©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

Jb. Geol. B.-A.	ISSN 0016-7800	Band **135**	Heft 2	S. 467–479	Wien, Mai 1992

Typengliederung und Klassifikation von Minerallagerstätten in Klüften („Hydro-lithogene" Mineralisationen)

Von REINHARD EXEL*)

Mit 3 Tabellen

Lagerstättenkunde
Kluftmineralisation
Definition
Genese
Typologie
Klassifikation
„hydro-lithogen"
water-rock-interaction

Inhalt

Zusammenfassung . . . 467
Abstract . . . 468
1. Einleitung . . . 468
2. Vorkommen in Metamorphiten . . . 469
3. Vorkommen in Sedimentgesteinen . . . 470
4. Vorkommen in Magmatiten . . . 470
5. Typologie . . . 470
5.1. Der IK-Index . . . 472
6. Klassifikation . . . 474
6.1. Der M-Typus und seine Klassen . . . 474
6.2. Der N-Typus und seine Klassen . . . 475
7. Genetische Deutung . . . 475
7.1. „Hydro-lithogene" Mineralisationen . . . 476
8. Schlußbetrachtung . . . 477
Dank . . . 478
Literatur . . . 478

Zusammenfassung

Die Arbeit „Ein genetisches Begriffssystem für Minerallagerstätten in Klüften" (siehe EXEL, 1991, Archiv f. Lagerst.forsch. der Geol. B.-A., **13**, 5–15, Wien) wird hier fortgesetzt und abgeschlossen. Gegenstand der Typengliederung und Klassifikation sind fast durchwegs schwermetallfreie Mineralisationen, die vornehmlich in Gesteinsklüften auftreten. Einige der hier besprochenen Mineralisationen wurden früher unter den Begriffen „alpine" bzw. „alpinotype" Kluftmineralien beschrieben, doch konnte nachgewiesen werden (vgl. EXEL, 1991), daß diese beiden Begriffe falsch definiert und daher falsch angewandt wurden.

Aufgrund der Tatsache, daß die gegenständlichen Mineralisationen in Klüften von praktisch allen Gesteinsarten bzw. Gesteinsfamilien, also in Sedimentgesteinen, Metamorphiten und Magmatiten auftreten (und zwar mit charakteristischen Paragenesen, deren Chemismus jeweils vom Chemismus des Nebengesteins bestimmt ist), und darüber hinaus ihr Vorkommen nicht ausschließlich an Klüfte gebunden ist (sie treten auch in kavernösen Gesteinshohlräumen, bzw. in Miarolen, Geoden, Septarien, usw. auf), erfolgt hier eine Neudefinition derselben. Letztere geschieht aufgrund gemeinsamer genetischer Merkmale, die fallweise schon in der eingangs zitierten Arbeit erläutert wurden, und sieht eine Typengliederung und Klassifikation vor. Als wesentliches Kriterium zur Unterscheidung der nun als M-Typus (sechs Klassen umfassend) und als N-Typus (drei Klassen umfassend) bezeichneten Kluftmineralisationen wird u.a. der Zustand der entsprechenden Kluftträgergesteine (metamorph oder nicht metamorph) herangezogen. Die Grenze zwischen diesen Zuständen liegt im Übergangsbereich von der Diagenese zur Metamorphose, der durch den von KUBLER (1967) erstellten Illit-Kristallinitätsindex (IK) definiert ist.

Der vorherrschenden Lehrmeinung entsprechend sollte die Entstehung der gegenständlichen Mineralisationen teils auf hydrothermalen Aktivitäten, teils auf diagenetischen Prozessen beruhen. Davon abweichend wird hier eine Interpretation angedeutet, welche die Möglichkeit in Betracht zieht, für die Entstehung der betreffenden Mineralisationen immer nur ein und denselben Mechanismus verantwortlich zu machen. Demnach würde es sich um in-situ-Bildungen eines multivariaten Reaktionssystems handeln, das von den Faktoren Nebengestein, Wasser, Druck und Temperatur bestimmt wird. Entscheidend für diese

*) Anschrift des Verfassers: Dr. REINHARD EXEL, Malborghetgasse 31/7, A-1100 Wien.

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

Hypothese ist, daß für die Herkunft der Stoffe (wässerige Lösungen), aus denen sich die Mineralisationen bilden, weder ein weitreichender z. B. durch hydrothermale Aktivitäten bedingter Antransport angenommen werden muß, noch diagenetische Prozesse angenommen werden müssen. Aller Wahrscheinlichkeit nach lassen sich nämlich sämtliche für die spätere Kristallisation notwendigen Komponenten (sowohl das Wasser selbst als auch die darin gelösten Stoffe) aus dem unmittelbaren Nebengestein oder dem Nebengesteinsverband der Klüfte ableiten.

Die weiteren im genannten Reaktionssystem wesentlichen Faktoren, Druck und Temperatur, entsprechen den im hydrothermal-pneumatolithischen Bereich bekannten Gradienten. Die Kristallisation bzw. die Mineralsukzessionen erfolgen gewöhnlich nach Überschreitung des fallweise erreichten P/T-Maximums.

Bezugnehmend auf die Herkunft der Stoffe seien diese Mineralisationen hier vorläufig als „hydro-lithogene" Mineralisationen bezeichnet. Dies auch deshalb, um sie deutlich von anderen, mitunter ebenfalls in Klüften auftretenden Mineralisationen (etwa Vererzungen und andere Bildungen hydrothermaler bis pegmatitischer oder anderer Natur) zu unterscheiden, deren Stoffherkunft zweifelsohne als allothigen, also nicht aus der unmittelbaren Gesteinsumgebung stammend, angesehen werden muß. Solche Mineralisationen stehen außerhalb unserer Betrachtung, können aber durch „hydro-lithogene" Mineralbildungsprozesse überprägt sein.

Typology and Classification for Fissure Mineral Deposits ("Hydro-lithogenous" Mineralizations)

Abstract

The paper entitled „A Genetic Definition System for Fissure Mineral Deposits" (see EXEL, 1991, Archiv f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., **13**, 5–15, Vienna) is continued and finished here.

Object of typology and classification are lowest- to medium-tempered mineralizations, generally poor in heavy metals and ore minerals, occurring in fissures (clefts). Some mineralizations of this kind have been reported as "alpine" or "alpine-type" fissure mineralizations, but EXEL (1991) pointed out that the definitions are wrong.

Criterions for a new definition were found by a number of facts never considered before, e.g., fissure mineralizations do not only occur in fissures or clefts, but take place also in other types of rock cavities (in miaroles, geodes, septaries and so on); the mineralizations in question are not bound at specific host rocks but are known from occurrences in sedimentary, metamorphic and magmatic rocks; the chemical composition of mineral parageneses is always controlled by the host rocks; the parageneses of minerals are different but show characteristic genetic features, which allow assignment to specific country rocks. This and other items give preference to a new definition of these mineralizations, done by a system of typology and classification, just in part published (see EXEL, 1991).

An important criterion for typology was found among others in the actual status of country rocks (metamorphic or not metamorphic). The limit of this can be located in the transition stage from diagenesis to metamorphism, defined with the IK (Index of Illite-Crystallinity) established by KUBLER (1967). So far, a distinction between M-Type deposits (bound to metamorphic rocks and subdivided in six classes) and N-Type deposits (bound to non metamorphic rocks and subdivided in three classes) were applied.

The origin of the mineralizations in question – according to the accepted opinion – should be hydrothermal or diagenetic. An outline of a different interpretation is given here, and suggests that the origin might always be caused by one and the same mechanism. So the mineralizations might be in-situ-deposits produced by a multivariate reaction system, with the following determinant factors: host rock, water, pressure and temperature.

The crucial point of this hypothesis is that of the provenance of matter (aqueous solutions), which takes place in fissures and in other cavities, a long way of transport must not strictly be considered, neither hydrothermal activities nor diagenetic processes. Probably, so far, provenance of all the compounds necessary for crystallization (i.e. water itself and enriched matter) derives from the host or country rocks.

The other determinant factors in this reaction system, like pressure and temperature, are on the analogy of datas known by forming hydrothermal-pneumatolitic mineral phases. Crystallization and mineral successions generally start shortly after the climax of P/T. In regard to the provenance of matter, a denomination as "hydro-lithogenous" mineralizations is proposed. This in contrast to other mineralizations occurring in fissures occasionally (e.g., ores and other minerals of hydrothermal to pegmatitic or other origin), their provenance of matter, beyond all doubt, is allothigenous and cannot be derived from relative host rocks. Fissure mineral deposits of this kind are not discussed here, but can be involved in "hydro-lithogenous" mineral forming processes.

1. Einleitung

Minerallagerstätten in Klüften sind weltweit von unzähligen Vorkommen bekannt, doch fehlte bisher eine genaue Bezeichnung der entsprechenden Mineralisationen, ein Faktum, welches immer wieder zu Irrtümern und genetischen Fehlinterpretationen führte. So wurden in der Literatur einige dieser Mineralisationen manchmal nach Art des Hauptmineralbestandes, z.B. einfach als „Erzklüfte", andere nach ihrem Verbreitungsgebiet, z.B. in den Alpen, als „alpine" Kluftmineralien, wieder andere als „alpinotype" Kluftmineralien beschrieben, und viele andere allgemein als „Kluftmineralisationen" oder überhaupt nicht weiter bezeichnet.

Dieser Umstand sowie die von EXEL (1991) gemachte Feststellung, daß sich die von NIGGLI et al. (1940) für die sogenannten „alpinen Kluftmineralien" gegebene Definition widerlegen läßt und damit unbrauchbar ist, gab Anlaß, diesen Themenkreis genauer zu untersuchen. Dabei zeigte sich, daß die als niedrigst bis mittelthermal angesehenen, im allgemeinen erz- und schwermetallfreien „alpinen" Kluftmineralisationen an metamorphe Gesteine gebunden sind, ihre Bildung aber zeitlich gesehen nicht, wie postuliert, an Endpha-

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

sen der alpidischen Metamorphose gebunden sein kann, da sie auch in variszischen und kaledonischen Metamorphiten auftreten. Ferner konnte u.a. festgestellt werden, daß der Chemismus der entsprechenden Paragenesen stets vom Chemismus des Kluftträgergesteins kontrolliert ist (vgl. NIEDERMAYR, 1980) und diese Mineralisationen nicht ausschließlich in bestimmten Klüften (Zerrklüfte im Sinne von STALDER et al., 1973) sondern auch in anderen Klufttypen, ja sogar in kavernösen Gesteinspartien vorkommen (vgl. WENINGER, 1974; EXEL, 1991). Das zuletzt angesprochene Faktum wiederum führte dazu, in eine sinnvolle Neudefinition grundsätzlich auch alle jene Mineralisationen miteinzubeziehen, die an sich nie als Kluftmineralisationen galten, die aber dennoch, wie oft in der Natur beobachtbar, sowohl in Klüften als auch in anderen Hohlräumen von Sedimentgesteinen und von Magmatiten, insbesondere von Vulkaniten, erscheinen. Obschon es sich bei den zuletzt angesprochenen Mineralisationen durchwegs um niedrigst-temperierte Bildungen handelt, deren Entstehung auf diagenetische Prozesse bzw. auf hydro-metasomatische Vorgänge zurückgeführt wurde, ist auch bei diesen Mineralisationen der Sachverhalt gegeben, wonach der Chemismus der Paragenesen vom Chemismus des Nebengesteins kontrolliert ist.

Weil aus vergleichenden Studien aller vorher genannten Mineralisationen hervorgeht, daß sie einen charakteristischen Mineralbestand aufweisen, der offensichtlich vom Nebengestein abhängig ist, wurde vom Autor ein auf genetischen Merkmalen der Paragenesen und der Trägergesteine beruhendes Begriffssystem für diese Mineralisationen entwickelt und zum Teil vorgestellt (siehe EXEL, 1991). Mit diesem Begriffssystem können diese Kluftmineralisationen, ausgehend von den charakteristischen Paragenesen und ihrem Erscheinungsbild, in Klassen eingeteilt und auf Typen, welche dem Zustand der Trägergesteine entsprechen, zurückgeführt werden, bzw. es kann umgekehrt von den Typen her eine Grobeinteilung erfolgen.

Insgesamt wurden zwei Typen von Kluftmineralisationen unterschieden, und zwar solche, die an metamorphe Trägergesteine gebunden sind (M-Typus) und solche, die in nicht metamorphen Trägergesteinen auftreten (N-Typus). Während über den M-Typus, der in sechs Klassen unterteilt ist, schon ausführlich berichtet wurde (siehe EXEL, 1991), war für den N-Typus eine entsprechende Klassifikation angekündigt, die nun in der vorliegenden Arbeit präsentiert wird. Es erfolgt hier auch die für die Typengliederung wichtige Festlegung der Grenze zwischen der Diagenese und der Metamorphose: Sie wird, in Anlehung and KUBLER (1967), als im Übergangsbereich der Tiefen Diagenese zur Hohen Anchizone liegend angenommen.

Schließlich wird die Entstehung der gegenständlichen Mineralisationen diskutiert, und ein Deutungsversuch unternommen, der davon ausgeht, ein und denselben Bildungsmechanismus anzunehmen. Grundlegend für diese Annahme ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich die Stoffe, aus denen sich die Mineralien bei entsprechenden P/T-Bedingungen bilden (wässerige Lösungen, d.h. Wasser und gelöste Stoffe), aus dem Nebengestein herleiten lassen. Es wird deshalb vorläufig von „hydro-lithogenen" Mineralisationen gesprochen.

2. Vorkommen in Metamorphiten

Es handelt sich hierbei um die weltweit von unzähligen Fundorten bekannten, früher sogen. „alpinen" und „alpinotypen" Kluftmineralisationen, die vor allem wegen ihrer interessanten und kristallographisch bemerkenswerten Mineralparagenesen vielfach Gegenstand wissenschaftlicher Bearbeitung waren und sind. EXEL (1991) konnte nachweisen, daß die von NIGGLI et al. (1940) für „alpine Kluftmineralien" gegebene und später von PARKER (1954), STALDER et al. (1973), WEIBEL (1973), WENINGER (1974), NIEDERMAYR (1980), MEIXNER (1981) und anderen namhaften Autoren übernommene Definition falsch ist und deshalb zu großen Mißverständnissen bei der Bezeichnung dieser Mineralisationen führte. So war beispielsweise u.a. von „zentralalpinen" (RYKART, 1984), von „ostalpinen" (NIEDERMAYR, 1980) und anderen „alpinen" Kluftmineralisationen die Rede, obschon für diese Mineralisationen dieselben Bildungsbedingungen angenommen wurden. Diese Beispiele zeigen, daß eine Bezeichnung nach geographischen Aspekten für wissenschaftliche Aussagen ungeeignet ist. Auch wurde die von KOLLER et al. (1978) für die sogen. „alpinotypen" Kluftmineralisationen postulierte Begriffsbestimmung widerlegt und damit gezeigt, daß unsere Mineralisationen generell nicht an die alpidische Gebirgsbildung bzw. an Endphasen der alpidischen Metamorphose gebunden sind, weil sie auch in nicht von der alpidischen Metamorphose überprägten variszischen und kaledonischen Metamorphiten auftreten. Ihre Bildung ist folglich in allen geologischen Zeiträumen möglich. Es konnte weiters herausgearbeitet werden, daß diese Kluftmineralisationen nicht nur, wie oft angenommen, an Zerrklüfte, oder überhaupt nur an Klüfte gebunden sind, sondern auch in kavernösen Gesteinspartien von metamorphen Gesteinen sowie in Miarolen vorkommen. Das Mineralinventar dieser Mineralisationen ist vorwiegend silikatischer Natur, umfaßt aber insgesamt eine große Artenvielfalt, nämlich etwa 150 Spezies (zusammenfassende Darstellungen den Alpenraum betreffend liegen u.a. von STALDER et al. [1973] und von WENINGER [1974] vor; Hinweise zu anderen Vorkommen bei EXEL [1991]).

Mit der Thematik ihrer Entstehung befaßten sich vor allem NIGGLI (1940), KOENIGSBERGER (1940), SCHNEIDERHÖHN (1941), LEITMEIER (1950), PARKER (1954), STALDER et al. (1973), WENINGER (1974) und NIEDERMAYR (1980). Generell setzte sich die Meinung durch, daß es sich um niedrig- bis mitteltemperierte hydrothermale Bildungen handle, welche aus wässerigen Lösungen, sogen. „leeren Thermen", hervorgehen, die den für die Kristallisation notwendigen Stoffbestand aus dem Nebengestein beziehen, und dies durch „Lateralsekretion".

Die für die Mineralbildung notwendigen Druck- und Temperaturbedingungen sind angeblich an metamorphe Abläufe geknüpft. Die maximalen P/T-Werte erreichen 7 bis 3 kb (STALDER et al., 1973) und Temperaturen bis ca. 650°C (FRIEDRICHSEN & MORTEANI, 1979), wobei die Mineralausscheidungen (Sukzessionen) gewöhnlich nach Erreichung des Temperaturmaximums erfolgten, also retrograde Merkmale aufweisen, d.h. von der Amphibolitfazies bis in die Zeolithfazies herabreichen (vgl. NIEDERMAYR, 1980).

Da für die eben geschilderte, gegenwärtig allgemein anerkannte genetische Interpretation die Frage nach der Herkunft der Stoffe, mit denen sich die bereits er-

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

wähnten „leeren Thermen" anreichern, und endlich auch die Frage nach der Herkunft der „leeren Thermen" selbst von größter Bedeutung ist, seien hierzu folgende Bemerkungen angebracht:

Es bestehen derzeit kaum Zweifel darüber, daß die Stoffe, mit denen sich die „leeren Thermen" anreichern, aus dem Nebengestein stammen, also lithogen sind. Dafür spricht der oft erbrachte Nachweis, daß der Chemismus der Mineralisationen im allgemeinen vom Chemismus ihrer Trägergesteine kontrolliert ist (vgl. hierzu NIGGLI, 1940; PARKER, 1954; STALDER et al., 1973; NIEDERMAYR, 1980, 1990a). Im Gegensatz dazu scheint aber die Herkunft der „leeren Thermen" selbst weitgehend ungeklärt zu sein und, bei genauer Analyse der Angaben in den soeben zitierten Werken, nur auf Annahmen zu beruhen. Die bis heute übernommene Auffassung von NIGGLI (1940) und von SCHNEIDERHÖHN (1941) geht nämlich davon aus, daß es sich nicht um primäre, tief liegende, mit Stoffen angereicherte hydrothermale Quellen handelt, sondern um sekundäre Hydrothermen handeln sollte, die sich erst aufgrund sogen. pseudo-hydrothermaler Vorgänge mit Stoffen anreichern. Wo die sekundären, also „leeren Thermen" wirklich herstammen, bleibt aber letztlich unbeantwortet, so daß in der Folgezeit auch eine andere Meinung geäußert wurde. So schließen EXNER (1957) und WENINGER (1974) nicht aus, daß es sich bei den „leeren Thermen" um „tiefvadose" Wässer handelt, also um Niederschlagswässer und Porenwässer, die in wenigen Kilometern Erdtiefe erwärmt und mineralstoffreich wurden. Diese Interpretation hat zwar wenig Anklang gefunden, doch hat sich deshalb die Diskussion über die „leeren Thermen" und ihre Herkunft keinesfalls erübrigt. Im Gegenteil, sie scheint gerade im Zusammenhang einer Gesamtbetrachtung aller Kluftmineralisationen besonders wichtig, und es wird deshalb in der vorliegenden Arbeit dazu ein neuer Aspekt angesprochen (siehe Punkt 7.).

3. Vorkommen in Sedimentgesteinen

Obschon auch in Sedimentgesteinen (vor allem in Kalken, Dolomiten, Sandsteinen und Argilliten) mineralisierte Klüfte beobachtbar sind, welche gelegentlich auch Hohlräume mit kristallisierten Mineralien aufweisen, wurden diese Mineralisationen bisher nie eigens unter dem Aspekt „Kluftmineralisationen" betrachtet. Dies soll aber hier geschehen, da nicht einzusehen ist, weshalb diese Betrachtungsweise nur entsprechenden Mineralisationen in Metamorphiten vorbehalten sein soll.

Die Paragenesen der in Klüften von Sedimentgesteinen vorkommenden Mineralisationen sind im allgemeinen artenarm und umfassen im wesentlichen dieselben Spezies, welche gelegentlich auch in Septarien, in Schwundrissen und in ähnlichen Hohlräumen auftreten. Die Entstehung dieser Mineralien erfolgt somit während und/oder nach der Diagenese. Man versteht darunter all jene Vorgänge, die zur Verfestigung eines Lockersediments, etwa von Kalkschlamm zu Kalkstein, führen (BRINKMANN, 1967). Dabei kommt es zu Stofftransport und Stoffumlagerung im Sediment durch wässerige Lösungen, welche sich mit Stoffen eben aus diesem Sediment anreichern.

Übersättigung dieser Lösungen kann sowohl chemisch als auch mechanisch durch den Einfluß von Druck entstehen, wobei schon bei relativ niedriger Temperatur Mineralien auskristallisieren. Diese sogenannte Um- oder Sammelkristallisation geschieht auf diese Weise, wobei die in Kalksteinen oft vorhandenen Calcit- und/oder Dolomitanreicherungen nicht nur in Form typisch sedimentärer Gefügestrukturen (etwa rhythmische oder geopetale Gefüge) erscheinen, sondern sich, ohne derartige Gefüge aufzuweisen, auch in schon vorhandenen Klüften oder in anderen Hohlräumen absetzen.

Auf diese frühe, schon von SANDER (1941, 1950) beobachtete, und von ihm als „paradiagenetisch" bezeichnete Kluftbildung und Mineralisation (Spatisation) kann in „nachdiagenetischen" bzw. spätdiagenetischen Zeiträumen (also im Zeitraum vom fertigen Gestein bis zum Einsetzen der Metamorphose) wiederholt sowohl Kluftbildung als auch Mineralisation dieser Klüfte folgen.

Aus dem Mineralbestand der früh- und spätdiagenetisch entstandenen Kluftmineralisationen kann man schließen, daß sie aus niedrigst-temperierten wässerigen Lösungen, welche die für die Mineralabscheidung nötigen Stoffe offensichtlich aus dem Nebengesteinsverband beziehen, hervorgegangen sind.

Was bereits für Kluftmineralisationen in Metamorphiten gesagt wurde, hat somit effektiv auch für die Kluftmineralisationen in Sedimentgesteinen Geltung: Der Chemismus dieser Mineralisationen ist stets von der chemischen Zusammensetzung des Nebengesteins bzw. des Nebengesteinsverbandes der Klüfte kontrolliert. Es erscheinen daher konsequenterweise in Kalken und Dolomiten vorwiegend Calcit, Aragonit oder Dolomit als auffällige Kluftmineralien, während in Klüften von Sand- und Tonsteinen hauptsächlich Quarz, Glimmermineralien und Feldspat auftreten (siehe Tab. 3).

Die Bildung der Kluftmineralisationen in Sedimentgesteinen erfolgt unter relativ niedrigen Druck- und Temperaturbedingungen (bis ca. 3 kb; 0–200°C), die ja für die Diagenese überhaupt charakteristisch sind. Die P/T-Bereiche der Diagenese können aber auch so hohe Werte erreichen, daß sie von einer beginnenden Metamorphose nicht oder kaum zu unterscheiden sind (BRINKMANN, 1967). Im Übergangsbereich Diagenese – Metamorphose (Anchizone) (vgl. 5.1.) können also Paragenesen in Klüften auftreten, die vielleicht nicht eindeutig dem einen oder dem anderen Zustand zuzuordnen sind. Um diesbezüglich Klarheit zu erlangen, werden gegebenenfalls detaillierte petrographische und mineralogische Untersuchungen notwendig sein.

In Hinblick auf die Temperatur der wässerigen Lösungen, aus denen diese Mineralisationen hervorgehen sei bemerkt, daß man sie prinzipiell den sogen. „leeren Thermen" (vgl. 2. und 7.) gleichsetzen könnte.

4. Vorkommen in Magmatiten

Auch in magmatischen Gesteinen, vornehmlich in intermediären bis basischen Vulkaniten (Andesite, Basalte, Trachyte, Phonolithe) sind gelegentlich mineralisierte Klüfte vorhanden. Da ihre Paragenesen mit jenen typischen Mineralvergesellschaftungen zu vergleichen sind, welche weitaus häufiger in Blasenräumen (Geoden) solcher Gesteine oder in Zwickeln von Pillowlaven

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

auftreten, wurden sie (wie auch die entsprechenden, in Sedimentgesteinen vorkommenden Mineralisationen) bisher nie als Kluftmineralisationen angesehen.

Der Mineralinhalt solcher Blasenräume besteht u.a. aus Quarz, Zeolithen und Carbonaten und wird im allgemeinen als „hydrothermal" entstanden interpretiert, wobei nach SCHNEIDERHÖHN (1944) diese Hydrothermen während oder kurz nach den Endstadien effusiv-magmatischer Aktivität wirksam werden sollten.

Es gibt dafür aber in Wirklichkeit keine eindeutigen Beweise, so daß diese allgemeine Interpretation hier einmal grundsätzlich in Frage gestellt werden muß. Dies vor allem deshalb, weil anhand neuerer Untersuchungsergebnisse von einigen weltweit sehr bekannten Kluft- und Geodenmineralisationen eher eine andere Entstehungsweise anzunehmen ist. Verwiesen sei in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten über die Amethystvorkommen in Klüften von Andesiten von Las Vigas/Mexico (zusammengefaßt von LIEBER & FRENZEL, 1990), die im englischen Sprachgebrauch zwar als „veins" (Adern oder Gänge) bezeichnet werden, sowie über die Zeolithvorkommen in Blasenräumen der Deccan-Basalte Indiens (vgl. WILKE, 1984), in denen die Entstehung dieser Mineralisationen, die durchaus auf andere Vorkommen übertragbar ist, mit den Begriffen „Autohydratation", „Autometasomatose", „Hydro-Metasomatose" oder „Zeolothisierung" beschrieben wird.

Diese Begriffe wurden zum Teil schon von SCHNEIDERHÖHN (1941) verwendet und implizieren, im Sinne des genannten Autors, Umwandlungsvorgänge infolge hydrothermaler Prozesse. Es handelt sich um noch nicht in allen Details geklärte Mineralum- und Neubildungsvorgänge, von denen einzelne Sequenzen oder ganze Abfolgen vulkanischer Gesteine erfaßt sein können, die sich aber nicht ganz eindeutig auf die Einwirkung „echter" Hydrothermen zurückführen lassen, sondern durch hydro-metasomatische Vorgänge erklärt werden. Letztere manifestieren sich durch die Umwandlung des primären Mineralbestandes, von dem meist nur noch Pseudomorphosen erhalten sind, und durch die Bildung neuer Mineralien infolge eines durch wässerige Lösungen erfolgten Stoffaustausches bei dem hauptsächlich Kalium, Calcium, Magnesium und Eisen zugeführt, während Natrium, Silicium und Aluminium weggeführt werden. Trotz dieser Umwandlung, die zu den Mineralneubildungen in Geoden, Klüften u. dgl. führt, sind diese Vulkanite keineswegs als Meta-Vulkanite anzusprechen, da sie in Bezug auf ihre Struktur und Textur keine Merkmale einer Metamorphose i.e.S. aufweisen. Nicht selten sind solche Gesteine allerdings durch Auslaugungserscheinungen sowie durch „Vergrünung" oder „Bleichung" gekennzeichnet.

Für diese offenbar im Detail sehr komplizierten und daher kaum experimentell nachvollziehbaren Vorgänge werden letzthin großräumig wirksame Geothermalsysteme angenommen (CATELINEAU & NIEVA, 1985), mit denen ursprünglich nur die Bildung gewisser Erzlagerstätten erklärt wurde (BISCHOFF, 1969). In diesen Geothermalsystemen, die ihrerseits wieder zum Teil auf rezent aktive Hydrothermalsysteme zurückgeführt werden, scheint der Einfluß von Meereswasser auf die Vulkanite eine bedeutende Rolle zu spielen (vgl. BONATTI, 1975; ELDER, 1991). Derartige Systeme, die lokal massive Anreicherungen sulfidischer Mineralien aufweisen, wurden bekanntlich in den letzten Jahren mehrfach in 2000 bis 3000 m unter Meeresniveau liegenden Tiefen im Bereich der mittelozeanischen Rücken entdeckt und untersucht (vgl. CORLISS et al., 1979; FRANCHETEAU et al., 1978; TUFAR et al., 1985). Sie stellen derzeit zwar die besten Beispiele für die primäre Entstehung von sulfidischen Erzlagerstätten dar, es können damit aber nicht alle in Bezug zur Entstehung unserer Kluftmineralisationen offenen Fragen zufriedenstellend beantwortet werden. Dies, weil deren Bildung offensichtlich nicht direkt mit den primären, erzabscheidenden Vorgängen zusammenhängt (bislang wurden jedenfalls keine entsprechenden Paragenesen nachgewiesen), sondern wahrscheinlich erst viel später – nach Beendigung dieser Vorgänge – und wohl auch weit entfernt von den Orten des primären Geschehens erfolgt.

Betrachtet man einmal die Paragenesen in Klüften und Geoden vulkanischer Gesteine genauer, so ist feststellbar, daß neben den häufig auftretenden Zeolithen, Calcit und Quarz sowie oft auch Prehnit, Datolith, Pumpellyit, Illit, Chlorit, Klinozoisit u.a. Mineralien hinzutreten. Es liegen also Bildungen vor, die den Bereich der Zeolithfazies bis hin zur Amphibolitfazies umfassen: Sie entsprechen somit niedrigst- bis mitteltemperierten Mineralisationen. Für die bereits erwähnten Amethystvorkommen in Klüften der Andesite von Las Vigas/Mexico werden Bildungstemperaturen von ca. 150°C für Quarz bzw. Amethyst und 235°–250°C für Chlorit und Illit angegeben (LIEBER & FRENZEL, 1990).

In Bezug auf eine genetische Interpretation scheint aber nun die Feststellung interessant, daß der Chemismus aller bisher auf „Zeolithisierung" oder „Hydro-Metasomatose" zurückgeführten Mineralisationen vom Trägergestein oder Nebengesteinsverband der Klüfte, Geoden usw. beeinflußt ist, d.h. keine gesteinsfremden Stoffe vorhanden sind. Wenn man wollte, so würde kaum etwas dagegen sprechen, die wässerigen Lösungen, aus denen Kluft- und Geodenmineralisationen in Vulkaniten hervorgehen, den sogen. „leeren Thermen" gleichzusetzen. Aus den schließlich gesättigten Lösungen können die Mineralsukzessionen ausscheiden. Die für diese Vorgänge notwendigen, niedrigen bis mittleren P/T-Bedingungen können sich beispielsweise durch epirogenetische Bewegungen einstellen.

5. Typologie

Die gegenständlichen, in metamorphen, magmatischen und sedimentären Gesteinen vorkommenden Mineralisationen weisen eine Reihe von Merkmalen auf (vgl. 8.), die für eine Begriffsbestimmung brauchbare Anhaltspunkte geben. Darunter existieren einige besonders charakteristische, genetisch bedingte Merkmale, die es erlauben, sie in Typen und Klassen einzuteilen. Die wichtigsten Merkmale sind:

a) **Chemismus der Mineralparagenesen**
Dieser ist vom Nebengestein oder Nebengesteinsverband der Klüfte kontrolliert (vgl. NIGGLI et al., 1940; NIEDERMAYR, 1980, 1990a), d.h. er ist lithogen.

b) **Der Mineralbestand der Paragenesen**
Er ist nicht einheitlich, weil u.a. vom Stoffangebot sowie von P/T-Bedingungen abhängig. Dennoch läßt sich aber statistisch eine Reihe von Mineralien nachweisen, welche für bestimmte Lithotypen charakteristisch sind. Diese charakteristischen Mineralien können also wesentliche Hinweise auf die Art des Nebengesteins liefern.

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

c) **Das Erscheinungsbild der Paragenesen**
Es setzt sich aus dem Mineralbestand sowie aus der Morphologie der einzelnen Mineralien zusammen und ist demnach von allen Bildungsfaktoren abhängig. Es ist im allgemeinen so charakteristisch, daß es eindeutige Rückschlüsse auf die Trägergesteinsfamilien (Sedimente, Magmatite, Metamorphite), in vielen Fällen sogar eine nähere, ja genaue Zuordnung zu spezifischen Lithotypen (Kluftnebengesteinen) zuläßt.

Die genannten Merkmale stehen also in ursächlichem Zusammenhang und man kann daher eine Beziehung zwischen den Paragenesen und ihren Trägergesteinen herstellen.

Eine Typologie der Kluftmineralisationen kann nun beispielsweise aus den o.a. Punkten b) und c) abgeleitet, d.h. also, aufgrund gemeinsamer äußerer Merkmale erstellt werden. Es liegt diesbezüglich ein erster Versuch von KOENIGSBERGER (1940) vor, der die Kluftmineralisationen in Metamorphiten der Schweiz (nur solche wurden in der zitierten Arbeit berücksichtigt) auf ihre typische Mutter- oder Nebengesteine zurückführte und sie als „Paragenetische Typen" bezeichnete. Da er nicht weniger als 28 solcher Typen unterschied, war sein Modell unübersichtlich und kaum anwendbar, weshalb es in der Folgezeit, bei Verzicht auf eine Typenbezeichnung, stark reduziert und übersichtlicher gestaltet wurde (entsprechende Abbildungen bei PARKER, 1954; WEIBEL, 1973; NIEDERMAYR, 1980). Aus diesen Modellen wurde, allerdings bei Berücksichtigung aller weltweit bekannten Paragenesen unserer Kluftmineralisationen, von EXEL (1991) eine neue Typologie konzipiert.

Dabei wurde zunächst die schon von KÖNIGSBERGER (1940) und von den anderen oben genannten Autoren praktizierte Vorgangsweise angewandt, indem, ausgehend von den charakteristischen Mineralien, die Lithotypen der Muttergesteine ermittelt bzw. letztere in Trägergesteinskategorien zusammengefaßt werden können (diese wurden hier diversen Klassen zugordnet; siehe Punkt 6.). Es wurde daraufhin aber nun ein zwar naheliegender, bisher jedoch noch nie erfolgter Schritt weiter gegangen, indem letztlich der aus genetischer Sicht für unsere Mineralisationen nicht unwesentliche Zustand dieser Trägergesteinskategorien (metamorph oder nicht metamorph) angesprochen, und dieser endlich als Kriterium für die Typologie (M-Typus und N-Typus) herangezogen wurde. Da die gesamte soeben erläuterte Vorgangsweise theoretisch auch umkehrbar ist, wurde von dieser Möglichkeit zum Zwecke der Übersichtlichkeit Gebrauch gemacht: die beiden Typen, welche eine Grobeinteilung gewährleisten, wurden der in Details gehenden Klassifikation übergeordnet.

Da für die Typengliederung die Beschaffenheit bzw. der Zustand der Trägergesteine der Mineralisationen (metamorph oder nicht metamorph) als Kriterium fungiert, ist die Frage, wie die Unterscheidung zwischen metamorphen Gesteinen und nicht metamorphen Gesteinen vorgenommen wird, von entscheidender Bedeutung. Es bieten sich diesbezüglich mehrere Möglichkeiten an, wie z.B. die Beobachtung der Textur (oft als äußeres Kennzeichen wahrnehmbar, doch ein sehr relativer Anhaltspunkt), die Ermittlung des Mineralbestandes, und dabei insbesondere die für die metamorphen Gesteine charakteristischen Indexminerale (vgl. WINKLER, 1979), oder die Ermittlung des Grades der Illit-Kristallinität. Da letztere die gegenwärtig unumstrittenste Methode darstellt, wird sie hier als Basis der Typengliederung herangezogen.

5.1. Der IK-Index

Ausgehend vom sedimentären Kreislauf folgt auf die Diagenese, unter der man alle Prozesse der Verfestigung von Lockersedimenten versteht, die Metamorphose der nun als feste Sedimente vorliegenden Gesteine (vgl. BRINKMANN, 1967). Dieser kontinuierliche Ablauf manifestiert sich durch Mineralum- und Neubildungen infolge von Temperatur- und Drucksteigerung, wobei endlich auch das Gefüge dieser Gesteine maßgeblich verändert wird.

Die Grenze zwischen der Diagenese und der Metamorphose verläuft nicht scharf. Sie liegt in einem Übergangsbereich (bei Temperaturen von etwa 270–300°C), bzw. in einer etwas niedriger temperierten Zone, die als Anchimetamorphose (MURAWSKI, 1963) bezeichnet wird. Letztere ist dadurch charakterisiert, daß in ihr die Bildung von Mineralien einsetzt, die nicht im sedimentären Bereich entstehen können. Als maßgebliches Kriterium fungiert dabei die Umbildung von Schichtsilikaten, insbesondere der zunehmende Ordnungsgrad dioktaedrischer Illite. Für diesen Ordnungsgrad, die sogen. Illit-Kristallinität, wurde von KUBLER (1967) ein Index erstellt, der anerkanntermaßen für die Definition tiefer Metamorphosebereiche herangezogen wird. Der Wirkungsbereich der Anchimetamorphose ist also durch den Illit-Kristallinitäts-Index (IK) definiert, welcher für den betreffenden Bereich mit 7,5 bis 4,0 angegeben wird (Tab. 1). In diesem Sinne wird hier die Grenzmarke zwischen nicht metamorphen und metamorphen Gesteinen, und damit die Gliederung der Mineralisationen in N-Typus und M-Typus, zwischen der Tiefen Diagenese und der Hohen Anchizone angesetzt.

Tabelle 1.
Schematische Darstellung des Übergangsbereiches von Diagenese zu Metamorphose aufgrund der Illit-Kristallinität (IK) (nach KUBLER, 1967).

IK 7,5	Diagenese	Tiefe Diagenese
	Metamorphose	Hohe Anchizone Tiefe Anchizone 270 - 300°
IK 4,0		Epizone

Es sei darauf hingewiesen, daß sowohl die Sedimente der Tiefen Diagenese als auch jene der Anchizone zum Teil schon einen metamorphen Mineralbestand aufweisen, daß diese Gesteine aber vom Gefüge her (zumindest nach äußeren Kennzeichen) kaum als Metamorphite anzusprechen sind, weil ihnen im allgemeinen die sonst für höher metamorphe Gesteine (z. B. Phyllite, Glimmerschiefer, Gneise) typischen Texturen (Schieferung) fehlen. Die Tatsache, daß in anchizonal beeinflußten Gesteinsserien Kluftmineralisationen auftreten (siehe NIEDERMAYR, MULLIS et al., 1984; KRUMM, 1984), kann die Zuordnung dieser Mineralisationen zu einem der beiden Typen erschweren oder sie erst aufgrund der Feststellung des IK-Indexes ermöglichen. Die Typenzuordnung kann in der Praxis fallweise auch noch deshalb auf Schwierigkeiten stoßen, weil gewisse Mineralbildungsprozesse, z. B. die sogen. „Authigenese", als rein diagenetischer Vorgang aufgefaßt wird,

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

Tabelle 2.
Klassifizierungsschema für Kluftmineralien des M-Typs (nach EXEL, 1991).
Min. = Mineralien; Be-Min. = Beryllium-Mineralien; REE-Min = Mineralien mit Seltenen Erdelementen (Rare Earth Elements); TiO_2-Mod. = Titandioxid-Modifikationen.

Klasse	Trägergesteine	Charakteristische Mineralien		
		Persistente Min.	Typomorphe Min.	Akzessorische Mineralien
I	Meta-Granite Meta-Pegmatite Meta-Aplite Gneise	Quarz Feldspat: Adular Albit Chlorit Calcit	Apatit (Fluorapatit) Fluorit Hämatit Muskovit Zeolithe, z.B. Stilbit Chabasit	REE-Min., z. B.: Monazit Synchisit Aeschynit-Y Be-Min., z. B.: Milarit Phenakit TiO_2-Mod.: Rutil Anatas Brookit Titanit
II	Metamorphite mit Hornblendegehalt: Amphibolite Meta-Granodiorite Meta-Tonalite Meta-Syenite Eklogite	Quarz Feldspat: Adular Albit Chlorit Calcit	Amianth Epidot Apatit (Fluorapatit) Titanit Scheelit Prehnit Be-Min., z.B. Bavenit Gadolinit Bertrandit Milarit Phenakit Zeolithe, z.B. Stilbit Chabasit Heulandit	Axinit Turmalin Datolith Apophyllit REE-Min., z. B.: Monazit Xenotim Aeschynit-Y Erzmin., z. B.: Bornit Galenit ged. Gold Pyrit
III	Glimmerschiefer Sericit-Gneis "Schiefer-Gneis"	Quarz Feldspat: Adular Albit Chlorit Calcit	Anatas Rutil Brookit Hämatit Be-Mineralien Monazit Scheelit	Apatit Pyrit Siderit
IV	Kalksilikatgest. Ultramafite	Chlorit Calcit	Diopsid Amianth Epidot Andradit Vesuvian Magnetit Ilmenit Perowskit	Apatit Titanit Skapolith
V	Serpentine	Chlorit Antigorit Magnetit	Talk Brucit Magnesit Dolomit Apatit	ged. Kupfer Chromit Nickel-Sulfide Pyroaurit Artinit
VI	Kalk- und Dolomit-Marmore	Calcit Dolomit Quarz	Fluorit Phlogopit	Rutil Turmalin

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

und Kluftmineralisationen im diagenetischen Bildungsmilieu (siehe Punkt 3.) bislang überhaupt kein Thema für Studien über Kluftmineralien waren. Es eröffnet sich diesbezüglich also ein neues Betätigungsfeld für Forschungen mit dem Ziel, Klarheit in den subtilen Übergangsbereich Diagenese–Metamorphose zu bringen.

Eine ähnliche Problematik ergibt sich bei den magmatischen Gesteinen. Auch bei ihnen ist natürlich ein Übergangsbereich zur Metamorphose gegeben. In jedem Fall müssen aber die insbesondere in andesitischen und rhyolithischen Vulkaniten auftretenden Kluftmineralisationen (meist aus Chloritmineralien, Quarz und Zeolithen bestehend) bislang zum N-Typus gerechnet werden, da ihre Trägergesteine üblicherweise nicht als Meta-Vulkanite angesehen werden, obschon sie nicht selten Anzeichen von Umwandlungsvorgängen aufweisen. Letztere werden gewöhnlich mit den Begriffen „Autohydratation", „Hydro-Metasomatose" oder „Zeolithisierung" beschrieben und auf hydrothermale Prozesse zurückgeführt, nicht jedoch als Ergebnis einer Metamorphose i.e.S. verstanden (vgl. Punkt 4.)

6. Klassifikation

Es wurde schon unter Punkt 5. erläutert, woraus sich die Typengliederung und Klassifikation der gegenständlichen Mineralisationen ableiten läßt, so daß auf die entsprechenden Argumente und Vorgangsweisen nicht weiter eingegangen zu werden braucht.

Zur Klasseneinteilung im allgemeinen sei darauf hingewiesen, daß sie anhand aller verfügbarer Daten über den Mineralbestand der Paragenesen und aufgrund von Daten über ihre Trägergesteine erstellt wurde und daher als repräsentativ für alle weltweit bekannten Mineralisationen, von denen hier die Rede ist, gelten kann. Es soll auch noch betont werden, daß in der Kategorie „Charakteristische Mineralien" (sie sind in „persistente", „typomorphe" und „akzessorische" Mineralien eingeteilt worden; siehe hierzu Erläuterungen bei EXEL, 1991) absichtlich nicht durch den Verwitterungskreislauf bedingte Mineralbildungen berücksichtigt sind.

6.1. Der M–Typus und seine Klassen

Der M-Typus umfaßt alle in metamorphen Gesteinen vorkommenden Kluftmineralisationen, die sich aus „leeren Thermen" und aus der „Lateralsekretion" ableiten lassen (vgl. 2. und 7.). Ein entsprechendes Klassifikationsschema wurde bereits von EXEL (1991) publiziert, ist aber der Vollständigkeit halber hier nochmals wiedergegeben (siehe Tab. 2). Dem seien einige Bemerkungen hinzugefügt, welche in der genannten Arbeit nicht zur Sprache kamen. So ist in diesem Schema zu berücksichtigen, daß dem Metamorphosegrad und der Metamorphoseart, dem die Trägergesteine ausgesetzt waren, kaum Rechnung getragen werden konnte. Dies gilt vor allem für die 6. Klasse (Kalk- und Dolomit-

Tabelle 3.
Klassifizierungsschema für Kluftmineralien des N-Typs.
1) = nahezu alle Arten.

Klasse	Trägergesteine	Charakteristische Mineralien		
		Persistente Min.	Typomorphe Min.	Akzessorische Mineralien
I	Kalke Dolomite Kalkmergel	Illit Calcit Dolomit Aragonit Pyrit Markasit	Baryt Coelestin Schwefel Gips Anhydrit	Mangan-Min.,z.B.:Pyrolusit Psilomelan Coronadit Quarz Opal Feldspat Galenit Wurtzit Pyrrhotin
II	Sandsteine Argillite	Glimmer: Illit Muskovit Chlorit Quarz Albit	Talk Baryt	Zeolithe, z.B. Analcim Uran-Min. mit (UO_2)
III	"Basalte" Andesite Trachyte Phonolithe	Glimmer: Chlorit Illit Zeolithe 1) Quarz Chalcedon Calcit	Pumpellyit Datolith Prehnit Apophyllit Klinozoisit	Baryt Coelestin Chalkopyrit Pyrit

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

marmore), die Karbonatgesteine umfaßt, welche von der Anchizone bis in die Katazone reichen. Auch konnten kontaktmetamorphe Gesteine, etwa Skarne, nicht eigens angeführt werden.

Die praktische Anwendung dieses Schemas wurde in über hundert Versuchen erprobt, welche der Publikation desselben vorausgingen. Die Versuche erfolgten zum Teil aufgrund von Beobachtungen im Gelände, teils anhand von Geländenotizen und teils nur aufgrund der Vorlage von aus Klüften stammenden Mineralparagenesen. Insgesamt zeigte sich, daß sich das Schema sehr gut bewährt und bei der Klassenzuordnung nur gelegentlich Fehlinterpretationen vorkommen.

6.2. Der N-Typus und seine Klassen

Mineralisationen des N-Typs sind an nicht metamorphe Gesteine gebunden. Sie treten daher sowohl in Sedimenten als auch in Magmatiten (insbesondere in Vulkaniten) auf. Ihre Bildung findet also in verschiedenen geochemischen Milieus statt, was sich im Erscheinungsbild der Paragenesen und auch im Mineralbestand deutlich zeigt.

Aufgrund der Beziehung Charakteristische Mineralien (Paragenesen) – Kluftträgergestein, kann der N-Typus in drei Klassen unterteilt werden (siehe Tab. 3).

Für die Sedimentgesteine ergaben sich zwei Klassen von Kluftträgergesteinen: Die Klasse I umfaßt Kalke, Dolomite und Kalkmergel, die Klasse II Sandsteine und Tone (Argillite). Kluftmineralisationen des N-Typs, Klasse I und II, sind weltweit überaus häufig verbreitet.

Kluftmineralisationen in Magmatiten (Vulkaniten), deren Entstehung unter Punkt 3. und 7. behandelt ist, wurden zur III. Klasse des N-Typs zusammengefaßt. Sie erscheinen mit typischen Paragenesen oft in Blasenräumen, den sogen. Geoden, von andesitischen, basaltischen und rhyolithischen Vulkaniten und sind weltweit von zahlreichen Lokalitäten bekannt, z.B. in den Dekkan-Basalten Indiens (Poona), von Mexico, Idar-Oberstein/Deutschland, usw. Ein bisher selten beachtetes Faktum ist aber die Tatsache, daß im Bereich der erwähnten Vorkommen nicht nur die Geoden sondern auch die bereichsweise vorhandenen Klüfte und Spalten gelegentlich mineralisiert sind, wobei dieselben Paragenesen auftreten – diese Paragenesen also auch zu den Kluftmineralisationen gerechnet werden müssen. Beispiele solcher Kluftmineralisationen sind hinreichend bekannt, etwa von Pula auf Sardinien (DE MICHELE, 1974), von Las Vigas/Mexico (LIEBER & FRENZEL, 1990), um nur einige wenige zu nennen.

Zu den charakteristischen Mineralien dieser Klasse zählen vor allem nahezu alle Arten von Zeolithen, insbesondere aber Natrolith, Chabasit, Thomsonit, Mordenit, Heulandit, Stilbit, Phillipsit, Gismondin und Laumontit. Darüber hinaus treten hauptsächlich Analcim, Quarz (Amethyst) und Calcit, Apophyllit, Datolith, Pumpellyit und Klinozoisit auf. Nicht selten erscheinen viele der genannten Mineralien in bemerkenswert schönen Kristallen.

7. Genetische Deutung

In Anbetracht einer Neudefinition der gegenständlichen Mineralisationen war es notwendig, sich auch mit der Frage nach ihrer Entstehung eingehend zu befassen. Dabei zeigte sich (vgl. ausführliche Darstellungen unter 2., 3. und 4.), daß man aufgrund der herrschenden Lehrmeinung für unsere in Typen und Klassen gegliederten Kluftmineralisationen drei verschiedene Bildungsabläufe annehmen müßte. Davon beruhen zwei auf hydrothermalen Aktivitäten, wobei einerseits die Einwirkung „leerer Thermen" auf das Nebengestein im Zuge metamorpher Vorgänge, und andererseits hydrometasomatische Vorgänge im Bereich von Geothermalsystemen eine Rolle spielen. Der dritte Bildungsablauf sollte im Zuge der Diagenese erfolgen.

Abgesehen davon, daß auf diese Weise die drei Bildungsmilieus, in denen die Mineralisationen vorkommen, berücksichtigt werden, muß darauf hingewiesen werden, daß diese Auffassungen zum Teil aber nur auf Annahmen beruhen. So etwa die Voraussetzung „leerer Thermen", deren Herkunft nach wie vor ungewiß ist (vgl. 2) oder hydrothermaler Aktivitäten bzw. hydro-metasomatischer Vorgänge im Bereich von Geothermalsystemen.

Andererseits gibt es aber auch einige wesentliche Fakten, die nicht ohne weiteres bezweifelt werden können und zwar:

a) Alle hier besprochenen Mineralisationen gehen letztlich aus wässerigen Lösungen hervor.
b) Da der Chemismus der Mineralisationen stets vom Nebengestein kontrolliert ist, erfolgt die Anreicherung der wässerigen Lösungen offensichtlich mit Stoffen aus dem Nebengestein oder Nebengesteinsverband; ein weiter Antransport von Stoffen kann generell ausgeschlossen werden.
c) Die Mineralausscheidung aus den gesättigten oder übersättigten wässerigen Lösungen findet im Rahmen von P/T-Werten statt, welche maximal 7 kb/640°C erreichen. Die Sukzessionen können sowohl bei progressiven als auch bei retrograden Bedingungen erfolgen.

Dieser Sachverhalt liefert m.E. genügend Anhaltspunkte, die Entstehung der gegenständlichen Mineralisationen anders und einfacher als bisher zu erklären. Man könnte sie nämlich als in-situ-Bildungen ansehen, die aus einem multivariaten Reaktionssystem mit den Faktoren Wasser, Nebengestein, Druck und Temperatur, hervorgehen (vgl. 7.1.).

Die Möglichkeit, einen derartigen Bildungsmechanismus anzunehmen, ergibt sich vor allem aus der sehr großen Wahrscheinlichkeit, daß die Herkunft der wässerigen Lösungen, die früher abgesehen von den Vorkommen in Sedimentgesteinen durch den Anstrom „leerer Thermen" fraglicher Herkunft und durch andere ebenso fragliche hydrothermale Vorgänge erklärt wurde, lithogen ist.

Diese Interpretation bietet sich vor allem deshalb an, weil ja kaum Zweifel darüber bestehen, daß – und es muß dies betont werden – die Stoffe, mit denen sich diese wässerigen Lösungen anreichern, aus dem Nebengestein stammen, und darüberhinaus die Anwesenheit von Wasser im Nebengestein oder Trägergesteinsverband generell vorausgesetzt werden kann. Es wäre bei dieser Hypothese die Fragestellung nach der Herkunft der „leeren Thermen" (vgl. 2.) überflüssig, und bei gewissen Mineralisationen (vgl. 4.) die Voraussetzung hydrothermaler Aktivitäten oder von Hydrothermen nicht unbedingt notwendig.

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

7.1. „Hydro-lithogene" Mineralisationen

Durch die folgenden, zum Teil durch Fakten belegten Gedankengänge wird die Möglichkeit angedeutet, daß die Entstehung der gegenständlichen Mineralisationen aller Wahrscheinlichkeit nach stets demselben Mechanismus folgt. Bevor aber nun auf die einzelnen Bildungsfaktoren eingegangen wird, sei darauf hingewiesen, weshalb hier von „hydro-lithogenen" Mineralisationen die Rede ist.

Dieser Ausdruck, der keineswegs als endgültige Bezeichnung angesehen werden muß, nimmt auf die Herkunft der Stoffe Bezug, aus denen sich diese Mineralisationen bilden, also einerseits auf das Wasser und andererseits auf die darin gelösten für die spätere Kristallisation notwendigen Stoffe, die in der vorliegenden Interpretation beide als aus dem Nebengestein stammend betrachtet werden. Der Terminus „hydro-lithogene" Mineralisationen wurde nicht zuletzt auch deshalb gewählt, weil er in Kontrast zu „hydrothermal" steht (eine Entstehungsweise, die hier nicht in Betracht gezogen wird) und ferner, um deutlich zwischen anderen Mineralisationen zu unterscheiden, die mitunter auch in Klüften und anderen Hohlräumen auftreten. Gemeint sind damit etwa Vererzungen i.e.S., Mineralbildungen hydrothermaler bis pneumatolithischer Natur oder pegmatitische Mineralisationen, also solche, deren Stoffherkunft zweifelsohne als allothigen, d.h. von weit her erfolgt angesehen werden muß, und die auch unter ganz anderen Bedingungen entstanden sind. Solche Mineralisationen können aber durchaus von Prozessen erfaßt werden, die zu ihrer Überprägung mit hydro-lithogenen Mineralisationen führt. Diese Prozesse sowie die daran beteiligten Faktoren seien nun angesprochen:

Nebengestein

Da der Chemismus der „hydro-lithogenen" Mineralisationen, wie schon oft erwähnt, stets von der chemischen Zusammensetzung des Nebengesteins kontrolliert ist, die Inhaltsstoffe der Mineralien also aus dem Nebengestein stammen, muß ihm für die Bildung der in Frage stehenden Mineralisationen grundlegende Bedeutung zukommen. Das Nebengestein, genauer, die Mineralien des Nebengesteins oder des Nebengesteinsverbandes von Klüften oder anderen Hohlräumen, müssen nämlich als das eigentliche Ausgangsmaterial, welches mit Wasser reagiert, bzw. vom Wasser zersetzt und umgewandelt wird, angesehen werden. Die entsprechenden chemischen Reaktionen werden durch steigende P/T-Bedingungen begünstigt und führen schließlich bis zur Sättigung bzw. Übersättigung der wässerigen Lösungen, die sich mit Stoffen aus dem Mineralbestand des Nebengesteins angereichert haben. Dieser in der experimentellen Petrologie als „water – rock interaction" bezeichnete Sachverhalt ist durch zahlreiche Untersuchungen bewiesen, die u.a. zur Erstellung von Geothermometern führten.

Wie in der Natur oft beobachtbar, müssen nicht immer im Nebengestein Auslaugungserscheinungen sichtbar sein, und es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, welche Dimensionen der Begriff „Nebengestein" letztlich umfaßt, zumal viele Lithotypen in Serien vom mm- bis in den über 100m-Bereich alternieren und oft auch rasche, tektonisch bedingte Formationswechsel vorhanden sind.

Generell kann man sagen, daß Kluft- oder andere Hohlraumsysteme entweder nur an einen bestimmten Lithotyp gebunden sind und Paragenesen aufweisen, welche diesem Muttergestein entsprechen, oder aber sich Kluftsysteme, etwa senkrecht zum Streichen, über diverse Lithotypen erstrecken, und dann für diesen gesamten Gesteinsverband charakteristische Paragenesen (evtentuell sogenannte „Mischparagenesen") aufweisen. Es ist dabei einerlei, ob die Mächtigkeit dieses Gesteinsverbandes im cm- oder Meterbereich liegt, oder gar über 100 m erreicht, sodaß zuweilen auch ganze Formationen als Nebengesteinsverband gelten können.

Wasser

Aus den Befunden der überaus zahlreichen Tief- und Tiefstbohrungen, die im Laufe der letzten Jahrzehnte für die Öl- und Gasexploration durchgeführt wurden, geht hervor, daß die Gegenwart von Wasser (gemeint ist hier nicht oberflächennahes Grundwasser) auch in sehr tief liegenden Gesteinsformationen (2–8 km und mehr) immer vorausgesetzt werden kann. Es liegt durchwegs als gespanntes Wasser, zum Teil als Poren- oder Kapillarwasser, oder als Kluftwasser vor. Seine Herkunft kann sowohl intraformational als auch extraformational (Infiltration von Oberflächenwässern, Meereswässern, Thermalwässern) sein, und es ist fallweise auch eine Durchmischung von intra- und extraformationalen Wässern, bzw. von absteigenden (descendenten) und aufsteigenden (ascendenten) oder von sogen. juvenilen mit vadosen Wässern wahrscheinlich, die genaue Herkunft aber nur in seltenen Fällen eindeutig eruierbar. Chemische und physikalische Parameter des Wassers (Eh, pH, usw.) können daher sehr variabel sein.

In jedem Fall reagiert das nie ganz reine H_2O in vielfältiger Weise mit dem Mineralbestand des Nebengesteins, wobei es schon bei geringem Druck, also oberflächennah zu erhöhter Löslichkeit mancher Mineralien und damit zu einer Stoffanreicherung (u.a. mit Na, Cl, CO_2) bzw. auch Ausfällung kommt (sogen. Hydrolyse). Es gilt als sicher, daß die Anreicherung des Wassers mit Stoffen aus dem Nebengestein sowohl durch erhöhten Druck als auch durch erhöhte Temperatur begünstigt und wohl auch beschleunigt wird. Mit zunehmender Tiefenlage tritt jedenfalls eine gravitative Differentiation des Wassers ein, bei welcher sich Stoffinhalt und Dichte erhöhen; auch eine Temperaturzunahme bis hin zu mehreren 100° ist durch den – zwar lokal variablen – geothermischen Tiefengradient gegeben, was zahlreiche Studien über geothermische Energie beweisen (vgl. RONNER, 1980). Für die Herkunft heißer, mit Stoffen angereicherter Wässer im Gestein müssen also nicht a priori juvenile Thermalwässer mit primärem Stoffbestand oder „leere Thermen" (Pseudohydrothermen) angenommen werden, die von Magmenherden ausgehend den Klüften zuströmen, sondern sie können durchaus, wie oben erwähnt, intraformational bzw. auch in den Klüften selbst, also in situ temperiert werden und sich mit Stoffen aus dem Nebengestein anreichern (dafür spricht die Armut an Schwermetallen in den hydro-lithogenen Mineralisationen).

In Bezug auf die Strömungsgeschwindigkeit (sie spielt bei der Reaktion des Wassers mit dem Nebenge-

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

stein eine Rolle), kann davon ausgegangen werden, daß stets Strömungen vorhanden sind, diese aber zumindest in Festgesteinen wahrscheinlich sehr geringe Geschwindigkeiten aufweisen dürften, ja darin mitunter einem quasistationären Zustand nahekommen könnten und zwar vor allem in großen unter hohem Druck stehenden Tiefenbereichen (speziell in Anreicherungszonen, die in etwa mit Erdölfallen vergleichbar sind). Auf diese Weise wäre auch erklärbar, weshalb nicht in allen kluftdurchsetzten Gesteinszonen entsprechende Mineralisationen auftreten. Nur entlang von weitreichenden Spaltensystemen oder an undurchlässigen Horizonten kann Wasser (gewöhnlich bei Druckentlastung) im allgemeinen gut zirkulieren, dabei mitunter auch in großen Mengen auftreten und hohe Strömungsgeschwindigkeiten annehmen.

Zu den hier nur angerissenen Details über die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers (auch sehr tiefer Bereiche) sei auf die Arbeiten von VOIGT (1990) und PINNEKER (1992) verwiesen, in welchen auch zahlreiche weiterführende Literaturhinweise gegeben sind.

Druck

Druck entsteht durch überlagernde Gesteinsformationen (lithostatischer Druck) oder durch tektonische Beanspruchung (etwa bei Faltungsvorgängen) und bewirkt u.a. den gespannten Zustand von Kluft- oder Porenwasser sowie eine Destabilisierung mancher Mineralphasen, was wiederum ihre Löslichkeit in Wasser (Abgabe bestimmter Ionenkomplexe) bzw. ihrer Umwandlung in andere Mineralphasen begünstigt. Als maximale Druckwerte, unter denen sich hydro-lithogene Mineralisationen bildeten, können 7–3 kb angegeben werden (vgl. STALDER et al., 1973; NIEDERMAYR, 1980). Das entspricht einer Mitteldruckmetamorphose bzw. einer Gesteinsüberlagerung von ca. 22.000 m. In vielen Fällen sind aber bedeutend geringere Druckwerte anzunehmen. In anchizonalen Gesteinen bilden sich Kluftquarze beispielsweise schon bei 2–1,5 kb, was einer Gesteinsüberlagerung von etwa 5.500 bis 7.500 m entspricht (vgl. NIEDERMAYR et al., 1984). Noch geringere Druckwerte sind natürlich in unmetamorphen Gesteinen maßgebend.

Temperatur

Ebenso wie der Druck ist die Temperatur einer der wesentlichen Faktoren, der zu Reaktionen zwischen Nebengestein und Wasser führt und der letztlich in Verbindung mit dem Druck für die Mineralsukzessionen verantwortlich ist, bei denen sich Kristalle aus den übersättigten Lösungen abscheiden. In Bezug auf die „hydro-lithogenen" Mineralisationen sei bemerkt, daß Temperatur generell nicht von magmatischen oder hydrothermalen Aktivitäten abgeleitet wird (diesbezüglich mögen evtl. nur einige Sonderfälle die Regel bestätigen), sondern sich durch vertikale Dislokation oder tektonische Beanspruchungen einstellen sollte und sich erwiesenermaßen auch daraus ergeben kann (vgl. geothermische Gradienten). Je nach Verlagerung in tiefere oder höhere Krustenbereiche bzw. tektonische Stockwerke, erfolgt Temperaturzu- oder -abnahme in den betroffenen Gesteinsformationen, wobei der Temperaturgradient bis zur Anatexis ansteigen kann. Auf die Temperatur bezogen, handelt es sich bei den „hydro-lithogenen" Mineralisationen um niedrigst- bis mitteltemperierte Bildungen, die bei progressiven oder retrograden P/T-Bedingungen aus den übersättigten, wässerigen Lösungen auskristallisierten. Die bisher höchsten Bildungstemperaturen von „hydro-lithogenen" Mineralisationen wurden in Metamorphiten der Zentralalpen ermittelt und erreichen etwa 650°C, wobei die Bildungstemperaturen von Quarz, Feldspäten und Carbonaten in den Klüften zwischen 600 bis 400 Grad betragen haben (FRIEDRICHSEN & MORTEANI, 1979). Sehr niedrige Werte (ca. 270°C) weisen Kluftquarze in anchizonalen Serien auf (NIEDERMAYR et al., 1984).

*

Die P/T-Gradienten können sozusagen als Rahmenbedingungen gelten, innerhalb derer das Ausgangsmaterial (Nebengestein und Wasser) reagiert. So gesehen kann, ausgehend von der Diagenese über die Anchi- und Epizone bis in den meso- und katazonalen Metamorphosebereich hinein ein progressiv oder, umgekehrt, ein retrograd verlaufender – mitunter auch wiederholt stattfindender – Mineralum- und -neubildungsprozeß („water – rock interaction") ablaufen, der letzten Endes u.a. zur Bildung von hydro-lithogenen Mineralisationen in Hohlräumen (Klüfte, Geoden, Septarien, usw.) führt. Dementsprechend findet man in Klüften und Hohlräumen von Sedimenten und in nicht metamorphen Magmatiten die am niedrigsten temperierten hydro-lithogenen Mineralisationen, während in Klüften und in kavernösen Partien von epi- und mesozonalen Metamorphiten die entsprechenden, höher temperierten Bildungen vorherrschen.

In diesem Zusammenhang sei ausdrücklich betont, daß trotz des im für die magmatische Abfolge charakteristischen, sogenannten hydrothermal-pneumatolithischen Bereichs liegenden Temperaturgradienten für die hier gegebene genetische Interpretation generell keineswegs hydrothermale Aktivitäten herangezogen werden, weil ja die Herkunft der wässerigen Lösungen sowie der Stoffe, mit denen sie sich anreichern, als in situ vorhanden (aus dem Gesteinsverband stammend) angenommen wird. Diese Annahme wird durch die Tatsache untermauert, daß der Gesamtchemismus der Mineralparagenesen aus Klüften im allgemeinen vom Chemismus des Nebengesteins bzw. des Nebengesteinsverbandes kontrolliert ist, also keine Stoffzufuhr von weit her erfolgt.

Bei Annahme der soeben erläuterten Bildungsvorgänge, die hier ja nur ansatzweise behandelt wurden, erübrigt sich eine Zuordnung der „hydro-lithogenen" Mineralisationen zu bestimmten Bildungsabfolgen, die wie bisher (nicht ganz konsequent) geschehen, der diagenetischen, metamorphen und magmatischen Abfolge zugeschrieben wurden. Es würden damit auch die speziell bei der hydrothermalen Mineralgenese verwendeten Begriffe „Zeolithisierung", „Autometasomatose", „Hydro-Metasomatose", mit denen versucht wurde, Hohlraummineralisationen in Magmatiten und Vulkaniten zu erklären überflüssig, ebenso wie die Ausdrücke „leere Thermen" und „Lateralsekretion".

8. Schlußbetrachtung

Mit dem Ziel, die bisher ungenau definierten, weitgehend erz- und schwermetallfreien, bei niedrigen bis mittleren Temperaturen gebildeten Minerallagerstätten,

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

welche in Klüften auftreten, exakt zu bezeichnen, wurde ein Begriffssystem entwickelt. Dieses resultierte aus einer eigens für diesen Zweck vorgenommenen, umfassenden Studie der betreffenden Mineralisationen, wobei neben einer Durchsicht und kritischen Auswertung der einschlägigen Literatur auch eigene Naturbeobachtungen miteinbezogen wurden. In summa ergaben sich überraschenderweise viele sich widersprechende Daten, aus denen aber u.a. folgende, für eine Begriffsbestimmung grundlegende Erkenntnisse herausgearbeitet werden konnten:

1) Der in der Literatur allgemein verwendete und hauptsächlich auf die Form der Lagerstätten Bezug nehmende Begriff „Kluftmineralisationen" läßt offen, um welche Art von Mineralisationen es sich handelt.
2) Einige dieser Mineralisationen, die sogen. „alpinen" und „alpinotypen" Kluftmineralisationen, waren falsch definiert.
3) Klüfte sind nicht die einzigen Räume, in denen die „Kluftmineralisationen" auftreten. Letztere erscheinen nämlich auch in anderen Hohlraumarten (etwa in kavernösen Gesteinspartien, Miarolen, usw.) und können die Hohlräume ganz oder nur teilweise ausfüllen.
4) Mineralisierte Klüfte sind nicht an bestimmte Gesteine gebunden, sondern kommen in allen möglichen Gesteinsarten vor, also in Sedimenten, Magmatiten und Metamorphiten.
5) Die Mineralisationen sind gewöhnlich jünger als das Trägergestein und sein Mineralbestand. Sie sind zeitlich aber nicht, wie verschiedentlich postuliert, an bestimmte Orogenzyklen oder an bestimmte Metamorphosephasen gebunden.
6) Es gilt als sicher, daß der Chemismus der Mineralisationen vom Chemismus der Trägergesteine kontrolliert ist.
7) Der Mineralbestand und das Erscheinungsbild der Paragenesen ist für die jeweiligen Trägergesteine charakteristisch.
8) Die Mineralisationen gehen aus wässerigen Lösungen hervor, deren Stoffbestand offensichtlich aus dem Nebengestein stammt.
9) Sowohl für die Herkunft der wässerigen Lösungen als auch für das Einsetzen bzw. Wirken bestimmter Druck- und Temperaturgradienten wurden verschiedene Ursachen angenommen (u.a. hydrothermale Vorgänge, metamorphe Vorgänge, diagenetische Prozesse). Es ist aber nicht auszuschließen, daß für die Entstehung der Mineralisationen möglicherweise immer nur ein und derselbe Bildungsvorgang ausschlaggebend ist.
10) Eine Neudefinition bzw. exakte Bezeichnung sollte nicht, wie bisher fallweise geschehen, nach dem evtl. vorherrschenden Mineralbestand oder nach dem vermeintlich wichtigsten Verbreitungsgebiet, sondern nach gemeinsamen, genetisch bedingten Merkmalen vorgenommen werden.

Vor allem aus dem Sachverhalt unter 6) und 7) wurde das vorliegende Begriffssystem entwickelt, womit die zur Diskussion stehenden Mineralisationen auch neu definiert wurden. Wie in der Lagerstättenkunde oft erfolgreich angewandt, wurde eine Einteilung in Typen und Klassen vorgenommen.

Die entsprechenden hier präsentierten Schemata bieten den Vorteil der Übersichtlichkeit. Als Nachteil könnte angesehen werden, daß sich in Anbetracht der vielen möglichen Paragenesen gelegentlich Unsicherheiten bei der Klassenzuordnung ergeben. Weil diese Unsicherheiten auch durch eine zahlenmäßig hohe Erweiterung der Klasseneinteilung nicht gänzlich zu beheben ist, wurde bewußt darauf verzichtet. Dies auch deshalb, weil bei einer erweiterten Klassifizierung zudem die Gefahr bestünde, sich in Details zu verlieren.

Die unter 9) angesprochene Minerogenese ist nicht in allen Details erforscht und beruht daher nach wie vor zum Teil auf Annahmen. Wenn nun trotzdem, wie hier, ein neuer Interpretationsversuch gemacht und von „hydro-lithogenen" Mineralisationen gesprochen wird, so deshalb, weil sich in Bezug auf die gegenständlichen Mineralisationen zeigte, daß die bisher vertretenen Auffassungen zu ihrer Genese zum Teil auf unsicheren Daten beruhen und durchaus nicht frei von Widersprüchen sind. Ersteres gilt natürlich auch für die unter Punkt 7.1. dieser Arbeit erläuterte neue Interpretation, mit der allerdings die Entstehung unserer Mineralisationen gut erklärt werden kann. Wie üblich, sind aber die Auffassungen zur Lagerstättengenese nie unumstritten.

Schließlich sei im Hinblick auf 1) bemerkt, daß dem bisher generell verwendeten, hauptsächlich auf die Art und Form der Lagerstätten Bezug nehmenden Ausdruck „Kluftmineralisationen" nun auch der genetische Terminus „hydro-lithogen" gegenübergestellt wurde.

Dank

Für Anregungen und Diskussionen zum Thema bin ich folgenden Personen zu Dank verpflichtet: den Kollegen Dr. J. HELLERSCHMIDT-ALBER, Dr. O. SCHERMANN, Dr. O. THIELE (alle Geologische Bundesanstalt Wien), Dr. G. NIEDERMAYR (Naturhistorisches Museum Wien), Herrn E.-D. ROTT, Wien.

Literatur

BISCHOFF, J.L. (1969): The Red Sea geothermal deposits: their mineralogy, chemistry and genesis. – In: DEGENS & ROSS (Eds.): Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea, 348–401, New York – Heidelberg – Berlin (Springer).

BONATTI, E. (1975): Metallogenesis at oceanic spreading centers. – Ann. Rev. Earth Plan. Sc., vol. **3**, 401–431.

BRINKMANN, R. (1967): Lehrbuch der allgemeinen Geologie, 3. Band. – Stuttgart (Enke).

BRINKMANN, R. (1972): Lehrbuch der allgemeinen Geologie, 2. Band. – Stuttgart (Enke).

CATELINEAU, M. & NIEVA, D. (1985): The Los Azufres (Mexico) geothermal system. – Contrib. Mineral. Petrol., **91**, 235–244.

CORLISS, J.B., DYMOND, J., GORDON, I. et al. (1979): Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift. – Science, **203**, 1073–1083, Washington.

DE MICHELE, V. (1974): Pula. – In: Guida mineralogica d'Italia, 2. volume, 192 S., Novara (Istituto Geografico De Agostini).

ELDER, J. (1981): Geothermal Systems. – 508 S., London (Academic Press).

EXEL, R. (1991): Ein genetisches Begriffssystem für Minerallagerstätten in Klüften. – Archiv f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., Bd. **13**, 5–15, Wien.

EXNER, Ch. (1957): Erläuterungen zur Geologischen Karte der Umgebung von Gastein. – Wien (Geol. B.-A.).

FRANCHETAU, J., NEEDHAM, H.D., CHOUKROUNE, P. et al. (1978): Découverte par submersible de sulfures polymétalliques massifs sur la dorsale du pacific orientale. – C.R. Acad. Sc. Paris, **287**, Series D, 1365–1368, Paris.

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

FRIEDRICHSEN, H. & MORTEANI, G. (1979): Oxygen and Hydrogen Isotope Studies on Minerals from Alpine fissures and their Gneissic Host Rocks, Western Tauern Window (Austria). – Contrib. Mineral. Petrol., **70**, 149–152.

KOENIGSBERGER, J. (1940): Die Mineralien der Schweizeralpen. Teil II. – Basel (Wepf & Co.).

KOLLER, F., NEUMAYR, R. & NIEDERMAYR, G. (1978): „Alpine Klüfte" im Kristallin der Böhmischen Masse. – Der Aufschluß, **29**, 373–378, Heidelberg.

KUBLER, B. (1967): La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorfisme. – In: Etages tectoniques, Colloque à Neuchatel, 105–122, 12 Abb., Neuchatel.

LEITMEIER, H. (1950): Über die Entstehung der Kluftmineralien in den Hohen Tauern. – Tscherm. Min. Petr. Mitt., **3**, F. 1, 390–413, Wien.

LIEBER, W. & FRENZEL, G. (1990): Die Amethyst-Vorkommen von Las Vigas, Veracruz, Mexico. – Lapis, **15**/6, 21–38, München.

MEIXNER, H. (1981): Alpine Kluftminerale. – Ergänzter Wiederabdruck aus: Fortschr. Min. Beih. **2**, 17–19 (Stuttgart). In: „Der Karinthin", F. **85**, 296–299, Klagenfurt.

MURAWSKI, H. (1963): Geologisches Wörterbuch. – 5. Aufl., Stuttgart (Enke).

NIEDERMAYR, G. (1980): Ostalpine Kluftmineralisationen und ihre Beziehungen zur alpidischen Metamorphose. – Ann. Naturhist. Mus. Wien, **83**, 399–416, Wien.

NIEDERMAYR, G. (1990): Doppelendige Quarze aus dem Bereich Hochstadel – Rosengarten in den östlichen Lienzer Dolomiten, Kärnten. – In: Neue Mineralfunde aus Österreich XXXIX, Carinthia II, **180**/100, 254–255, Klagenfurt.

NIEDERMAYR, G. (1990a): Mineralfolgen in alpinen Klüften der Ostalpen und ihre Bedeutung für den Bau der Alpen. – Mitt. österr. Min. Ges., **135**, 59–60, Wien.

NIEDERMAYR, G. & MULLIS, J. et al. (1984): Zur Anchimetamorphose permo-skythischer Sedimentgesteine im westlichen Drauzug, Kärnten–Osttirol (Österreich). – Geol. Rundschau, **73**/1, 207–221, 4 Abb., 2 Tab., Stuttgart.

NIGGLI, P., KOENIGSBERGER, J. & PARKER, R.L. (1940): Die Mineralien der Schweizeralpen. – 2 Bände, Basel (Wepf & Co.).

PARKER, R.L. (1954): Die Mineralfunde der Schweizer Alpen. – Basel.

PINNEKER, E.V. (1992): Das Wasser in der Litho- und Asthenosphäre. Wechselwirkungen und Geschichte. – 263 S., Berlin – Stuttgart (Bornträger).

RONNER, F. (1980): Geothermische Energie. – In: Der Geologische Aufbau Österreichs, Hrsg.: Geol. B.-A., Wien (Springer).

RYKART, R. (1984): Zum Quarzwachstum in einer zentralalpinen Kluft. – Schweizer Strahler, Vol. **6**, 414–421.

SANDER, B. (1948): Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Erster Teil: Allgemeine Gefügekunde und Arbeiten im Bereich Handstück bis Profil. – 215 S., Wien – Innsbruck (Springer).

SANDER, B. (1950): Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Zweiter Teil: Die Korngefüge. – 409 S., Wien, Innsbruck (Springer).

SCHNEIDERHÖHN, H. (1941): Lehrbuch der Erzlagerstättenkunde. Erster Band. – Jena (Gustav Fischer).

SCHNEIDERHÖHN, H. (1944): Erzlagerstätten. Kurzvorlesungen zur Einführung und Wiederholung. – Jena (Gustav Fischer).

STALDER, H.A., DE QUERVAIN, F., NIGGLI, E. & GRAESER, S. (1973): Die Mineralfunde der Schweiz. – Neubearbeitung des gleichnamigen Werkes von PARKER (1954), Basel (Wepf & Co.).

TUFAR, W., GRUNDLACH, H. & MARCHIG, V. (1985): Ore Paragenesis of Recent Sulfid Formations from the East Pacific Rise. – Monograph Series on Mineral Deposits, **25**, 75–93, (Ed. K. GERMAN), Berlin – Stuttgart (Borntraeger).

VOIGT, H.J. (1990): Hydrogeochemie. Eine Einführung in die Beschaffenheitsentwicklung des Grundwassers. – Berlin usw. (Springer).

WEIBEL, M. (1973): Die Mineralien der Schweiz. – 4. Aufl., Basel – Stuttgart (Birkhäuser Verlag).

WENINGER, H. (1974): Die alpinen Kluftmineralien der österreichischen Ostalpen. – Der Aufschluß, 25. Sonderschrift, 169 S., VFMG Heidelberg.

WILKE, H.-J. (1984): Die Drusenmineralien der westindischen Basalte. – Lapis, **9**/5, 9–27, München.

WINKLER, H.G.F. (1979): Petrogenesis of Metamorphic Rocks. – 5th edition, New York – Heidelberg – Berlin (Springer).

Manuskript bei der Schriftleitung eingelangt am 2. März 1992.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt

Jahr/Year: 1992

Band/Volume: 135

Autor(en)/Author(s): Exel Reinhard

Artikel/Article: Typengliederung und Klassifikation von Minerallagerstätten in Klüften ("Hydro-lithogene" Mineralisationen) 467-479