

MINERALOGIE UND PETROGRAPHIE

Ostalpine Kluftmineralisationen und ihre Beziehungen zur alpidischen MetamorphoseVon G. NIEDERMAYR ¹⁾

(Mit 4 Abbildungen)

Manuskript eingelangt am 6. Feber 1980

Zusammenfassung

Ausgehend von dem aus den Ostalpen bekannten, die alpinen Klüfte betreffenden, Datenmaterial wird untersucht, inwieweit eine Beziehung zwischen dem Mineralinhalt alpiner Klüfte und dem Metamorphosegeschehen der die Klüfte umgebenden Gesteine besteht.

Der Stoffbestand der alpinen Kluftmineralparagenesen läßt sich zwanglos aus dem umgebenden Gesteinsverband herleiten — eine weitreichende Stoffzufuhr ist nicht anzunehmen. Die alpinen Klüfte der Ostalpen können demnach wahrscheinlich in ihrer Gesamtheit als weitgehend geschlossene Systeme betrachtet werden. Die Mineralausscheidung begann unmittelbar im Anschluß an den Höhepunkt der jungalpidischen Metamorphose. Vereinfacht ergeben sich dabei folgende Mineralsukzessionen: (Quarz, Feldspäte, Glimmer, Karbonate)→Epidot→Prehnit→Laumontit→Desmin; diese Abfolgen entsprechen den Gesetzmäßigkeiten einer retrograden Metamorphose. Die alpinen Kluftmineralisationen geben damit über jenen Teil des jungalpidischen Metamorphosegeschehens Auskunft, der mittels petrologischer Untersuchungen der entsprechenden Gesteinsserien nicht zufriedenstellend erfaßt werden kann. Die Mineralbildungen in den Klüften durchlaufen dementsprechend alle Stadien der retrograden Metamorphose, beginnend mit der niedrig temperierten Amphibolitfazies über Grünschieferfazies, Prehnit-Pumpellyitfazies bis zur Zeolithfazies.

Da sich im oberostalpinen Altkristallin die gleichen Zeolithparagenesen finden wie im Pennin, muß angenommen werden, daß beide Einheiten das gleiche Temperatur-Druck-Niveau durchlaufen haben. Die altkristallinen Serien haben dieses aber sicher früher erreicht, als jene des Pennins. Die Mineralabfolgen in den alpinen Klüften der Ostalpen werden somit weitgehend vom Hebungsvorgang des alpinen Schichtstapels geprägt. Sie geben damit aber auch einen guten Einblick in das geologische Geschehen in den Spätphasen der alpinen Gebirgsbildung und der alpidischen Metamorphose.

Summary

Data available on fissure mineralizations in the Eastern Alps are analyzed with regard to a possible link between mineral associations and regional metamorphism.

Mineral contents of fissures are also governed by country rock composition. Thus the Alpine-type fissures very probably represent closed systems and mass transport took

¹⁾ Anschrift des Verfassers: Dr. Gerhard NIEDERMAYR, Naturhistorisches Museum, Mineralogisch-Petrographische Abteilung, Burgring 7, A-1014 Wien. — Österreich.

place from the wallrocks into the fissures. Formation of minerals started shortly after the climax of the late alpidic metamorphic event. The following simplified mineral successions can be observed: (quartz, feldspars, micas, carbonates)→epidote→prehnite→laumontite→stilbite. This succession clearly records the cooling history of the particular rock units. Fissure mineralizations thus contain informations on the metamorphic history of Alpine rocks which is not recorded in the rocks themselves. Mineral successions in fissures correspond to retrograde metamorphism beginning in the lower amphibolite facies and evolving through the greenschist and prehnite-pumpellyite facies down to the zeolite facies.

The Upper Austro-alpine Altkristallin (= old crystalline basement) and the Pennin contain identical zeolite paragenesis. Consequently, these two major units of the Alps must have experienced very similar cooling histories but at different times. The mineral successions in alpine fissures thus record the uplifting event and give some insight into the late geological history of the Alps.

Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es, das vorhandene Datenmaterial über die ostalpinen Klufftmineralisationen zusammenzufassen und vor allem zu untersuchen, inwieweit eine Beziehung zwischen alpinen Klüften und deren Mineralinhalt und dem Metamorphosegeschehen der diese Klüfte beinhaltenden Gesteinsserien herzustellen ist. Das von verschiedenen Autoren in den letzten Jahren mitgeteilte Datenmaterial aus Klufftmineralisationen des westlichen Tauernfensters, speziell die Isotopendaten von Klufftquarzen und -karbonaten, tragen wesentlich zum Verständnis der ostalpinen Klufftbildung bei.

Der Verfasser dieser Zeilen hat sich seit Jahren teils im Rahmen der am Naturhistorischen Museum in Wien und in den entsprechenden Veranstaltungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft gepflegten Öffentlichkeitsarbeit mit Problemen der alpinen Klufftmineralisationen auseinandergesetzt und teils im Zuge von Forschungsvorhaben des Museums eine Reihe dieser Mineralvorkommen bearbeitet. Das in der Museumssammlung vorhandene sehr umfangreiche Belegmaterial ostalpiner Mineralfundstellen hat darüber hinaus ebenfalls wertvolle Hinweise erbracht. Dabei waren grundsätzlich zwei Feststellungen zu treffen:

a) Der Mineralinhalt einer Klufft ist vom Chemismus des Nebengesteins abhängig.

b) Die Abfolge der verschiedenen Mineralphasen in den Klüften ist im wesentlichen gleich, d. h. die Mineralsukzession ist nicht von der Zusammensetzung des Nebengesteins abhängig.

Bildung und Stoffbestand der ostalpinen Klüfte

Die folgenden Ausführungen sollen nur sehr cursorisch einen Überblick über jene Parameter geben, die für die alpinen Klufftmineralisationen und deren genetische Interpretation wesentlich sind. Eine Übersicht über die verschiedenen Metamorphosephasen, deren Nachweisbarkeit und Auswirkungen auf

das ostalpine Gebirge geben die Metamorphosekarte der Alpen und die dazu erschienenen Erläuterungen (ostalpinen Anteil bearbeitet von FRANK & al. 1978).

Alpine Klüfte sind mineralbesetzte Hohlräume im Gebirgskörper, „die im allgemeinen ungefähr senkrecht zur Textur des Gesteins verlaufen“ (STALDER & al. 1973, S. 1), doch ist dies nicht unbedingt Voraussetzung und hängt in erster Linie vom Vorhandensein von Inhomogenitäten und vom lokal wirksamen Streßfeld ab. Die Gesamtmenge der in einer Kluft enthaltenen Mineralien ist sehr unterschiedlich, ebenso der relative Anteil des freien Hohlraumes darin. Diese Feststellung ist sehr wesentlich, da es nicht einzusehen ist, daß eine Kluft, die vollständig von einem oder mehreren Kluftmineralien ausgefüllt ist, etwa nicht zu den alpinen Klüften zu zählen wäre, wie dies im Schrifttum verschiedentlich angedeutet worden ist. Dies betrifft vor allem die in den Ostalpen recht häufigen Quarzgänge und speziell den Sonderfall der beryllführenden Quarzgänge. Der Beryll, meist in Form des mehr oder weniger intensiv blau gefärbten Aquamarins, ist in der Regel auf dem die Quarzgänge begrenzenden Nebengestein aufgewachsen, reicht ansonsten vollflächig entwickelt in den ehemaligen Kluflthohlraum hinein und wird vom offensichtlich später ausgeschiedenen Quarz vollkommen umschlossen. Der Quarzgang selbst kann aber unter Umständen einige Meter weiter — meist am Kontakt zum Nebengestein oder im Quarz selbst — Hohlräume aufweisen, die dann typische Kluftmineralien wie Adular, Calcit und Chlorit und auch Quarzkristalle führen können. Der Beryll ist somit hier als Erstausscheidung derartiger Mineralisationen zu betrachten. Beryll ist aber ein typisches Mineral der pegmatitisch-pneumatolytischen Phase. Bedenkt man, daß die maximalen Temperaturen der alpidischen Metamorphose im Tauernfenster bereichsweise 600° C und teilweise auch etwas mehr erreicht haben, so ist der Beryll in den alpinen Quarzgängen wohl als ein Produkt einer in manchen Klüften wirksamen pegmatitisch-pneumatolytischen Phase zu betrachten. Die Bildung der Hohlräume selbst erfolgte wohl im Zuge der Aufwölbung des Alpenkörpers, bedingt durch Druckentlastung und isostatischen Ausgleich, im Anschluß an den alpinen Deckenaufbau, was zu einem Aufreißen der Klüfte führte. Die Klüfte füllten sich mit einer heißen, wässrigen Salzlösung, die zum Teil einen hohen Anteil an CO₂ enthielt. Diese Lösungen traten mit dem Nebengestein in Wechselwirkung und führten häufig zu einer Zersetzung und Auslaugung desselben im Bereich einer Kluft. Mit der Zeit, d. h. bei langsam sinkender Temperatur und sinkendem Druck, begann sich dieser Vorgang umzukehren und aus den gesättigten Lösungen entstanden neue Mineralien. Die Bildungstemperaturen der alpinen Kluftmineralisation sind nach HÖRMANN & MORTEANI (1972) und LUCKSCHEITER & MORTEANI (1977) im westlichen Tauernfenster mit etwa 600—400° C für Kluftkarbonate und -quarze anzunehmen, bei Drucken von 6 bis 3 kb, wobei sehr signifikante regionale Unterschiede festgestellt worden sind, die mit den aus den Mineralgleichgewichten der Gesteine ermittelten Angaben gute Übereinstimmung zeigen. Bei hohem Metamorphosegrad in den Gesteinen zeigen auch die Kluftquarze entsprechend hohe Bildungstemperaturen und

-drucke, in niedriger metamorphen Arealen sind auch die Bildungsbedingungen für die frühen Ausscheidungen in den Klüften zu niedrigeren Werten hin verschoben.

Tabelle 1. Beziehungen zwischen Nebengestein und Kluftmineralisation in den Ostalpen

Nebengesteine	Durchläufer- mineralien	charakteristische Mineralien
Zentralgneise	Adular Albit (z. T. Periklin) Calcit Chlorit Quarz	Apatit Fluorit Hämatit Monazit Muskovit TiO ₂ -Modifikationen Titanit Zeolithe
Tonalite und hornblende- führende Gesteine (Amphibolite etc.)	Adular Albit (häufig Periklin) Calcit Chlorit Quarz	Amianth Apatit Epidot Prehnit Scheelit Titanit Zeolithe
Schiefergneise, Glimmerschiefer	Adular Albit (z. T. Periklin) Calcit Chlorit Quarz	Berylliummineralien Biotit Monazit Scheelit TiO ₂ -Modifikationen
Kalksilikate, Ultramafite		Epidot Diopsid Granat
Karbonatgesteine	Calcit Quarz	Dolomit Fe-Karbonate

Tab. 1 gibt eine Aufstellung der wichtigsten Kluftmineralien in Bezug auf deren unmittelbare Nebengesteine. Die Durchläufermineralien Quarz, Adular, Calcit und Chlorit sind in fast allen Mineralisationen unabhängig vom Chemismus der Nebengesteine festzustellen. Bestimmte Leitmineralien und Paragenesen sind aber für bestimmte Gesteine typisch.

Es ist früher immer behauptet worden, daß für die alpine Kluftmineralisation unbedingt eine weitreichende Substanzzufuhr, z. B. aus größerer Tiefe, angenommen werden müsse (WEINSCHENK 1896, LEITMEIER 1942, HABERLANDT & SCHIENER 1951). Besonders die Ergebnisse der jüngsten Zeit zeigen aber immer deutlicher, daß man für diese Mineralisationen durchaus Stoffwanderungen im Zuge der alpidischen Metamorphose verantwortlich machen kann und somit der kluftbildende und mineralisierende Prozeß zunächst auf relativ engem Raum abgelaufen ist. Eine gute Vorstellung von den Stoff-

umsetzungen, die sich im Zuge der alpinen Kluftmineralbildung vollzogen haben, gibt eine Zusammenstellung von STALDER & al. (1973) aus den Schweizer Alpen. Wie aus der Betrachtung der Dichteunterschiede des frischen, unzersetzten Gesteins zum kavernösen Gestein im Bereich der Klüfte selbst ersichtlich wird, betragen die Stoffverschiebungen bis zu 20 Gew.-% des frischen Nebengesteins einer Kluft (l. c. S. 2). Bedenkt man, daß es in den kavernösen, ausgelaugten Partien des Gesteins im Zuge der mineralisierenden Vorgänge ebenfalls zu Neubildungen kommen kann (etwa Bildung von Epidot und Chlorit), was bei der Dichtebestimmung nicht berücksichtigt werden konnte, mag der Gesamtstoffumsatz gelegentlich noch höher zu veranschlagen sein. Ähnliches gilt wohl auch für die Klüfte der Ostalpen, da auch hier die mineralisierten Zonen meist von mehr oder weniger intensiv ausgelaugten Gesteinspartien umgeben sind. Zu bedenken ist in diesem Zusammenhang, daß eine Kluft und ihre Nebengesteine als räumliches Gebilde gesehen werden müssen, in der Regel aber nur ein flächenhafter Einblick möglich ist. Damit ist aber ein bestimmtes Aufschlußbild allein nicht unbedingt als repräsentativ für eine Mineralisation anzusehen. Erst die Summe aller Beobachtungen gestattet es uns, Überlegungen hinsichtlich der Bildung einer bestimmten Kluft anzustellen.

Bei all diesen Betrachtungen entscheidend ist die Frage nach der Herkunft der leichtflüchtigen Bestandteile der Kluftlösungen, vor allem von H_2O und CO_2 . CO_2 wird — und das scheinen entsprechende Untersuchungen an Kluftkarbonaten und -quarzen des westlichen Tauernfensters zu untermauern — einerseits aus der Dekarbonisierung der Gesteine im Zuge der alpidischen Metamorphose hergeleitet werden können, andererseits aber auch auf die Oxydation von graphitischer Substanz zurückzuführen sein (LAUSCH, MÖLLER & MORTEANI 1974, HOEFS & MORTEANI 1979). Auch H_2O wird im Zuge der progressiven Metamorphose aus den Nebengesteinen der Klüfte freigesetzt werden.

Aus dem Vorstehenden ist abzuleiten, daß eine Kluft bzw. jedes Kluftsystem für sich mit dem umgebenden Gesteinsbereich ein weitgehend geschlossenes System darstellt und damit ähnlich auf die Druck- und Temperaturänderungen während der alpinen Metamorphose reagieren müßte wie die umliegenden Gesteine. Damit müßte es aber möglich sein, die für die Bildung der Gesteine maßgeblichen petrologischen Parameter auch auf die alpine Kluftmineralisation anwenden zu können.

Ausgewählte Beispiele alpiner Kluftminerale der Ostalpen

An die 150 verschiedene Mineralien wurden bisher aus alpinen Klüften und verwandten Paragenesen in den Ostalpen beschrieben. Die alpinen Kluftmineralparagenesen sind daher meist komplex zusammengesetzt. Die Beziehungen dieser Kluftmineralisationen zum alpidischen Geschehen soll nun an Hand einiger ausgewählter Beispiele erörtert werden. Die im einzelnen gegebenen Verbreitungskarten wurden mit Hilfe von vorhandenen Zusammen-

Tabelle 2. Beispiele Zeolithe und Prehnit führender Mineralabfolgen in Klüften des westlichen Tauernfensters. Um eine genauere Lokalisierung zu ermöglichen, ist der Fundort der angeführten Paragenesen zusätzlich vermerkt

Zillertaler Alpen

Quarz→Adular→Heulandit→Desmin (Schlegeis)
 Hornblende→Adular→Prehnit→Heulandit→Skolezit (Floiental)
 Adular→Quarz→Muskovit→Desmin (Floiental)
 Periklin→Muskovit→Epidot→Chlorit→Prehnit→Heulandit→Laumontit
 (Floiental)
 Quarz→Periklin→Adular→Muskovit→Apatit→Prehnit und Chlorit→Laumontit
 (Floiental)
 Albit→Adular→Calcit→Prehnit→Apatit→Apophyllit (Floiental)

Krimmler Achental

Heulandit→Skolezit→Desmin (Hütteltal Kopf)

Sulzbachtäler

Adular (korrod.)→Epidot→Chlorit→Datolith→Prehnit→Desmin (Bleidächer)
 Quarz→Adular→Desmin→Skolezit→Chlorit (Krausenarkopf)
 Periklin→Quarz→Adular→Klinochlor→Skolezit (Goßkopf)
 Adular→Chlorit→Prehnit→Desmin (Goßkopf)
 Quarz→Adular→Albit→Epidot→Fluorit→Bavenit→Prehnit (Sattelkar)
 Desmin→Chabasit (Sattelkar)
 Adular→Milarit→Pyrit→Chlorit und Muskovit (Waschkopf-West)
 Adular→Epidot→Muskovit→Chlorit→Bavenit→Laumontit (Waschkopf-Ost)
 Adular→Desmin (Notklamm)
 Adular→Quarz→Apatit→Milarit→Chlorit→Bavenit (Beryller)

Habachtal

Adular→Chlorit→Laumontit (Teufelsmühle)
 Prehnit→Apophyllit→Laumontit („Prehnitinsel“)
 Calcit→Prehnit→Desmin→Apophyllit („Prehnitinsel“)
 Adular→Fluorit→Prehnit→Apophyllit→Desmin („Prehnitinsel“)
 Adular (korrod.)→Prehnit I→Prehnit II→Skolezit („Prehnitinsel“)
 Quarz (korrod.)→Adular→Titanit→Calcit→Datolith→Laumontit—Apophyllit—
 Chlorit (Gr. Lienzinger)
 Calcit→Fluorit→Prehnit→Laumontit („Prehnitinsel“)
 Periklin→Apatit→Chlorit→Laumontit („Prehnitinsel“)
 Periklin→Epidot→Fluorit→Prehnit→Chabasit (Seescharte)
 Albit→Epidot→Chlorit→Apatit→Heulandit→Chabasit (Kl. Weidalpe)

Hollersbachtal

Adular→Skolezit→Desmin (Weißeneck)
 Adular→Calcit→Heulandit→Desmin (Weißeneck)
 Periklin→Adular→Chlorit→Laumontit→Skolezit (Bruchgraben)
 Periklin→Prehnit (Senninger Klamm)
 Adular→Chlorit→Laumontit→Desmin→Skolezit (Senninger Klamm)
 Adular→Chlorit→Desmin→Skolezit (Senninger Klamm)
 Adular→Desmin (Senninger Klamm)
 Adular→Heulandit (Senninger Klamm)
 Quarz (korrod.)→Chabasit (Senninger Klamm)

stellungen (GASSER 1913, MEIXNER 1957, ALKER 1959, WENINGER 1974), verschiedenen Detailbeschreibungen und eigenen Beobachtungen erstellt.

Das Schwergewicht der hier dargelegten Untersuchungen liegt dabei in der Erfassung der Mineralsukzession in alpinen Klüften, da schon die ersten Ergebnisse in dieser Richtung zeigten, daß — weitgehend unabhängig vom jeweiligen Nebengestein — bestimmte Mineralabfolgen in den Klüften festzustellen sind (Tab. 2). Die in der Tabelle angegebenen Mineralsukzessionen umfassen nur den Bereich des westlichen Tauernfensters. Im Prinzip ähnliche Ergebnisse zeigen aber auch die entsprechenden Kluftmineralisationen im Ostteil des Tauernfensters. Bezüglich der Metamorphosebedingungen der jeweiligen Gesteine sei hier auf die zusammenfassende Darstellung von FRANK & al. (1978) und die in dieser Arbeit zitierte Literatur verwiesen. Kürzlich haben FRIEDRICHSEN & MORTEANI (1979) an Hand von Sauerstoff-Isotopen-Untersuchungen alpiner Kluftquarze und -biotite im westlichen Tauernfenster Equilibrierungstemperaturen zwischen 640° C bis 450° C festgestellt. Gleichzeitig damit wurde, analog den petrologischen Befunden, eine sukzessive Temperaturabnahme vom Zentralteil des Tauernfensters nach außen hin beobachtet. Kluftmineralbildung und Metamorphose des jeweiligen Nebengesteins erfolgten in Bezug auf die untersuchten Mineralphasen im gleichen Temperaturbereich.

Die in Tab. 2 angeführten Mineralsukzessionen wurden sowohl in Gneisen verschiedenster Zusammensetzung als auch in Amphiboliten festgestellt. Damit ist erwiesen, daß im Gegensatz zum Mineralinhalt der Klüfte — der ja wesentlich vom Chemismus des Nebengesteins abhängt — die Mineralabfolge in der Regel gleich ist. Dies bedeutet, daß die Mineralsukzession einer alpinen Kluft nicht vom Chemismus des Nebengesteins beeinflusst wird, sondern in erster Linie vom Temperatur-Druck-Abfall während der alpidischen Metamorphose abhängt.

Nicht behandelt werden in dieser Arbeit die in Klüften an sich häufigen Feldspäte und Karbonate. Speziell an Hand der Dolomitentmischungen in den Mg-Calciten der Klüfte haben HÖRMANN & MORTEANI (1972) für die Karbonate in den Klüften des westlichen Tauernfensters Bildungstemperaturen von etwa 600—420° C abgeleitet. Diese Daten konnten von LUCKSCHEITER & MORTEANI (1977) durch Untersuchungen an Flüssigkeitseinschlüssen von Kluftquarzen aus dem gleichen Bereich bestätigt werden. Die Bildungstemperaturen für die Hauptkristallisation der alpinen Kluftmineralisationen, d. i. ganz allgemein die substanzmäßig wesentlichste Bildungsphase von Quarz, Feldspäten und Karbonaten, sind damit relativ hoch anzunehmen und müssen etwa zwischen 600—400° C betragen haben. Sie sind damit in der Regel weitgehend mit den für die jeweiligen Bereiche ermittelten Temperaturmaxima der Regionalmetamorphose ident. Die Kristallisation von Quarz, Karbonaten und Feldspäten, die mengenmäßig etwa $\frac{4}{5}$ des Inhalts einer alpinen Kluft ausmachen, wird daher unmittelbar im Anschluß an den Höhepunkt der letzten alpidischen Metamorphosephase erfolgt sein.

a) Berylliummineralien

Berylliummineralien zählen zu den eher seltenen Bildungen in den alpinen Klüften. Auf die Bedeutung des Berylls und seine Stellung in der alpinen Kluftmineralisation wurde aber schon eingangs hingewiesen. Der Beryll ist jedenfalls das weitaus häufigste Berylliummineral und tritt in der Regel in Quarzgängen eingewachsen auf; „Kluftberyll“ sind äußerst selten. Beryll findet sich haupt-

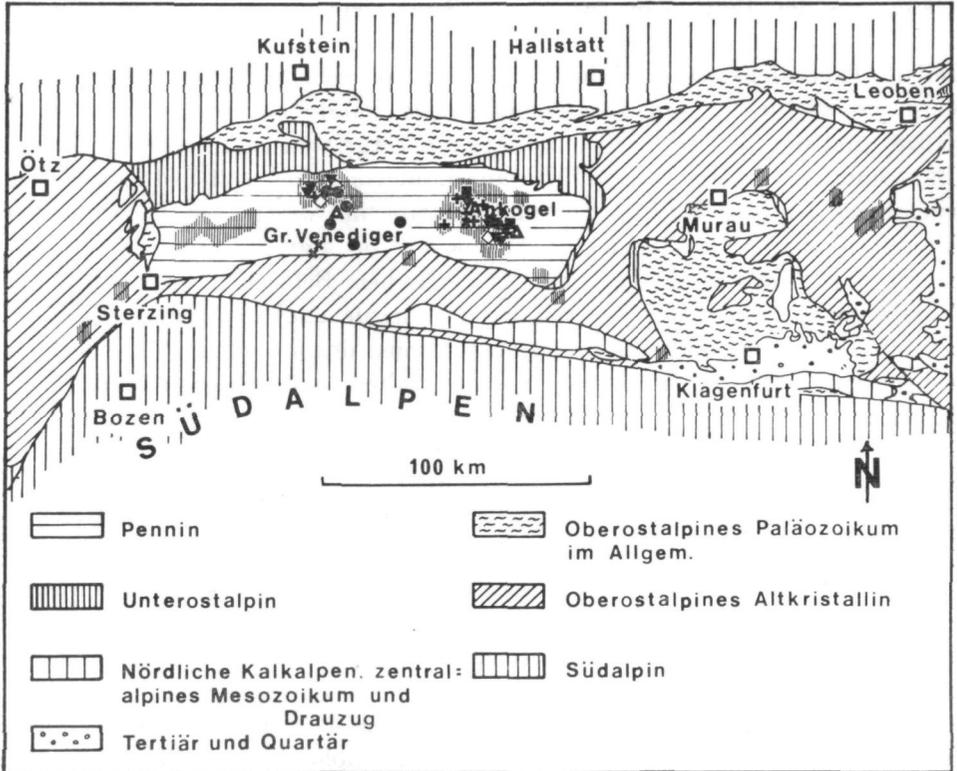


Abb. 1. Beryllium-Mineralien in alpinen Klüften und aus Pegmatitgängen der Ostalpen. \diamond Bavenit, $+$ Bertrandit, \times Euklas, \blacksquare Gadolinit, \bullet Milarit, \blacktriangledown Phenakit. Die Vorkommen von Beryll sind durch eine enge Schraffur angedeutet. Geologie vereinfacht nach BÖGEL & SCHMIDT (1976)

sächlich in den penninischen Gesteinen der Tuxer und Zillertaler Alpen, des Großvenedigers und im Raum Rauris—Gastein. Bemerkenswert ist, daß er im westlichen Tauernfenster allein auftritt, im Bereich des Großvenedigers und östlich davon aber auch von anderen Berylliummineralien begleitet wird (Abb. 1). Es war naheliegend, als Ursache dieses Verteilungsmusters unterschiedliche Bildungsbedingungen, unterschiedlichen Druck und Temperatur anzunehmen. Auch dem pH-Wert der Kluftlösung wird hier entscheidende Bedeutung zukommen, da gerade die Löslichkeiten von einerseits Beryllium und andererseits von Silizium sehr stark milieuhängig sind.

Wie schon erwähnt, ist die Bildung von Beryll in den Klüften sicher sehr früh anzunehmen. Dagegen beweist die Vergesellschaftung von Bavenit und Milarit mit Zeolithen, daß die übrigen Berylliumminerale erst in einem späteren Stadium der retrograden Metamorphose gebildet wurden (NIEDER-MAYR 1979a). Auf Grund petrologischer Befunde ist ein Gefälle in den Metamorphosebedingungen in den westlichen Hohen Tauern erwiesen (RAITH & al. 1978). Dies könnte als Erklärung für die Beobachtung herangezogen werden, daß in den Klüften in den höher metamorphen Bereichen der Zillertaler Alpen nur Beryll, in den etwas niedriger metamorphen Bereichen östlich davon aber auch andere Berylliumminerale festgestellt werden konnten. Es ist daher zu erwarten, daß in den dem Metamorphosegrad der zentralen Zillertaler Alpen entsprechenden tieferliegenden Bereichen des Großvenedigers etwa ebenfalls nur Beryll in Quarzgängen auftritt.

b) Quarz

Aus den Schweizer Alpen ist bekannt, daß zumindest zum Teil auch die Tracht der Quarzkristalle Hinweis auf deren Bildungsbedingungen geben kann. So sind Quarze mit Tessiner Habitus charakteristisch für Bereiche höherer Metamorphose. Die Amethyste der Hohen Tauern, etwa jene der Zillertaler Alpen, die in Form von Zepterquarzen auf Bergkristallen mit Tessiner Habitus aufsitzen, sind sicher wesentlich jünger als diese und zeigen immer normal-rhomboedrischen Habitus bei teils intensiver Skelettbildung. Da derartige Amethyste auf den gesamten penninischen Raum verteilt sind, kann dies sicher nicht als Beweis für regional unterschiedliche Metamorphosebedingungen gewertet werden, wohl aber zeigt dies an, daß sich Temperatur und Druck im Laufe der Mineralausscheidung zu niedrigeren Werten hin verändert haben.

LUCKSCHEITER & MORTEANI (1977) haben die Flüssigkeitseinschlüsse in Kluftquarzen der westlichen Hohen Tauern untersucht und festgestellt, daß der CO_2 -Gehalt der Lösungen im Verlauf der Mineralbildung in den Klüften im allgemeinen kontinuierlich abgenommen hat. Die Bildung der nach Quarz, Feldspäten und Karbonaten auskristallisierten Kluftminerale erfolgte im westlichen Tauernfenster daher in der Regel sicher aus einer CO_2 -armen bis -freien Lösung. Dem CO_2 -Partialdruck kommt aber eine große petrogenetische Bedeutung zu. So wird z. B. die Bildung von Zeolithen aber auch von Prehnit bei hohem CO_2 -Partialdruck unterbunden (COOMBS, D. S., R. J. HORODYSKI & R. S. NAYLOR 1970).

c) Datolith—Prehnit—Apophyllit

Die „Zeolithbegleiter“ Datolith, Prehnit und Apophyllit sind aus einigen alpinen Vorkommen bekannt (Abb. 2) und besonders aus dem Bereich des Großvenedigers mehrfach beschrieben worden (z. B. „Prehnitinsel“ im Habachtal, LEITMEIER 1951). Die angegebene Reihenfolge entspricht etwa der beob-

achteten Ausscheidungsfolge, wenn zwei oder seltener alle drei Phasen in der gleichen Paragenese auftreten.

Häufigstes Mineral dieser Gruppe ist dabei der Prehnit, der nicht nur in Klüften penninischer Gesteine, sondern auch in Klüften des oberostalpinen Altkristallins mehrfach festzustellen und in der Regel mit Zeolithmineralien vergesellschaftet ist. Nach den experimentellen Befunden von LIU (1971a) ist Prehnit bei Drucken von 1–5 kbar P_{H_2O} zwischen 250° C bis etwa 400° C

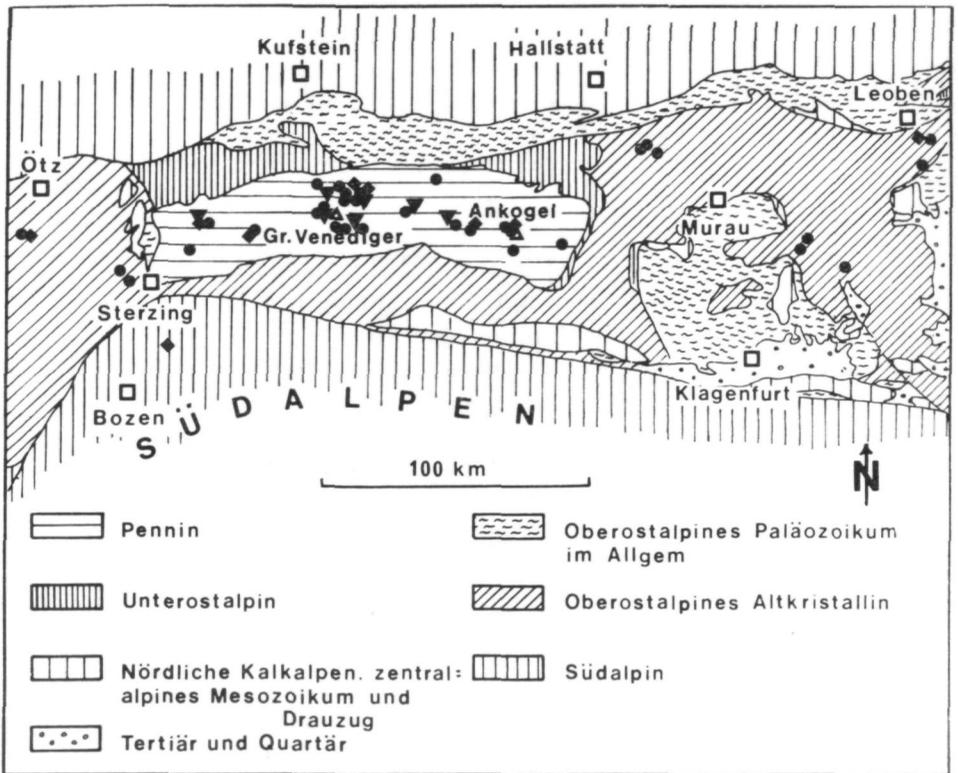


Abb. 2. Verteilung von Datolith, Prehnit und Apophyllit in alpinen Klüften der Ostalpen. ▼ Datolith, ● Prehnit, ◆ Apophyllit. Geologie vereinfacht nach BÖGEL & SCHMIDT (1976)

stabil. Diese Daten gelten für Bedingungen mit geringem CO_2 -Partialdruck und einem Überschuß an H_2O . Beides trifft für die Bereiche, in denen Prehnit in den Ostalpen auftritt, zu. Die Daten von LIU können daher auf diese schon relativ späten und „abgekühlten“ Paragenesen, die Prehnit und Zeolithmineralien führen, angewandt werden (NIEDERMAYR 1979b, NIEDERMAYR & KOLLER 1980).

In den Klüften der karbonatreichen penninischen Bündner Schiefer und den sie begleitenden Ophiolithmassen wurde hingegen bisher kein Prehnit beobachtet.

d) Zeolithe

Zeolithe treten sowohl im Pennin, als auch im oberostalpinen Altkristallin in Klüften auf (Abb. 3). Vor allem durch den Autobahnbau wurden in den letzten Jahren auch im Ostteil der Ostalpen viele Zeolithparagenesen festgestellt (WENINGER 1974). Es ist daher zu erwarten, daß in den übrigen Bereichen des oberostalpinen Altkristallins, die zunächst als mineralogisch eher unergiebig galten, auch in Hinkunft interessante alpine Kluftmineralisationen festzustellen sein werden. Da in der die ostalpinen Kluftmineralisationen behandelnden Literatur kaum verbindliche Mineralsukzessionen angegeben werden, dies aber besonders für Paragenesen mit Prehnit und mehreren Zeolithmineralien sehr wesentlich für eine petrologische Interpretation dieser Bildungen zu sein scheint, wurden die in der Mineraliensammlung des Naturhistorischen Museums in Wien vorhandenen Zeolithe und Prehnit führenden Mineralstufen auf ihre paragenetischen Abfolgen hin näher untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Tab. 2 etwas schematisiert zusammengefaßt. Vereinfacht ergibt sich dabei eine Reihenfolge von (Quarz, Feldspäte, Glimmer, Calcit)→Epidot→Prehnit→Laumontit→Desmin. Diese Abfolge hat große Ähnlichkeiten mit Mineralparagenesen der Zeolith- bzw. Prehnit-Pumpellyitfazies (COOMBS & al. 1959, MIYASHIRO & SHIDO 1970, LIOU 1971b), nur mit dem Unterschied, daß die Mineralsukzession in den alpinen Klüften einer retrograden Druck- und Temperaturänderung entspricht. Ist für eine progressive Metamorphose die Tendenz zur Bildung der jeweils wasserärmeren Phase klar erwiesen, so ist in gleicher Weise — analog den experimentellen Befunden — bei fallender Temperatur (und fallendem Druck) das Gegenteil zu erwarten. Aus Gründen der Entropie wird die jeweils stabile Mineralgesellschaft bei abnehmender Temperatur jene sein, die die größtmögliche H₂O-Führung aufweist und bei sehr niedrigen Metamorphosebedingungen hauptsächlich aus Tonmineralien und wasserreichen Zeolithen besteht.

Analog den für die Mineralparagenesen der Zeolithfazies gültigen Parametern werden die Zeolithmineralisationen der alpinen Klüfte von der Zusammensetzung der Lösung, von Bildungstemperatur und -druck, vom CO₂-Partialdruck und vom Anteil an freier Kieselsäure in der Kluftlösung abhängen. So ist das ein Kieselsäuredefizit aufweisende Zeolithmineral Natrolith nur im an Kieselsäure untersättigten Bildungsmilieu zu erwarten. Dies ist sicher einer der Gründe, warum Natrolith in alpinen Klüften bisher nicht beobachtet werden konnte (früher als Natrolith beschriebene Bildungen haben sich bei Überprüfung immer als Skolezit erwiesen, MEIXNER 1964). Wahrscheinlich ist dafür aber auch die Zusammensetzung der Kluftlösung verantwortlich; die alpinen Zeolithe sind ja, von Harmotom abgesehen, alle zu den Ca-Zeolithen zu stellen. Die Kieselsäure-Aktivität wird auch die Bildung von Skolezit beeinflussen, der auf Grund seines niedrigen H₂O-Gehaltes am Beginn der Zeolithabscheidung auftreten müßte. Tatsächlich ist Skolezit vielfach am Ende der Zeolithbildung festzustellen und tritt häufig zusammen mit Desmin und sogar

Chabasit auf. Aus Zeolithfazies-Gebieten ist er nur aus Bereichen bekannt, die ein Kieselsäuredefizit aufweisen (COOMBS & al. 1959). Man kann daher als Grund für das späte Auftreten von Skolezit in manchen alpinen Kluftparagenesen und das Fehlen von Natrolith in alpinen Klüften eine Verarmung an freier Kieselsäure in der mineralisierenden Kluftlösung annehmen.

Wie bereits erwähnt, kommt dem CO_2 -Partialdruck ebenfalls ein petrologisch bedeutsamer Einfluß auf die Zeolithbildung zu. Aus Zeolithfazies-

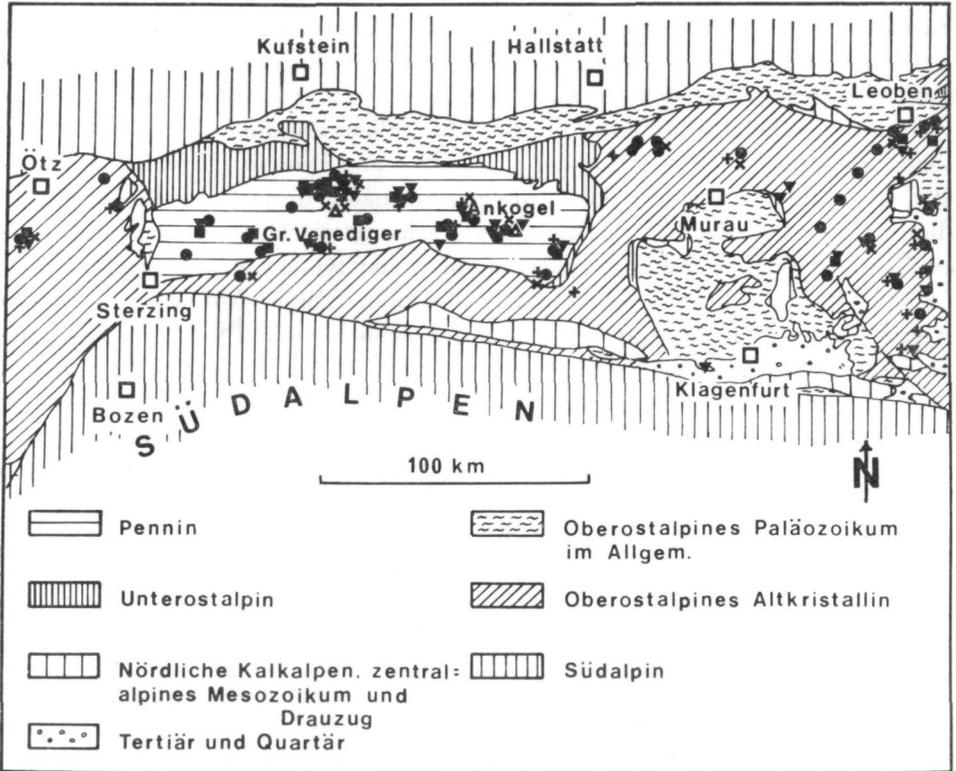


Abb. 3. Zeolithe in alpinen Klüften der Ostalpen. × Chabasit, ● Desmin, + Harmotom und Heulandit, ■ Skolezit, ▼ Thomsonit und Laumontit. Geologie vereinfacht nach BÖGEL & SCHMIDT (1976).

Gebieten ist bekannt, daß ein hoher CO_2 -Partialdruck die Ausbildung von Zeolithmineralparagenesen, ja auch die Bildung von Prehnit in der Prehnit-Pumpellyitfazies-Zone unterbindet (COOMBS, D. S., R. J. HORODYSKI & R. S. NAYLOR 1970). Dies ist sicher der alleinige Grund dafür, daß sowohl Prehnit als auch Zeolithe in den kalkreichen Bündner-Schiefer Serien des Tauernfensters und auch in den sie begleitenden Ophiolithkomplexen bisher nicht nachgewiesen werden konnten. ZEN (1960) hat darauf hingewiesen, daß ein hoher CO_2 -Partialdruck bei entsprechendem Grad der Regionalmetamorphose die Bildung von Paragenesen mit Kaolinit—Calcit oder Pyrophyllit—

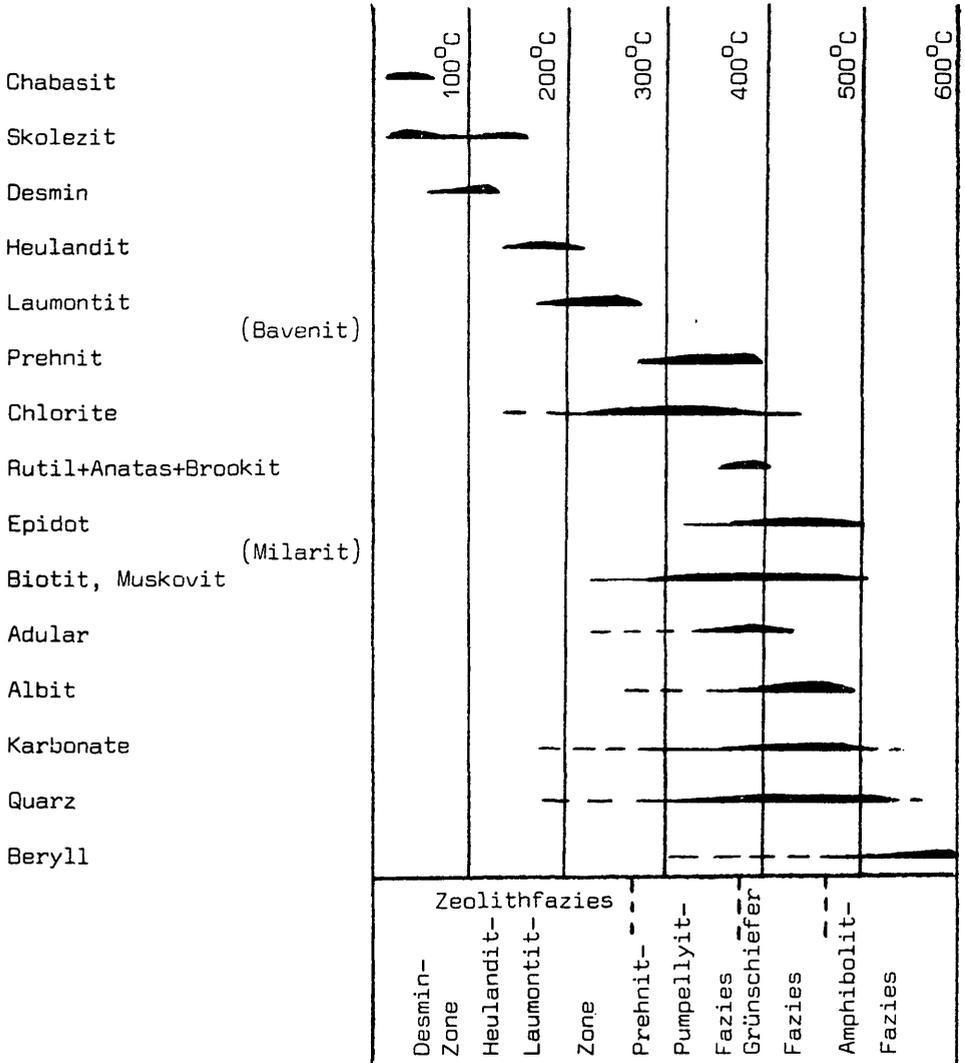
Calcit an Stelle der Ca-Zeolithe Laumontit und Heulandit begünstigt. In den Klüften der Bündner-Schiefer-Serien des Tauernfensters wären demnach an Stelle von Zeolithen vor allem Calcit, Kaolinit und Pyrophyllit zu erwarten.

Weiters ist auffällig, daß Chlorit — ein in alpinen Klüften generell sehr häufiges Mineral — im wesentlichen, wenn mit Zeolithen vergesellschaftet, nur aus Laumontit, eventuell auch noch Heulandit führenden Zeolithparagenesen bekannt ist. In Klüften mit Desmin, Skolezit oder Chabasit konnte der Verfasser Chlorit nie in größeren Mengen feststellen. Dafür werden aber von einheimischen Sammlern immer wieder unansehnliche, tonig-schmierige Kluftletten in solchen Zeolithklüften erwähnt. Tonige, oft auch limonitische, Kluftletten sind allerdings auch in anderen alpinen Klüften nicht selten und nicht nur an Zeolithe führende Spaltensysteme gebunden. Es wäre sehr wichtig, derartige Bildungen näher zu untersuchen. In progressiv metamorph beeinflussten Zeolithfazies-Gebieten Neuseelands oder Japans bildet sich Chlorit im allgemeinen auf Kosten von Mixed-Layer-Mineralien, Smektiten oder Seladonit (MIYASHIRO & SHIDO 1970); es ist daher nicht auszuschließen, daß bei retrograder Metamorphose zumindest z. T. der umgekehrte Prozeß abläuft, und aus Chlorit bzw. aus entsprechenden wässrigen Lösungen Tonmineralien gebildet werden können.

Schlußbetrachtung

In Tab. 3 ist die auf Grund von bekannten Gleichgewichtsreaktionen und indikativen Mineralstabilitäten und eigenen Beobachtungen erstellte Ausscheidungsfolge der alpinen Kluftmineralisationen der Ostalpen vereinfacht dargestellt. Die Zuordnung zu bestimmten „Fazies“-Zonen ist rein hypothetisch, entspricht aber etwa den aus der progressiven Metamorphose ableitbaren Bildungsbedingungen bestimmter Mineralphasen. Konsequenterweise muß aber ein von einem — aus welchen Gründen immer — progressiven Metamorphoseakt geprägter Gesteinsstapel bei Hebungs- und Erosionsvorgängen im Zuge der geologischen Entwicklung von Krustenteilen die gleichen Stadien auch retrograd wieder durchlaufen. TURNER & VERHOOGEN (1960) haben schon darauf hingewiesen, daß der durch metamorphe Vorgänge geprägte Mineralbestand eines Gesteins im allgemeinen als kinetisch irreversibel zu betrachten ist, dies aber in erster Linie vom Vorhandensein bzw. von der Zusammensetzung der fluiden Phase abhängig ist. Es ist daher klar, daß die Mineralphasen der Gesteine auf Änderungen von Temperatur und Druck wesentlich träger reagieren werden als die sich aus Kluftlösungen simultan mit diesem Vorgang bildenden Mineralphasen in den Klüften dieser Gesteine. Dies wird insbesondere auf die späteren Phasen retrograder Metamorphoseereignisse zutreffen. So sind zwar progressiv ausschließlich zeolithfaziell geprägte Krustenteile in Orogengebieten hinreichend bekannt (COOMBS & al. 1959, ERNST & al. 1970, MIYASHIRO 1973), retrograd zeolithfazielle Mineralabfolgen sind aber bisher im wesentlichen nur aus Hydrothermalsystemen

Tabelle 3. Vereinfachte Ausscheidungsfolge der alpinen Kluftminerale in den Ostalpen



"Fazies"-Zonen in den Klüften

beschrieben worden (MASON & GREENBERG 1953, COOMBS & al. 1959, WALKER 1960).

Wichtig ist festzuhalten, daß Bildungstemperaturen und Bildungsdrucke der Erstausscheidungen in den Klüften mit dem maximalen Metamorphosegrad der jeweils umgebenden Gesteine übereinstimmen können, dies aber nicht unbedingt immer der Fall sein muß. Hier spielten in erster Linie der Zeitpunkt der Kluftöffnung und in zweiter Linie das Stoffangebot aus dem Nebengestein eine Rolle. In einem gegebenen Gesteinsverband werden daher später gebildete

Klüfte je nach dem, dem Bildungszeitpunkt entsprechenden, Stadium der retrograden Metamorphose niedriger temperierte Mineralphasen als frühe Ausscheidungen Metamorphose aufweisen, als die im gleichen Gesteinsverband auftretenden, früher gebildeten Kluftparagenesen.

Aus dem p-T Diagramm (Abb. 4) läßt sich ableiten, daß die in den ostalpinen Klüften beobachtbaren Mineralsukzessionen etwa einem „medium-pressure-type metamorphism“ im Sinne MIYASHIRO's (1973) entsprechen mit einer allerdings retrograd indikativen Mineralabfolge. Die Ausscheidungsfolge

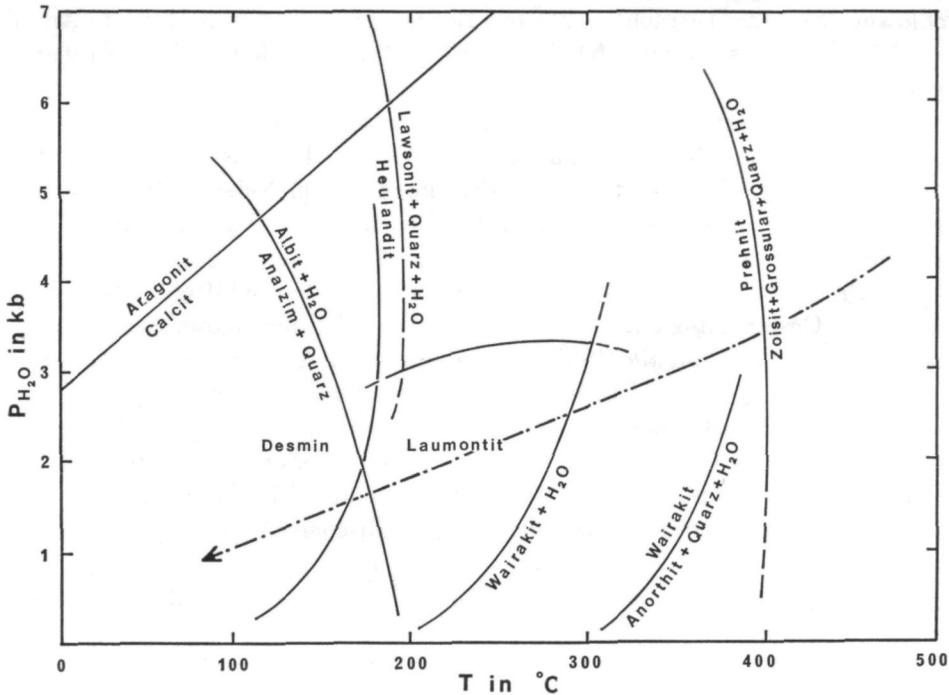


Abb. 4. p-T Diagramm nach LIU (1971c). Die strichpunktierte Linie gibt schematisiert den Trend der Mineralausscheidung in den alpinen Klüften der Ostalpen an

entspricht somit einem normalen, nur durch durchschnittliche orogene Hebung bedingten retrograden Metamorphoseverlauf. Das kann nur so interpretiert werden, daß während des retrograden Verlaufes der jungalpidischen Metamorphose keine nennenswerten druck- und/oder temperaturbetonten Ereignisse (z. B. verstärkter Druckabfall im Zuge alpidischer Deckenbewegungen) die alpinen Kluftmineralisationen entscheidend beeinflußt haben. Der alpidische Deckenbau muß in diesem Stadium bereits abgeschlossen gewesen sein. Da Kluftzeolithe sowohl im Pennin als auch im oberostalpinen Altkristallin auftreten, müssen beide Einheiten wohl den gleichen Temperatur-Druck-Bereich durchlaufen haben. Die altkristallinen Serien haben diesen jedoch früher erreicht, als jene des Pennins, da sie ja die penninischen Gesteine überlagern.

Zusammenfassend läßt sich somit feststellen:

1. Die Mineralisationen der alpinen Klüfte der Ostalpen zeigen klare Beziehungen zum jeweils umgebenden Gestein; für bestimmte Gesteinstypen sind bestimmte Mineralparagenesen charakteristisch. Der Stoffbestand der alpinen Klüfte läßt sich zwanglos aus dem umgebenden Gesteinsverband herleiten — eine weitreichende Stoffzufuhr in die Klüfte bzw. in zusammenhängende Kluftsysteme hinein ist unwahrscheinlich.

2. Die alpinen Klüfte der Ostalpen können unter Einbeziehung des jeweiligen Nebengesteins wahrscheinlich in ihrer Gesamtheit als weitgehend geschlossene Systeme betrachtet werden. Der mengenmäßig bedeutendste Anteil des Mineralinhalts alpiner Klüfte wurde bei relativ hohen Temperaturen zwischen 400—600° C gebildet.

3. Der Mineralinhalt in den alpinen Klüften wird vom Chemismus des jeweiligen Nebengesteins beeinflusst. Die Mineralabfolgen in den Klüften zeigen hingegen keine unmittelbaren Beziehungen zum Nebengestein; sie sind in erster Linie durch den Temperatur-Druck-Abfall während der Metamorphose bedingt.

4. Die beobachtbaren Mineralsukzessionen in den Klüften entsprechen daher den Gesetzmäßigkeiten einer retrograden Metamorphose. Sie repräsentieren dementsprechend alle Stadien der Metamorphose, beginnend bei der niedrig temperierten Amphibolitfazies über Grünschieferfazies, Prehnit-Pumpellyitfazies bis zur Zeolithfazies und in die postmetamorphen Stadien hinein. Die Anlage und Mineralisation der alpinen Klüfte ist sicher erst nach Abschluß des alpidischen Deckenbaues erfolgt. Woraus wieder abgeleitet werden kann, daß die alpine Kluftmineralisation dem jungalpidischen Metamorphose-Zyklus zuzuordnen ist.

5. Die Mineralabfolgen in den Klüften entsprechen damit dem Hebungsvorgang des alpinen Schichtstapels.

6. Die Tatsache, daß sich im oberostalpinen Altkristallin die gleichen Zeolithparagenesen finden wie im Pennin, läßt nur den Schluß zu, daß beide Einheiten den gleichen Temperatur-Druck-Bereich durchlaufen haben, die altkristallinen Serien diesen aber früher erreicht haben müssen als jene des Pennins.

Nachtrag während der Korrektur

Knapp vor Einlangen der ersten Fahnenkorrektur erschien die Arbeit von LUCKSCHEITER & MORTEANI (1980), in der neue Daten von Flüssigkeitseinschlüssen in Quarz, Apatit, Epidot, Diopsid, Beryll und Phenakit aus den Ostalpen mitgeteilt werden. Die Ergebnisse decken sich im wesentlichen mit jenen anderer Arbeiten von MORTEANI und Mitarbeitern. Dabei handelt es sich nach Fig. 1 und Tab. 1 A der erwähnten Arbeit mit Ausnahme von zwei Apatitproben, die offensichtlich aus den Amphibolitklüften der Knappenwandmulde stammen, um im großen und ganzen relativ früh gebildete Mineralisationen. Dementsprechend hoch sind daher auch die dafür ermittelten Bildungstemperaturen

und Bildungsdrucke. Es wäre aber in diesem Zusammenhang sicher lohnend, auch einmal die Flüssigkeitseinschlüsse später gebildeter Kluftmineralien, wie etwa von Datolith, Berylliummineralien, Fluorit, Prehnit und Zeolithen in gleicher Weise zu untersuchen.

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit wurde z. T. durch die Ergebnisse einer Zusammenarbeit mit dem Geotechnischen Institut der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal in Wien durchgeführt und vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanzierten Projektes unterstützt (Projekt 2273); damit konnten jene Erfahrungen im Gelände gesammelt werden, die die Interpretation der Mineralabfolgen in den alpinen Klüften erst ermöglicht haben.

Für die kritischen Anmerkungen und Diskussionen zum Manuskript danke ich den Herren Dr. F. KOLLER, Doz. Dr. G. KURAT und Prof. DDr. Dipl.-Ing. H. WIESENER, alle Wien. Ganz besonders danken möchte ich aber Herrn Prof. Dr. W. RICHTER, Wien, auf dessen Vorschlag, im Rahmen eines Seminars über alpine Klüfte zu sprechen, diese Arbeit überhaupt erst zustande gekommen ist.

Literatur

- ALKER, A. (1959): Zur Mineralogie der Steiermark. — Mitt.-Bl. Abt. Mineral. Landesmus. Joanneum, Graz, 126 S.
- BÖGEL, H. & K. SCHMIDT (1976): Kleine Geologie der Ostalpen. — 231 S. — Thun (Ott).
- COOMBS, D. S., A. J. ELLIS, W. S. FYFE & A. M. TAYLOR (1959): The zeolite facies, with comments on the interpretation of hydrothermal syntheses. — *Geochim. Cosmochim. Acta*, **17**: 53–107.
- , R. J. HORODYSKY & R. S. NAYLOR (1970): Occurrence of Prehnite-Pumpellyite Facies Metamorphism in Northern Maine. — *Am. Journ. Sci.*, **268**: 142–156.
- ERNST, W. G., Y. SEKI, H. ONUKI & M. G. GILBERT (1970): Comparative study of low-grade metamorphism in the California Coast Ranges and the outer metamorphic belt of Japan. — *Min. Geol. Soc. Am.*, **124**.
- FRANK, W., F. PURTSCHELLER, F. P. SASSI & B. ZANETTIN (1978): Eastern Alps. — Metamorphic map of the Alps 1 : 1,000,000, Explanatory text (Comp. E. NIGGLI). — Subcomm. Cartogr. Metam. Belts of the World, 228–242. — Leiden, Paris (Unesco).
- FRIEDRICHSEN, H. & G. MORTEANI (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.
- GASSER, G. (1913): Die Mineralien Tirols, einschließlich Vorarlbergs und der Hohen Tauern. — 548 S. — Innsbruck (Wagner).
- HABERLANDT, A. & A. SCHIENER (1951): Die Mineral- und Elementvergesellschaftung des Zentralgneisgebietes von Badgastein (Hohe Tauern). — *Tschermaks Min.-Petr. Mitt.* **3. F.**, **2**: 292–354.
- HOEFS, J. & G. MORTEANI (1979): The carbon isotopic composition of fluid inclusions in Alpine fissure quartzes from the western Tauern Window (Tyrol, Austria). — *N. Jb. Miner., Mh.* **1979**: 123–134.
- HÖRMANN, P. K. & G. MORTEANI (1972): Mineralogical and Chemical Composition of Some Carbonate Minerals from the Zillertal Alps, Tyrol (Austria). — *Tschermaks Min. Petr. Mitt.*, **17**: 46–59.
- LAUSCH, J., P. MÖLLER & G. MORTEANI (1974): Die Verteilung der Seltenen Erden in den Karbonaten und Penninischen Gneisen der Zillertaler Alpen (Tirol, Österreich). — *N. Jb. Miner., Mh.* **1974**: 490–507.

- LEITMEIER, H. (1942): Einige neuere Mineralvorkommen im Gebiete des Habachtales, ein Beitrag zur Kenntnis der Entstehung der Zentralgranitgneise der Hohen Tauern. — *Tschermaks Min. Petr. Mitt.*, N. F. **53**: 271—329.
- (1951): Vorlage neuerer Mineralvorkommen aus dem Pinzgau. — *Tschermaks Min. Petr. Mitt.*, 3. F., **2**: 140—142.
- LIU, J. G. (1971a): Synthesis and Stability Relations of Prehnite, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. — *Amer. Min.*, **56**: 507—531.
- (1971b): P—T Stabilities of Laumontite, Wairakite, Lawsonite, and Related Minerals in the System $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$. — *Journ. Petrol.*, **12**: 379—411.
- (1971c): Stilbite-Laumontite Equilibrium. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, **31**: 171—177.
- LUCKSCHEITER, B. & G. MORTEANI (1977): Untersuchungen der Flüssigkeitseinschlüsse in Kluffquarzen der penninischen Gesteine des westlichen Tauernfensters. — *Fortschr. Miner.*, **55**, Beih. 1: 89—91.
- & — (1980): Microthermometrical and chemical studies of fluid inclusions in minerals from Alpine veins from the penninic rocks of the central and western Tauern Window (Austria/Italy). — *Lithos*, **13**: 61—77.
- MASON, B. & S. S. GREENBERG (1953): Zeolites and associated minerals from Southern Brazil. — *Ark. Min.* **1**: 519—526.
- MEIXNER, H. (1957): Die Minerale Kärntens I. — *Carinthia II*, Sh. **21**: 147 S.
- (1964): Zur Landesmineralogie von Salzburg, 1878—1962. — Aus: *Die naturwiss. Erforsch. d. Landes Salzburg (P. TRATZ-Festschrift)*, 24—42. — Salzburg.
- MIYASHIRO, A. (1973): Metamorphism and metamorphic belts. — 492 S. — London (Allen & Unwin).
- & F. SHIDO (1970): Progressive Metamorphism in Zeolite Assemblages. — *Lithos*, **3**: 251—260.
- NIEDERMAYR, G. (1979a): Neue Funde von Milarit und Bavenit aus dem Pinzgau, Salzburg — Österreich. — *Aufschluß*, **30**: 147—149.
- (1979b): Alpine Kluffzeolithe und die alpidische Metamorphose. — *Fortschr. Min.*, **57/Bh.** 1: 111—112.
- & F. KOLLER (1980): Neue Mineralfunde aus dem Tauernfenster. — *Mitt. Österr. Mineralog. Ges.*, **127**: 20—27.
- RAITH, M., P. RAASE, H. KREUZER & P. MÜLLER (1978): The Age of the Alpidic Metamorphism in the Western Tauern Window, Austrian Alps, according to Radiometric Dating. — In: *Alps, Apennines, Hellenides*: 121—172.
- STALDER, H. A., F. de QUERVAIN, E. NIGGLI & S. GRAESER (1973): Die Mineralfunde der Schweiz. — 433 S. — Basel (Wepf & Co.).
- TURNER, F. J. & V. VERHOOGEN (1960): *Igneous and metamorphic petrology*. — 2. Aufl., 694 S. — New York—Toronto—London (McGraw Hill).
- WALKER, G. P. L. (1960): Zeolite Zones and dike distribution in relation to the structure of the basalts of Eastern Iceland. — *J. Geol.*, **68**: 515—528.
- WEINSCHENK, E. (1896): Die Minerallagerstätten des Großvenedigerstockes in den Hohen Tauern. — Ein Beitrag zur Kenntnis der alpinen Minerallagerstätten. — *Z. Krist.*, **26**: 337—508.
- WENINGER, H. (1974): Die alpinen Kluffminerale der österreichischen Ostalpen. — *Aufschluß*, Sh. **25**: 168 S.
- ZEN, E.-An (1960): Metamorphism of Lower Paleozoic rocks in the vicinity of the Taconic Range in west-central Vermont. — *Amer. Min.*, **45**: 129—175.