

Alpine Metamorphose von Erzvorkommen der Schweizer Alpen

Autor(en): **Niggli, Ernst**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen
= Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie**

Band (Jahr): **54 (1974)**

Heft 2-3: **Alpidische Metamorphosen in den Alpen**

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-42211>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Alpine Metamorphose von Erzvorkommen der Schweizer Alpen

Von *Ernst Niggli* (Bern)*)

Mit 3 Figuren im Text

Abstract

Recent publications concerned with the effect of Alpine metamorphism on ore occurrences in the Swiss Alps are reviewed. All localities except two, lie within the zone of Alpine greenschist facies metamorphism. Many of the deposits, particularly the sulphide-bearing ones, are strongly deformed. Sulphide ores are recrystallized to a very fine-grained "mixed ore". One pitchblende occurrence contains well-preserved primary (pre-Alpine) microstructures. In many cases, evidence of Alpine remobilization and redeposition is observed. The amount of material involved and the migration distances are generally small. The paper contains the following five chapters: sulphide ore occurrences; pitchblende occurrences; manganese ores in radiolarites; fissures of Alpine type containing ore minerals; the world famous sulfosalt locality, Lengnabach.

Zur Zeit wird kein einziges schweizerisches Erzvorkommen ausgebeutet; vor wenigen Jahren schlossen die beiden noch aktiven Bergwerke von Herznach im Tafeljura (Eisenerz des Doggers) und am Gonzen im Helvetikum (Hämatiterz des Malms) ihre Tore. Die schweizerischen Erzvorkommen sind aber, auch wenn sie zur Zeit nicht abbauwürdig sind, doch recht zahlreich und mannigfaltig. Die im zentralen Sektor der Alpen (dazu gehören die Schweizer Alpen) besonders intensive tektonische Verformung hat nun aber, besonders bei ursprünglich gangförmigen Vorkommen, oft zu starker Zerschering, Zerstückelung, Längung und Plättung sowie Boudinierung der Lagerstätten geführt. Vererzte Zonen werden oft nach wenigen Metern durch Scherzonen abgeschnitten, die Fortsetzung ist meist nur schwierig zu finden.

Eine Übersicht über die Vorkommen geben die Publikationen von H. F. HUTTENLOCHER (1934), sowie von E. KÜNDIG und F. DE QUERVAIN (1953). Fast alle Erzvorkommen der Schweizer Alpen sind noch von der alpinen

*) Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern, Sahlistrasse 6, CH-3012 Bern.

Metamorphose erfasst worden. Eigentliche postmetamorphe Vorkommen sind selten; Huttenlocher hält z. B. die goldhaltigen Quarz-Pyritgänge des Monte-Rosa-Gebietes sowie einige Pb-Zn-Lagerstätten (wie z. B. Trachsellauen) für postorogen-nicht-metamorph. Das letzte Wort ist hier aber noch nicht gesprochen.

K. BÄCHTIGER (1971) bringt die Goldvorkommen des Calanda in engen genetischen Zusammenhang mit der Phase der Bildung der Zerrklüftminerale der Nachbarschaft der Goldvorkommen. Die goldführenden Lösungen lässt er aus grossen Tiefen, vielleicht sogar dem oberen Mantel, herkommen. Auf Zusammenhänge zwischen Zerrklüften und Erzvorkommen wird im Nachstehenden an mehreren Stellen eingegangen werden.

Die Feststellung, dass eine Erzlagerstätte noch von der alpinen Metamorphose erfasst worden ist, bedeutet natürlich nicht, dass sie etwa prä-triadisches Alter haben muss, also «präalpin» in der extremsten Bedeutung des Begriffes ist. Viele solcher Vorkommen (so die mit den Ophiolithen verknüpften Vererzungen, dann die Hämatiterze des Gonzen, die Blei-Zinkerze in der Trias usw.) sind während des alpinen Zyklus s.l., im Mesozoikum, entstanden. – M. FREY et al. (1974, diese Arbeit) betonen die Mehrphasigkeit der alpinen Metamorphose, die schon in der Kreide einsetzte. Es ist jedoch noch verfrüht, Phänomene alpiner Metamorphose immer eindeutig einer Phase zuzuordnen. Die Hauptphase der Metamorphose hatte in den Zentralalpen wohl sicher mitteltertiäres Alter.

Die alpine Metamorphose der Gesteine der Schweizer Alpen ist in den letzten Jahren von vielen Petrographen im Detail untersucht worden. Ferner stehen zur Deutung eine Fülle experimenteller Daten zur Verfügung. Weit schlechter steht es mit den Erzvorkommen. Immerhin sind in den letzten Jahren einige Arbeiten erschienen, die sich mit dem Thema: alpine Metamorphose von Erzlagerstätten befassen. Über sie soll hier in einer Auswahl kurz berichtet werden. Es zeigt sich allerdings, dass die Verhältnisse komplizierter sind als bei gewöhnlichen Gesteinen. Viele Erzminerale sind relativ gut löslich; gross ist der Einfluss der Zusammensetzung der Lösungen und Gase. Ferner sind die chemischen Systeme, mit denen wir es zu tun haben, sehr komplex, die Zahl der Komponenten gross. Es wird schwierig sein, für Erzvorkommen nur auf Grund von Erzparagenesen eine Zonengliederung einer regionalen Metamorphose durchzuführen.

Es stellt sich die Frage, ob die alpine Metamorphose (insbesondere die mitteltertiäre Hauptphase), welche ihren höchsten Grad (Amphibolitfacies) in den Zentralalpen (im Lepontin) erreichte, selbst zur Bildung von eigentlichen metamorphogenen, ganz neuen Lagerstätten Anlass gegeben hat. Wir haben bisher in den Zentralalpen keine Hinweise für die Existenz solcher Lagerstätten. Gerade im Lepontin haben übrigens nach E. JÄGER (1973, S. 15) wandernde fluide Phasen während der alpinen Metamorphose nur eine geringe

Rolle gespielt; die Spuren- und Isotopenchemie der einzelnen Gesteinskörper (auch kleinerer) blieb erhalten, ohne dass es zu Ausgleichswanderungen und Homogenisierungen kam.

Dies bedeutet aber keineswegs, dass vor allem im Bereich schwächerer Metamorphose Remobilisierungen und Migrationen nicht doch eine Rolle gespielt haben. Dieser Frage soll im Nachstehenden besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

SULFIDISCHE VORKOMMEN

Sowohl H. F. HUTTENLOCHER (1931) für die Blei-Zinklagerstätten Goppenstein (Go in Fig. 1), wie auch C. FRIEDLÄNDER (1930) für das ähnliche Vorkommen von Alp Nadèls (N in Fig. 1) haben schon vor 40 Jahren die wesentlichen Wirkungen alpiner Gebirgsbildung und Metamorphose auf sulfidische, ursprünglich gangförmige, wohl herzynische Lagerstätten beschrieben. Beide Vorkommen liegen im Bereich alpiner Grünschieferfacies. Beide Autoren erwähnen die starke Deformation («Mechanisierung», Zerschierung und Verquetschung); die einzelnen Erzkörper erreichen heute nur noch geringe Dimensionen. In beiden Vorkommen sind feinkörnige, innig verwachsene, dichte Mischerze aus Bleiglanz und Zinkblende entstanden, die auch mit der Gangart fein verwachsen sind. Die Erze werden so schwer aufbereitbar. Die einzelnen Mineralkörner sind meist kleiner als 0,2 mm und können bis 0,002 mm klein werden.

Vor kurzem hat J.-P. JENNI (1973) Pb-Zn-Cu-Vererzungen am Bristenstock, in der kristallinen Schieferhülle des Aaregranites, beschrieben (B in Fig. 1). Sie liegen in der Stilpnomelanzone, gerade am N-Rande alpiner Grünschieferfacies. Auch hier ist eine ausgesprochene Boudinierung festzustellen; die Erzkörper haben Linsenform und sind maximal 20 m lang. Die alpine Metamorphose (niedriggradige Grünschieferfacies) bewirkte eine fast vollständige Um- und Rekristallisation, die zu einem feinkörnigen Mischerz (zur Hauptsache aus Bleiglanz, Kupferkies, Zinkblende und Gangarten bestehend) führte. Fig. 2 illustriert die feinkörnige, komplizierte Verwachsung der Mineralien solcher Erze. Die sulfidischen Hauptgemengteile sind arm an Entmischungskörperchen, eine Selbstreinigung der Mineralien fand statt.

Die rein silikatischen Gangarten sind ebenfalls metamorph umkristallisiert: Alpine Neubildungen sind Granat (Spessartin-, Almandin- und Grossular-«Moleküle» in etwa gleichen Mengen), Stilpnomelan, Albit, Quarz und Epidot.

Das Gebiet des Bristenstocks ist sehr reich an Zerrklüften. Bei der Bildung dieser Klüfte und ihres Mineralinhalts kam es lokal auch zu Remobilisationen der Erze und zu erneutem Absatz von Sulfiden (Kupferkies, Zinkblende, Pyrit und Bleiglanz). Die jungen «Erzgänge» sind leicht von den älteren, umkri-

stallisierten Bildungen zu unterscheiden. Erstere sind sehr quarzreich und sulfidarm. Ferner sind die Sulfide relativ grobkörnig kristallisiert (bis über 2 mm gross). Auch Manganblende-Rhodonit-Quarz-Vorkommen werden von Jenni als alpidische Remobilisate interpretiert.

Auffällig sind die sehr deutlichen Phänomene metamorpher Umkristallisation, trotz der kaum sehr hohen Temperatur bei der Metamorphose (beträchtlich unter 440° C; Stilpnomelan + Muskowit sind stabil). JENNI glaubt, dass eine Beteiligung grösserer Mengen zirkulierender wässriger Lösungen (zahlreiche mineralführende Zerrklüfte!) wesentlich dafür verantwortlich ist.

A. STÖCK (1966) beschrieb Magnetkies-Kupferkiesvererzungen am Kontakt des Zentralen Aargranits im westlichen Aarmassiv (Gr = Grisighorn in Fig. 1). Auch diese Vorkommen (ursprünglich Spaltengänge und auch greisenartige Metasomatite) liegen im Bereiche alpiner Grünschieferfacies, und zwar gerade noch in der Stilpnomelanzone (die Fig. 1 ist in dieser Hinsicht zu korrigieren).

Auch hier sind die Erzminerale umkristallisiert (Magnetkies, Kupferkies, Zinkblende, Bleiglanz, gediegen Wismut und ein Blei-Wismutsulfosalz). Molybdänglanzblätter sind stark zerknittert und verbogen. Alpine Neubildungen sind ferner Quarz, Biotit, Chlorit, Muskowit, Talk, Aklinolith, Granat (Grossular-Almandin-Spessartin-Mischkristall), Epidot-Orthit und Calcit. Die ursprünglichen spaltenfüllenden Erzgänge sind weit stärker verschiefert als die metasomatische Bildungen.

V. DIETRICH (1972) beschreibt ausführlich die sulfidischen meist aderförmigen Vererzungen in den Oberhalbsteiner Serpentiniten. Auch sie liegen im

Fig. 1. Zonengrenzen des Vorkommens von Mineralien der alpinen Metamorphose (nach E. Wenk und E. Niggli), mit Eintragung der im Text erwähnten Erzvorkommen. Linien des ersten und letzten Auftretens von Stilpnomelan, des ersten Auftretens von Chloritoid und Staurolith und Felder des Auftretens von Plagioklasen mit mehr als 70 und mehr als 85% An, in Koexistenz mit Calcit. Nach Tafel I in E. Niggli, 1970; die Stilpnomelanfeldgrenzen modifiziert nach mündlichen Mitteilungen von Dr. M. Frey, Th. Küpfer, U. Seemann und Dr. Ch. Kupferschmid (alle Bern).

Erklärung der Zeichen:

- 1: Erzmineralführende Zerrklüfte.
- 2: Uranvorkommen.
- 3: Blei-Zinkvorkommen.
- 4: Blei-Zink-Kupfervorkommen und Eisen-Kupfervorkommen.
- 5: Spezieller Lagerstättentyp des Lengenbachs:
Pyrit, Realgar und zahlreiche Pb-Sulfosalze.
- 6-10: Manganvorkommen im obersten Penninikum.

Paragenesen (siehe Text): 6: Rhodochrosit + Quarz, 7: Rhodochrosit + Quarz + Tephroit, 8: Rhodochrosit + Quarz + Pyroxmangit, 9: Rhodochrosit + Pyroxmangit, 10: Rhodochrosit + Tephroit.

Buchstaben stehen für Namen von Lokalitäten:

B = Bristenstock, Fa = Falotta, Fu = Furtschellas, Go = Goppenstein, Gr = Grisighorn und Umgebung, I = Iséables, La = Langwies, Le = Lengenbach, Lu = Lukmanierschlucht (nördlich Curaglia), MP = Passo del Muretto, Mu = Murtel, N = Nadèls, S = Scerceis, T = Trun.



0.02cm

Fig. 2. Zeichnung nach Anschliffphotographie. Alpin umkristallisiertes Pb-Zn-Cu-Erz am Bristenstock (Vorkommen Knappere). Sehr innige, feinkörnige Verwachsung von Bleiglanz (weiss), Kupferkies (horizontal schraffiert), Zinkblende (punktiert) und Gangart (schwarz). Ausschnitt aus Fig. 14 in JENNI, 1973.

Bereiche der Grünschieferfacies alpiner Metamorphose. Die Hauptausscheidung der Erzminerale und ihrer Begleiter ist nach DIETRICH eine Folge der eoalpinen Metamorphose (Oberkreide). Aus Lösungen und Mobilisaten bildeten sich damals in Störungszonen Silikate und Oxide wie Ilvait, Andradit, Aktinolith, Diopsid, Ferroantigonit, Greenalit und die Erzminerale Magnetkies, Kupferkies, Cubanit, Linneit, Bravoit, Violarit, Zinkblende und Magnetit. Der Stoffbestand der Erzminerale ist aus den Serpentiniten (und ihren basischen Begleitgesteinen) mobilisiert worden. Später zerbrachen während einer letzten tektonischen Phase die Minerale teilweise und wurden durch neue Sulfide und Oxide verdrängt.

Die ebenfalls sulfidführende Lagerstätte des Lengenbach im Binntal soll ihres ganz speziellen Charakters wegen am Schluss besprochen werden.

DIE URANVORKOMMEN BEI TRUN

Östlich und südlich von Trun (T in Fig. 1) im Vorderrheintal konnten in den letzten Jahren mehrere kleine Uranvorkommen gefunden werden, welche J. D. KRAMERS (1973) beschrieb, wobei er die Entstehung und die alpine

Metamorphose besonders berücksichtigte. Die Vererzungen befinden sich in z. T. sehr stark alpin verschieferten Paragneisen des Tavetscher Zwischenmassivs; die Gneise sind schon voralpin, wohl herzynisch, in der Amphibolitfazies metamorphosiert worden. Die Gesteine zeigen in starkem Ausmasse die Überprägung durch die retrograde alpine Metamorphose, die in die Grünschieferfazies zu stellen ist und zwar in die Stilpnomelanzone (siehe Fig. 1). Uranträger der Erze ist ganz überwiegend Pechblende. Sie tritt in kleinen Schmitzen und knollenförmigen «Boudins» auf, die nur Grössen bis mehrere Zentimeter erreichen (KRAMERS, 1973, Fig. 5). Die Boudinierung und die starke Kataklyse sind ohne Zweifel die Folgen alpiner Tektonisierung. Auch hier (wie schon bei den sulfidischen Erzvorkommen) ist deutlich die starke Zerstörung des ursprünglichen makrostrukturellen Verbandes von Erzvorkommen durch die alpine Gebirgsbildung feststellbar.

Überraschend war nun aber der Befund, dass in den Knollen und zerbrochenen Teilstücken die ursprüngliche nierig-botryoidale Mikro-Struktur, die auf eine voralpine hydrothermale Entstehung hinweist, z. T. noch hervorragend erhalten geblieben ist (KRAMERS, 1973, Fig. 10). Zum alten Mineralbestand gehören ferner Pyrit, Magnetit, Hämatit, Kupferkies, Bleiglanz, Zinkblende, Tetraedrit, Cobaltit, Linneit, Molybdänglanz, gediegenes Gold, gediegenes Arsen und Graphit.

Alpine Quarz-Carbonat-Mobilisate kommen an einigen Stellen in Berührung mit den Uranvererzungen. An solchen Stellen verdrängen Bleiglanz und Kupferkies Cobaltit und Linneit. Die Pechblende wird z. T. resorbiert und umgelagert. Auf röntgenographischem Wege wies J. D. KRAMERS bei einer Pechblende aus einem Quarz-Carbonatmobilisat eine Strukturveränderung als Folge einer teilweisen Oxydation von U^{4+} zu U^{6+} nach.

Die mikroskopisch-strukturellen Untersuchungen liessen also recht eindeutig Pechblenden mit geringer alpiner Beeinflussung (abgesehen von der tektonischen Zerstückelung) von solchen unterscheiden, die unter dem Einfluss alpin mobilisierter Lösungen verändert oder sogar umgelagert worden sind, wobei allerdings die Wanderwege nur sehr kurz sind (Bereiche von Zentimetern). J. D. KRAMERS hat nun zur Kontrolle der genetischen Interpretationen Uran-Blei-Isotopenaltersbestimmungen durchgeführt. Die 12 auf Grund der erzmikroskopischen Befunde ausgesuchten Proben ergaben Pb^{206}/U^{238} - und Pb^{207}/U^{235} -Werte, die im sogenannten Concordia-Diagramm praktisch auf einer Geraden liegen, nur Probe 4 zeigt eine grössere Lagenabweichung (Fig. 3). Der obere Schnittpunkt der Geraden mit der Concordia-Kurve liegt bei einem Alterswert von 303 bis 329 Millionen Jahren (der Wert variiert je nachdem, ob Probe 4 berücksichtigt wird oder nicht). Diese obere Intersektion entspricht dem voralpinen, herzynischen Alter der primären Mineralisation. Die untere Intersektion liegt bei einem Alterswert von 20 bis 27 Millionen Jahren, was recht gut mit den alpinen Biotit-Abkühlungsaltern (Rb-Sr-Methode) im glei-

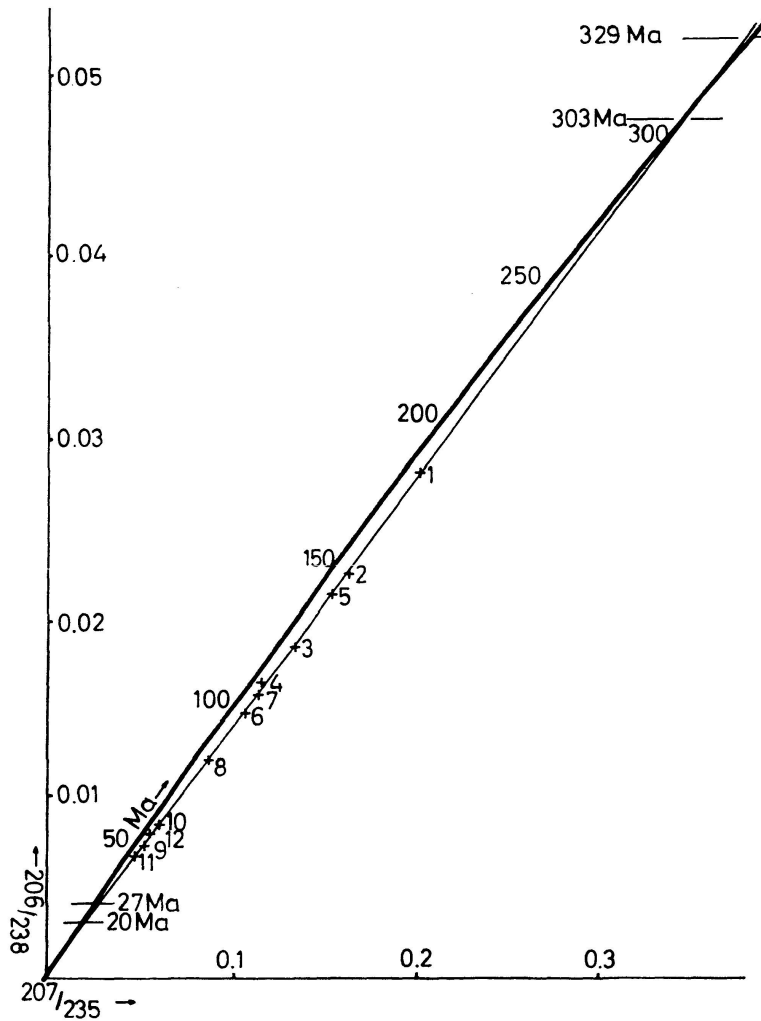


Fig. 3. Uran-Blei-Altersbestimmungen an Trunser Pechblende-*proben im Concordia*-diagramm von WETHERHILL. Nach Tafel 3 in J. D. KRAMERS, 1973. Ma = Millionen Jahre.

chen Gebiet übereinstimmt. Es handelt sich ohne Zweifel um den Einfluss der alpinen Metamorphose. Die einzelnen U-Pb-Alterswerte variieren von 45 bis 185 Millionen Jahren. Von grosser Wichtigkeit ist nun die Tatsache, dass diejenigen Proben den stärksten Bleiverlust zeigen (also unten im Diagramm liegen), welche, nach den vorangegangenen mikroskopischen und röntgenographischen Untersuchungen, von alpin mobilisierten Lösungen am stärksten beeinflusst oder sogar neugebildet worden sind (Proben 11, 9, 12, 10, 8), während Pechblende mit gut erhaltenen alten Strukturen, ohne sichtbare Beeinflussung durch Lösungen, im Concordia-Diagramm bei höheren individuellen Alterswerten zu finden sind (z. B. Proben 1, 2, 5). Die Altersbestimmungen bestätigen demnach die mit anderen Methoden erarbeitete Geschichte der Mineralisationen. Erstaunlich ist, dass trotz der an sich grossen Beweglichkeit des Elements Uran hier in epizonal überprägten Vorkommen so viele primäre, vormetamorphe Eigenschaften erhalten geblieben sind, ganz im Gegensatz zu den schon beschriebenen sulfidischen Lagerstätten. Offenbar bietet zirkulieren-

des Grundwasser weit bessere Möglichkeiten zu grossräumiger Wanderung und Umlagerung des Urans als eine Regionalmetamorphose.

Uranvererzungen sind auch an andern Lokalitäten der Zentralalpen gefunden worden. Über die Vorkommen bei Isérables im Wallis orientiert z. B. die Arbeit von TH. HÜGI et al., 1967. Die Funde liegen in wahrscheinlich permokarbonischen Metasedimenten der penninischen St.-Bernhard-Decke, und wie die Trunser Vorkommen im Bereich alpiner Metamorphose in Grünschieferfacies. Die Autoren nehmen für *diese* Vorkommen eine beträchtliche alpine Wanderung mobilisierten Urans an. Es ist sehr wohl denkbar, dass von Vorkommen zu Vorkommen beträchtliche Unterschiede im Verhalten der Uranerze gegenüber der alpinen Metamorphose angenommen werden müssen. Zusammensetzung, Wanderungsgeschwindigkeit und Menge zirkulierender Lösung, sowie Unterschiede in der Durchlässigkeit der Gesteine und Erze, werden eine entscheidende Rolle spielen.

MANGANVORKOMMEN IN RADIOLARITEN DES OBERPENNINGIKUMS GRAUBÜNDENS

In oberjurassischen Radiolariten der höchsten penninischen Decken kommen von Arosa im Norden über das Oberhalbstein, das Julier-Berninagebiet bis in die Malenco-Region als Linsen und Körper Manganerze vor. Ophiolithe (Metabasite) und Marmore sind Begleitgesteine. Im Profil Arosa-Bergell zeigt die alpine Metamorphose eine deutliche Zunahme, von der Pumpellyit-Prehnit-Facies über die Grünschieferfacies bis zu niedriggradiger Amphibolitfacies ganz im Süden. Das eigentliche Erz besteht aus Braunit, er ist vergesellschaftet mit Mangansilikaten und -Carbonaten, die sowohl in derben Massen wie auch in querschlägigen Gängchen, Adern und im Radiolarit als Lagen angereichert sind. Schon seit 50 Jahren sind einige dieser Manganvorkommen wegen ihres Gehaltes an seltenen Mangansilikaten bekannt (siehe dazu GEIGER, 1948): Parsettensit, Sursassit, Tinzenit, Piemontit und Rhodonit sind neben Manganocalcit und Rhodochrosit für das Oberhalbstein typisch (mittlere Grünschieferfacies). Weiter südlich, in Richtung höhergradiger Metamorphose, im Julier-Berninagebiet, haben TROMMSDORFF et al. (1970) neuerdings Mn-Glimmer, Spessartin, Tephroit, Pyroxmangit, Rhodonit, Mn-Aegirinaugit, Mn-Na-Amphibol gefunden. Einige dieser Mineralien (nicht aber Tephroit und Pyroxmangit) waren schon vorher aus dem Schams (Val Ferrera) von STUCKY (1960) beschrieben worden.

Die progressive Metamorphose manganführender Gesteine ist nun in der letzten Zeit experimentell untersucht und die Ergebnisse mit der Natur verglichen worden (TJ. PETERS 1971, TJ. PETERS et al. 1973). Die Untersuchungen beschränken sich zunächst noch auf das System $MnO-SiO_2-CO_2-H_2O$ (also ohne

CaO). Als Mineralphasen treten in diesem System Quarz, Rhodochrosit, Pyroxmangit und Tephroit auf. In Fig. 1 sind unter den Nummern 6–10 die in der Natur festgestellten Paragenesen dieser Mineralien angegeben. Ganz im Norden (Zeolithfacies) findet man die Paragenese Tephroit-Quarz-Rhodochrosit (La = Langwies in Fig. 1), dann folgen (im Oberhalbstein, Fa = Falotta) Quarz + Rhodochrosit, im Berninagebiet (Mu = Murtel, mittlere Grünschieferfacies) Rhodochrosit + Quarz + Pyroxmangit und in noch stärker metamorphen Bildungen ganz im Süden nur Tephroit + Rhodochrosit (Fu, S, MP in Fig. 1). Die experimentellen Daten, durchgeführt für $P_{\text{tot}} = 2 \text{ kb}$ und wechselnde Zusammensetzung der fluiden Phase (mit H_2O und CO_2) zeigen zunächst, dass der Einfluss der Zusammensetzung der fluiden Phase sehr gross ist. So spielt sich die Reaktion $\text{Pyroxmangit} + \text{Rhodochrosit} \rightleftharpoons \text{Tephroit} + \text{CO}_2$ für 60 Mol-% CO_2 in der fluiden Phase bei einer Temperatur von 550°C ab, falls nur 10% CO_2 (aber 90% H_2O) vorhanden sind, erniedrigt sich die Reaktions-temperatur auf 485°C . Pyroxmangit bildet sich in diesen Versuchen nur oberhalb 430°C . Bei 10 Vol-% CO_2 reagieren Rhodochrosit + Quarz zu Pyroxmangit + CO_2 bei einer Temperatur von 450°C und Pyroxmangit + Rhodochrosit zu Tephroit + CO_2 bei 485°C . Bei sehr niedrigem X_{CO_2} (unter 2 Mol-%) bildet sich Tephroit im Gleichgewicht auch unter 420°C , in einem Feld, in welchem Rhodochrosit, Tephroit und Quarz stabile Phasen sind. Die in der Natur festgestellte Folge steht mit diesen experimentellen Befunden in Übereinstimmung. Für das Arosler-Gebiet muss angenommen werden, dass dort X_{CO_2} besonders niedrig war (Tephroit!).

ALPINE ZERRKLÜFTE MIT ERZMINERALIEN IM WESTLICHEN TAVETSCHER ZWISCHENMASSIV

Die alpinen Zerrklüfte bildeten sich nach dem Paroxysmus der Alpenfaltung und der alpinen Metamorphose. Sie stehen aber in enger Beziehung zu letzterer und sind auch nach den neueren radiometrischen Altersbestimmungen älter als man bisher oft dachte (älter als 10 Mio Jahre, siehe M. FREY et al., dieses Heft).

E. NIGGLI hat in H. A. STALDER et al. (1973) die mineralführenden Zerrklüfte der Region Tavetsch-Medel-Trun behandelt. Das Gebiet gehört zu denjenigen mit höchster Dichte an Zerrklüften in den Alpen. Der Mineralinhalt dieser Zerrklüfte (meist vom «offenen» Typ) zeigt eine deutliche Abhängigkeit vom Nebengestein. So führen Klüfte in Amphiboliten reichlich Titanit, Epidot, Quarz, Adular, solche in Paragneisen und -Schiefern Anatas, Rutil, Brookit, Ankerit, neben Quarz und Calcit usf. In der genannten Region (insbesondere z. B. in der Lukmanierschlucht = Lu in Fig. 1) kommen speziell in Gesteinen des Tavetscher Zwischenmassivs auch Klüfte vor, die durch die Anwesenheit

von Sulfiden oder/und von Gold charakterisiert sind (Fundortgruppe 6f). Bleiglanz und Zinkblende sind zwar auch anderswo in den Schweizer Alpen in Zerrklüften gefunden worden; die Funde in der hier besprochenen Region stechen aber durch die grosse Zahl der sulfidischen Spezies und die Häufigkeit solcher Klüfte heraus. Die charakteristischen Erzminerale der Fundortgruppe 6f sind Jamesonit, Boulangerit (beides Blei-Antimon-Sulfide), Zinkblende (bis 5 cm gross), Kupferkies, Magnetkies, Arsenkies, Bleiglanz, Gold, Pyrit, sowie Quarz, Calcit, Ankerit, Siderit, Rutil, Apatit. Im unmittelbaren Nebengestein ist meist keine Vererzung zu konstatieren. E. NIGGLI (a. a. O. S. 161) nimmt nun an, dass der Kluftinhalt aus Lösungen kristallisierte, welche erhöhte Metallgehalte aus alten Erzgängen (durch Wiederlösung, «Remobilisation») erhalten haben. Es müssen dabei längere Wanderwege (mindestens Dekameter) angenommen werden. Die Hypothese wird recht wahrscheinlich gemacht durch das Auftreten von recht zahlreichen voralpinen, metamorph überprägten, z. T. gangförmigen Vererzungen im Tavetscher Zwischenmassiv, welche alle diejenigen Metalle führen, die auch in den Klüften vorkommen. Es sei nur an die von FRIEDLÄNDER (1930) beschriebenen Vererzungen in der Lukmanierschlucht (mit Pyrit, Bleiglanz, Arsenkies, Turmalin und Quarz) und auf der Alp Nadèls (Bleiglanz und Zinkblende) erinnert. E. NIGGLI hat 1944 (S. 169) auf Goldquarzgänge bei Sedrun, auf Magnetkiesgänge (mit Kupferkies und Magnetiteinschlüssen) im Val Nalps und auf Arsenkiesvererzungen südlich Tschamut hingewiesen. In H. A. STALDER et al. (1973) hat E. NIGGLI ferner Erzgänge mit Jamesonit im Somvix sowie Erzadern und Imprägnationen mit Antimonit und neue Funde von Goldquarzgängen (beide in der Lukmanierschlucht) erwähnt. Es bereitet keine besondere Mühe, eine Beziehung zwischen den alten Vererzungen und dem Mineralinhalt der Klüfte der Fundortgruppe 6f anzunehmen.

Die grosse Kluftdichte der Region weist auf das Vorhandensein grösserer Mengen zirkulierender Lösungen hin. Das mag die für die Schweizer Alpen recht beträchtliche alpine Remobilisation erklären. Immerhin sei nachdrücklich festgehalten, dass es nicht zu eigentlichen «jungen» Vererzungen gekommen ist. Die Erzminerale der Klüfte sind eher mineralogische Raritäten und bauen keine Erzlagerstätten auf.

DAS MINERALVORKOMMEN LENGENBACH (WALLIS), MIT SELTENEN SULFOSALZEN

Das Lengebacher Vorkommen (Le in Fig. 1) hat einige einzigartige Eigenschaften. Es lässt sich kaum mit einer anderen bekannten Lagerstätte der Welt unmittelbar vergleichen. Im steilstehenden triadischen Dolomit der penninischen Monte-Leone-Decke kommen im Binntal an mehreren Stellen

Vererzungen vor. Besonders reichhaltig ist die Paragenese der Lokalität Lengenbach (H. A. STALDER et al., 1969, S. GRAESER in H. A. STALDER et al., 1973, S. 282, W. NOWACKI, 1969–1970). Der verfaltete Dolomit führt mehrere sulfidreiche Bänder mit Pyrit als Hauptmineral. Daneben sind aber bis heute 60 weitere Mineralien gefunden worden, darunter mehrere äusserst seltene Pb-As-, Cu-As-, Ag-As- und Tl-As-Sulfosalze. 15 davon sind bis heute überhaupt nur aus dem Lengenbacher Vorkommen bekannt. Die Mineralien werden zum grösseren Teil in länglichrunden Hohlräumen (Drusen) gefunden, zum kleineren Teil sind sie «gesteinsbildend». Wichtigere Species sind Realgar, Zinkblende, Arsenkies, Tennantit, Skleroklas, Lengenbachit, Baumhauerit, Rathit I, Liveingit, Dufrénoysit, Seligmannit, Jordanit, Bleiglanz und viele andere mehr. GRAESER konnte zeigen, dass älterer Bleiglanz durch Pb-As-Sulfosalze verdrängt worden ist, wobei sich zunächst As-arme Species wie Jordanit bildeten, die ihrerseits lokal durch Arsen-reichere ersetzt wurden.

Die genetische Deutung ist nicht leicht. Ältere Arbeiten hielten das Vorkommen für eine mit der Ophiolithbildung in Zusammenhang stehende Sulfid-lagerstätte, die ihre besondere Mineralogie der alpinen, isochemischen Metamorphose zu verdanken hat, welche hier mesozonalen Grad erreicht hat, wie die Nebengesteine zeigen. Meiner Meinung nach kann aber nur eine ganz spezielle und aus verständlichen Gründen sehr selten realisierte Entstehungsgeschichte die Lagerstätte befriedigend erklären, wobei voneinander unabhängige Faktoren *zufällig* zusammengewirkt haben müssen. S. GRAESER (1968, 1969 und in H. A. STALDER et al., 1969, sowie H. A. STALDER et al., 1973) hat einen solchen zweiphasigen Vorgang postuliert. Als erstes nimmt er eine syn-sedimentäre Vererzung in der Trias an, wobei während der Ablagerung des Carbonatgesteins auch Bleiglanz, Pyrit und Zinkblende entstanden. Schwefelisotopenuntersuchungen sind mit der syngenetischen Entstehung im Einklang (HOEFS und GRAESER 1968). Es handelt sich um eine Vererzung, wie sie in der Trias der Alpen und auch des südlichen Deutschland nicht selten vorkommt. Gegen Ende der alpinen Metamorphose, nach den Hauptdeformationen, drangen dann nach GRAESER Lösungen mit As, Cu, Ag, Tl und Sb in den Dolomit ein und reagierten mit den präexistierenden Sulfiden unter Bildung von Sulfosalzen. Der Metallgehalt der Lösungen stammt nach dem gleichen Autor aus kleinen Cu-As-Lagerstätten in den weiter südlich anstehenden Monte-Leone-Gneisen, die während der alpinen Metamorphose und der anschliessenden Bildung der Zerrklüfte teilweise remobilisiert wurden. Zufällig trafen solche Lösungen dann am Lengenbach auf den schon vererzten Dolomit. Gestützt wird diese Hypothese durch die Funde merkwürdiger, bisher unbekannter Arsenatmineralien wie Asbecasit und Cafarsit in Zerrklüften der Gneise (Fundortgruppe 11d in H. A. STALDER et al., 1973, siehe auch S. GRAESER 1966).

Die Hypothese setzt recht lange Wanderwege der Lösungen und eine recht beträchtliche Remobilisation voraus. Blei- und Schwefelisotopenuntersuchun-

gen stützen die postulierte Entstehungsgeschichte. Das einzigartige Lengensbacher Vorkommen wäre demnach ein Zufallsprodukt, das aber immerhin die Mineralogen seit vielen Jahrzehnten zu Recht fasziniert.

SCHLUSSBEMERKUNG

Die in dieser Übersicht erwähnten Untersuchungen der alpinen Metamorphose zentralalpiner Erzvorkommen zeigen, dass wir erst am Anfang der Erforschung dieses Problemkreises stehen. Es ergibt sich noch kein einfaches Gesamtbild; die Verhältnisse sind sicher komplizierter als bei den gewöhnlichen Gesteinen. Die Frage des Ausmasses von Remobilisation, Migration und Wiederausscheidung als Folge der Metamorphose und der an sie sich anschließenden Zerrklüftung ist noch nicht genügend geklärt und sicher von Vorkommen zu Vorkommen verschieden. Das Uranerz von Trun zeigt nur bescheidene Remobilisationsphänomene, ebenso wie die sulfidischen Erze des Bristenstocks, des Grisighorns, von Alp Nadèls. Etwas wichtiger sind sie im Bereich der zahlreichen Zerrklüfte im Raume Tavetsch-Medel; von grösserer Bedeutung vielleicht in den sulfidischen Vererzungen der Oberhalbsteiner Serpentinite. Ferner haben Remobilisationen und Migrationen anscheinend eine wichtige Rolle bei der Entstehung der einzigartigen Mineralogie des Vorkommens von Lengensbach gespielt. Als oft recht interessant erwies sich die Untersuchung der Gangarten, die ebenfalls heute meist als metamorphe Neubildungen vorliegen. Vielversprechend sind die experimentellen Untersuchungen an oxidischen Systemen mit Mangan als Komponente.

LITERATURVERZEICHNIS

- BÄCHTIGER, K. (1971): On the origin of native gold, quartz crystals and thermal water in the surroundings of Calanda mountain (Kt. Graubünden und Kt. St. Gallen). Schweiz. Min. Petr. Mitt. 51, 585–586.
- DIETRICH, V. (1969): Die Ophiolithe des Oberhalbsteins (Graubünden) und das Ophiolithmaterial der Ostschweizerischen Molasseablagerungen, ein petrographischer Vergleich. Diss. Univ. Zürich. Europ. Hochschulschriften Ser. XVII v. I, Lang & Co. Bern.
- (1972): Die sulfidischen Vererzungen in den Oberhalbsteiner Serpentiniten. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. 49.
- DIETRICH, V. und PETERS, T.J. (1971): Regionale Verteilung der Mg-Phyllosilikate in den Serpentiniten des Oberhalbsteins. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 51, 329–350.
- FREY, M., HUNZIKER, J. C., FRANK, W., BOCQUET, J., DAL PIAZ, G. V., JÄGER, E. and NIGGLI, E. (1974): Alpine metamorphism of the Alps – a review. Schweiz. Min. Petr. Mitt., 54, 247–290.
- FRIEDLÄNDER, C. (1930): Erzvorkommnisse des Bündner Oberlandes und ihre Begleitgesteine. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. 16, Heft 1.
- GEIGER, TH. (1948): Manganerze in den Radiolariten Graubündens. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. 27.

- GRAESER, S. (1966): Asbecasit und Cafarsit, zwei neue Mineralien aus dem Binnatal. Schweiz. Min. Petr. Mitt., *46*, 367–376.
- (1968): Lead isotopes and minor elements in galenas and sulphosalts from Binnatal. Earth and Planet. Sci. Letters, *4*, 384–392.
- (1969): Minor elements in sphalerites and galenas from Binnatal. Contr. Miner. Petrol. *2*, 156–163.
- HOEFS, J. und GRAESER, S. (1968): Schwefelisotopenuntersuchungen an Sulfiden und Sulfosalzen des Binnatales. Contr. Mineral. and Petrol. *17*, 165–172.
- HÜGLI, TH., KÖPPEL, V., DE QUERVAIN, F. und RICKENBACH, E. (1967): Die Uranvererzungen bei Iséables (Wallis). Beiträge Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. *42*.
- HUTTENLOCHER, H. F. (1925): Zur Kenntnis verschiedener Erzgänge aus dem Penninikum und ihre Metamorphose. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *5*, 181–227.
- (1931): Blei-Zinklagerstätten von Goppenstein (Wallis). Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. *16*, Heft 2.
- (1934): Die Erzlagerstätten der Westalpen. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *14*, 24–146.
- JÄGER, E. (1973): Die alpine Orogenese im Lichte der radiometrischen Altersbestimmung. Eclogae geol. Helv. *66*, S. 11–21.
- JENNI, J.-P. (1973): Die Vorkommen von Bleiglanz, Kupferkies und Zinkblende des Bristenstocks (Kt. Uri). Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. *53*.
- KRAMERS, J. D. (1973): Zur Mineralogie, Entstehung und alpinen Metamorphose der Uranvorkommen bei Trun, Graubünden. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. *52*.
- KÜNDIG, E. und DE QUERVAIN, F. (1953): Fundstellen mineralischer Rohstoffe in der Schweiz. 2. Ausg. Kümmerly & Frey, Bern.
- NIGGLI, E. (1944): Das westliche Tavetscher Zwischenmassiv und der angrenzende Nordrand des Gotthardmassivs. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *24*, 58–315.
- (1970): Alpine Metamorphose und alpine Gebirgsbildung. Fortschr. Miner. *47*, 16–26.
- NOWACKI, W. (1969–1970): Über einige Mineralien der Grube Lengenbach (Binnatal). Urner Mineralienfreund, Jg. 1969 und 1970.
- PETERS, T.J. (1971): Pyroxmangite: Stability in H₂O-CO₂ mixtures at a total pressure of 2000 bars. Contr. Mineral. and Petrol. *32*, 267–273.
- PETERS, T.J., SCHWANDER, H. and TROMMSDORFF, V. (1973): Assemblages among tephroite, pyroxmangite, rhodochrosite, quartz: experimental data and occurrences in the Rhetic Alps. Contr. Mineral. and Petrol. *42*, 325–332.
- STALDER, H. A., NIGGLI, E., GRAESER, S., ARNOTH, J. und NOWACKI, W. (1969): Die Mineralfundstelle Lengenbach im Binnatal. Jb. Naturh. Mus. Bern (1966–1968), S. 235–316.
- STALDER, H. A., DE QUERVAIN, F., NIGGLI, E. und GRAESER, S. (1973): Die Mineralfunde der Schweiz. Neubearbeitung von R. L. Parker: «Die Mineralfunde der Schweizer Alpen.» Wepf & Co., Basel.
- STECK, A. (1966): Magnetkies-Kupferkies-Vererzungen am Kontakt des Zentralen Aaregranites im westlichen Aarmassiv nördlich Brig. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *46*, 389–412.
- STUCKY, K. (1960): Die Eisen- und Manganerze in der Trias des Val Ferrera. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie, Liefg. *37*.
- TROMMSDORFF, V., SCHWANDER, H. und PETERS, T.J. (1970): Mangansilikate der alpinen Metamorphose in Radiolariten des Julier-Bernina-Gebietes. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *50*, 539–545.
- TUFAR, W. (1974): Zur Altersgliederung der ostalpinen Vererzung. Geol. Rundschau *63*, 105–124.

Manuskript eingegangen am 9. April 1974.