

ERZMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN AN SILBERPENTLANDITEN DER Cu-Fe-ERZPARAGENESE VON AXAMS (STUBAIKRISTALLIN, TIROL, ÖSTERREICH)

Franz Vavtar

Mit 14 Abbildungen, 6 Diagrammen und 4 Tabellen

Zusammenfassung:

Mit dem Silberpentlandit von Axams gelang der erstmalige Nachweis dieses Ag-Ni-Fe-Sulfides auch in einer ostalpinen Erzmineralisation. Er tritt intragranular im Kupferkies als akzessorischer Gemengteil einer hochtemperierten Cu-Fe-Erzparagenese im polymetamorph überprägten Stubaikristallin auf.

Der Kupferkies der Erzparagenese belegt mit seiner α - β -Umwandlungslamellierung und den Zinkblende-Entmischungen eine Bildungs- bzw. Umbildungstemperatur von mindestens 500° C. Der Silberpentlandit wird als Entmischung < 455° C aus einem ehemals kubischen, Ag-Ni-hältigen Cu-Fe-Zn-Mischkristall interpretiert.

Produkte der beginnenden Verwitterung von Silberpentlandit sind Bravoit und/oder Violarit sowie ein ? Sulfid der sogenannten „Silberkies“-Gruppe.

Die Ag-Gehalte der Silberpentlandite variieren zwischen 10.9 und 13.0 (Mittelwert: 11.6) Gew.%. Die Fe-Gehalte liegen zwischen 33.8 und 36.5 (Mittelwert: 35.4) Gew.%, die Ni-Gehalte schwanken zwischen 18.6 und 20.8 (Mittelwert: 19.5) Gew.%. Weiters wurden Cu-Gehalte von 1.0 bis 2.1 (Mittelwert: 1.5) Gew.% und Co-Gehalte von 0.0 bis 0.7 (Mittelwert: 0.3) Gew.% nachgewiesen. Die S-Gehalte liegen zwischen 31.2 und 33.3 (Mittelwert: 32.5) Gew.%. Die durchschnittliche Zusammensetzung der Silberpentlandite kann mit der Formel $\text{Ag}_{0.84}(\text{Fe},\text{Ni},\text{Cu},\text{Co})_{7.85}\text{S}_8$ ausgedrückt werden.

Die farbmtrische Auswertung der spektralen Dispersionskurven dreier Silberpentlanditkörner ergibt mittlere Normfarbwerte von $x = 0.341$ und $y = 0.343$, einen mittleren Hellbezugswert $Y = 30.9\%$, eine mittlere Farbintensität $Pe = 15.5\%$ und eine mittlere farbtongleiche Wellenlänge $\lambda_d = 579.5$ nm.

Die Korrelation farbmtrischer und mineralchemischer Daten zeigt, daß die Farbwerte nicht so sehr vom Gehalt der Ag-Atome, die sich auf oktaedrisch koordinierten Gitterplätzen der Silberpentlanditstruktur befinden, bestimmt werden, sondern vielmehr durch den Gehalt von (Fe,Ni)-Atomen auf den tetraedrisch koordinierten Gitterplätzen und vom Cu-Gehalt pro Formeleinheit beeinflusst werden. Es ergeben sich signifikante Zusammenhänge zwischen dem Hellbezugswert $Y\%$ und Cu pfu bzw. zwischen der Farbsättigung $Pe\%$ und (Fe,Ni) pfu. Stöchiometrischer Silberpentlandit ohne Cu pfu besitzt einen Helligkeitseindruck von $Y = 28.8\%$. Einem um 1 % höheren Hellbezugswert entspricht ein um 0.100 ± 0.015 höherer Cu-Gehalt. Stöchiometrischer Silberpentlandit mit 8 (Fe,Ni)-Atomen pfu besitzt eine Farbsättigung von $Pe = 18.0\%$. Einer um 1% niedrigeren Farbsättigung entspricht ein um 0.19 ± 0.03 niedrigerer (Ni,Fe)-Gehalt.

Abstract:

The argentopentlandite from Axams is the first report of this Ag-Ni-Fe sulphide in an Eastern Alpine ore mineralization. It is intragranular in chalcopyrite as an accessory component in a high temperature Cu-Fe ore paragenesis in the polymetamorphic Stubai crystalline.

The chalcopyrite of these ore paragenesis, with its α - β -inversion twins and its star-shaped sphalerite exsolutions, points towards a minimum temperature of formation or transformation from 500° C. Argentopentlandite is interpreted as an exsolution < 455° C from a former cubic Ag-Ni containing Cu-Fe-Zn solid solution.

Alteration products of argentopentlandite in supergene environments are bravoite and/or violarite and a ? sulphide from the „Silberkies“ group.

The Ag-contents of the argentopentlandites vary between 10.9 and 13.0 (average: 11.6) wt.%. The Fe-contents lie between 33.8 and 36.5 (average: 35.4) wt.%, the Ni-contents alternate between 18.6 and 20.8 (average: 19.5) wt.%. In addition, Cu-contents from 1.0 to 2.1 (average: 1.5) wt.% and Co-contents from 0.0 to 0.7 (average: 0.3) wt.% were reported. The S-contents range from 31.2 to 33.3 (average: 32.5) wt.%. The mean composition of the argentopentlandites can be expressed by the formula $\text{Ag}_{0.84}(\text{Fe},\text{Ni},\text{Cu},\text{Co})_{7.85}\text{S}_8$.

The color value calculation of the spectral dispersion curves of the argentopentlandite grains yields mean rectangular chromaticity coordinates from $x = 0.341$ and $y = 0.343$, a mean luminance $Y = 30.9\%$, a mean excitation purity $Pe = 15.5\%$ and a mean dominant wavelength $\lambda_d = 579.5$ nm.

The correlation of color value and mineralochemical data yields that the reflection color changes are determined less by the Ag atoms located in the octahedrally coordinated sites in the argentopentlandite structure than they are by the (Fe,Ni) atoms in the tetrahedrally coordinated lattice sites and by Cu pfu. There exist significant connections between luminance $Y\%$ and Cu pfu or between excitation purity $Pe\%$ and (Fe,Ni) pfu. Stoichiometric argentopentlandite without Cu pfu has a luminance from $Y = 28.8\%$. A luminance that is 1% greater corresponds to a Cu-content that is greater by 0.100 ± 0.015 . Stoichiometric argentopentlandite with 8 (Fe,Ni)-atoms pfu has an excitation purity from $Pe = 18.0\%$. An excitation purity that is 1% lower corresponds to a (Fe,Ni)-content that is lower by 0.19 ± 0.03 .

Einleitung und Problemstellung

Silberpentlandit mit der theoretischen Formel $AgFe_5Ni_3S_8$ wurde erstmals von SHISHKIN et al. (1971) und später von RUDASHEVSKII et al. (1977) aus sibirischen Cu-Ni- und Ni-Co-Lagerstätten beschrieben. VUORELAINEN et al. (1972) gelang der Nachweis auch in finnischen Sulfidlagerstätten des Outokumpu-Typs. In den folgenden Jahren wurden Silberpentlandite auch in kanadischen Cu-Fe-Ni-Lagerstätten bekannt. So in Sudbury, Ontario (KARPENKOV et al., 1973), oder Bird River, Manitoba (SCOTT & GASPARRINI, 1973, und HALL & STEWART, 1973). GROVES & HALL (1978) beschreiben Silberpentlandite von Mount Windarra, W-Australien, MPOSKOS (1983) von einer Ag-Cu-Co-Ni-As-S-Mineralisation in Mazedonien, Griechenland, und BENVENUTI (1991) aus einer Pb-Ag-Zn-Ni-Lagerstätte in der Toskana, Italien.

Immer handelt es sich dabei um Silberpentlandite in Erzparagenesen mit Pentlandit $(Fe,Ni)_9S_8$ und/oder Ni-Mineralen wie Gersdorffit $NiAsS$ (MPOSKOS, 1983). In der Erzmineralvergesellschaftung der Silberpentlandite von Axams konnte bis jetzt weder Pentlandit noch irgend ein anderes Ni-Mineral nachgewiesen werden.

Nach den Strukturuntersuchungen von HALL & STEWART (1973) besitzt Silberpentlandit eine kubische Pentlandit-Struktur, in der die oktaedrisch koordinierten Gitterplätze von Ag-Atomen eingenommen werden und auf den tetraedrisch koordinierten Gitterplätzen sich die (Fe,Ni)-Atome befinden

Bis jetzt wurde nur der Silberpentlandit aus der Talnotry Mine in Schottland von CRIDDLE & STANLEY (1986) farbmetrisch untersucht. Von

Silberpentlanditen einiger anderer Vorkommen existieren lediglich einzelne Reflexionsdaten, die bei ausgewählten Wellenlängen gemessen wurden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist einerseits die umfassende erzmikroskopische und mineralchemische Kennzeichnung der Silberpentlandite von Axams, andererseits soll aufgezeigt werden, welche optisch-physikalischen Parameter durch den Mineralchemismus beeinflusst werden, und ob diese Beeinflussung mit Methoden der quantitativen Erzmikroskopie nachweisbar ist.

Geologischer Rahmen

Der Silberpentlandit tritt in einer butzenförmigen Cu-Fe-Erzmineralisation auf, die an z.T. apatitreiche, quarzitisches Knauern in Gneisglimmerschiefern gebunden ist. 12 km SW von Innsbruck, beim sog. Knappenhof in Axams, weist noch eine Halde auf einen ehemaligen Cu-Erzbergbau hin (SPERGES, 1765; SRBIK, 1929; VAVTAR, 1988).

Über die Form der Erzkörper und ihr Auftreten in der polymetamorph überprägten Paragneisabfolge des Stubaikristallins sind keine Aussagen möglich, da das Anstehende nicht mehr lokalisierbar ist.

Als jüngstes metamorphes Geschehen in der erzführenden, altpaläozoischen Metasedimentabfolge läßt sich eine kretazische Metamorphose mit dem Maximum um 90–100 M.a. (THÖNI, 1982) nachweisen. Sie erreichte im NW des Kristallins Metamorphosebedingungen von $< 300^\circ\text{C}$,

im Bereich des Erzvorkommens Axams etwa 300°–350° C (= Stilpnomelanzone nach THÖNI, 1982) und im SE des Kristallins, im Schneeberger Zug, Temperaturen von > 600°C und 6–7 kb (HOINKES, 1986). Im Brennermesozoikum wird eine Temperaturzunahme von 450°C im Bereich der Kalkögel, ca. 5 km S des Erzvorkommens, auf 530°C und 3.5–4 kb im Bereich der Scheeberger Weißen beschrieben (DIETRICH, 1980).

Nach einem paläogenen, N-vergenten Vorstoß und W- bis NW-gerichteten Bewegungen der Kristallinmasse im Mitteloligozän und Miozän wurden im Neogen mit dem Vorstoß des Ötztal-kristallins über den Quarzphyllit die Silltalstörung (SCHMIDEGG, 1964) und verschiedene Parallelstörungen angelegt.

Erzmineralparagenese

Der Silberpentlandit von Axams ist als akzessorischer Gemengteil in einer Erzmineralparagenese vertreten, die als Hauptgemengteile Kupferkies CuFeS_2 , Magnetkies Fe_{1-x}S und Pyrit FeS_2 umfaßt. Arsenkies FeAsS , Zinkblende ZnS und Markasit FeS_2 sind zu den Nebengemengteilen zu rechnen, während Bleiglanz PbS , Mackinawit FeS_{1-x} , ged. Wismut Bi , Wismutglanz Bi_2S_3 und Elektrum AuAg nur als Akzessorien auftreten. Unter den sekundären Mineralneubildungen sind neben Nadeleisenerz $\alpha\text{-FeOOH}$ vor allem die Alterationsprodukte von Silberpentlandit, wie Bravoiit $(\text{Ni,Fe})\text{S}_2$ und/oder Violarit Ni_2FeS_4 und ein ? Mineral der „Silberkies“-Gruppe AgFe_2S_3 anzuführen.

Ein wesentliches Merkmal dieser Silberpentlandit-führenden Erzmineralparagenese ist das Fehlen von Pentlandit und anderer Ni- und Ag-Mineraie.

Auffallendes Kennzeichen im **Kupferkies** sind lanzettartige und oleanderblattförmige $\alpha\text{-}\beta$ -Umwandlungslamellen, die je nach Schnittlage der jeweils betrachteten Körner entweder aufeinander senkrecht stehen (Abb. 2), oder einen von 90° abweichenden Winkel einschließen können (Abb. 3 und 9). Die Inversionslamellen liefern

wichtige Hinweise auf die Bildungs- bzw. Umbildungstemperatur von Kupferkies und somit der Erzparagenese, worauf später noch eingegangen wird. Die Cu-Gehalte liegen zwischen 32.94 und 34.34 (Mittelwert: 33.61) Gew.%, und die Fe-Gehalte schwanken zwischen 30.33 und 31.03 (Mittelwert: 30.62) Gew.% (Tab. 1). Die Ni-, Co-, Au-, Ag- und Bi-Gehalte sind z.T. unter der Nachweisgrenze. Jedoch kann aus ihrer Depektierbarkeit zumindest für einen Teil der in der Paragenese akzessorisch vertretenen Ni-, Co-, Au-, Ag- und Bi-Mineraie auf eine Bildung im Zuge metamorpher Stoffumlagerungen und Entmischungsprozesse aus Kupferkies geschlossen werden.

Ehemaliger Hochtemperatur-Kupferkies mit $\alpha\text{-}\beta$ -Inversionslamellen enthält meist auch sternchenförmige **Zinkblende**-Entmischungen (Abb. 3 und 4), die nach kristallographischen Vorzugsrichtungen gleichförmig im Kupferkies angeordnet sind (Abb. 4). Zinkblende tritt aber nicht nur als Entmischung im Kupferkies auf, sondern bildet auch selbständige Primärkristallisate in der Erzmineralparagenese von Axams.

Auf Grund extrem hoher Anisotropie-Effekte und wegen des kräftigen Reflexionspleochroismus ist **Mackinawit** als feine, flitterförmige Entmischung im Kupferkies besonders leicht zu identifizieren (Abb. 2, 3, 4, 8 und 9). Neben scheinbar regellos im Kupferkies verteiltem Mackinawit (Abb. 3 und 9) gibt es auch Kristallisate, die orientiert nach zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen im Kupferkies angeordnet sind (Abb. 8). Bei den EMP-Analysen (Tab. 1) an den nur 2 μ breiten Mackinawittäfelchen handelt es sich um Mischanalysen mit dem umgebenden Kupferkies. Es darf jedoch angenommen werden, daß die im Gegensatz zum Kupferkies wesentlich höheren Ni- (4.70 bzw. 5.80 Gew.%) und Co-Gehalte (0.26 bzw. 0.10 Gew.%) ursächlich mit dem Mackinawit zusammenhängen. Nach KUCHA (1981) besitzen Ni- und Co-hältige Mackinawite eine obere Stabilitätsgrenze von 200° C.

Neben Kupferkies und Pyrit ist als weiterer Hauptgemengteil dieser Erzparagenese noch **Magnetkies** (Abb. 1) zu erwähnen. Die aus den

Probe	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	Au	Ag	Bi	Pb	Sb	S	total
Chp 1	33.25	30.42	0.38	0.04	0.03	0.09	0.00	0.08	0.00	0.00	34.27	98.56
Chp 2	33.40	30.46	0.00	0.02	0.00	0.06	0.04	0.00	0.11	0.02	34.15	98.26
Chp 3	34.13	30.88	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	34.01	99.10
Chp 4	32.94	30.33	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.17	0.05	0.00	33.91	97.45
Chp 5	34.34	31.03	0.00	0.05	0.19	0.02	0.07	0.00	0.00	0.00	33.84	100.34
Po 1	0.00	58.73	0.00	0.00	0.55	–	–	–	–	–	39.64	98.82
Po 2	0.16	59.87	0.02	0.19	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.99	99.43
Mck 1	14.98	46.90	0.00	0.26	4.70	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	34.65	101.69
Mck 2	14.73	39.54	0.00	0.10	5.80	–	–	–	–	–	36.41	96.58
Bi	0.51	0.44	0.16	0.00	0.00	0.05	0.04	93.24	0.00	0.03	0.02	94.49
Au 1	0.08	2.31	0.35	0.04	0.53	55.10	35.78	0.53	0.00	0.00	0.42	94.61
Au 2a	–	1.71	–	–	–	63.37	30.54	–	–	–	0.00	95.62
Au 2b	–	1.36	–	–	–	73.01	25.88	–	–	–	0.85	101.10
Au 2c	–	1.36	–	–	–	50.38	46.53	1.45	–	–	1.45	101.74
Au 2	–	1.47	–	–	–	62.25	34.32	1.45	–	–	0.73	100.24
Bit	–	2.24	–	–	–	5.54	2.06	84.11	7.15	–	2.92	104.02

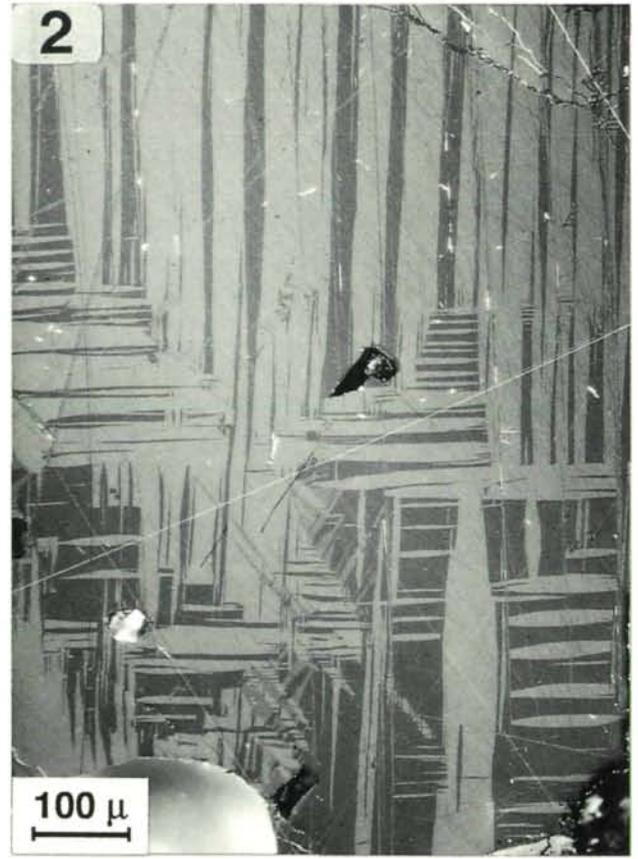
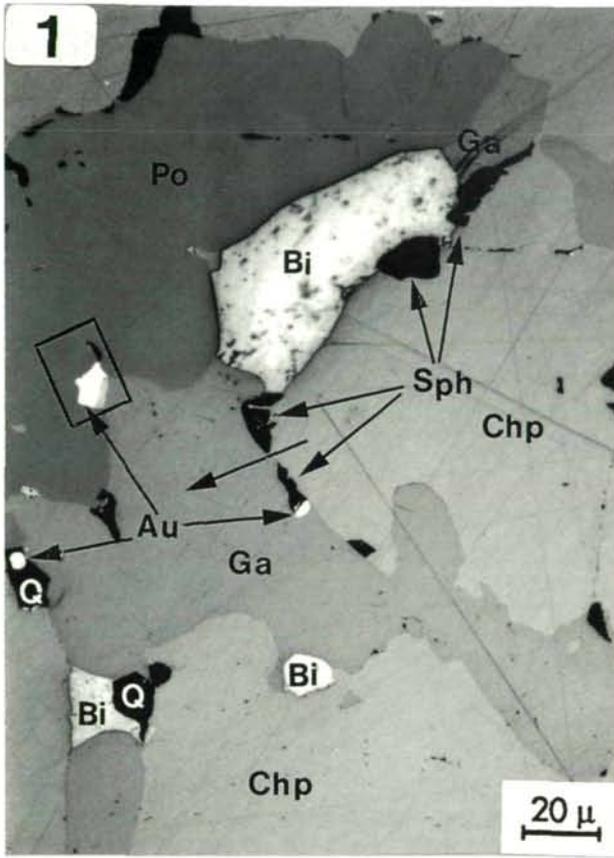
Tab. 1: EMP-Analysen von Kupferkies (Chp), Magnetkies (Po), Mackinawit (Mck), ged. Wismut (Bi), Elektrum (Au) und Wismutglanz (Bit). Angaben in Gew.%; – = nicht bestimmt.

Abb. 1: Neben Kupferkies (Chp, lichtgrau), Bleiglanz (Ga, hellgrau) und Magnetkies (Po, dunkelgrau) ist ged. Wismut (Bi, grauweiß) mit schwarzgraugefleckter Oberfläche (schlechte Poliereigenschaften) zu sehen. Drei winzige Elektrum-Körnchen (Au, weiß) und Zinkblende (Sph, schwarz) sind mit Pfeilen markiert. Im eingezeichneten Ausschnitt (entspricht der Abb. 5) ist zwischen Elektrum und Bleiglanz ein dünner Wismutglanzsaum (weißgrau) zu erkennen. Als Gangartmineral ist Quarz (Q, schwarz) vertreten. Polierter Anschliff; 1 Nic.; Ölimmersion.

Abb. 2: Im Hochtemperatur-Kupferkies mit typischen, oleanderblattförmigen α - β -Inversionslamellen sind die feinen Mackinawitflitterchen (weiß) wegen der extrem hohen und sehr lebhaften Anisotropie-Effekte leicht zu erkennen. Quarzkörner sind durch Innenreflexe weiß aufgehellt. Polierter Anschliff; Nic. X.

Abb. 3: Im Hochtemperatur-Kupferkies mit lanzettartigen α - β -Umwandlungslamellen und weißen Mackinawitflitterchen treten kleine Zinkblendesternchen (grau, Pfeile) auf. Polierter Anschliff; Nic. X.

Abb. 4: Zinkblendesternchen (grauweiß), die orientiert nach kristallographischen Richtungen im Kupferkies (grauweiß) angeordnet sind. Außerdem ist wurmförmiger und abhängig von der Schnittlage auch „nadeliger“ Mackinawit (Pfeile, hellgrau) zu erkennen. Polierter Anschliff; 1 Nic.; Ölimmersion.



EMP-Analysen (Tab. 1) ableitbaren Formeln $(\text{Fe,Ni})_{7-0.14}\text{S}_8$ mit 46.0 at.% Fe und 0.4 at.% Ni sowie $(\text{Fe,Ni,Cu})_{7+0.62}\text{S}_8$ mit 46.6 at.% Fe, 0.1 at.% Ni und 0.1 at.% Cu stimmen mit der von KISSIN (1974) angegebenen Formel $\text{Fe}_{7\pm x}\text{S}_8$ mit 46.4 bis 47.3 at.% Fe für monoklinen 4C-Magnetkies auffallend gut überein. Der Magnetkies dieser Erzmineralparagenese ist auch als tafeliges Entmischungsprodukt im Kupferkies zu beobachten (Abb. 8). Eines der Magnetkiestäfelchen ist mit der (001)-Fläche orientiert auf (111) von Silberpentlandit aufgewachsen (Abb. 8). Vom farblich ähnlich aussehenden, jedoch isotropen und etwas schwächer reflektierenden Silberpentlandit ist Magnetkies durch die deutlichen Anisotropie-Effekte bzw. durch den Reflexionspleochroismus zu unterscheiden.

Mengenmäßig dominiert unter den akzessorischen Gemengteilen **Bleiglanz** (Abb. 1), der hier im Gegensatz zu Bleiglanzen der Pb-Zn-Erzparagenesen im Stubai-Ötztal-Kristallin Ag-frei zu sein scheint (Abb. 6d).

Auch ged. **Wismut** (Abb. 1) ist unter den Akzessorien ein relativ häufiger und wegen seiner geringen Schleifhärte, seiner deutlichen Anisotropie-Effekte und seiner Zwillingslamellierung ein einfach zu bestimmender Vertreter.

Bei den winzigen, maximal 10 μ großen „Goldkörnchen“ (Abb. 1) handelt es sich nicht um reines Gold, sondern um die Au-Ag-Legierung **Elektrum** mit durchschnittlichen Ag-Gehalten von 34.61 Gew.% (Tab. 1).

Ein weiterer akzessorischer Gemengteil ist vermutlich **Wismutglanz** (Abb. 1 und 5), dessen eindeutige Bestimmung jedoch wegen der Feinheit des Kornes von nur 2 μ nicht möglich war. Unter dem Auflichtmikroskop fällt ein deutlicher Helligkeitsunterschied zum angrenzenden Bleiglanz auf (Abb. 1), der in etwa dem um 5% höheren Reflexionsvermögen von Wismutglanz in Richtung der kristallographischen c-Achse entspricht. Da es sich bei der EMP-Analyse (Tab. 1) um eine Mischanalyse handelt, in der sich die Elementgehalte des fraglichen Wismutglanz mit Elektrum, Bleiglanz und vermutlich auch mit Magnetkies überlagern, war auch auf diesem Wege eine exakte Bestimmung nicht möglich. Mittels einer Fe-, Au-, Ag- und Bi-Verteilungsanalyse (Abb. 6b–6e) konnte jedoch nachgewiesen werden, daß der Kern des fraglichen Kornes nur aus Wismut besteht. Es könnte sich also um Wismutglanz handeln.

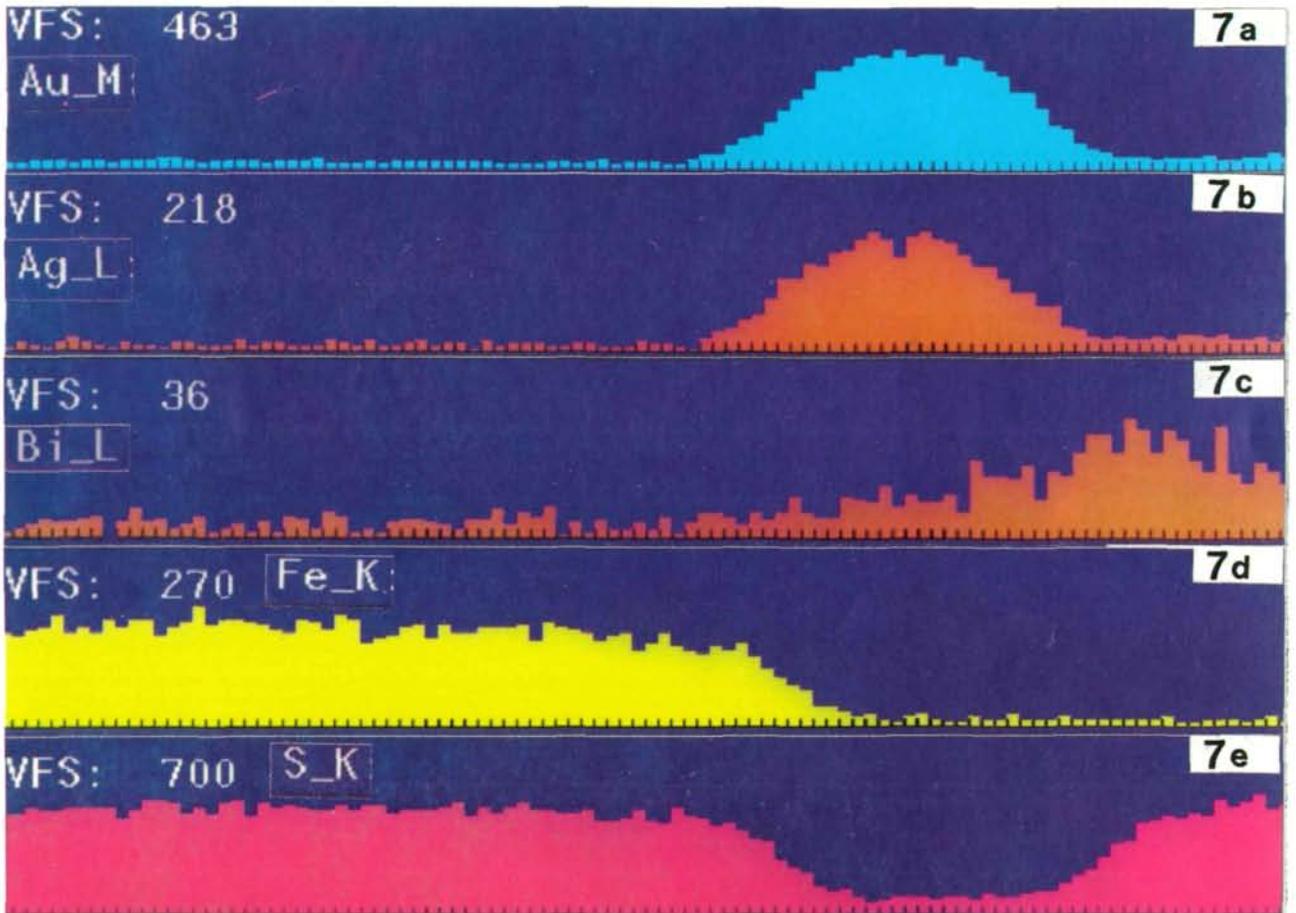
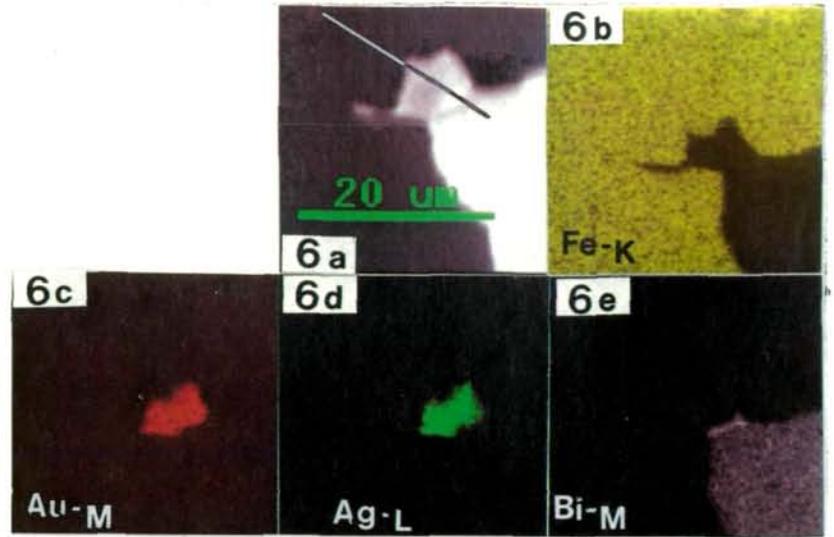
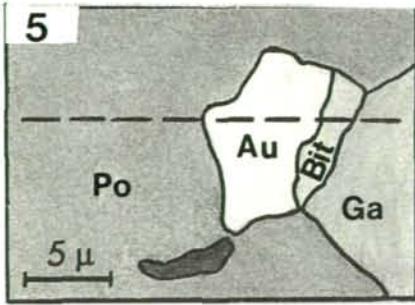
Silberpentlandit

Der Silberpentlandit dieses Vorkommens ist nur intragranular im Hochtemperatur-Kupferkies in Form maximal 35 μ großer, xenomorpher (Abb. 9 und 10), hypidiomorpher bis idiomorpher Körner zu beobachten (Abb. 8, 12 und 13). Mitunter sind dabei die Kristallite gleichförmig mit untereinander parallel verlaufenden Korn-

Abb. 5: Ausschnittsvergrößerung aus Abb. 1 mit Magnetkies (Po), Bleiglanz (Ga), Zinkblende (schwarz), Elektrum (Au) und einem 2 μ breiten ? Wismutglanzsaum (Bit) zwischen Elektrum und Bleiglanz. Die Elementverteilungs-Meßlinie (Abb. 7 a–e) ist strichliert eingezeichnet. Zeichnung nach einem Mikrophoto.

Abb. 6 a–e: EMP-Analyse der Fe-, Au-, Ag- und Bi-Verteilung im Magnetkies, Bleiglanz, Elektrum, ? Wismutglanz und der Zinkblende. Im BSE-Bild (Abb. 6 a) ist die Elementverteilungs-Meßlinie (Abb. 7 a–e) eingezeichnet. Fe (Abb. 6 b) ist auf den Magnetkies beschränkt. Bi (Abb. 6 e) ist nur im dünnen ? Wismutglanzsaum zwischen Elektrum und Bleiglanz nachzuweisen. Der Bleiglanz ist Ag-frei (Abb. 6 d). Seine scheinbaren Bi-Gehalte (Abb. 6 e) erklären sich aus der Überlagerung der Bi-M- und der Pb-M-Linien.

Abb. 7 a–e: EMP-Analyse der Au-, Ag-, Bi-, Fe- und S-Verteilung entlang der Meßlinie, die in den Abb. 5 und 6 a markiert ist. Die Korngrenzen zwischen Magnetkies, Elektrum und ? Wismutglanz sind wegen der Unschärfe in der Auflösung bzw. auf Grund von Mischanalysen im Randbereich der Mineralkörner \pm verschwommen. Die Intergranulare zwischen Wismutglanz und Bleiglanz ist zusätzlich noch durch die Überlagerung der Bi-L- und Pb-L-Linien verschleiert. VFS: 463, 218, 36, 270 und 700 = Maximum der Impulse pro Sekunde für die jeweiligen Elemente; Länge der Meßlinie 20 μ .



grenzen nach kristallographischen Richtungen im Kupferkies angeordnet (Abb. 12) und erinnern an die von SCOTT & GASPARRINI (Fig. 2, S. 166, 1973) beschriebenen, dendritischen Silberpentlandit-Entmischungen im Kupferkies. In Abb. 8 stimmen die Korngrenzen des idiomorphen Silberpentlanditkornes mit den Richtungen überein, nach denen Mackinawit im Kupferkies entmischt ist.

Physikalisch-optische Kennzeichnung

Silberpentlandit besitzt eine bronceartige Reflexionsfarbe ähnlich jener von frischpoliertem Bornit, ist optisch isotrop und zeigt keine Innenreflexe. Sein Reflexionsvermögen ist, sowohl bei Beobachtung in Luft, als auch in Öl merklich niedriger, als jenes von Magnetkies der gleichen Paragenese. Vereinzelt wird durch parallele Mikrorisse (Abb. 13) eine kubische Schleifspaltbarkeit angedeutet.

An drei, von ihrer Korngröße her geeigneten Silberpentlanditen (Agpn 1, Agpn 2 und Agpn 3 in Abb. 12) wurde mit einem Mikrospektralphotometer (Photomultiplier: Kathodentyp S 11) am Reichert-Univar-Forschungsmikroskop die spektrale Reflexion im Bereich des sichtbaren Lichtes von 400 bis 700 nm in 20-Nanometer-Schritten gemessen. Als Lichtquelle diente eine Xe-

nonlampe (XBO 450 W/20 fr.), die eine 20-fach höhere subjektive Helligkeit besitzt als 15-W-Niedervoltleuchten, die normalerweise verwendet werden. Das Xenonlicht hat jedoch im Rotbereich des Spektrums eine deutliche Intensitätsabnahme. Als Standard wurde WTc verwendet. Wegen der extremen Kornfeinheit mußten die Reflexionsmessungen mit einem Planachromat-Objektiv 50x/0.70 durchgeführt werden. Um politurabhängige Meßfehler weitgehend auszuschalten, wurde der Meßbereich mit 1.3 μ Durchmesser möglichst klein gewählt. Diese Meßanordnung (Xenonbrenner, Objektiv, Meßbereichsgröße) machte im langwelligen Spektralbereich ab 680 nm eine hohe Messverstärkung notwendig. Das führte zu einer Verminderung der Nullpunkt Konstanz der digitalen Meßwerte und deshalb mußten die Reflexionswerte von 680 und 700 nm mit dem Referenzspektrum (Agpn 7) von CRIDDLE & STANLEY (1986) interpoliert werden.

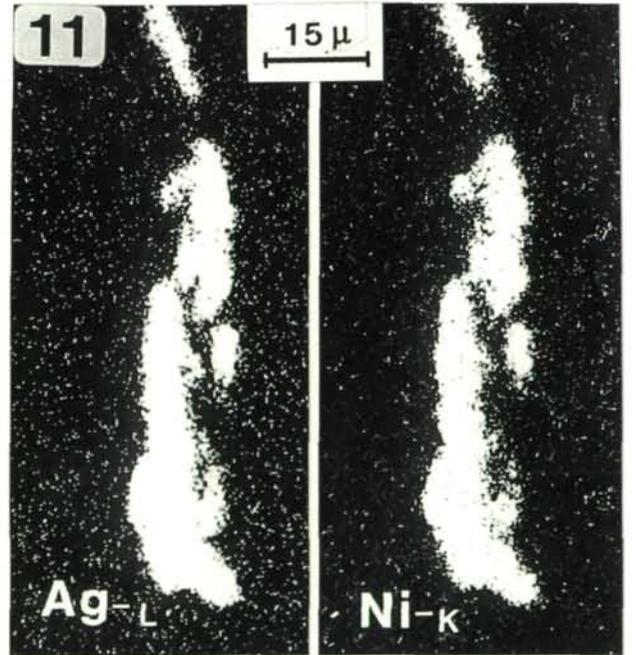
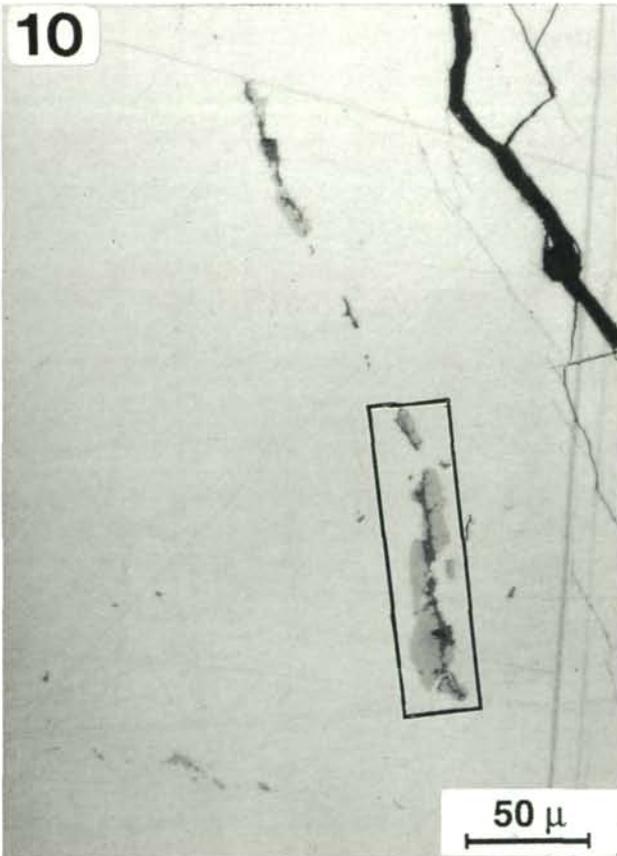
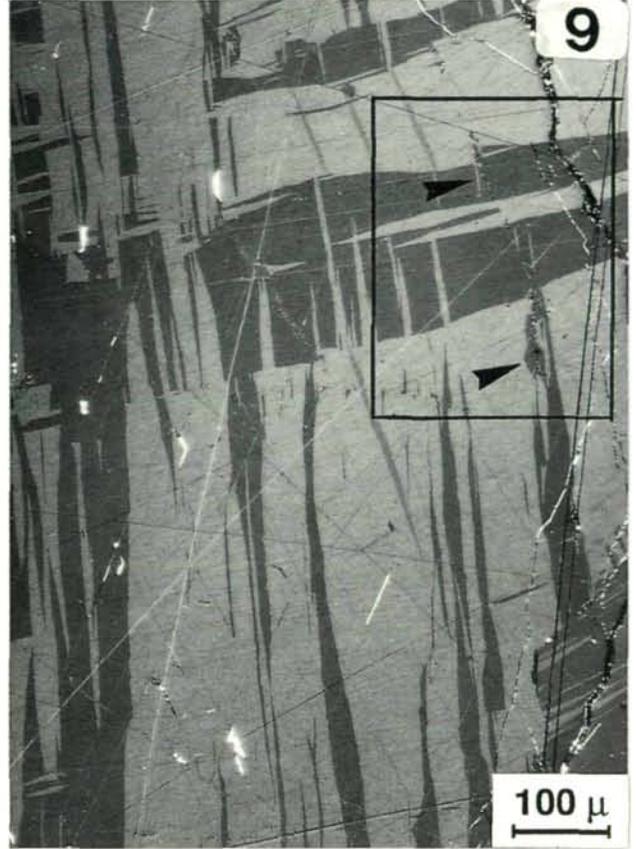
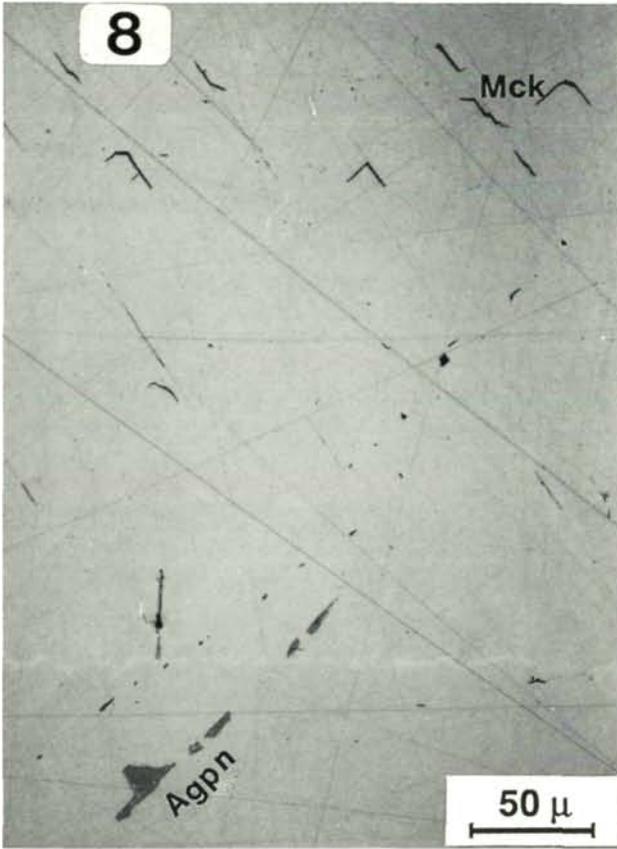
Der gleichförmige Verlauf der spektralen Reflexionskurven 1, 2, 3 und 7 (Diagr. 1) belegt eine \pm identische Dispersion des reflektierten Lichtes durch die analysierten Silberpentlandite 1, 2, 3 und 7. Die Übereinstimmung der Kurven 1, 2 und 3 mit der Kurve 7 (Referenzspektrum) ist auffällig, wobei die Ähnlichkeit zwischen 1 und 7 bzw. zwischen 2 und 3 größer ist. Im Detail bestehen jedoch leichte Unterschiede zwischen den einzelnen Dispersionskurven. Die Silberpentlandite 2 und 3 besitzen im gesamten

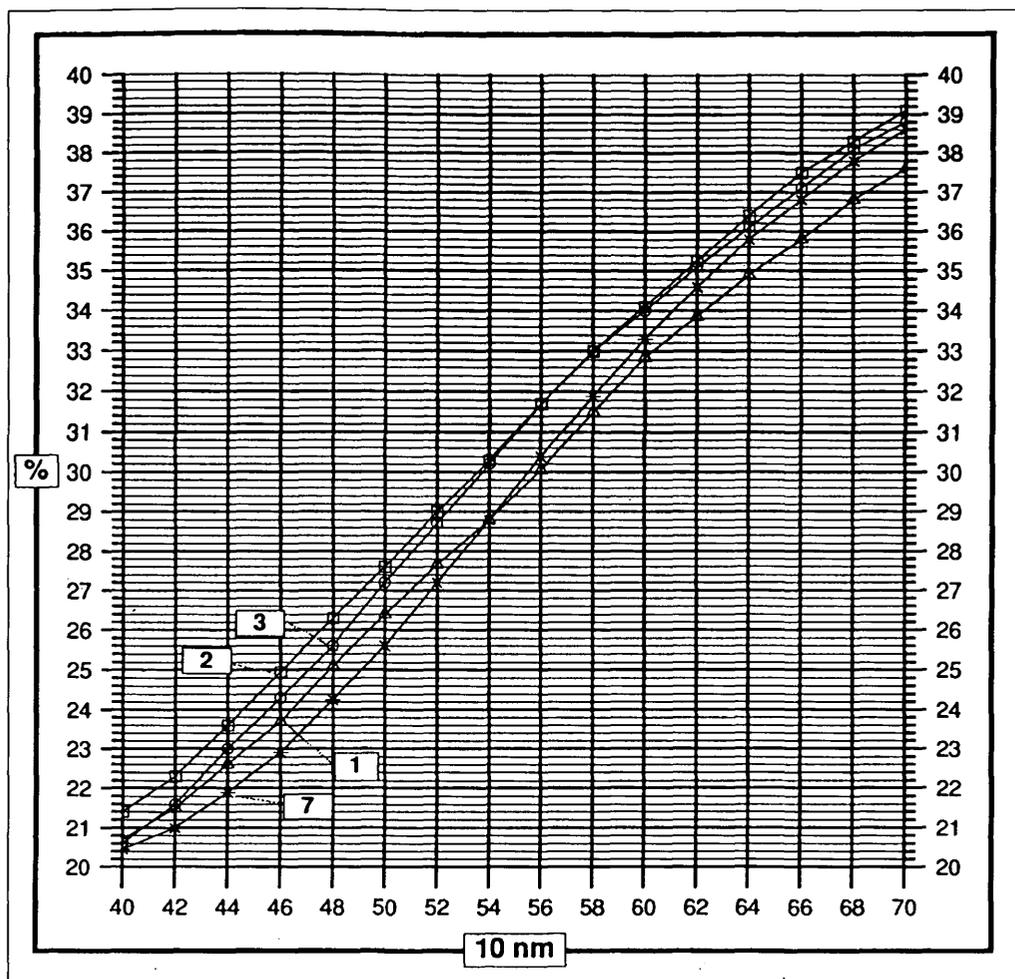
Abb. 8: Mackinawit-Entmischungen (Mck, schwarzgrau) nach zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen im Kupferkies (weißgrau). Von links unten nach rechts oben sind im Kupferkies Magnetkiestäfelchen (dunkelgrau) gereiht. Das unterste im Bild ist orientiert mit Silberpentlandit verwachsen (Agpn, dunkelgrau). Polierter Anschliff; 1 Nic.; Ölimmersion.

Abb. 9: Hochtemperatur-Kupferkies mit α - β -Umwandlungslamellen und feinen Mackinawitfitterchen. Der isotrope Silberpentlandit (Pfeile) ist bei gekreuzten Nicols nur undeutlich von den Kupferkies-Zwillingslamellen, die sich in Dunkelstellung befinden, zu unterscheiden. Der eingezeichnete Ausschnitt entspricht der Abb. 10. Polierter Anschliff; Nic. X.

Abb. 10: In dieser Ausschnittsvergrößerung aus Abb. 9. sind die xenomorphen Silberpentlanditkörner (weißgrau) entlang von Mikrorissen zum Teil umgewandelt zu Nadeleisenerz (dunkelgrau). Der eingezeichnete Ausschnitt entspricht etwa der halben Größe von Abb. 11. Polierter Anschliff; 1 Nic.

Abb. 11: EMP-Analyse der Ag- und Ni-Verteilung im Silberpentlandit der Abb. 10. Ag und Ni sind nur im Silberpentlandit nachzuweisen. Nadeleisenerz ist Ag- und Ni-frei.





λ nm	R% 1	R% 2	R% 3	R% 7		Agpn 1	Agpn 2	Agpn 3	Agpn 7
400	20.70	21.40	20.60	20.45	Ag	11.43	11.05	11.02	12.10
420	21.50	22.30	21.60	21.00	Fe	35.63	35.06	35.45	35.06
440	22.60	23.60	23.00	21.90	Cu	1.15	2.07	1.98	0.60
460	23.70	24.95	24.30	22.90	Ni	19.14	19.60	18.56	20.06
480	25.10	26.30	25.60	24.25	Co	0.38	0.00	0.26	0.00
500	26.40	27.60	27.20	25.60	S	33.07	33.34	31.75	31.50
520	27.65	29.00	28.70	27.20	total	100.80	101.12	99.02	99.80
540	28.80	30.30	30.20	28.80					
560	30.05	31.70	31.70	30.40					
580	31.50	33.00	33.00	31.90					
600	32.85	34.10	34.00	33.30					
620	33.85	35.25	35.10	34.60					
640	34.90	36.40	36.10	35.80					
660	35.80	37.50	37.10	36.80					
680	36.80	38.30	38.10	37.80					
700	37.60	39.10	38.80	38.60					

Diagramm 1: Spektrale Dispersionskurven der Silberpentlandite 1, 2 und 3 von Axams (Abb. 12) sowie 7 (CRIDDLE & STANLEY, 1986). Reichert-Univar-Mikrospektrophotometer; Objektiv: Planachromat 50x/0,70; Meßfelddurchmesser: 1.3 μ ; Standard: WTiC; Mineralchemismus in Gew.%.

Spektralbereich die höheren Reflexionswerte als 1 und 7, ihre Kurven verlaufen ab 520 nm beinahe identisch und weisen zwischen 540 und 600 nm die gleichen Reflexionswerte auf. Silberpentlandit 1 hat bis 540 nm etwas höhere und ab 540 nm niedrigere Reflexionswerte als Silberpentlandit 7. Von den wenigen Reflexionswerten, die GROVES & HALL (1978) von anderen Silberpentlanditen publiziert haben (siehe Tab. 4), weichen die entsprechenden Werte der Silberpentlandite dieser Studie zum Teil beträchtlich ab.

Die spektralen Dispersionskurven der Silberpentlandite 1, 2, 3 und 7 wurden nach einem von LIU Jianming auf Grundlage der sog. Gewichtsordinaten-Methode (PILLER, 1966; SCHULTZE, 1975) erstellten Computerprogramm farbmetrisch ausgewertet. Bei dieser Methode werden aus den Rot-, Grün- und Blauanteilen der jeweiligen Reflexionskurven bzw. aus den entsprechenden Normfarbwerten X, Y und Z die Normfarbwertanteile x, y und z nach folgenden Formeln berechnet:

$$x = X/(X + Y + Z)$$

$$y = Y/(X + Y + Z)$$

$$z = Z/(X + Y + Z)$$

$$x + y + z = 1$$

Die Normfarbwerte betragen für Agpn 1 $x = 0.341$ $y = 0.342$, für Agpn 2 $x = 0.340$ $y = 0.343$ und für Agpn 3 $x = 0.342$ $y = 0.345$. Die Berechnungen erfolgten für die Normlichtart C, welche im sichtbaren Spektralbereich etwa dem Tageslicht bzw. einer Beleuchtung mit Tageslichtfilter entspricht.

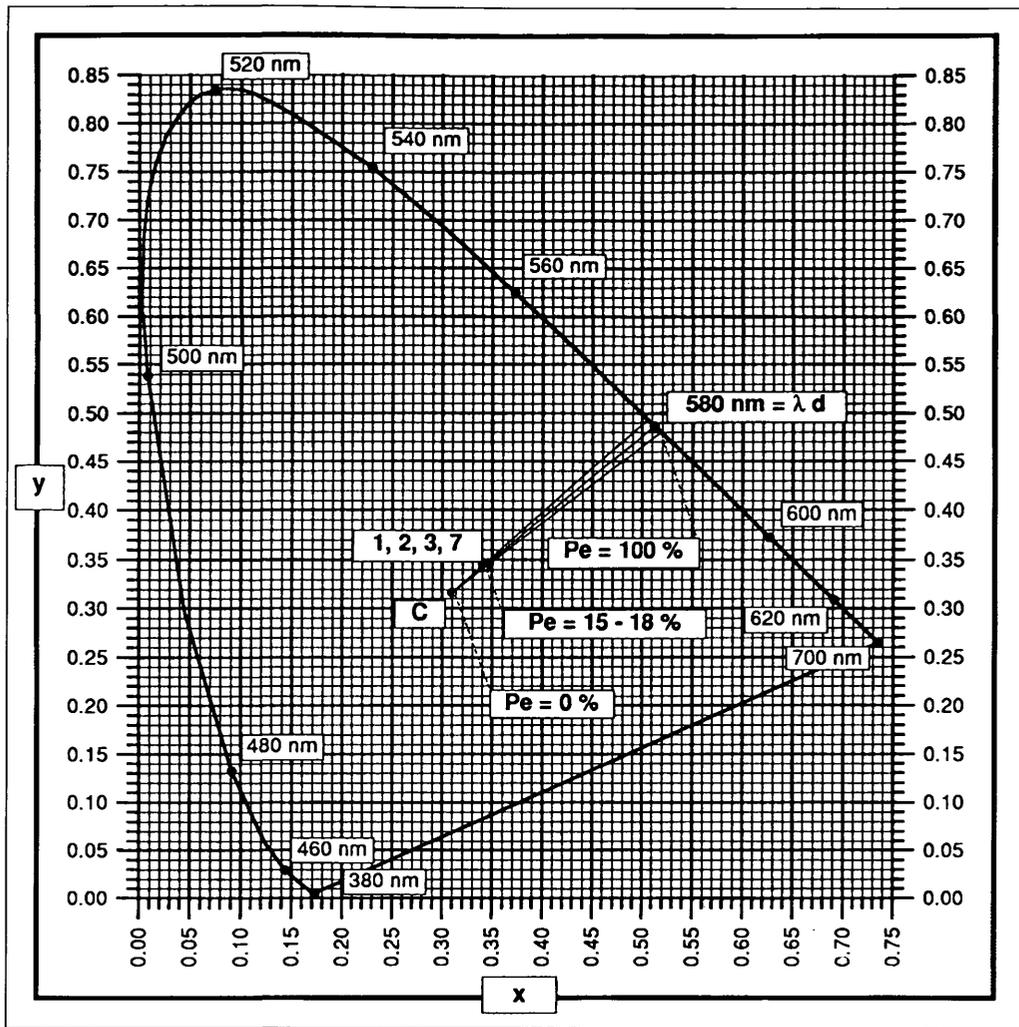
Die Farbkennzeichnung durch die Normfarbwertanteile x und y wird noch durch den Hellbezugswert Y% ergänzt. Es handelt sich dabei um den Normfarbwert Y, der bei 550 nm die stärkste Farbvalenz besitzt und ziemlich genau jenem Wellenbereich von 555 nm entspricht, bei dem das menschliche Auge das stärkste Helligkeitsempfinden hat. Y% liegt in der dritten Dimension und wurde in die zweidimensionalen x-y-Diagramme nicht eingetragen. Der Hellbezugswert für die gemessenen Silberpentlandite (30.0 Y% für Agpn 1, 31.4 Y% für Agpn 2, 31.2 Y% für Agpn 3) liegt mit einem Mittelwert

von 30.9 Y% nur wenig über dem Helligkeitseindruck von 30.1 Y% im Silberpentlandit 7 von CRIDDLE & STANLEY (1986).

Zur vollständigen Charakterisierung der Farbvalenzen wurden auch die beiden Helmholtz-Koordinaten (farbtongleiche Wellenlänge λ_d und Farbsättigung P_e) ermittelt. Dabei entspricht die farbtongleiche Wellenlänge λ_d jenem Farbton am sog. „Spektralfarbenzug“ (= Kurve der reinen Spektralfarben), der durch eine additive Mischung mit der Normlichtart C die Farbe des gemessenen Farbkörpers ergibt. Sie kann am Schnittpunkt der Geraden „C – 1, 2, 3, 7“ auf der Kurve der reinen Spektralfarben abgelesen werden (Diagr. 2). Die Farbsättigung bzw. Farbintensität P_e gibt die Menge des spektralen Farbanteiles an, die für die Erreichung der jeweiligen Farbmischung notwendig ist. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Distanz „C – 1, 2, 3, 7“ zu „C – λ_d “ (Diagr. 2) und beträgt im Punkt der Normlichtart C logischerweise 0% und im Punkt λ_d auf der Kurve der reinen Spektralfarben 100%. Die von der Kurve der reinen Spektralfarben eingeschlossene Fläche im Normfarbdreieck beinhaltet die Normfarbwertanteile x und y sämtlicher natürlich vorkommenden, realen Farben. Außerhalb des Spektralfarbenzuges befinden sich die nicht realisierbaren, virtuellen Farben.

Auch die aus den spektralen Dispersionskurven ermittelten Farb- und Helmholtzwerte ($P_e\%$: 15.2 für Agpn 1, 15.0 für Agpn 2, 15.4 für Agpn 3, 17.6 für Agpn 7; λ_d nm: 579 für Agpn 3, 580 für Agpn 1, 2 und 7) schwanken innerhalb eines sehr eng begrenzten Bereiches und überlagern sich im Übersichtsdiagramm (Diagr. 2).

In der detaillierteren Darstellung (Diagr. 3) werden jedoch geringe Unterschiede deutlich. Entsprechend der Ähnlichkeit der Reflexionskurven von Silberpentlandit 2 und 3 bzw. 1 und 7 weisen sie mit 31.4 und 31.2 Y% bzw. 30.0 und 30.1 Y% auch beinahe gleich hohe Helligkeitseindrücke und mit 579.5 und 579.1 λ_d nm bzw. 580.0 und 580.3 λ_d nm auch beinahe dieselben farbtongleichen Wellenlängen auf. In den Farbintensitäten sind diese augenfälligen Zusammen-



	x	y	Y%	Pe%	λd nm
Agpn 1	0.341	0.342	30.0	15.2	580
Agpn 2	0.340	0.343	31.4	15.0	580
Agpn 3	0.342	0.345	31.2	16.4	579
Agpn 7	0.346	0.345	30.1	17.6	580
C	0.310	0.316		0.0	

Diagramm 2: Normfarbtafel mit den Normfarbwertanteilen x und y, den Farbintensitäten Pe% und den farbtongleichen Wellenlängen λd nm der Silberpentlandite 1, 2, 3 und 7 bezogen auf die Normlichtart C.

hänge jedoch nicht zu erkennen. Hier scheinen Ähnlichkeiten eher zwischen den Silberpentlanditen 1 und 2 mit 15.21 und 14.96 Pe% bzw. 3 und 7 mit 16.41 und 17.58 Pe% zu bestehen.

Diese geringen Differenzen in den Farbwerten sind jedoch nur meßbar und bei mikroskopischer

Betrachtung auch für einen geübten Erzmikroskopiker nicht feststellbar. Das ist auch aus der Größe der eingezeichneten Mac-Adam-Ellipsen zu ersehen (Diagr. 3), die bekanntlich jene Bereiche umschließen, innerhalb derer unser Auge keine Farbunterschiede erkennen kann.

von VOURELAINEN et al. (1972) höhere Durchschnittsgehalte von 57.3 Gew.% angegeben.

Die mittleren Cu- und Co-Gehalte von 1.5 und 0.3 Gew.% gleichen denen anderer Silberpentlandite, sofern sie bestimmt worden sind. Sie sind etwas niedriger als die Ni- und Co-Gehalte der Silberpentlandite von Koronuda (MPOSKOS, 1983).

Die deutlichsten Unterschiede in der mineralochemischen Zusammensetzung zwischen den Silberpentlanditen von Axams und jenen anderer Vorkommen sind in ihren S-Gehalten festzustellen. Während alle anderen mittlere S-Gehalte zwischen 30.9 Gew.% (Outokumpu, in MANDZIUK & SCOTT, 1977) und 31.6 Gew.% (finnische Vorkommen, in VOURELAINEN et al., 1972) aufwei-

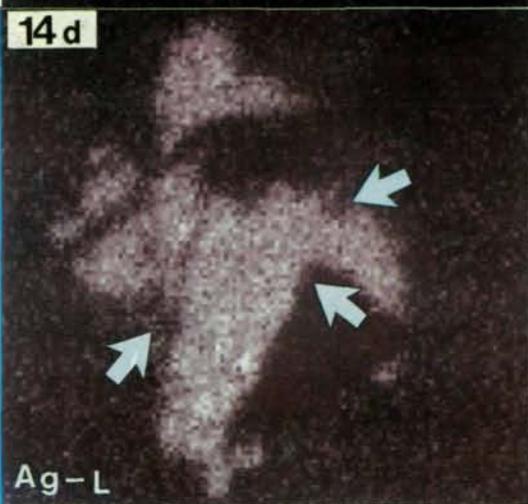
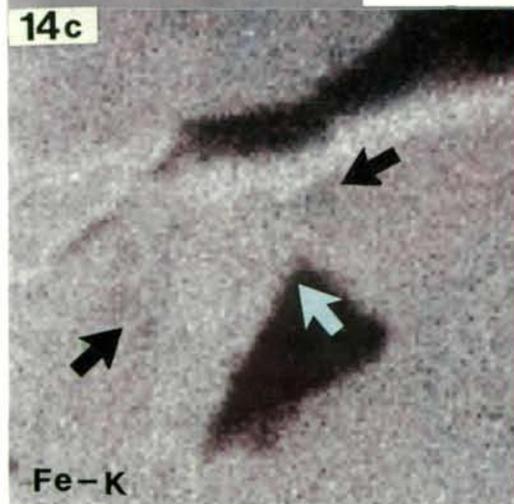
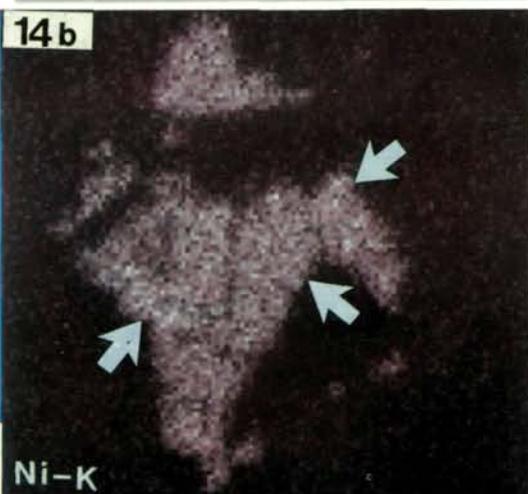
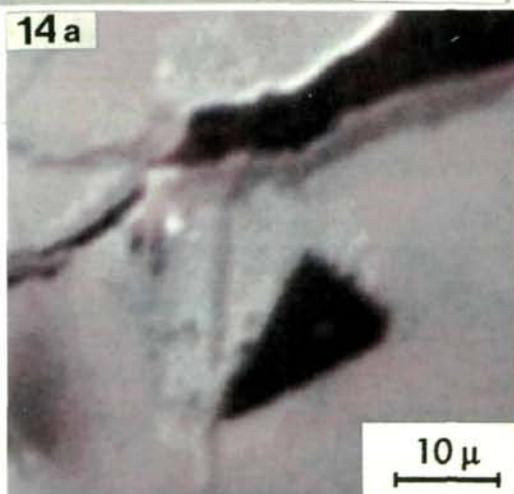
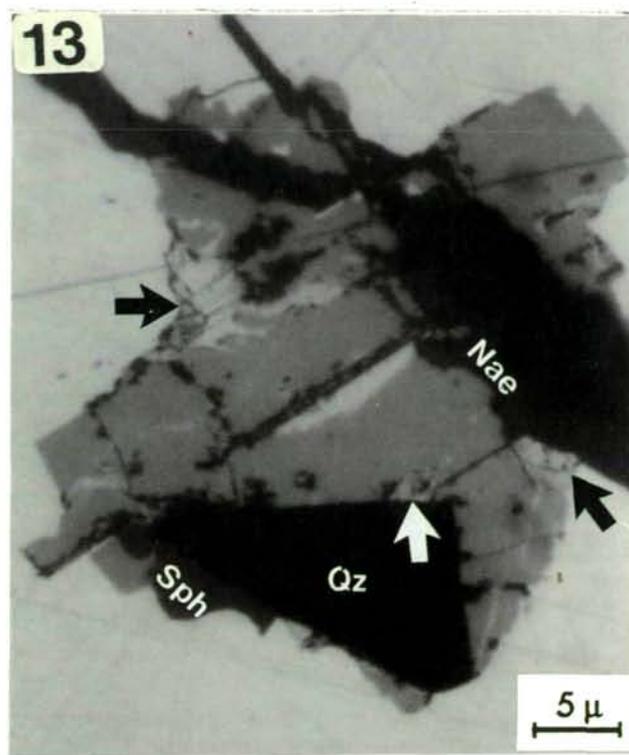
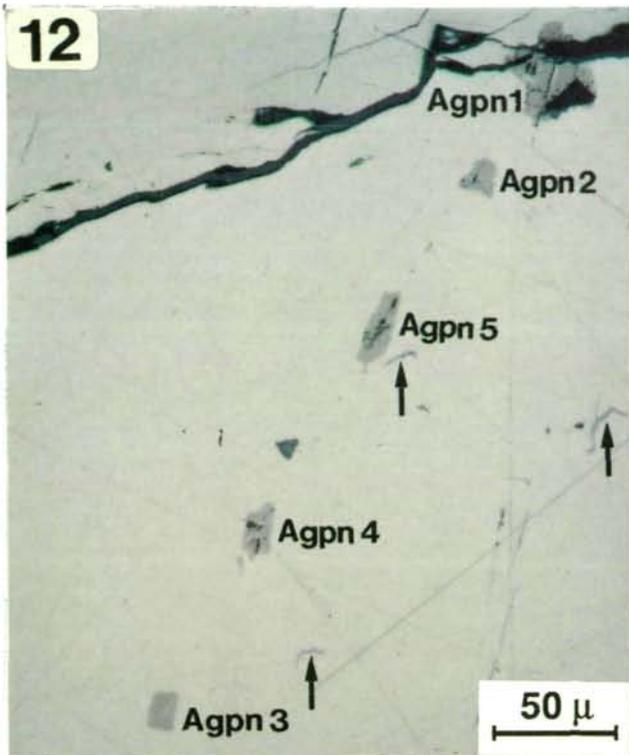
Probe	Ag	Fe	Cu	Ni	Co	S	total				
Agpn 1a	11.24	35.93	1.10	19.01	0.15	33.05	100.49				
Agpn 1b	11.22	35.04	1.34	19.34	0.71	32.98	100.62				
Agpn 1c	11.83	35.91	1.00	19.08	0.28	33.17	101.27				
Agpn 2	11.05	35.06	2.07	19.60	0.00	33.34	101.12				
Agpn 3	11.02	35.45	1.98	18.56	0.26	31.75	99.02				
Agpn 4	10.90	34.89	1.14	20.75	0.72	33.00	101.40				
Agpn 5	11.10	33.83	1.88	20.45	0.44	32.55	100.25				
Agpn 6a	13.04	36.07	1.34	19.34	0.06	31.69	101.54				
Agpn 6b	12.98	36.45	1.23	19.35	0.13	31.21	101.35				
	A/pfu	A/pfu	A/pfu	A/pfu	A/pfu	A/pfu	Fe/Ni	Ag/S	Fe/S	Ni/S	Me/S
Agpn 1	0.82	4.96	0.14	2.53	0.05	8	1.960	0.103	0.620	0.316	1.063
Agpn 2	0.79	4.83	0.25	2.57	0.00	8	1.879	0.099	0.604	0.321	1.055
Agpn 3	0.83	5.13	0.25	2.56	0.04	8	2.004	0.104	0.641	0.320	1.101
Agpn 4	0.78	4.85	0.14	2.75	0.10	8	1.764	0.098	0.606	0.343	1.083
Agpn 5	0.81	4.78	0.23	2.75	0.06	8	1.738	0.101	0.598	0.343	1.079
Agpn 6	0.98	5.30	0.17	2.69	0.01	8	1.970	0.123	0.663	0.336	1.144

Tab 2: EMP-Analysen (Gew.%), Atome pro Formeleinheit und Atomverhältnisse der Silberpentlandite von Axams. Agpn 1–5 in Abb. 12; Agpn 6 in Abb. 10.

Abb. 12: Gleichförmig orientiert im Kupferkies (grauweiß) treten idiomorphe bis hypidiomorphe, max. 35 µ große Silberpentlanditkristallite (Agpn 1–5) auf, die ausgehend von Mikrorissen von Nadeleisenerz (schwarz) und einem stärker reflektierenden Sulfid (weiß) verdrängt werden. In der perlschnurartigen Silberpentlanditreihe ist auch ein dreieckiges Zinkblendekorn (schwarz) zu erkennen. Die feinen Mackinawit-Entmischungen (Pfeile) heben sich nur undeutlich vom umgebenden Kupferkies ab. Polierter Anschliff; 1 Nic.; Ölimmersion.

Abb. 13: Nadeleisenerz (Nae, schwarzgrau) umkrustet Silberpentlandit (Agpn 1 der Abb. 12) und Kupferkies (Chp). Silberpentlandit wird randlich von Bravoit und/oder Violarit (lichtgrau, Pfeile) und ausgehend von der Spaltbarkeit von ? Silberkies III mit einem deutlich kräftigeren Reflexionsvermögen verdrängt. Im Silberpentlandit ist Quarz (Qz, schwarz) eingewachsen. Zwischen Quarz und dem angrenzenden Kupferkies ist Zinkblende (Sph, dunkelgrau) zu erkennen. Polierter Anschliff; 1 Nic.; Ölimmersion.

Abb. 14 a–d: EMP-Analyse der Ni-, Fe- und Ag-Verteilung im Silberpentlandit der Abb. 13. Im BSE-Bild (Abb. 14 a) und in der Fe-Verteilung (Abb. 14 c) hebt sich die Fe-reichere Nadeleisenerzkruste deutlich vom Silberpentlandit und Kupferkies ab. Im Bravoit und/oder Violarit (Pfeile, Abb. 14 b–d) ist eine Ni-Anreicherung (Abb. 14 b), ein teilweiser Fe-Verlust (Abb. 14 c) und völlige Ag-Abreicherung (Abb. 14 d) zu erkennen. Im ? Silberkies III ist lediglich eine merkliche Ni-Abreicherung (Abb. 14 b) festzustellen, während im Fe- (Abb. 14 c) und Ag-Gehalt (Abb. 14 d) kein Unterschied zum umgebenden Silberpentlandit erkennbar ist.



1	$\text{Ag}_{0.82}(\text{Fe,Cu})_{5.10}(\text{Ni,Co})_{2.58}\text{S}_8$	Axams, Österreich	
2	$\text{Ag}_{0.79}(\text{Fe,Cu})_{5.08}(\text{Ni,Co})_{2.57}\text{S}_8$	Axams, Österreich	
3	$\text{Ag}_{0.83}(\text{Fe,Cu})_{5.38}(\text{Ni,Co})_{2.60}\text{S}_8$	Axams, Österreich	
4	$\text{Ag}_{0.78}(\text{Fe,Cu})_{4.99}(\text{Ni,Co})_{2.85}\text{S}_8$	Axams, Österreich	
5	$\text{Ag}_{0.81}(\text{Fe,Cu})_{5.01}(\text{Ni,Co})_{2.81}\text{S}_8$	Axams, Österreich	
6	$\text{Ag}_{0.98}(\text{Fe,Cu})_{5.47}(\text{Ni,Co})_{2.70}\text{S}_8$	Axams, Österreich	
7	$\text{Ag}_{0.91}(\text{Fe,Cu})_{5.20}(\text{Ni,Co})_{2.78}\text{S}_8$	Talnotry, Schottland	(CRIDDLE & STANLEY, 1986)
8	$\text{Ag}_{1.03}(\text{Fe,Cu,Co})_{4.92}\text{Ni}_{3.03}\text{S}_8$	Koronuda, Griechenland	(MPOSKOS, 1983)
9	$\text{Ag}_{1.00}(\text{Fe,Cu,Co})_{5.28}\text{Ni}_{2.63}\text{S}_8$	Koronuda, Griechenland	(MPOSKOS, 1983)
10	$\text{Ag}_{1.09}(\text{Fe,Cu})_{4.84}(\text{Ni,Co})_{3.08}\text{S}_8$	Toskana, Italien	(BENVENUTI, 1991)
11	$\text{Ag}_{1.00}\text{Fe}_{5.18}\text{Ni}_{2.79}\text{S}_8$	Windarra, Australien	(GROVES & HALL, 1978)
12	$\text{Ag}_{1.01}\text{Fe}_{5.24}\text{Ni}_{2.81}\text{S}_8$	Windarra, Australien	(GROVES & HALL, 1978)
13	$\text{Ag}_{0.99}\text{Fe}_{4.83}\text{Ni}_{3.17}\text{S}_8$	Bird River, Manitoba	(HALL & STEWART, 1973)
14	$\text{Ag}_{1.03}\text{Fe}_{4.93}\text{Ni}_{3.28}\text{S}_8$	Bird River, Manitoba	(SCOTT & GASPARRINI, 1973)
15	$\text{Ag}_{1.03}\text{Fe}_{5.62}\text{Ni}_{2.62}\text{S}_8$	Sudbury, Ontario	(KARPENKOV et al., 1973)
16	$\text{Ag}_{0.81}\text{Fe}_{5.41}\text{Ni}_{2.82}\text{S}_8$	Outokumpu-Erze, Finnland	(VUORELAINEN et al., 1972)
17	$\text{Ag}_{1.10}\text{Fe}_{5.55}\text{Ni}_{2.57}\text{S}_8$	Talnakh, Sibirien	(SHISHKIN et al., 1971)
18	$\text{Ag}_{1.09}\text{Fe}_{4.51}\text{Ni}_{3.37}\text{S}_8$	Khovuaksa, Sibirien	(SHISHKIN et al., 1971)
19	$\text{Ag}_{1.00}\text{Fe}_{5.00}\text{Ni}_{3.00}\text{S}_8$	Oktyabr u. Talnakh, Sibirien	(RUDASHEVSKII et al., 1977)

Tab. 3: Kalkulierte Formeln von Silberpentlanditen der Erzparagenese Axams und anderer Vorkommen.

sen, liegen sie in den Silberpentlanditen von Axams zwischen 31.2 und 33.3 Gew.% (Mittelwert: 32.5). Nur die Silberpentlandite 1 und 6 besitzen mit 31.8 und 31.5 Gew.% ähnliche S-Gehalte.

Die Ag/S-Atomverhältnisse (Tab. 2) der Silberpentlandite von Axams zwischen 0.098 und 0.123 und einem Mittelwert von 0.105 liegen z.T. deutlich unter dem stöchiometrischen Atomverhältnis von 0.125. Die Fe/S-Atomverhältnisse zwischen 0.598 und 0.663 mit einem Mittelwert von 0.622 pendeln um den stöchiometrischen Wert von 0.625, während die Ni/S-Atomverhältnisse zwischen 0.316 und 0.343 und einem Mittelwert von 0.330 wesentlich niedriger sind als der stöchiometrische Wert von 0.375. Weiters zeigt sich (Tab. 2), daß die Silberpentlandite von Axams mit Ausnahme von Agpn 6 ein deutliches Metalldefizit aufweisen und die Me/S-Atomverhältnisse zwischen 1.055 und 1.144 mit einem Mittelwert 1.088 deutlich unter dem stöchiometrischen Verhältnis von 1.125 liegen. Die Fe/Ni-Atomverhältnisse zwischen 1.738 und 2.004 mit

einem Mittelwert von 1.886 sind deutlich höher als das stöchiometrische Fe/Ni-Atomverhältnis von 1.667.

Die durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Silberpentlandite von Axams kann mit der Formel $\text{Ag}_{0.84}(\text{Fe,Ni,Cu,Co})_{7.85}\text{S}_8$ angegeben werden. Ähnliche Ag- und (Fe + Ni)-Gehalte pro Formeleinheit besitzt nur der von CRIDDLE & STANLEY (1986) analysierte Silberpentlandit. Die Silberpentlandite der anderen Vorkommen haben durchwegs höhere Ag- und (Fe,Ni)-Gehalte pro Formeleinheit (Tab. 3).

Umwandlungen

Bekanntlich entstehen bei beginnender Pentlandit-Verwitterung Bravoiit und Violarit. Auch die Silberpentlandite dieses Vorkommens werden entlang von Mikrorissen, bzw. auch ausgehend von den Kornrändern verwitterungsbedingt verdrängt (Abb. 10 und 12). Ob es sich bei die-

	470 nm	480 nm	546 nm	560 nm	589 nm	600 nm	640 nm	650 nm
Agpn 1	24.40	25.10	29.20	30.05	31.90	32.85	34.90	35.35
Agpn 2	25.60	26.30	30.70	31.70	33.40	34.10	36.40	36.95
Agpn 3	24.95	25.60	30.65	30.40	33.30	34.00	36.10	36.60
Agpn 7	23.30	24.25	29.30	30.40	32.60	33.30	35.80	36.30
Agpn 11	–	29.10	34.00	–	37.00	–	39.90	–
Agpn 14	25.50	–	32.80	–	33.70	–	–	39.60
Agpn 15	–	26.10	–	33.90	–	35.50	37.40	–
Agpn 16	26.30	–	37.40	–	33.00	–	–	39.80
Agpn 17	–	29.30	–	35.00	–	36.50	38.60	–

Tab. 4: Reflexionsdaten einiger Silberpentlandite verschiedener Vorkommen. Werte von Agpn 7 aus CRIDDLE & STANLEY (1986); Werte von Agpn 11, 14, 15, 16, 17 zusammengefaßt bei GROVES & HALL (1978).

sen supergenen Mineralneubildungen um Bravoi oder um Violarit handelt, ist jedoch weder aus dem auflichtmikroskopischen Befund, noch aus der mineralchemischen Zusammensetzung klar ersichtlich. Unter dem Mikroskop sind Violarit und Bravoi wegen ihrer stark schwankenden und sich zum Teil überschneidenden Farb- und Helligkeitseindrücke (RAMDOHR, 1975) kaum auseinanderzuhalten. Auch mittels einer quantitativ-chemischen Mineralanalyse war eine genaue Bestimmung nicht möglich, da, bedingt durch die Kornfeinheit, nur wenig aussagekräftige Mischanalysen zu erzielen waren. Aus der Elementverteilungsanalyse geht hervor, daß in den fraglichen Bereichen Ag völlig abgeführt worden ist (Abb. 14d). In der Fe-Verteilung (Abb. 14c) sind zum umgebenden Silberpentlandit nur schwache Unterschiede zu erkennen, die auf eine teilweise Fe-Abfuhr im Zuge der verwitterungsbedingten Stoffumlagerungen hinweisen. In der Ni-Verteilung (Abb. 14b) ist gegenüber Silberpentlandit eine relative Anreicherung festzustellen.

Neben Bravoi und/oder Violarit ist im Silberpentlanditkorn der Abb. 13 noch ein weiteres Sulfid zu erkennen, welches ihn, ausgehend von einem Spaltriß, verdrängt und ein wesentlich höheres Reflexionsvermögen besitzt. Sein Reflexionsvermögen ist auch etwas höher als jenes der

randlichen Bravoi-Violarit-Neubildungen. Die Elementverteilung in diesem Bereich zeigt, daß von den Silberpentlandit-Elementen nur Ni fehlt (Abb. 14b), während im Fe- und Ag-Gehalt (Abb. 14c und d) keine Veränderungen festzustellen sind. Dem Mineralchemismus nach handelt es sich also um ein Ag-Fe-Sulfid, vermutlich um ein Mineral der sogenannten „Silberkies“-Gruppe. Die Silberkiesminerale Sternbergit AgFe_2S_3 (= Silberkies I nach RAMDOHR, 1975) und Argentopyrit AgFe_2S_3 (= Silberkies II) besitzen jedoch einen deutlichen Reflexionspleochroismus und deutliche Anisotropie-Effekte, die am fraglichen Korn nicht beobachtet werden konnten. Das könnte einerseits mit der Schnittlage zusammenhängen, andererseits sind bei Beobachtungen mit sehr stark vergrößernden Objektiven, die eine große numerischen Apertur besitzen, Reflexionspleochroismus und Anisotropie oft nur schwer festzustellen. Auch haben Argentopyrit und Sternbergit ein relativ niedriges, maximales Reflexionsvermögen, welches bei 546 nm und Ölimmersion nur um 4% über dem von Silberpentlandit liegt. Wie jedoch deutlich zu sehen ist (Abb. 13), beträgt der Helligkeitsunterschied zwischen Silberpentlandit und dem fraglichem Korn wesentlich mehr als nur 4%. Demnach dürfte hier Silberkies III (RAMDOHR, 1975) vorliegen, der heller sein soll als die

Silberkiese I (Sternbergit) und II (Argentopyrit) und der auch schwächere Anisotropie-Effekte bzw. einen weniger deutlichen Reflexionspleochroismus besitzen soll.

Diskussion

Die Erzmineralparagenese von Axams, in der Silberpentlandit als akzessorischer Gemengteil nachgewiesen werden konnte, unterscheidet sich von den anderen Mineralparagenesen, in denen er beschrieben worden ist, vor allem dadurch, daß hier Pentlandit aber auch andere Ni-Mineralien fehlen, sieht man vom Mackinawit ab, in dem 4.7 bzw. 5.8 Gew.% Ni nachzuweisen sind (Tab. 1). Lediglich vom Silberpentlandit-Vorkommen Koronuda beschreibt MPOSKOS (1983) eine ähnliche Erzmineralparagenese. Auch dort fehlt Pentlandit, und auch dort treten Bi-Mineralien und Elektrum auf.

Die lanzettartigen bis oleanderblattförmigen Zwillingslamellen im Kupferkies (Abb. 2, 3 und 9) werden als Reliktgefüge einer α - β -Umwandlung interpretiert. Nach YUND & KULLERUD (1966) erfolgt die Inversion vom kubischen Hochtemperaturmischkristall $(\text{Cu,Fe})_{1+x}\text{S}$ zum tetragonalen Kupferkies im reinen Cu-Fe-S-System bei $547 \pm 5^\circ\text{C}$. Aus den zahlreichen, sternchenförmigen Zinkblende-Entmischungen (Abb. 3 und 4), die im ehemaligen Hochtemperatur-Kupferkies zu beobachten sind, ist jedoch auf eine etwas niedrigere Umwandlungstemperatur zu schließen, die nach MOH (1975) im System Cu-Fe-Zn-S bei $500 \pm 10^\circ\text{C}$ liegt.

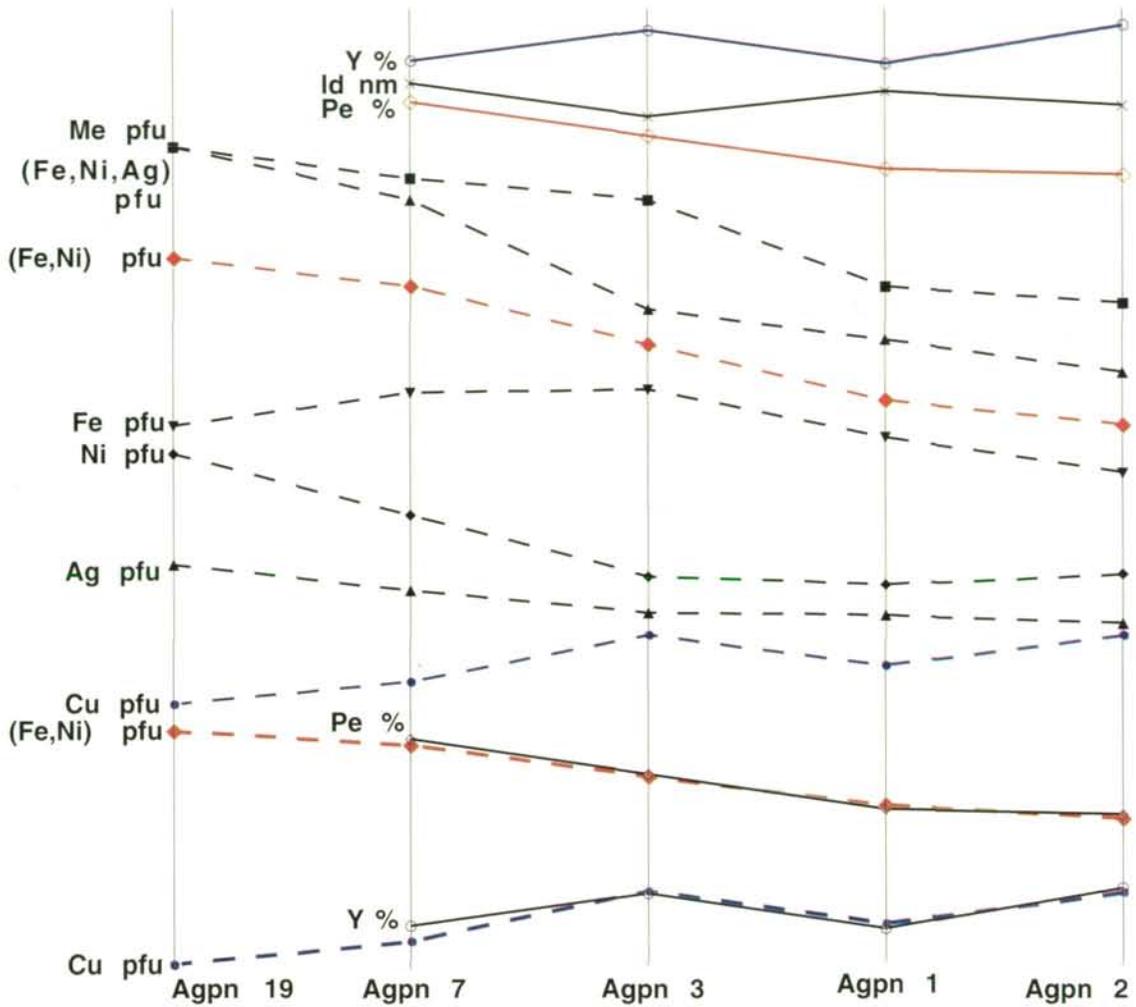
Der Silberpentlandit von Axams tritt ausschließlich im ehemaligen Hochtemperatur-Kupferkies auf und weist durch seine Orientierung und Anordnung im Kupferkies, ebenso wie Zinkblende-, Magnetkies- und Mackinawit-Entmischungen, auf textuelle Zusammenhänge hin, die durch Entmischungsprozesse entstanden sind. Auch aus der $< 455^\circ\text{C}$ liegenden, oberen Stabilitätsgrenze von Silberpentlandit (MANDZIUK & SCOTT, 1977) ist abzuleiten, daß er nicht als älteres bzw. gleichaltes Kristallinat vom Hochtem-

peratur-Kupferkies eingeschlossen worden ist, sondern daß er nur durch spätere Entmischungsprozesse aus einem ehemals kubischen, Ag-Ni-haltigen Cu-Fe-Zn-Mischkristall entstanden sein kann. Nicht zuletzt spricht auch das Fehlen von Pentlandit und anderer Fe-Ni- bzw. Ag-Sulfide in dieser Paragenese gegen die Möglichkeit einer Verdrängung von Kupferkies durch Silberpentlandit etwa als Folge einer jüngeren, metamorphen Stoffzufuhr.

Bei Temperaturen $< 334 \pm 17^\circ\text{C}$ (YUND & KULLERUD, 1966) dürfte Magnetkies entmischt sein, der dem Silberpentlandit z.T. orientiert aufgewachsen ist (Abb. 8). Für die Entmischung der Ni- und Co-führenden Mackinawite (Abb. 2, 3, 4, 8 und 9) darf eine Temperatur $< 200^\circ\text{C}$ (KUCHA, 1981) angenommen werden.

Im Zuge der beginnenden Verwitterung kam es randlich bzw. entlang von der Spaltbarkeit im Silberpentlandit zur Abfuhr bzw. Umlagerung von Ag, Fe und Ni, und damit zusammenhängend zu seiner Verdrängung durch Bravoit und ? Silberkies III, sowie schließlich zur Umkrustung der Sulfide mit Nadeleisenerz.

Setzt man die Farbwerte mit den mineralogischen Daten in Beziehung (Diagr. 4), so sind eine Reihe von \pm deutlichen Abhängigkeiten zu erkennen. Je mehr sich die Anzahl der Me-, (Fe,Ni,Ag)-, (Fe,Ni)- und Ag-Atome pro Formeleinheit bzw. die Me/S-, (Fe,Ni,Ag)/S-, (Fe,Ni)/S- und Ag/S-Atomverhältnisse den stöchiometrischen Verhältnissen von Agpn 19 mit der Formel $\text{Ag}_1\text{Fe}_5\text{Fe}_3\text{S}_8$ nähern, umso höher wird auch die Farbintensität $\text{Pe}\%$. Am deutlichsten ist die Übereinstimmung der Kurve für $\text{Pe}\%$ mit den Kurven für (Fe,Ni) pfu und für Ag pfu, wobei die Kurven für $\text{Pe}\%$ und für (Fe,Ni) pfu fast identisch verlaufen, während zwischen $\text{Pe}\%$ und Ag pfu deutlichere Unterschiede bestehen. Es scheint also, daß nicht so sehr die von stöchiometrischen Verhältnissen abweichende Zahl der Ag-Atome auf den oktaedrisch koordinierten Gitterplätzen, als vielmehr die Anzahl der (Fe,Ni)-Atome auf den tetraedrisch koordinierten Gitterplätzen die Farbwerte beeinflussen. Je geringer das (Fe,Ni) pfu Defi-



Y%		30.1	31.2	30.0	31.4
λd nm		580.3	579.1	580.0	579.5
Pe%		17.6	16.4	15.2	15.0
Me	9.00	8.89	8.81	8.50	8.44
(Fe,Ni,Ag)	9.00	8.89	8.81	8.50	8.44
(Fe,Ni)	8.00	7.90	7.69	7.49	7.40
Fe	5.00	5.12	5.13	4.96	4.83
Ni	3.00	2.78	2.56	2.53	2.57
Ag	1.00	0.91	0.83	0.82	0.79
Cu	0.00	0.08	0.25	0.14	0.25

Formel kalkuliert:

Agpn 19	$\text{Ag}_{1.00}\text{Fe}_{5.00}\text{Ni}_{3.00}\text{S}_8$
Agpn 7	$\text{Ag}_{0.91}\text{Fe}_{5.12}\text{Ni}_{2.78}\text{S}_8 + \text{Cu}_{0.08}$
Agpn 3	$\text{Ag}_{0.83}\text{Fe}_{5.13}\text{Ni}_{2.56}\text{S}_8 + \text{Cu}_{0.25}$ u. $\text{Co}_{0.04}$
Agpn 1	$\text{Ag}_{0.82}\text{Fe}_{4.96}\text{Ni}_{2.53}\text{S}_8 + \text{Cu}_{0.14}$ u. $\text{Co}_{0.05}$
Agpn 2	$\text{Ag}_{0.79}\text{Fe}_{4.83}\text{Ni}_{2.57}\text{S}_8 + \text{Cu}_{0.25}$

Diagramm 4: Farbwerte und minerochemische Daten der Silberpentlandite 1, 2, 3, 7 und 19 gereiht nach der Me-Stöchiometrie. Die identisch verlaufenden Kurven von Cu pfu und Y% bzw. (Fe,Ni) pfu und Pe% sind gesondert dargestellt.

(Fe,Ni) pfu

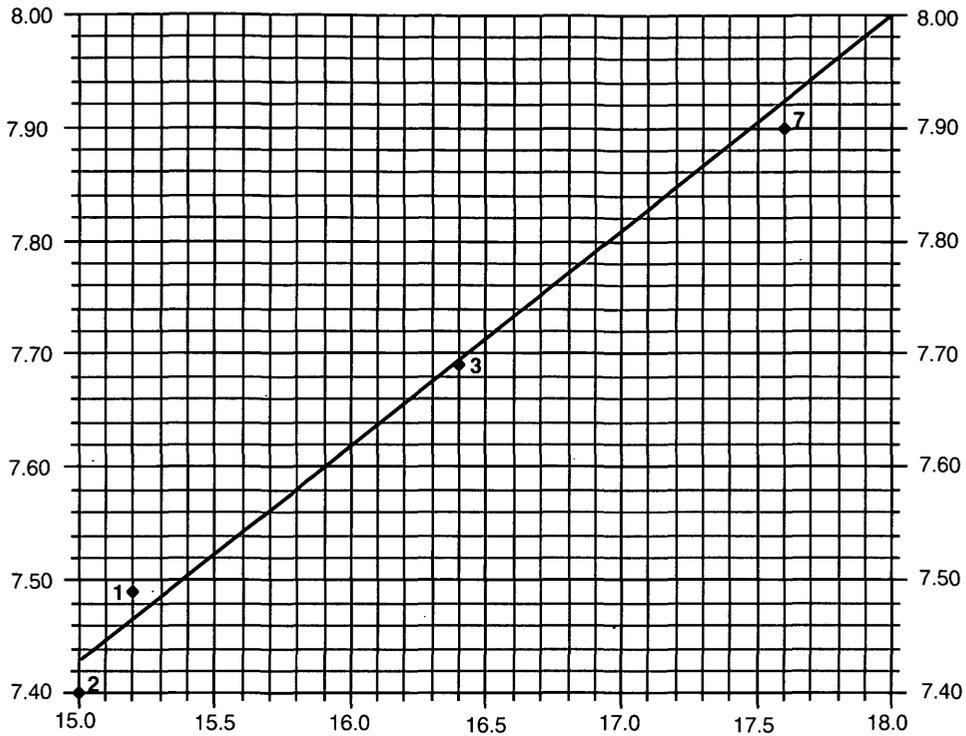


Diagramm 5: Korrelation von (Fe,Ni) pfu und Pe% der Silberpentlandite 1, 2, 3 und 7. Es ergibt sich eine lineare Variation von (Fe,Ni) pfu, abhängig von Pe%. Standardabweichung = ± 0.03 .

Cu pfu

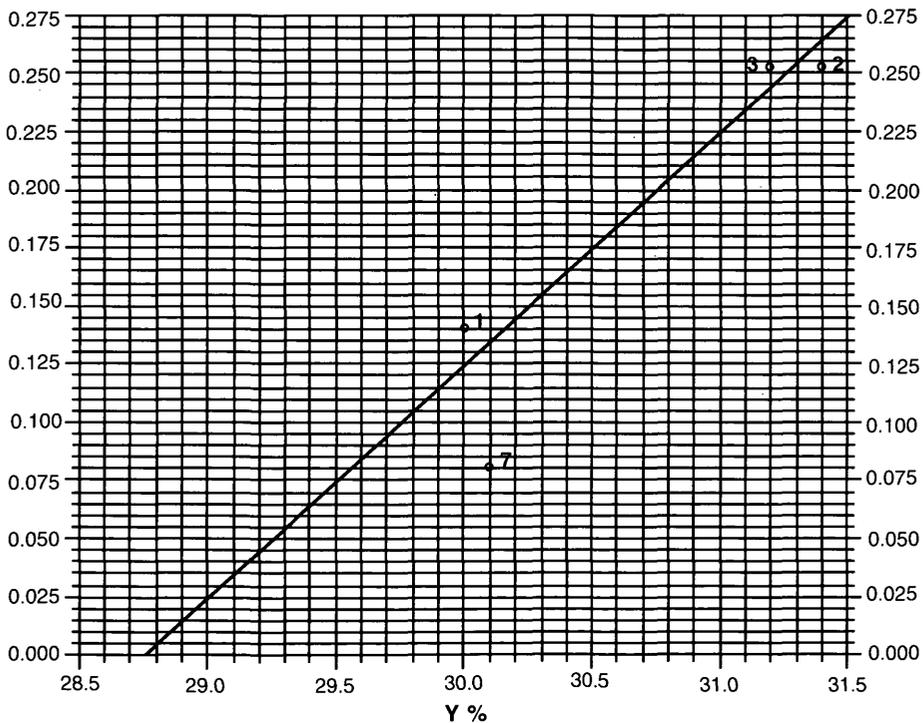


Diagramm 6: Korrelation von Cu pfu und Y% der Silberpentlandite 1, 2, 3 und 7. In den analysierten Silberpentlanditen 1, 2 und 3 ergibt sich eine lineare Variation von Cu pfu, abhängig von Y%. Standardabweichung = ± 0.015 . Der Silberpentlandit 7 von CRIDDLE & STANLEY (1986) fällt aus der Reihe.

zit, umso höher die Farbsättigung $Pe\%$, d.h. umso kräftiger gefärbt ist Silberpentlandit. Je niedriger der (Fe,Ni)-Gehalt pro Formeleinheit, umso niedriger ist auch die Farbintensität $Pe\%$. Silberpentlandit mit dem stöchiometrischen (Fe,Ni)-Gehalt von 8 Atomen pro Formeleinheit besitzt eine Farbsättigung von 18.0 $Pe\%$ bzw. einer um 1% niedrigeren Farbintensität entspricht ein um 0.19 ± 0.03 niedrigerer (Fe,Ni)-Gehalt pro Formeleinheit (Diagr. 5).

Besonders auffällig ist die Abhängigkeit des Helligkeitseindruckes $Y\%$ vom Cu-Gehalt pro Formeleinheit (Diagr. 4). Höhere Cu-Gehalte entsprechen einem höheren Helligkeitseindruck $Y\%$. Berücksichtigt man nur die in der vorliegenden Studie analysierten und gemessenen Silberpentlandite von Axams, so ergibt sich, daß Cu-freier Silberpentlandit einen Helligkeitseindruck von 28.75 $Y\%$ aufweisen müßte, und daß einem um 1% höheren Helligkeitseindruck ein um 0.100 ± 0.015 höherer Cu-Gehalt pro Formeleinheit entspricht (Diagr. 6).

Auch wenn es sich bei den Vergleichswertpaaren um Daten von nur 4 Silberpentlanditkörnern handelt – eine Zahl, die für eine statistisch gesicherte Aussage sicher zu klein ist –, so kann es sich bei diesen augenfälligen Übereinstimmungen doch nicht nur um reinen Zufall handeln.

Literatur

- BENVENUTI, M. (1991): Ni-sulphides from the Bottino mine (Tuscany, Italy). – *Eur. J. Mineral.*, **3**, 79–84.
- CRIDDLE, A.J. & STANLEY, C.J. (1986): The Quantitative Data File for Ore Minerals. – British Museum (Natural History), International Mineralogical Association-Commission on Ore Microscopy, p. 420.
- DIETRICH, H. (1980): Mineralogisch-petrographische Untersuchungen zur Metamorphose des Brennermesozoikums. – Diss. Univ. Innsbruck, S. 137.
- GOVES, D.I. & HALL, S.R. (1978): Argentian pentlandite with parkerit, joseit A and the probable Bi-analogue of ullmannit from Mount Windarra, Western Australia. – *Can. Miner.*, **16**, 1–7.
- HALL, S.R. & STEWART, J.M. (1973): The crystal structure of argentian pentlandite $(Fe,Ni)_8AgS_8$, compared with the refined structure of pentlandite $(Fe,Ni)_9S_8$. – *Can. Miner.*, **12**, 169–177.
- HOINKES, G. (1986): Eoalpine metamorphism of the Austroalpine Schneeberg complex and the adjacent Ötztal crystalline basement. – *Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, **66**, 135–138.
- KARPENKOV, A.M., MITENKOV, G.A., MIKHAILOVA, V.A., RUDASHEVSKII, A.F., SIDOROV, A.F. & SHISHKIN, N.N. (1973): Silver-bearing pentlandite in the ores of Sudbury. – *Zap. Vses. Mineral. Obshchest*, **102**, 339–342.
- KISSIN, S.A. (1974): Phase relations in a Portion of the Fe-S System. – Ph. D. Thesis, University of Toronto, Canada.
- KUCHA, H. (1981): Electron Diffraction and Microprobe Study of Ni-Co-rich Mackinawite from Krzemianka, NE Poland. – *Chem. Erde*, **40**, 235–240.
- MANDZIUK, Z.L. & SCOTT, S.D. (1977): Synthesis, stability, and phase relations of argentian pentlandite in the system Ag-Fe-Ni-S. – *Can. Miner.*, **15**, 349–364.
- MOH, G.H. (1975): Tin-containing Mineral Systems. Part II: Phase relations and mineral assemblages in the Cu-Fe-Zn-Sn-S System. – *Chem. Erde*, **34**, 1–61.
- MPOSKOS, E. (1983): A new occurrence of argentian pentlandite from the Koronuda ore mineralization, Macedonia, Greece. – *N. Jb. Miner. Mh.*, **5**, 193–200.
- PILLER, H. (1966): Colour Measurements in Ore-Microscopy. – *Min. Deposita*, **1**, 175–192.
- RAMDOHR, P. (1975): Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. – 4. bearbeitete u. erweiterte Auflage, S. 1277.
- RUDASHEVSKII, N.S., MITENKOV, G.A., KARPENKOV, A.M. & SHISHKIN, N.N. (1977): Silver-containing pentlandite – the independent mineral species, argentopentlandite. – *Zap. Vses. Mineral. Obshchest*, **106**, 688–691.
- SCHMIDEGG, O. (1964): Die Ötztaler Schubmasse und ihre Umgebung. – *Verh. Geol. B.A.*, 27–47.
- SCHULTZE, W. (1975): Farbenlehre und Farbenmessung. Eine kurze Einführung. – Dritte überarbeitete Auflage, 97.
- SCOTT, S.D. & GASPARRINI, E. (1973): Argentian pentlandite, $(Fe,Ni)_8AgS_8$, from Bird River, Manitoba. – *Can. Miner.*, **12**, 165–168.
- SHISHKIN, N.N., MITENKOV, G.A., MIKHAILOVA, V.A., RUDASHEVSKII, N.S., SIDOROV, A.F., KARPENKOV, A.M.,

- KONDRAT'EV, A.V. & BUDKO, I.A. (1971): Bogatabya serebrom raznovidnost pentlandita (A silver-rich pentlandite variety). – Zap. Vses. Mineral. Obshchest, **100**, 184–191.
- SPERGES, J. (1765): Tyrolische Bergwerksgeschichte.
- SRBIK, R. (1929): Bergbau in Tirol und Vorarlberg. – Bericht d. naturwissenschaftl.-medizin. Vereins, **41**, 1–277.
- THÖNI, M. (1982): Der Einfluß der kretazischen Metamorphose im Westabschnitt der ostalpinen Einheit: Interpretation geochronologischer Daten. – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., **28**, 17–34.
- VAVTAR, F. (1988): Die Erzanreicherungen im Nordtiroler Stubai-, Ötztal- und Silvrettakristallin. – Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., **9**, 103–153.
- VOURELAINEN, Y. HÄKLI, T.A. & PAPUNEN, H. (1972): Argentinian pentlandite from some Finnish sulfide deposits. – Amer. Miner., **57**, 137–145.
- YUND, R.A. & KULLERUD, G. (1966): Thermal Stability of Assamblages in the Cu-Fe-S System. – Journal of Petrology, **7/3**, 454–488.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Franz Vavtar, Institut für Mineralogie und Petrographie, Innrain 52, A-6020 Innsbruck, Austria.

Manuskript eingegangen: 17. Februar 1995