildet wurden, und c) im Bereich von Fazieswechseln auftreten.

Bemerkenswerterweise sind die meisten Bezirke tektonisch unbeanspruchte bis auf einige Ausnahmen, beispielsweise in Illinois/Kentucky, wo Gänge auftreten.

Im großen und ganzen ist die strukturelle Beanspruchung der typischen bedeckten Plattformen im Vergleich zu den Orogenen oder den alten Schilden recht gering. Das Abtauchen in größere Tröge wurde schon erwähnt. Hinzuzufügen wären die gestörten Dome, von denen einige, wie der Ozark Dom, das unterlagernde präkambrische Grundgebirge aufgeschlossen zeigen. *Heyl* (1969) bemerkte, daß die größeren Mineralbezirke mit solchen Vorkommen in Verbindung stehen. Erst kürzlich (1972) untersuchte er die Lineamente im Grundgebirge, die in den überlagernden Gesteinen als ein Verbundsystem von Brüchen und kleineren Strukturen auftreten und über 1300 km in den Mittleren Westen hinein

verfolgt werden können. Der Pine Point-Bezirk in Kanada läßt sich ebenfalls mit einem Lineament in Verbindung bringen. Bruchtektonik ist eine strukturelle Eigenart der Plattformen.

In Nordwesteuropa sind die bedeckten Plattformen recht gut in Irland, Nordengland und Belgien zu sehen. Sie setzen sich wahrscheinlich nördlich der variszischen Gebirge in die deutsch-polnische Ebene fort, obwohl sie hier unter mächtigem Pleistozän und anderen nachpaläozoischen Formationen verborgen sind. Weiter im Süden liegen die Blei-Zink-Bezirke Oberschlesiens, die an Kalke des Muschelkalks (Mittlere Trias) gebunden sind und in schwach gefalteten Synklinen der Plattformbedeckung auftreten. Obwohl *Bilibin* (1960) sich sehr dafür einsetzte, die weit verbreitete Mineralisation Rußlands durch eine Abfolge von Orogenesen zu interpretieren, konnte doch *Dimitriyev* (1968) zeigen, daß die Merkmale bedeckter Plattformen über weite Gebiete östlich und westlich des Urals vorhanden sind.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Karbonate verschiedenen Alters, vom Kambrium bis zur Trias, die die wichtigsten lithologischen Einheiten der bedeckten Plattformen ausmachen, die Provinzen und Bezirke umfassen, die wichtig für Blei-, Zink-, Fluor-, Barium- und in geringerem Ausmaß für die Kupferproduktion sind. Das Auftreten der Erzvorkommen wurde durch Permeabilitätskanäle verschiedener Art kontrolliert, unter welchen Paläogrundwasserleiter (*Hoagland*, 1971) in Verbindung mit Karst sicherlich eine wichtige Rolle spielten. Andere Faktoren sind Klüfte, kleinere Brüche, brekziöse Zonen eines tektonisch bedingten Riffandes in Verbindung mit Lösungserscheinungen und Diskordanzen (z. B. zwischen Grundgebirge und Bedeckung).

2. Wenden wir uns nun der „*Rotbedeckung*“ zu, so geben die Formationen des Unterperm (Rotliegendes), des Buntsandstein und Keuper NW-Europas und der Trias und des Jura auf dem Colorado Plateau ein gutes Beispiel. Obwohl das Colorado Plateau von Elementen des Anden-Orogens umgeben ist, fällt es doch unter die Kategorie der bedeckten Plattformen, wie die allgemein schwach einfallenden, strukturell einförmigen roten Sandsteine andeuten. Dispers auskristallisierte Lagerstätten treten in triadischen Sandsteinen Deutschlands, besonders in Mechnich (Blei) und Commern (Kupfer) auf. Im kleineren Maßstab sind andere Vorkommen aus dem unterpermischen Rotliegendes bekannt geworden. Oberpermische Sandsteine enthalten große Kupfervorkommen, z. B. die vorsudetischen Erzkörper in Polen, die seit dem Krieg entdeckt wurden (*Oberc & Serkies* 1968), während weiter im Osten permische Sandsteine Erzkörper in Rußland enthalten. Die Alderley Edge-Vorkommen in England führen Kupfer, Vanadium und Uran in Keupersandsteinen. Baryt ist als Zement weitverbreitet in den Sandsteinen Cheshire's und Nottingham's. Um Elgin am Moray Firth in Schottland kommen große unregelmäßige Zonen mit Fluorit sowie etwas Bleiglanz hinzu.

Entsprechende Vorkommen in Rotsedimenten des Colorado Plateaus enthalten Kupfer, Vanadium, Molybdän und sogar etwas Silber und Gold (*Hess* 1933, *Finch* 1933). Besonders wichtig wurde die Gegend durch ihre Uranvorkommen. Die Be-

deutung der Vorkommen führte zur intensiveren geologischen Untersuchung, als deren Ergebnis zwei Haupttypen unterschieden werden konnten (Fischer 1970): a) die Wyoming Konkretionen, lang ausgezogene Körper, die vertikal ganz oder teilweise Sandsteinabfolgen durchdringen und wie Rollen entlang der Oxydationsgrenze in den Sandsteinen verteilt sind, und b) der fastkonkordante Coloradotyp, geringmächtige, flächenhafte, unstete Körper, die von reduzierten Gesteinen umgeben sind. Ähnliche Erzbezirke treten anscheinend in Rußland auf (Kashirtseva & Sidelnikowa 1971).

Strukturelle Einflüsse sind im allgemeinen sogar noch geringer in den Rotsedimenten als in den Karbonaten. Der Fluß der mineralisierenden Lösungen folgte in den meisten Fällen Permeabilitätskanälen, die wahrscheinlich während der Diagenese der Sandsteine nicht zementiert wurden. Bruchtektonik und Faltung hat, wie gezeigt werden kann, selten eine bedeutende Rolle gespielt. Die Beziehungen zwischen Bedeckung und Grundgebirge sind in den meisten Rotsedimentbezirken nicht bekannt genug.

3. Paralische Bedingungen, unter denen Kohlen entstehen, brachten geringe syngenetische Bildungen an Sulfiden, ich kenne aber keine wirtschaftlichen Vorkommen dieses Typs. Die zyklischen Ablagerungen des Obervisé und Namur (Karbon) im Norden Englands gleichen den „coal measures“, die Flöze sind aber zu dünn, um abgebaut zu werden. Zahlreiche Gänge mit Pb, Zn, F, Ba, treten in dieser Fazies auf, wobei einige die überlagernden „coal measures“ des Westfal durchschlagen. Einige Gänge wurden auch im Kohlenbezirk der Ruhr gefunden. Die gut entwickelten echt sedimentären Siderit- und Chamositvorkommen im Mesozoikum Europas gehören einer ähnlichen Fazies an.

4. Schiefer, die in flachen epikontinentalen Becken unter stagnierenden Bodenbedingungen abgelagert wurden, haben Metalle angereichert (Dunham, 1961), wirtschaftliche Vorkommen sind aber selten. Das interessanteste phanerozoische Beispiel ist der Kupferschiefer, der in NW-Europa weit verbreitet ist (Dunham, 1964). Uran ist in einigen schwarzen Schiefen wie dem schwedischen Kulm angereichert.

5. Evaporitische Bildungen in den Deckgesteinen phanerozoischer Plattformen enthalten keine Metallerzlager; sie sind aber wahrscheinlich bedeutsam als Quellen hypersaliner Minerallösungen, die auf andere Faziesbereiche einwirken. Davidson (1966) versuchte, das zu beweisen, aber es besteht keine geographische Verbindung zwischen nichteisenhaltiger oder eisenhaltiger Mineralisierung und den Evaporitbecken.

6. Plateau-Lavagebiete, wie die von NE-Sibirien, des Dekkan, von Antrim-Nord Skye, dem Karroo und Parana sind wichtige Hinweise auf bedeckte Plattformen. Metallogenetisch gesehen sind sie enttäuschend und enthalten selten phanerozoische Sulfidlagerstätten. In einigen Fällen wie in Insizwa erfolgte eine Differentiation der verbundenen intrusiven Decken, die massive Sulfidlagen bildeten; in anderen Fällen (z. B. in Sibirien, Ivanova, 1971) ist die Anreicherung von Kupfer erheblich aber noch nicht wirtschaftlich.

Die Deckenbasalte scheinen hauptsächlich aus Spalten ausgeflossen zu sein. Einige zentrale Vorkommen aber, wie der tertiäre Vulkanismus der Hebriden, sind anscheinend an inaktive Kontinentalränder gebunden. Von kleineren Plutonen, die mit ihnen auftreten, abgesehen, fehlen auffallenderweise tiefwurzelnde, größere Intrusionen in den phanerozoischen Plattformen. Das ist bemerkenswert im Falle der Erzprovinzen und -bezirke und fast ohne Ausnahme. Basische und einige ultrabasische Gänge kommen in wenigen Bezirken vor, es ist aber keine genetische Beziehung zum Erz zu erkennen. Das weit verbreitete System basischer Sills im nördlichen England ist sicher nicht die Quelle der hydrothermalen Lösungen in den Penninen (*Dunham*, 1949). Im Mittleren Westen der USA gibt es einige explosive Diatreme. Das Diatrem im Hicks Dome im Illinois/Kentucky-Bezirk könnte in kausaler Beziehung zur Fluoritmineralisation stehen. Aber die Seltenheit oder gar Abwesenheit solcher Merkmale im großen Blei-Zink-Bezirk läßt vermuten, daß ihnen geringe Bedeutung zukommt. Vielleicht kann dasselbe für die kleinen Alkali-Intrusionen entlang des Lineaments parallel zum 38. Breitengrad gesagt werden. In den bedeckten Plattformen wurden einige wenige Kimberlit- oder Karbonatitdurchschlagsröhren gefunden; einige durchschlagen Gesteine der Kreide in Afrika beispielsweise. Es gibt aber keinen Grund, sie mit der Bildung der Sulfiderze in Verbindung zu bringen. In einigen Karbonatbezirken wurden dünnen, bis sehr dünnen Tufflagen in den Nebengesteinen große Bedeutung beigemessen als Indikatoren einer Beziehung zum Vulkanismus, vielleicht in Verbindung mit vulkanischen Quellen. Solche Lagen scheinen oft weit vom Eruptionspunkt entfernt zu sein, und das Argument ist nicht sehr überzeugend. Was die Deckgesteine anbelangt, so werden ihre Erzvorkommen immer noch am besten von Lindgren beschrieben, der sie nicht in Beziehung zu einer magmatischen Aktivität setzt.

Nichtsdestotrotz müssen wir zugeben, daß wir keine Kenntnis von den Vorgängen im tieferen Teil der Kruste haben. Möglicherweise liegt die Fortsetzung der metamorphen Schilde unter den Deckgesteinen und bildet eine Art Fundament, das örtlich so reaktiviert wurde, daß eine Mineralisierung von außerhalb das einzig sichtbare Zeichen dieser Aktivität in einer alles umfassenden Bedekung zu sein scheint. Ein Versuch, dieses Problem mittels der Geophysik und Bohrungen in den nördlichen Penninen zu untersuchen, erbrachte eine Granitintrusion in der Mitte der zonaren Abfolge des Blei-Zink-Fluor-Barium-Bezirks (*Dunham & a1*, 1965). Der Granit ist allerdings älter als die karbonen Gesteine, die die Vorkommen enthalten. Es ist ebenfalls offenkundig, daß der Wärmefluß, gemessen am Inkohlungsgrad der Kohlen und an Flüssigkeitseinschlüssen epigenetischer Mineralien, stärker als normal ist und noch nicht erklärt werden kann. Es scheint sehr wahrscheinlich, daß in fast allen Erzprovinzen der phanerozoischen Plattformen die Erzausscheidungen bei Temperaturen erfolgte, die 50^o—150^o C über den in diesen geringen Tiefen normalerweise herrschenden lagen.

Die Vorkommen, die hier zur Diskussion stehen, fallen unter die telethermale Klasse einiger Autoren; nur wenige wären heute kühn genug, sie in der telemagnetischen Kategorie unterzubringen. Von der Mineralogie her sind sie recht einfach: Kupferkies, Pyrit, Markasit, Bleiglanz, Zinkblende, Fluorit, Baryt, Quarz, Kalzit, Ankerit (in Karbonaten); Uraninit, Coffinite, Vanadium-Glimmer, Pyrit, Kupfersulfide, Bleiglanz im Rotsedimenttyp. Die geochemischen Verbindungen sind etwas komplizierter: *Heyl's* (1967) Feststellung für den Mississippi-Typ, daß „Co und Ni vorhanden sind; Ag, As, Sb sporadisch auftreten; Au, Bi, W, Te, Sn, Mo selten sind; Kohlenwasserstoffe weit verbreitet sind“, würde ebensogut auf die NW-europäischen Vorkommen zutreffen, wobei Hg in die sporadische Kategorie hinzuzufügen wäre. *Galkiewicz* (1967) berichtet über Cd, Ag, Th, Ge, In, Mo, Hg, As, Sb, Bi, Ni, Mn als Spurenelemente in oberschlesischen Erzen, wobei Kohlenwasserstoffe selten oder gar nicht vorhanden sind.

In vielen, jedoch nicht allen Vorkommen in der Karbonatfazies ist das Bleiisotop im Bleiglanz vom anomalen J-Typ, von dem man annimmt, daß er von radioaktiven Desintegrationsprodukten kontaminiert wurde. Wenn das ein Bindeglied zum Rotsedimenttyp wäre, erscheint es doch seltsam, daß keine bedeutenden Uranvorkommen in der Karbonatfazies gefunden wurden. Es ist ebenfalls bemerkenswert, daß keine großen Zinkvorkommen in der sandigen Fazies auftreten. Wichtig ist, zuerst einmal herauszufinden, in welchem Ausmaß die Sedimentation während der Bedeckung der Plattformen die Entstehung von epizonalen Erzkörpern kontrollierte. Im Falle der oolithischen Eisensteine, die zu mehreren Malen im Phanerozoikum auftraten, gibt es keinen Zweifel, daß das Eisen durch chemische Sedimentation in abgeschlossenen Becken konzentriert wurde, die nur wenig klastisches Material empfangen. Das Eh-Potential war veränderlich, sodaß Chamosit, Siderit und Pyrit gebildet werden konnten, wo reduzierende Bedingungen vorherrschten, Goethit oder gar Magnetit, wo Oxydation vorherrschte. Sphalerit ist weit verbreitet, jedoch unwirtschaftlich in sideritischen Chamositoolithen in Yorkshire, England (*Dunham*, 1960); andere Metalle, Cu, Pb, Ni, Co eingeschlossen, sind angereichert. Ebenso klar ist, daß ein höherer Gehalt als der Clarke'sche an agricoliden Metallen in einigen Schiefen zu finden ist, wobei die Anreicherung während der Sedimentation von einer Umverteilung während der Diagenese gefolgt wurde, was wohl die beste Erklärung dafür sein dürfte. Viele Autoren (z. B. *Wedepohl*, 1969) glauben, daß Verwitterungslösungen aus exponierten Teilen der Kontinente eine ausreichende Quelle für diese angereicherten Metalle sind. Ich selbst bin überhaupt nicht davon überzeugt (*Dunham*, 1964), daß der Prozeß erreicht werden kann, ohne daß mineralisiertes Grundwasser daran beteiligt ist, das entweder in Form von Quellen aus dem Seeboden tritt (wie im Roten Meer heutzutage) oder durch Schiefer, die als Membranfilter für solche Grundwässer dienen, nach deren Bedeckung floß. Es wurde der Versuch unternommen, besonders von französischen und deutschen Lagerstättenkundlern

(*Niccolini*, 1970, S. 252), den Mississippi-Typ der Blei-Zink-Fluor-Barium-Vorkommen in der Karbonatfazies auf sedimentären Ursprung zurückzuführen. Ungeachtet der Manifestierung epigenetischer Merkmale, die eigentlich in jedem Vorkommen dieses Typs zu finden sind, hielt man daran fest, daß die Metalle mit den Sedimenten abgelagert wurden. Ich betrachte diese Erklärung als völlig unannehmbar, obwohl in einigen Fällen die Möglichkeit nicht verneint wird, daß Mineralquellen am Seeboden die Erzentstehung in der Karbonatfazies gefördert haben. In der großen Mehrzahl solcher Vorkommen wurde der Gehalt durch Permeabilitätskanäle von außen in das Gestein gebracht. Das Ausmaß echter Lateralsekretion — z. B. Konzentration verstreuter seltener Elemente in den Gesteinen — ist immer noch recht unklar.

Der größte Fortschritt in den letzten zwei Dekaden wurde in den Bereichen der Chemie, der Temperatur und dem Druck von Lösungen gemacht, die für die Konzentration verantwortlich sind. Die Untersuchungstechnik an Flüssigkeitseinschlüssen, zuerst vom englischen Petrographen *Sorby* 1855 angewandt, aber seither lange vernachlässigt, hat wieder durch *Ermakov* in Rußland, *Newhouse*, *Roedder* und andere in den USA an Bedeutung gewonnen. Bildungstemperaturen sind nun hinreichend bekannt und liegen im Bereich von 50°—150° C mit einigen Beispielen in der Karbonatfazies, die 200° C überschreiten, ungeachtet der geologischen Aussage, daß die Ablagerung in Tiefen von 1 km oder weniger stattfand. Gefrierexperimente weisen auf hohe Salinität hin, und die hervorragende Arbeit von *Hall & Friedman* (1963) an Illinois' Mineralien zeigt, daß die Minerallösungen aus hypersalinen Mineralquellen stammen, die sich gut mit Formationswässern vergleichen lassen, die gewöhnlich unterhalb 700 m in der Erdölexploration (*White* 1968; *Dunham* 1970) gefunden werden. Solche Wässer sind ausgezeichnete Löser für Metalle in Form von Chloridkomplexen.

Obwohl magmatische Aktivität zweifelsohne residuale hypersaline Mineralquellen hervorbringen kann, in denen fast alle löslichen Komponenten des Magma konzentriert sein können, und obwohl, wie *Holland* (1972) zeigte, Mineralquellen einen großen Anteil eines Metalls wie z. B. Zink aus einer magmatischen Abfolge extrahieren können, ist es doch nicht möglich, hydrothermale Lösungen, die von einem juvenilen Magma stammen, anzuführen, um die weit verbreiteten Erzprovinzen in phanerozoischen Plattformen zu erklären. Ein Beitrag von dieser Seite kann jedoch nach *White* (1968) nicht ganz ausgeschlossen werden, aber die Vermutung von *Heyl* (1967) und mir (1967), daß eine Anreicherung an K in Mineralquellen, gemessen an Flüssigkeitseinschlüssen, beweise, daß solche Beiträge stattgefunden haben, ist nicht vereinbar mit den Gesetzmäßigkeiten der physikalischen Chemie (*Helgeson* in einem Diskussionsbeitrag zu *Heyl* 1967). Auch die H/D-Verhältnisse tragen nicht zu einer Lösung des Problems bei. Der größere Teil der Wässer scheinen entweder connate (fossiles Meerwasser) oder atmosphärische Wässer zu sein, die eine extensive Membranfiltration bei erhöhten Temperaturen durchliefen oder eine Kombination von beiden sind.

Die genaue Herkunft der Metalle konnte bisher noch nicht demonstriert wer-

den, und mehr geochemische Forschung an sedimentären Systemen ist notwendig. Karbonate sind nicht von sich aus gute Sammler agricolider Elemente (siehe z. B. *Wedepohl* in *Lavery & Barnes* 1971), obwohl man vermutet hat, daß einige Korallen Zinkanreicherung begünstigen können. Schwarze Schiefer sind vielversprechender als intermediäre Quelle, nimmt man an, daß sie von zirkulierenden Mineralwässern ausgelaugt wurden; aber auch das ist immer noch fraglich. Sandsteine scheinen wegen ihrer großen Permeabilität vielversprechender zu sein. Vor kurzem führten *Doe & Delevaux* (1972) aufgrund ihrer Untersuchungen an der isotopischen Zusammensetzung von Blei an, daß der große Missouri Bleigürtel im Bonnetterre-Dolomit sein Blei von Mineralwässern bekommen haben könnte, die den unterlagernden Lamotte-Sandstein auslaugten. Weitere Versuche, Isotope als Spurensucher in dieser Art anzuwenden, wären sehr wünschenswert.

Schwefel wird nicht unbedingt von den gleichen Mineralwässern herangebracht, obwohl es der Fall sein könnte. *Gerdemann & Myers* (1972) behaupten, daß der Schwefel in SE-Missouri aus der Dekomposition von Algenriffen oder anderen organischen Sedimenten herstamme. *Skinner* (1967) nahm schon früher an, daß der Schwefel von organischem Material und Erdöl stamme, wobei heiße Mineralquellen in den Mississippi-Valley-Bezirk eindrangen.

White (z. B. 1968) führte wiederholt an, daß das Mischen von Mineralwässern verschiedenen Ursprungs eine bedeutende Rolle in der geochemischen Evolution der Provinzen spielte. Modelle, die auf dieser Grundlage basieren, um die Mineralisation der englischen Penninen zu erklären, wurden von *Sawkins* (1966) und *Solomon, Rafter & Dunham* (1972) vorgebracht, wobei letzterer sich auf Isotopen-daten stützte.

Man muß sich fragen, wie die Mineralwässer, seien sie connate oder atmosphärisch-gefiltert, aufgeheizt werden. Einige Autoren nehmen einfach nur Perioden höherer geothermaler Gradienten zur Hilfe, aber man kann sich das ohne magmatische Aktivität in der Tiefe kaum vorstellen. Die andere Möglichkeit wäre ein Absinken der Mineralwässer aufgrund ihrer Schwere zu einer Tiefe von zehn oder mehr Kilometern, bis sie durch Tektogenese zurückgetrieben werden; oder das Vorhandensein connater Wässer, die erst tief versenkt, und wenn Beanspruchungen auftreten, ausgetrieben werden.

Wenden wir uns abschließend den Uran-Vanadium-Kupfer und Blei-führenden Sandsteinen zu, so nahm man für die ersteren sauerstoffreiche Wässer als Medium an; das gilt für die Colorado Plateau Vorkommen, die frühere Autoren als sedimentär (*Warren* 1972) betrachtet hatten. Man kann die gleiche Erklärung nicht auf alle Sandsteine anwenden. Interessanterweise aber widersprach *Nuralin* (1964) den sedimentären Hypothesen *Strakhovs* (1960) und *Konstantimovs* (1963), daß die russischen Kupfersandsteine syngenetisch und sedimentär seien. Eine Konferenz über dieses Problem in Moskau 1965 fand diese Hypothesen ebenfalls unannehmbar. *Bezrodnyikh* (1971) führte aus, daß die Erzkonzentrationen im südlichen Teil der sibirischen Plattform postdiagenetisch entstanden.

Schlußfolgerungen

Die Erzprovinzen und -bezirke, die man charakteristischerweise in den phanerozoischen bedeckten Plattformen findet, sind mineralogisch einfach. Geochemisch beinhalten sie gewisse Elemente, die bemerkenswerterweise in nur geringen Konzentrationen auftreten, wie Cr, Sn, W, Ni (abgesehen von Plateaulaven), B. Von vielen dieser Vorkommen nimmt man an, daß sie durch warme oder heiße hypersaline Mineralwässer, die über erhebliche Tiefen in der Kruste zirkulierten, abgelagert wurden. Die Elemente, die nun in konzentrierter Form auftreten, wurden aus Sedimenten (die bevorzugte Abfolge scheint die folgende zu sein: 1. Sandsteine, 2. schwarze Schiefer, 3. Karbonate) oder möglicherweise aus magmatischen oder metamorphen Gesteinen des unterlagernden Grundgebirges ausge-laugt. Die Ränder großer Sedimentbecken — wie in Illinois, Michigan, der Nordsee, NW-Rußland — sind vielleicht die bevorzugtesten Gebiete für solche Provinzen.

Literatur

- Bezrodnikb*, Y. P. (1971): The Process of formation of cupreous sandstones in the light of geochemical data. — Abs. Int. Geochem. Cong., Moscow, 2, 884—5.
- Bilibin*, J. A. (1960): Die geochemischen Typen den orogeren Zonen. — Z. f. angew. Geol., 6, 545—49.
- Blondel*, F. (1937): La geologie et les mines des vieilles plateformes. — Paris.
- Callahan*, W. H. (1967): Some spatial and temporal aspects of the localisation of Mississippi Valley-Appalachian type ore deposits. — Econ. Geol. Monog. 3, 14—19.
- Davidson*, C. F. (1966): Some genetic relationships between ore deposits and evaporites. — Trans. Inst. Min. Metall., 75, B215—25.
- Dmitriyev*, L. M. (1968): Polymetal mineralization in northeastern Russian Platform and adjacent mobile folded zones. — Internat. Geology Rev., 10, 4.
- Doe*, B. R. & *Delefaux*, M. H. (1972): Source of lead in Southeast Missouri galena ores. — Econ. Geol. 67, 409—25.
- Dunham*, K. C. (1949): The Geology of the Northern Pennine Ore Field. Vol. I. Tyne to Stainmore. — Mem. Geol. Survey. 357 pp, 4 pls, 33 figs.
- Dunham*, K. C. (1960): Syngenetic and diagenetic mineralization in Yorkshire. — Proc. Yorks. Geol. Soc., 32, 229—284.
- Dunham*, K. C. (1961): Black Shale, Oil and Sulphide Ore. (Presidential Adress delivered 1. 9. 1961). — Advancement of Science, 18, No. 73, 274—99.
- Dunham*, K. C. (1964): Neptunist concepts in ore genesis. — Econ. Geol. 69, 1.—21.
- Dunham*, K. C., A. C. *Dunham*, B. L. *Hodge* & G. A. L. *Johnson* (1965): Granite beneath Viséan sediments with mineralization at Rookhope, northern Pennines. — Quart. J. Geol. Soc. London, 121, 383—417.
- Dunham*, K. C. (1970): Mineralization by deep formation waters. — Trans. Instn. Mining Metall. (Sect. B Appl. earth sci.) 79, B1 27—36.
- Dunham*, K. C. (1972): Basic and applied geochemists in search of ore. — Ninth Sir Julius Wernher Memorial Lecture. Trans. Inst. Mining and Metal.
- Dunham*, K. C. (1973): Geological Controls of Metalliferous Provinces. — 12th Pacific Sci. Congress, Symposium D, Bur. Min. Res. Australia, Bull. 141, 1—11.
- Finch*, J. W. (1933): Copper deposits of the Western States. — *Lindgren* Volume: Ore deposits of the Western States, 481—87.
- Fischer*, R. P. (1970): Similarities, differences and some genetic problems of the Wyoming and Colorado Plateau types of uranium deposits in sandstones. — Econ. Geol. 65, 778—85.

- Galkiewicz, T. (1967): Genesis of Silesian-Cracovian zinc-lead deposits. — *Econ. Geol. Monog.* 3, 156—77.
- Gerdemann, P. E. & Miers, H. E. (1972): Relationship of carbonate facies patterns to ore deposition and to ore genesis in the south-east Missouri lead district. — *Econ. Geol.*, 67, 426—33.
- Guild, P. W. (1971): Metallogeny: a key to exploration. — *Min. Engng. N.-Y.*, 23, 69—72.
- Hall, W. & Friedman, I. (1963): Composition of fluid inclusions, Cave-in-Rock district, Illinois and Upper Mississippi Valley zinc-lead district. — *Econ. Geol.*, 58, 886—911.
- Hess, F. L. (1933): Uranium, vanadium, radium, gold, silver and molybdenum sedimentary deposits. — *Lindgren Volume: Ore Deposits of the Western States*, 450—81.
- Heyl, A. V. (1967): Genesis of stratiform zinc-lead-barite-fluorite deposits. — *Econ. Geol. Monog.* 3, 20—32.
- Heyl, A. V. (1969): Some aspects of genesis of zinc-lead-barite-fluorite deposits in the Mississippi Valley, USA. — *Trans. Inst. Min. Metall.*, 78, B 48—60.
- Heyl, A. V. (1972): The 38th Parallel lineament and its relationship to ore deposits. — *Econ. Geol.* 67, 879—94.
- Hoagland, A. D. (1971): Appalachian strata-bound deposits: their essential features, genesis and the exploration problem. — *Econ. Geol.* 66, 805—10.
- Holland, H. D. (1972): Granites, solutions, and base metal deposits. — *Econ. Geol.* 67, 281—301.
- Ivanova, A. (1971): Content and distribution of trace elements in traps of the north-western Siberian platform. — *Abst. Int. Geochem. Congr., Moscow*, 1, p. 144.
- Kashirtseva, M. F. & V. O. Sidelnikova (1971): Selenium, uranium, molybdenum in oxogenous roll-type orebodies. — *Abst. Int. Geochem. Cong. Moscow*, 2, 890—1.
- Kelly, W. C. & Turneaure, F. S. (1970): Mineralogy, paragenesis and geothermometry of the tin and tungsten deposits of the Eastern Andes, Bolivia. — *Econ. Geol.* 65, 709—80.
- Konstantinov, M. M. (1963): Proiskozhdeme Stratifitsirovannykh Mestorozhdenii Svitsa 1. Trinka. — *Academy of Sciences, Moscow*, 183 pp.
- Mitchell, A. H. G. & M. S. Garson (1972): Relationship of porphyry copper and circum-Pacific tin deposits to palaeo-Benioff zones. — *Trans. Inst. Min. Metall.*, 81, B 10—25.
- Niccolini, P. (1970): *Gitologie des concentrations minerales stratiformes.* — Paris, 792 pp.
- Nuralin, N. N. & al. (1964): *Geologiya Rudnikh Mestorozhdenii* 6, 105—12.
- Oberc, J. & Serkies, J. (1968): Evolution of the Forc-Sudertian copper deposit. — *Econ. Geol.* 63, 372—79.
- Petraschek, W. E. (1965): Typical features of metallogenic provinces. — *Econ. Geol.*, 60, 1620—34.
- Sillitoe, R. H. (1972): A plate tectonic model for the origin of the porphyry copper deposits. — *Econ. Geol.*, 67, 184—97.
- Skinner, B. J. (1967): Precipitation of Mississippi Valley type ores: a possible mechanism. — *Econ. Geol. Monog.* 3, 363—370.
- Solomon, M., T. A. Rafter & K. C. Dunham (1971): Sulphur and oxygen isotope studies in the northern Pennines in relation to ore genesis. — *Trans. Inst. Mining Metall.* B, 80, 259—76.
- Strakhov, N. M. (1960): *Osnovy Teorii Litogeneza*, 1, Moscow.
- Warren, C. G. (1972): Sulfur isotopes as a clue to the genetic geochemistry of a roll-type uranium deposit. — *Econ. Geol.*, 67, 759—67.
- Wedepohl, K. H. (1969) ed.: *Handbook of geochemistry.* Berlin, 1, 442 pp.
- Wedepohl, K. H., N. G. Lavery & H. L. Barnes (1971): Zinc dispersion in the Wisconsin zinc-lead district. — *Econ. Geol.*, 66, 226—242.
- White, D. E. (1968): Environments of generation of some base-metal deposits. — *Econ. Geol.*, 63, 301—35.