

„Asbest“ aus der Graphitlagerstätte Kaisersberg und vom Leimsgraben bei Mautern, Steiermark, Österreich

Johann G. RAITH und Walter POSTL

Zusammenfassung: Aus der Graphitlagerstätte Kaisersberg (Steiermark, Österreich), die in oberkarbonen Gesteinen der Veitscher Decke (Östliche Grauwackenzone) liegt, sind mehrfach als „Asbest“ bzw. „Hornblendeasbest“ beschriebene faserig-strahlige Mineralaggregate bekannt geworden. Vergleichbares Material aus dem Leimsgraben bei Mautern ist in der mineralogischen Sammlung des Landesmuseums Joanneum vorhanden. Die detaillierte mineralogische Untersuchung (Mikroskopie, XRD, EMS, REM) konnte zeigen, dass es sich bei diesen extrem gelängten Mineralaggregaten um Chlorit und Muskovit mit äußerst ungewöhnlichem Habitus und *nicht* um klassische Asbestminerale handelt. Mg-Fe-Chlorit tritt in Paragenese mit Quarz, Muskovit, Graphit und akzessorischen Sulfiden auf. In Chlorit-armen Proben sind Fe-Chloritoid und Kyanit weitere wichtige Minerale der metamorphen Paragenese. Die Bildung dieser Minerale in Graphitschiefern und in ihnen auftretenden synmetamorphen Quarzgängchen bzw. Quarzmobilisaten erfolgte im Zuge der alpidischen Metamorphose, die in der Graphitlagerstätte Kaisersberg Bedingungen der unteren Grünschieferfazies (ca. 400 °C, Minimaldruck ca. 2 kbar) erreichte.

Summary: Minerals with unusual fibrous habit occur in the graphite mine Kaisersberg (Styria, Austria) in graphite schists of Upper Carboniferous age (Veitsch Nappe, Eastern Greywacke Zone) and at the Leimsgraben near Mautern (Styria, Austria). A detailed mineralogical investigation (microscopy, XRD, EMS, REM) revealed that these extremely elongate mineral aggregates are non-classical asbestos minerals; they have been identified as chlorite and muscovite, respectively. Mg-Fe-chlorite is associated with quartz, muscovite, graphite and accessory sulphides. In chlorite-poor samples Fe-chloritoid and kyanite are additional important metamorphic minerals. Formation of these metamorphic mineral assemblages in graphite schists and in syn-metamorphic quartzveins is related to Alpine metamorphism, that reached lower greenschist facies conditions (ca. 400 °C, minimum pressure ca. 2 kbar) at Kaisersberg.

Keywords: Asbest, Chlorit, Muskovit, Grauwackenzone, Kaisersberg, Leims, Steiermark, Österreich.

1. Einleitung

Neben den Graphitlagerstätten im niederösterreichischen Moldanubikum sind jene im östlichen Teil der Grauwackenzone die wohl wirtschaftlich bedeutendsten Österreichs, wobei in der Umgebung von Kaisersberg, westlich St. Michael bei Leoben bereits seit 1770 Graphit bergmännisch gewonnen wird (WEIß, 1992). Von den zahlreichen steirischen Vorkommen (SCHARFE, 1981) steht derzeit nur mehr die Lagerstätte Kaisersberg in Betrieb. Sie produzierte im Jahre 1995 ca. 7316 t Roh-, Mahlgraphit und Flotate (pers. Mitt., Oberste Bergbehörde, 1996).

Hinsichtlich ihrer Mineralführung wurden von den steirischen Graphitlagerstätten nur wenige Funde vermerkt. Aus Kaisersberg sind vor allem die im Graphit eingewachsenen Mineralaggregate mit faserig-strahligem Habitus, die unter der Sammelbezeichnung „Asbest“ oder „Hornblendeasbest“ in diversen Mineraliensammlungen anzutreffen sind, seit über 100 Jahren bekannt. Sowohl Proben aus Kaisersberg, als auch sehr ähnliches Material, das Ritter von HAUENFELS um 1870 im Leimsgraben aufsammlte, ist in den Sammlungsbeständen des Landesmuseums Joanneum vorhanden (Abb. 1, 2).

Innerhalb der steirischen Graphitlagerstätten sind Mineralfunde in jüngerer Zeit nur von Kaisersberg bekannt geworden: Dickit und eine Mikroerzmineralisation mit Sphalerit und Chalkopyrit (SCHROLL & SPATZEK, 1984); kleinere in Quarz eingewachsene sulfidische Vererzungen mit Sphalerit, Chalkopyrit, Pyrit, Galenit und Bi-hältigem Meneghinit (PAAR in NIEDERMAYR & al., 1993); Kyanit sowie kleinere Chlorit und Bergkristall führende Klüftchen (MÖHLER & SEITWEGER, 1993); Pyrophyllit in Bergkristall und Chlorit führenden Klüftchen (POSTL in NIEDERMAYR, 1994).

Die vorliegende Studie verfolgte den Zweck, das geologische Auftreten und vor allem die mineralogische Zusammensetzung dieses Materials mittels Mikroskopie, Röntgendiffraktometrie (XRD), Elektronenmikrosonden-Analyse (EMS), Rasterelektronenmikroskopie (REM), Infrarot-Spektroskopie (FTIR) und thermischer Analyse zu klären. Die Klärung der mineralogischen Zusammensetzung dieses Materials scheint auf Grund des möglichen gesundheitlichen Risikos von Asbestmineralen nicht nur für den Mineraliensammler von Interesse.

2. Geologischer Rahmen

Die steirischen Graphitlagerstätten in der Östlichen Grauwackenzone sind schichtgebunden und treten in der vor allem Karbon umfassenden Veitscher Decke auf (KLAR, 1964; HOLZER, 1966; SCHARFE, 1981; RATSCHBACHER, 1984). Diese stellt die tektonisch tiefste Einheit der Grauwackenzone dar und überlagert mit tektonischen Kontakten ostalpines Kristallin (z. B. Granitgneise des Seckauer Kristallins) und Reste von darauf auflagerndem Mesozoikum (cf. Rannach Serie; HAUSER, 1938; NIEVOLL, 1984; NEUBAUER & VOZÁROVÁ, 1989). Die sedimentär angelegten Graphitlagerstätten liegen innerhalb der sogenannten

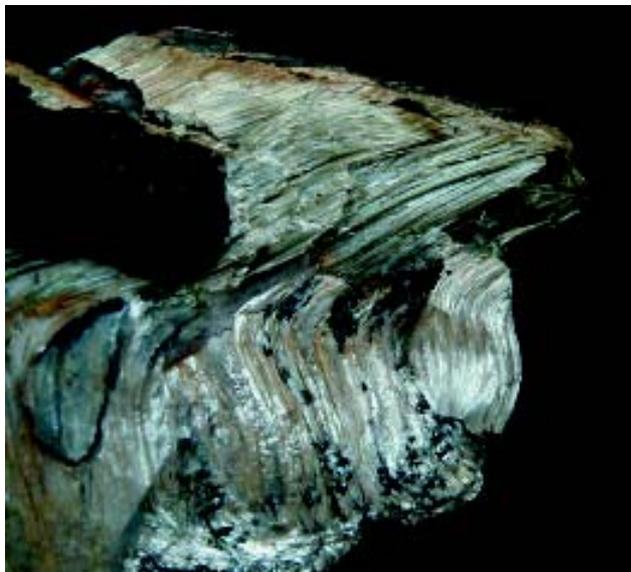


Abb. 1 (oben): „Asbest“-Probe von Kaisersberg (LMJ, Inv.-Nr. 25.601), faserig ausgebildetes Chlorit; Bildbreite 180 mm, Foto H.-P. BOJAR.

Abb. 2 (unten): Detail der „Asbest“-Probe aus dem Leimsgraben (LMJ, Inv.-Nr. 34.070), faserig ausgebildeter Chlorit (lauchgrün), faserig-blättriger Muskovit (silbrig-weiss); Bildbreite 60 mm, Foto H.-P. BOJAR.



Sunk Formation, einer durch zyklische Sedimentation gekennzeichneten karbonatisch-klastischen Abfolge mit charakteristischer Zunahme grobklastischer Anteile gegen das stratigraphisch Hangende (RATSCHBACHER, 1984; 1985). Diese nunmehr aus Graphit-führenden Phylliten, Graphitschiefern, Metasandsteinen, Metakonglomeraten etc. bestehende 50–150 m mächtige Abfolge wird als Delta- bis Küstenentwicklung interpretiert und ist altersmäßig durch Pflanzenfossilien ins Westphal A-C eingestuft.

Die Lagerstätten sind mehrphasig deformiert (RATSCHBACHER, 1985) und unter Bedingungen der Grünschieferfazies metamorph geworden, wobei für die tektonisch tiefere Veitscher Decke nur ein alpidisches Metamorphoseereignis nachweisbar ist (RATSCHBACHER & KLIMA, 1985, S. 160). Konventionelle K-Ar-Datierungen an Hellglimmern ergaben Alter von 53–98 Ma (ibid., S. 167) und belegen damit das alpidische Metamorphosealter.

3. Probenbeschreibung und Petrographie

Graphitbergbau Kaisersberg

Die im Detail untersuchten Proben K1 und K2 stammen aus älteren Aufsammlungen des Erstautors von Haldenmaterial des Graphitbergbaues Kaisersberg. Die Probe K3 stammt aus der Mineralogischen Sammlung des Institutes für Geowissenschaften der Montanuniversität Leoben, die als "Asbest" archiviert wurde. Weitere Proben (K7, K19) konnten im Zuge einer Untertage-Befahrung im September 1996 aufgesammelt werden und stammen aus verschiedenen Abbauen des Marienbaues.

Bei dem untersuchten Material handelt es sich um Mineralaggregate mit extrem faserig-nadeligem Habitus, die direkt in tektonisch stark beanspruchten Graphitschiefern bzw. in Assoziation mit Millimeter bis Zentimeter dicken, meist schieferungsparallelen Quarzgängchen im Graphit auftreten.

Im Raum Kaisersberg lassen sich zumindest zwei Deformationsereignisse in den Graphitschiefern unterscheiden (RAITH & VALI, 1998). Die bereits entlang einer älteren Schieferung (S1) eingeregelt Quarzmobilisate und Phyllosilikatlagen wurden von einer jüngeren Isoklinalverfaltung (B2) und einer korrespondierenden zweiten Schieferung (S2) deformiert. Letztere ist als Achsenflächenschieferung entwickelt, die die B2 Falten zum Teil zerscherte. Die in S2 auftretenden faserigen Silikate sind stark eingeregelt (L2 Mineral-elongation). Faserige Mineralaggregate kommen auch in diskordanten lokalen Extensionsklüftchen, die ebenfalls mit der D2 Deformation in Beziehung stehen, im Graphit vor.

Mikroskopisch sind die Proben durch die enge Wechsellagerung von quarz- und schichtsilikatreichen Lagen charakterisiert, wobei nicht nur die Fasern, sondern auch die polykristallinen Quarzkörner extreme Einregelung zeigen. Die Quarzkörner sind in den einzelnen Zeilen teilweise gelängt. Sehr häufig sind postdeformative Rekristallisationsphänomene (Ausbildung von geraden Korngrenzen, 120° Kornkontakte) zu beobachten.

Die asbestähnlichen Einzelkristalle zeigen faserig-strahligen Habitus, wobei die einzelnen Fasern mehrere Zentimeter lang werden können. Das Verhältnis von Länge zu

Durchmesser (L/D) der einzelnen Fasern ist $\gg 3$. Der Durchmesser der einzelnen Fasern variiert, ist zum Teil aber auch $< 3\text{--}5\ \mu\text{m}$ (siehe Rasterelektronenmikroskopie).

Mikroskopisch lassen sich in der Probe K1 *Chlorit* und Quarz als Hauptgemengteile bestimmen, wobei der faserig ausgebildete Chlorit im Handstück schwach grünlich gefärbt ist. Muskovit und Graphit sind Nebengemengteile. Akzessorisch treten Rutil und opake Minerale auf. Im Auflicht und mittels qualitativer EDS-Analytik wurden diese opaken Erzphasen als Chalcopyrit und Ullmannit identifiziert. Chlorit ist im Dünschliff farblos, zeigt \pm gerade Auslöschung in bezug auf die Spaltflächen nach (001) und niedrige, aber normale Interferenzfarben (graugelb der 1. Ordnung). *Muskovit* und Quarz sind die Hauptgemengteile in den Proben K2 und K3. Untergeordnet treten in diesen beiden Proben Chloritoid und Graphit auf. Makroskopisch ist das als Muskovit identifizierte faserige Mineral weiß mit mattem, wachsartigen, z. T. auch seidigen Glanz. *Chloritoid* bildet bis zu 0,5 mm große hypidio- bis idiomorphe Porphyroblasten, die das geregelte Glimmergefüge überwachsen. Chloritoid tritt außerdem gemeinsam mit feinstem Hellglimmer und Rutil als Einschlussmineral in Graphit auf. Von petrogenetischem Interesse ist, dass in den Proben aus dem Marienbau *Kyanit* mit Muskovit, Quarz, Rutil, Graphit, \pm Chloritoid \pm Chlorit koexistiert. *Kyanit* ist Teil der metamorphen Peak-Paragenese (Abb. 3). Da er die ältere S1 Schieferung überwächst und entlang der S2 Schieferungsflächen eingeregelt wird, ist der Metamorphosehöhepunkt als post-D1 und syn-D2 einzustufen.



Abb. 3: Dünnschliffbild der Probe K17 von Kaisersberg. Ein älteres S1 Flächengefüge (helle Muskovit- und dunkle Graphitlagen) wird von B2 verfault, wobei Muskovit entlang der neuen S2 Achsenflächenschieferung eingeregelt wird. Die Kristallisation von *Kyanit*, sie wird der maximalen Metamorphose zugeordnet, ist als syn- bis post-D2 einzustufen. Bildbreite ca. 2 mm.

Leimsgraben

Im nördlich der Graphitlagerstätte Kaisersberg gelegenen Leimsgraben gibt es ebenfalls Graphitvorkommen (Sunk Formation), aus denen „Asbest“ bekannt ist. In der Mineralogischen Sammlung des Landesmuseums Joanneum befinden sich u. a. zwei Proben (Inv.-Nr. 34.069 und 34.070) mit der ursprünglichen Bezeichnung „Asbest aus den Graphitthonschiefern des Leimsgraben bei Mautern“, welche 1871 von Ritter von Hauenfels als Geschenk übergeben worden sind. Diese beiden Proben, die im Jahre 1979 im Zuge von Revisionsarbeiten als Chlorit bzw. Muskovit (von W. P.) bestimmt worden sind, dienen in Ergänzung zu den Proben aus Kaisersberg als weiteres Untersuchungsmaterial.

Das etwa 14 cm lange Stück mit der Inv.-Nr. 34.069 besteht i. w. aus weißem Gangquarz, an dem sich teilweise dünne Lagen von Graphitschiefer befinden. Eine Seite ist großflächig mit lauchgrünen, parallel orientierten Chloritfasern bedeckt, wobei die Faserlänge 4 cm erreichen kann. Untergeordnet sind auch stark gekrümmte, silbrig-seidengänzende, faserig bis plattig entwickelte Muskovitaggregate vorhanden.

Die etwa $9 \times 6 \times 3$ cm große Probe mit der Inv.-Nr. 34.070 (Abb. 2) besteht überwiegend aus stark gekrümmten, parallel orientierten Fasern, die sich zwischen Resten von Graphitschiefer und Gangquarz befinden. An dieser Probe sind Zonen mit lauchgrünem Chlorit und silbrig-seidenglänzendem Muskovit ungefähr gleich stark vertreten und auch durch den Farbunterschied gut auseinander zu halten. Einzelne Muskovitaggregate zeigen unter dem Binokular gegenüber jenen von Chlorit deutlich blättrige Absonderung, wenn auch das Längen/Breiten-Verhältnis der Kristallaggregate im krassen Gegensatz zur üblichen Morphologie von Glimmern steht.

Eine dritte Probe (Inv.-Nr. 34.071), welche um 1900 an das Joanneum gelangte, entspricht dem äußeren Erscheinungsbild von Inv.-Nr. 34.070. Auch von dieser Probe wurden Fasern untersucht.

4. Rasterelektronenmikroskopie

Zur genauen Abklärung der morphologischen Ausbildung der faserigen Mineralaggregate wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen an mit Au-Pd bedampften Proben (K1 und K3) an der Montanuniversität, und zwar am Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung (Cambridge REM; Analytiker: G. HAWRANEK) bzw. am Institut für Gesteins- hüttenkunde (Jeol; Analytiker: W. ROSSMANN), durchgeführt.

Kaisersberg

Chlorit (Probe K1): Bei 200-facher Vergrößerung sind unterschiedliche morphologische Ausbildungsformen erkennbar. Einerseits sind extrem längliche blättrige, andererseits faserige Kristallaggregate unterscheidbar. Bei 1500-facher Vergrößerung wird erkennbar, dass auch die faserigen Aggregate, die Durchmesser im Mikrometer- bis Zehner-Mikrometer-Bereich haben, aus eher blättrigen Schichtpaketen aufgebaut werden. Inter-

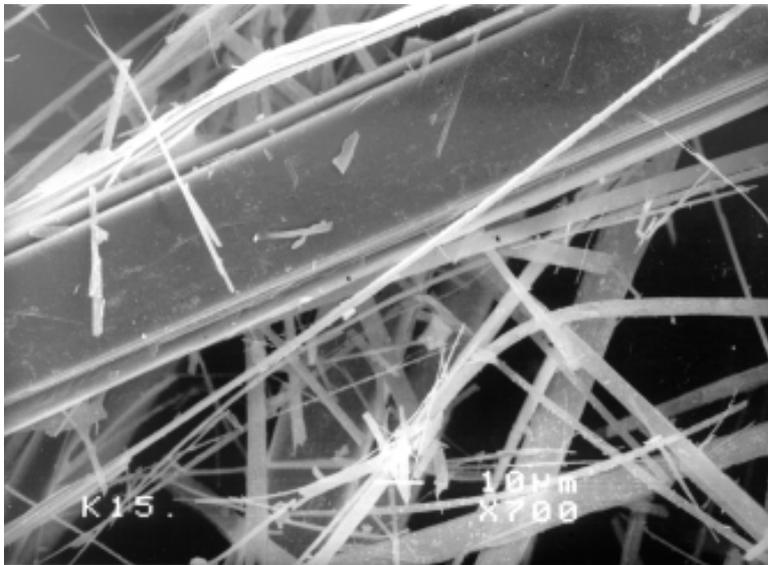
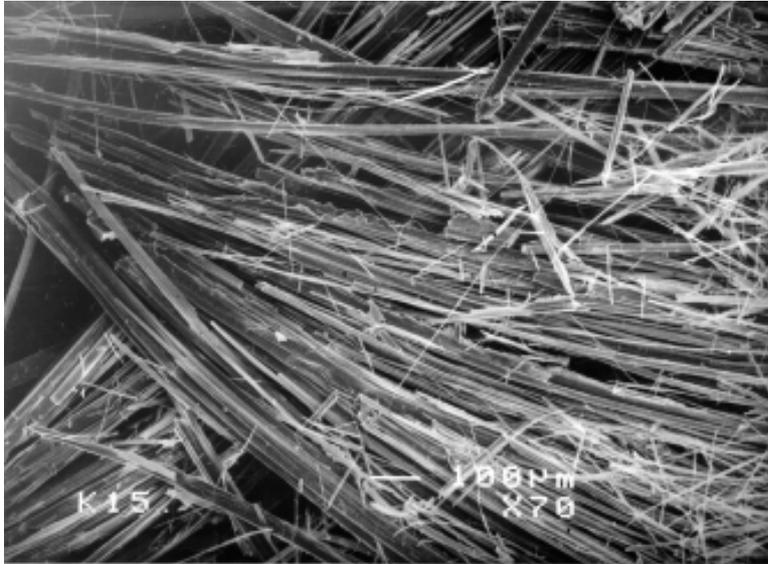


Abb. 4: REM-Aufnahmen von Muskovit mit faserigem Habitus aus der Graphitlagerstätte Kaisersberg. (a) Probe K15. Die faserige Struktur der Muskovitaggregate wird bei kleiner Vergrößerung (70-fach) deutlich. Einzelne Fasern können mehrere Millimeter Länge erreichen. (b) Probe K15. Bei stärkerer Vergrößerung (700-fach) wird die sehr unterschiedliche Größe der faserigen Kristalle erkennbar. Größere Kristalle lassen aber trotz der extremen länglichen Morphologie den für Schichtsilikate typischen blättrigen Aufbau mit Spaltbarkeit normal (001) erkennen.

essanterweise ist aber an den einzelnen Chlorit-Paketen eine gewisse Krümmung und beginnende Einrollung parallel zur Längsrichtung der Fasern erkennbar (siehe Abb. 3 in RAITH & VALI, 1998)

Muskovit (Probe K3; Probe K15): Bei 70-facher Vergrößerung wird der bereits makroskopisch deutliche, faserige Habitus der Muskovitaggregate besonders schön sichtbar (K15, Abb. 4a). Bei 1000-facher Vergrößerung werden die sehr unterschiedlichen Korngrößen der Kristallite deutlich. Neben mehrere 100 μm langen Kristalliten sind auch sehr kleine ($< 10 \mu\text{m}$) erkennbar (K15, Abb. 4b). Im Detail wird trotz der extrem länglichen Morphologie der Kristalle die für Phyllosilikate typische blättrig-schichtige Internstruktur erkennbar (K15; Abb. 4b). Auch hier ist die bereits makro- und mikroskopisch erkennbare extreme längliche Ausbildung der Kristallaggregate nachweisbar.

Leimsgraben

Chlorit (Probe J3, LMJ Inv.Nr. 34.071): Bei 250-facher Vergrößerung ist der faserige Habitus gut erkennbar (Abb. 5a), jedoch ist an derselben Probe bei 2000-facher Vergrößerung bereits blättrige Absonderung zu bemerken (Abb. 5b).

Muskovit (Probe J2, LMJ Inv.Nr. 34.070): Wenn auch die Muskovitaggregate extrem verlängerten Habitus aufweisen, zeigen Abb. 5c und Abb. 5d bei 400-facher Vergrößerung eine deutliche blättrige Absonderung entsprechend den Schichtsilikaten.

5. Röntgendiffraktometrie

Die röntgenographische Untersuchung an gepulvertem Probenmaterial erfolgte an einem Gerät der Firma Philips (Modell PW3710) an unorientierten Pulverproben am Institut für Geowissenschaften (Abteilung Prospektion und Angewandte Sedimentologie; Analytiker: F. SEIDL), unter folgenden Aufnahmebedingungen: CuK_α -Strahlung, 50 kV, 20 mA; $1/2^\circ$ Winkelgeschwindigkeit; Aufnahmebereich $2-65^\circ 2\theta$; Divergenzschlitz $1/2^\circ$; Receiving-Schlitz 0,1 mm; Scutter-Schlitz $1/2^\circ$. Es wurde versucht möglichst quarzfreie Partien zu untersuchen. Die wichtigsten Reflexe, ihre Intensitäten und die hkl-Indizes sind in Tabelle 1 aufgelistet und Daten der ICDD-Kartei gegenübergestellt.

Probe K1 besteht demnach aus Chlorit mit einem sehr geringen Quarz- und Glimmeranteil. K2 und K3 sind Muskovit-dominierte Proben. Sehr geringe Mengen an Chlorit, Chloritoid und Quarz sind nachweisbar.

Chlorit: Nach den röntgenographischen Untersuchungen an Probe K1 handelt es sich um einen trioktaedrischen 14-Å Chlorit mit annähernd statistischer Mg-Fe-Verteilung in den oktaedrisch koordinierten Gitterpositionen. Im Vergleich zu Angaben von BAILEY (1980; S. 91) und der ICDD-Kartei ist der Chlorit am ehesten dem Polytyp IIb zuzuordnen.

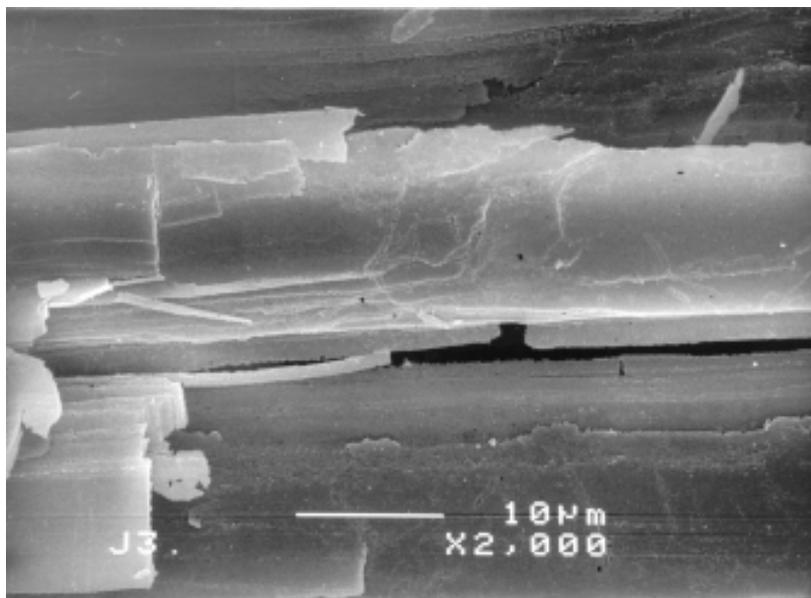
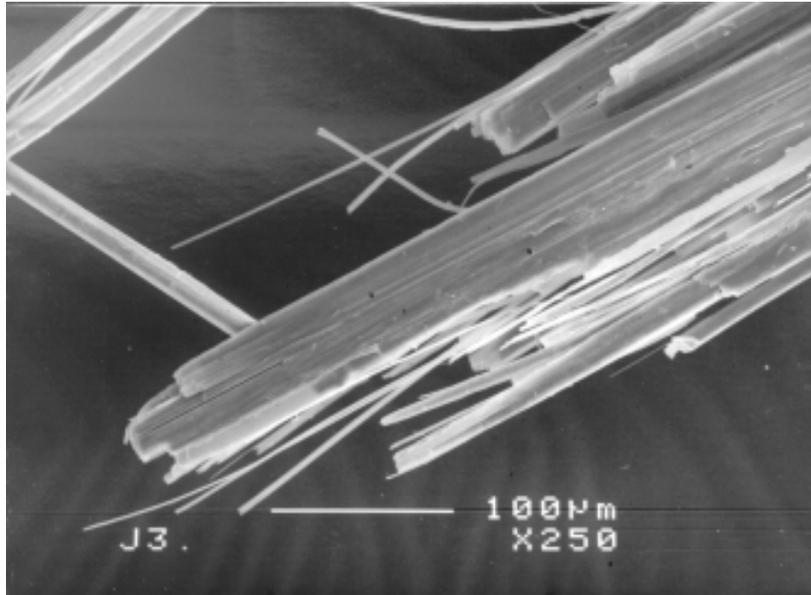
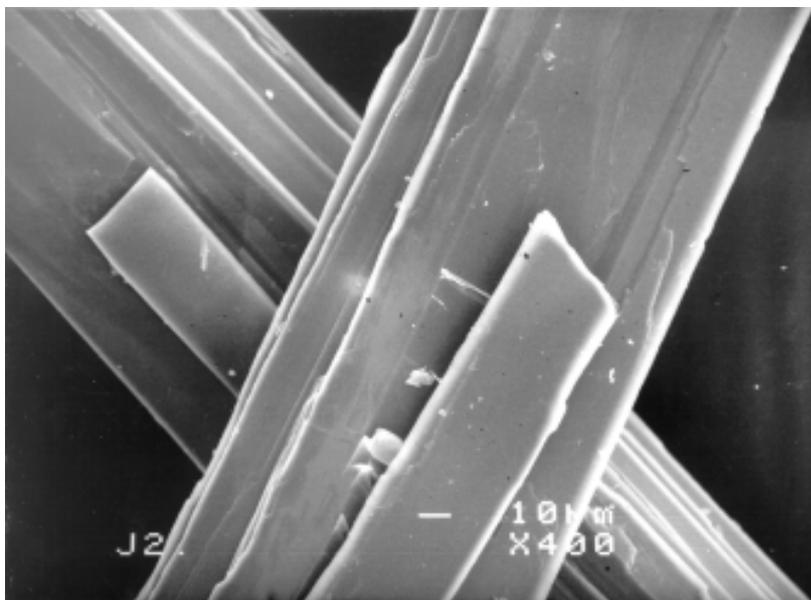
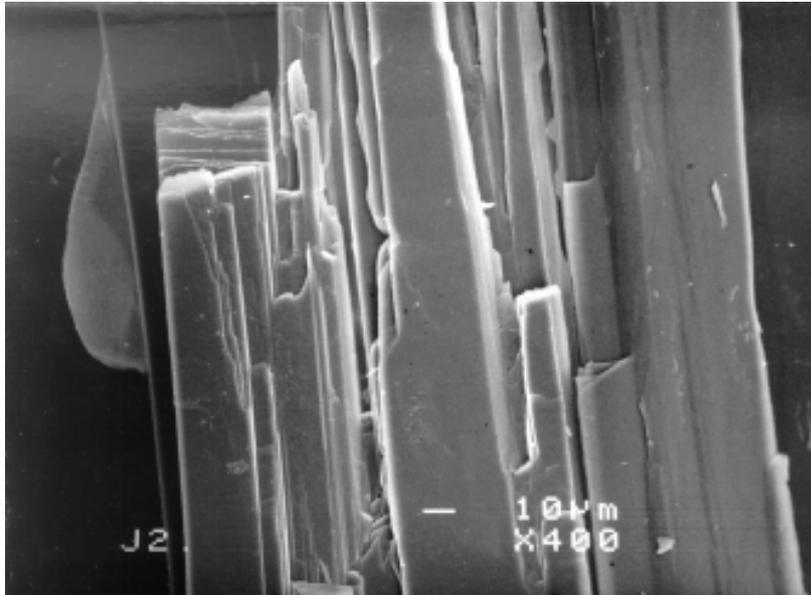


Abb. 5: REM-Aufnahmen von Muskovit und Chlorit aus dem Leimsgraben. (a; links oben) Probe J3, LMJ Inv.-Nr. 34.071. Unterschiedlich dicke Fasern von Chlorit (Vergrößerung 250-fach). (b; links unten) Probe J3, LMJ Inv.-Nr. 34.071. Bei stärkerer Vergrößerung (2000-fach) wird



auch hier die blättrige Absonderung deutlich. (c; rechts oben) und (d; rechts unten): Probe J2, LMJ Inv.-Nr. 34.070. Trotz extremer Elongation der Muskovitaggregate ist eine deutliche blättrige Ausbildung erkennbar (400-fach).

Muskovit: Die untersuchten Proben K2 und K3 zeigen charakteristische Reflexe dioktaedrischer Glimmer und sind eindeutig als Muskovit und zwar als $2M_1$ -Polytyp charakterisiert (Tab. 1). Größere Mengen an anderen Polytypen ($1M_d$, $1M$, $3T$) konnten nicht nachgewiesen werden. Die semiquantitative Abschätzung des Verhältnisses $2M_1/1M_d$ über einen Vergleich der Intensitäten des (023) Reflexes bei $3,74 \text{ \AA}$ mit den Reflexen bei $\approx 2,58 \text{ \AA}$ nach der Methode von VELDE & HOWER (1963) zeigt ebenfalls, dass der $2M_1$ -Polytyp bei weitem überwiegt. In Probe K2 sind maximal 10, in Probe K3 max. 30 % $1M$ -Muskovit vorhanden. Die Reflexe der Glimmer sind scharf ausgebildet. Die mittlere Halbwertsbreite des d_{002} -Basalreflexes beträgt $0,13$ bzw. $0,16^\circ 2\theta$ in den beiden Proben.

Graphit: Zur Charakterisierung des graphitischen Materials wurden orientierte Pulverpräparate von mit Flußsäure behandeltem Probenmaterial hergestellt und nach der Methode von LANDIS (1971) röntgenographisch untersucht und klassifiziert. Die Unterscheidung des Ordnungsgrades von graphitischem Material erfolgt entsprechend dieser Arbeit auf Grund der Lage, Breite und Asymmetrie des d_{002} -Reflexes. Der d_{002} -Reflex, gemessen bei maximalem Intensitätswert, liegt bei $3,40 \pm 0,01$ (Mittelwert, einfache Standardabweichung von 5 Messungen). Der Wert von d_{002} gemessen bei $1/3$ der Reflexhöhe ist $3,41 \pm 0,01$. Der H/W-Wert (Reflexhöhe H/Reflexbreite W bei $H=1/2$) ist $21,9 \pm 5,3$. Auf Grund der Lage des d_{002} -Reflexes ist das graphitische Material am besten als *Semigraphit* anzusprechen und zwar als Graphit- d_{1A} . Dies ist in guter Übereinstimmung mit Reflexionsmessungen an Graphit, für den die maximale Reflexionswerte in Öl ($=R_{\max}$) zwischen 8,6 und 10,6 % liegen (RAITH & VALI, 1998).

6. Mineralchemie

Die mineralchemische Zusammensetzung der Proben wurde quantitativ mittels einer ARL-SEMQ Elektronenstrahl-Mikrosonde (WDS) unter Verwendung natürlicher Mineralstandards (Kärsutit für Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na; Biotit für K; Rhodonit für Mn) am Institut für Geowissenschaften (Abteilung für Mineralogie und Petrologie) bestimmt. Die analytischen Bedingungen waren 15 kV und 20 nA. Die Daten wurden mittels eines modifizierten BENCE & ALBEE Modells bzw. nach BASTIN korrigiert. Die Verrechnung der Mineralformeln erfolgte auf wasserfreier Basis (Muskovit 22, Chlorit 28, Chloritoid 12 Sauerstoffe). Ausgewählte Analysen sind in Tabellen 2 und 3 aufgelistet. Diese Ergebnisse, vor allem die niedrigen Alkaligehalte der Muskovitanalysen, wurden selektiv mittels eines quantitativ arbeitenden Rasterelektronenmikroskopes (JEOL 6310 mit integriertem Oxford EDX System, natürlichen Mineralstandards, Probenstrom 2 nA bei eingeklapptem Farradaykäfig (= 2,5 nA auf Aluminiumblock); Zählzeit 100 s, ZAF-Korrektur) am Institut für Mineralogie, Kristallographie und Petrologie der Universität Graz kontrolliert.

Chlorit, Probe K1

d-Werte (Å)	I rel. %	ASTM 7-165	I rel. %	hkl
14,204	47	14,000	80	001
7,082	100	7,080	80	002
4,716	31	4,730	40	003
4,256	3	4,240	20	111
3,536	62	3,545	60	004
2,830	9	2,842	20	005
2,592	2	2,582	40	131, 20 $\bar{2}$
2,545	2	2,543	100	13 $\bar{2}$, 20 $\bar{1}$
2,442	2	2,439	50	132, 20 $\bar{3}$
2,390	2	2,381	20	13 $\bar{3}$, 202
2,022	2	2,066	10	134, 205
2,008	4	2,003	40	13 $\bar{5}$, 204
1,821	2	1,822	10	13 $\bar{6}$, 205
1,546	5	1,538	60	33 $\bar{1}$, 060

Muscovit, Probe K3

d-Werte (Å)	I rel. %	ASTM 6-263	I rel. %	hkl
10,056	100	9,950	95	002
5,022	29	4,970	30	004
4,475	2	4,470	20	110
3,889	2	3,880	14	11 $\bar{3}$
3,740	2	3,730	18	023
3,500	2	3,480	20	114
3,345	53	3,320	100	006
3,210	3	3,190	30	114
3,000	4	2,987	35	025
2,876	1	2,859	25	115
2,597	2	2,596	16	13 $\bar{1}$
2,569	4	2,566	55	20 $\bar{2}$
2,510	4	2,491	14	132
2,380	2	2,384	25	133
2,008	17	1,993	45	0010
1,499	2	1,504	30	060, 33 $\bar{1}$

Tab. 1: Vergleich der wichtigsten d-Werte und Intensitäten der untersuchten Proben mit Werten der ICDD-Kartei. Probe K1 ist eindeutig als Chlorit, K2 als Muskovit (2M₁-Polytyp) charakterisiert.

Probe	K1	K2	K7	K2	K2	K3	K7	K19	K2	K3	K2	K3
Analyse	1/2	2/1e	2/8e	1/2	1/12e	2/5	1/3e	1/8e	1/8	2/3		
Mineral	Chlorit	Chlorit	Chlorit	Muscovit	Muscovit	Muscovit	Muscovit	Muscovit	Chloritoid	Chloritoid		
SiO ₂	24,61	26,64	26,16	48,19	48,57	48,30	48,43	48,13	24,61	24,53		
TiO ₂	0,03	0,10	0,02	0,38	0,16	0,30	0,04	0,13	0,46	0,12		
Al ₂ O ₃	24,27	24,23	24,37	41,39	37,34	35,15	37,82	36,93	40,55	38,51		
FeO*	20,25	21,31	16,32	0,25	0,38	0,70	0,25	0,50	21,78	26,18		
MnO	0,01	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,32		
MgO	18,55	13,44	19,66	0,27	0,35	0,50	0,38	0,53	3,31	2,74		
CaO	0,00	0,00	0,02	1,08	0,00	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00		
Na ₂ O	0,00	0,24	0,36	1,80	0,78	0,52	0,85	0,45	0,05	0,00		
K ₂ O	0,00	0,64	0,07	3,14	6,92	5,08	7,19	6,79	0,00	0,02		
Σ	87,72	86,75	87,07	96,50	94,50	90,55	94,99	93,46	91,26	92,42		
Si	5,039	5,530	5,274	6,036	6,308	6,469	6,267	6,313	2,033	2,050		
Ti	0,005	0,016	0,003	0,036	0,016	0,030	0,004	0,013	0,029	0,008		
Al	5,856	5,928	5,791	6,110	5,715	5,548	5,768	5,709	3,949	3,793		
Fe ²⁺	3,467	3,699	2,752	0,026	0,041	0,078	0,027	0,055	1,505	1,830		
Mn	0,002	0,026	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,023		
Mg	5,661	4,159	5,909	0,050	0,068	0,100	0,073	0,104	0,408	0,341		
Ca	0,000	0,000	0,004	0,145	0,000	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000		
Na	0,000	0,097	0,141	0,437	0,196	0,135	0,213	0,114	0,008	0,000		
K	0,000	0,169	0,018	0,502	1,146	0,868	1,187	1,136	0,000	0,002		
Σ Kationen	20,029	19,624	19,907	13,343	13,491	13,229	13,545	13,445	7,967	8,046		
Anzahl O	28	28	28	22	22	22	22	22	12	12		
X _{Mg}	62,02	52,93	68,23	65,79	62,15	56,18	73,04	65,39	21,316	15,71		
Al ^{IV}	2,961	2,47	2,73	1,964	1,692	1,531	1,733	1,687				
ΣY				4,258	4,148	4,225	4,139	4,194				
ΣA				1,084	1,342	1,003	1,404	1,250				
T °C Chlorit**	415	336	377									

Tab. 2: Mineralanalysen (in Gew.-%) und Berechnung der Kationen von Chlorit, Muscovit und Chloritoid aus Proben der Graphitlagerstätte Kaisersberg; X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe²⁺); Al^{IV} Al in der Tetraederposition; ΣY Summe der Kationen in Oktaederpositionen; ΣA Summe der Kationen in den Glimmer-zwischenschichten; * gesamtes Fe als FeO; ** Temperaturen berechnet mit dem Chlorit-Thermometer von CATHÉLINEAU (1988).

Probe	34.070	34.070	34.070	34.071	34.071	34.071	34.070	34.070	34.070	34.070	34.070	34.070	34.070	34.070	34.070
Analyse	1	2	3	1	3	9	34.071	13	14	22					
Mineral	Chl	Mus	Mus	Mus											
SiO ₂	26,09	25,63	26,46	25,88	26,49	25,41	25,41	49,40	50,09	49,60					
TiO ₂	0,06	0,09	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00	0,11	0,15	0,15					
Al ₂ O ₃	23,16	22,93	23,12	23,55	23,72	23,94	23,94	33,92	35,39	35,99					
FeO*	21,89	21,71	20,39	20,40	20,42	21,84	21,84	0,98	0,58	0,55					
MnO	0,12	0,12	0,07	0,09	0,07	bd	bd	bd	bd	bd					
MgO	18,12	18,43	18,30	18,44	18,76	17,92	17,92	1,20	0,78	0,82					
CaO	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00					
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	0,67	0,56					
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	8,90	8,98	8,71					
Σ	89,45	88,93	88,37	88,37	89,51	89,13	89,13	95,07	96,64	96,38					
Si	5,269	5,213	5,360	5,250	5,295	5,151	5,151	6,478	6,445	6,388					
Ti	0,009	0,014	0,005	0,000	0,004	0,000	0,000	0,011	0,015	0,015					
Al	5,513	5,496	5,519	5,630	5,588	5,719	5,719	5,242	5,366	5,462					
Fe ²⁺	3,697	3,692	3,454	3,460	3,413	3,702	3,702	0,108	0,062	0,059					
Mn	0,021	0,021	0,012	0,015	0,012	-	-	-	-	-					
Mg	5,454	5,586	5,526	5,576	5,590	5,414	5,414	0,234	0,150	0,157					
Ca	0,002	0,004	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000					
Na	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,143	0,167	0,140					
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	1,489	1,474	1,431					
Σ Kationen	19,965	20,026	19,876	19,934	19,907	19,991	19,991	13,705	13,678	13,652					
Anzahl O	28	28	28	28	28	28	28	22	22	22					
X _{Mg} ^{IV}	0,596	0,602	0,615	0,617	0,621	0,594	0,594	0,684	0,708	0,727					
Al ^{IV}	2,731	2,787	2,640	2,750	2,705	2,849	2,849	1,522	1,555	1,612					
ΣY								0,342	0,212	0,216					
ΣA								1,632	1,641	1,571					

Tab. 3: Mineralanalysen (in Gew.-%) und Berechnung der Kationen von Chlorit, Muskovit der Proben von Leims; X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe²⁺); Al^{IV} Al in Tetraederposition; ΣY Summe der Kationen in Oktaederpositionen; ΣA Summe der Kationen in den Glimmerzwischenschichten; * gesamtes Fe als FeO.

Chlorit: Chlorit der Kaisersberger Probe K1 zeigt sehr einheitliche Zusammensetzung. Die Anzahl der Si-Kationen in der tetraedrischen Position variiert zwischen 5,0 und 5,2 (Mittelwert $5,077 \pm 0,064$, $n=11$), X_{Mg} (= $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ auf molarer Basis) zwischen 0,59 und 0,64 (Mittelwert $0,608 \pm 0,016$, $n=11$). Die Gehalte von Ti, Mn, Ca und der Alkalien sind sehr gering (0 bis maximal einige Hundertstel Gew.-%).

Chlorit aus den Proben von Leims (34.070; 34.071) weist folgende Zusammensetzung auf: Si in der Tetraederposition variiert zwischen 5,2 und 5,4 (Mittelwert $5,26 \pm 0,09$), $X_{Mg} = 0,59-0,62$ (Mittelwert $0,611 \pm 0,008$). Die Gehalte an Ti und Mn liegen im Hundertstel- bzw. Zehntelprozent-Bereich. Die Ca-, Na- und K- Gehalte liegen unter der Nachweisgrenze der Mikrosonde.

Alle Chlorite sind damit als Mg-Fe-Chlorite, und zwar entsprechend der Klassifikation von HEY (1954) als Rhipidolite zu klassifizieren.

Muskovit: Die untersuchten Glimmerminerale in den Proben K2 und K3 aus Kaisersberg zeigen eine recht geringe Streubreite in ihrer chemischen Zusammensetzung. Silizium in der Tetraederposition variiert zwischen 5,97 bis 6,52, die Summe der Kationen in der oktaedrischen Position zwischen 4,19 und 4,29. Die Summe der zweiwertigen (M^{2+}) Kationen Mg, Fe (gesamtes Fe als Fe^{2+} angegeben) und Mn liegt zwischen 0,076 und 0,186. Auf Grund der Al/Si-Verhältnisse und der geringen Gehalte an zweiwertigen Kationen sind die Glimmer als Muskovite, mit Zusammensetzungen, die dem theoretischen Endglied sehr nahe kommen, zu bezeichnen (Abb. 6).

Muskovit aus der Probe 34.070 von Leims zeigt ebenfalls sehr einheitliche Zusammensetzung. Zonarbau konnte nicht nachgewiesen werden. Si in der tetraedrischen Position variiert zwischen 6,39 und 6,48. Die Summe (Mittelwert, einfache Standardabweichung) der zweiwertigen Kationen ist $0,215 \pm 0,027$, die der A-Position $1,61 \pm 0,067$. Die FeO-Gehalte sind niedrig und liegen durchwegs unter einem Gew.-% FeO (Tab. 3). Somit sind auch die Hellglimmer aus Leims eindeutig als Muskovite ausgewiesen.

Auffällig bei den meisten Analysen ist die niedrige Besetzung der A-Position, was auch die zu niedrigen Gesamtsummen der Analysen erklärt. Die Summe der Kationen K, Na, Ca, die in der idealen Muskovitstruktur bei Berechnung auf 22 Sauerstoffe idealerweise zwei ist, liegt in den untersuchten Proben aus Kaisersberg zwischen 0,80 und 1,31, in der Probe aus Leims zwischen 1,44 und 1,67. Na variiert von 0,08 bis 0,27 in Kaisersberg und von 0,14 bis 0,18 in der Probe aus Leims. Als Einschlüsse in Graphit von Kaisersberg auftretender Glimmer (z. B. Analysen K2 1/2 und 1/3) hat bis 0,45 Na und bis zu 0,15 Ca bei ebenfalls recht niedrigen Gehalten an Kalium. Wie in der Diskussion dargelegt (siehe unten), sind die zu niedrigen Gehalte an Alkalien auf den Verlust dieser Elemente während der EMS-Analyse zurückzuführen. Um diesen Verlust zu minimieren, ist es daher ratsam, die Elemente Na und K bereits im ersten Analysendurchgang der wellenlängendispersiven Analyse zu erfassen. Dies ist bei den Analysen an Probe 34.070 aus Leims erfolgt, die daher auch höhere Alkaligehalte ergaben.

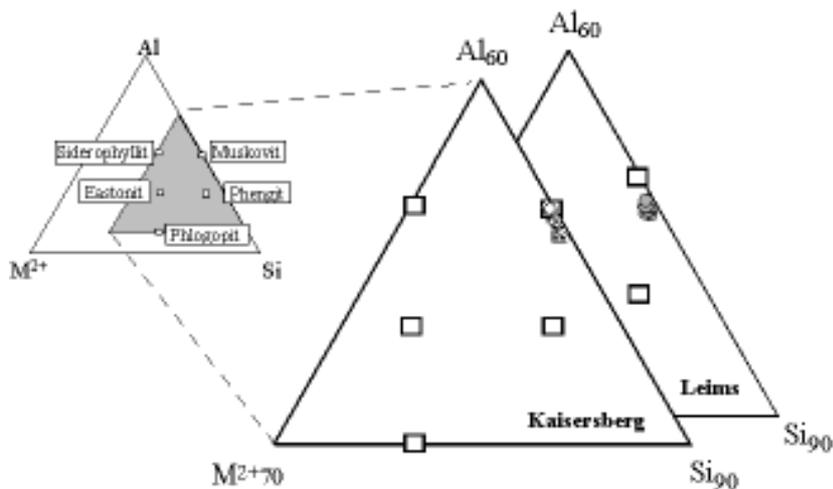


Abb. 6: Al-M²⁺-Si Diagramm zur Darstellung der Zusammensetzung von Glimmern. Alle Analysen aus (a) Kaisersberg (n=16 von 5 verschiedenen Proben) und (b) Leims (n=9, Probe 34.070) sind als Muskovite zu klassifizieren.

Chloritoid: Das Auftreten von Chloritoid ist auf die beiden Muskovit-führenden Proben K2 und K3 beschränkt. Die Zahl der Si-Kationen, berechnet auf der Basis von 12 Sauerstoffen, liegt zwischen 1,92 und 2,11, Al zwischen 3,79 und 4,16. Die Mn-Gehalte sind niedrig und variieren zwischen 0,1 und 0,6 Gew.-%. X_{Mg} variiert zwischen 0,078 und 0,179 (Mittelwert $0,15 \pm 0,034$, $n=7$). Die Fe-reichste Analyse (K2 1/4) zeigt ein X_{Mg} von 0,078 und stammt von einem in Graphit eingeschlossenen Korn.

7. Infrarot-Spektroskopie und thermische Analyse

Um das mögliche Vorhandensein von H₂O- bzw. H₃O⁺-Molekülen in Muskovit zu überprüfen – diese Moleküle sind mit EMS und REM nicht nachweisbar – wurde das Material zusätzlich mittels Infrarot-Spektroskopie (FTIR-Spektroskopie) und thermischer Analyse untersucht. Die FTIR-Messungen wurden dankenswerterweise von Herrn Prof. Dr. A. BERAN, Institut für Mineralogie und Kristallographie, Universität Wien, durchgeführt. Sie erfolgten an gepulvertem Probenmaterial, und zwar an Mikropresslingen, die mit KBr bzw. mit Polyöl als Trägersubstanz hergestellt wurden. Die Spektren wurden über einen Bereich von 1200 bis 4000 cm⁻¹, mit einem Perkin-Elmer FTIR-Spektrometer 1760 X (TGS Detektor) aufgenommen. Für weitere analytische Details sei auf die Arbeit von BERAN & al. (1997) verwiesen. Ein typisches Spektrum ist in Abb. 7 gezeigt. Zur Ab-

schätzung des Vorhandenseins von molekularem Wasser ist vor allem der Bereich mit Wellenzahl um ca. 1600 cm^{-1} interessant. Das Fehlen einer ausgeprägten Absorptionsbande bei 1635 cm^{-1} , i. e. der Position der H_2O -Knickschwingung, lässt den Schluss zu, dass keine signifikanten Mengen an Wasser im Muskovit vorhanden sind.

Die thermische Analyse einer gepulverten Muskovitprobe wurden mit einem NETZSCH-STA 409 Gerät unter folgenden Messbedingungen von der Firma NETZSCH Gerätebau GmbH in Selb (Bayern) durchgeführt: Temperaturbereich: Raumtemperatur bis 1400 °C ; Heizrate: 5 K/min ; Atmosphäre: Luft, statisch; TG/DSC TYP S Proben-träger; Pt-Tiegel mit Deckel; $37,06\text{ mg}$ Einwaage. Die TG- bzw. DTG-Kurven (Abb. 7a, b) zeigen eine fünfstufige Entwicklung mit Gewichtsverlusten von $0,32$, $0,35$, $4,15$, $0,79$ und $0,57\%$ (Gesamt $6,43\%$). Maximale Gewichtsverlustraten wurden bei ca. 89 , 306 , 687 und 972 °C ermittelt (Abb. 8a). Aus den zugehörigen DSC-Kurven (Abb. 8b) lässt sich Folgendes schließen: Die erste TG-Stufe ist auf die Abgabe von Oberflächenwasser bzw. schwach gebundenes Wasser zurückzuführen (endothermer DSC-Peak bei 200 °C). Die zweite TG-Stufe korreliert mit einem exothermen DSC-Peak bei 315 °C .

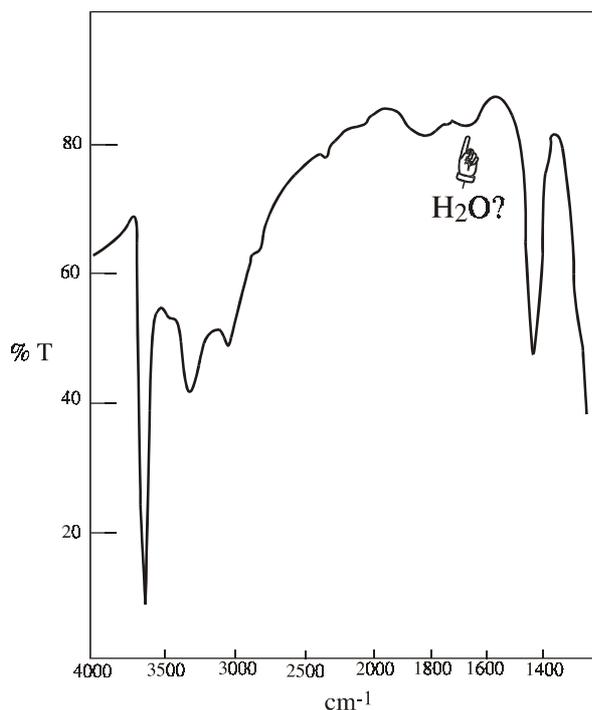


Abb. 7: FTIR-Spektrum von Muskovit aus der Graphitlagerstätte Kaisersberg (Aufnahme A. BERAN, Wien). Das Fehlen der H_2O -Knickschwingung bei einer Wellenzahl von ca. 1635 cm^{-1} (Pfeil) lässt schließen, dass kein Molekülwasser in den Glimmerzwischenschichten vorhanden ist.

Dies lässt auf das Vorhandensein von organischem Material (i. e. Graphit) schließen. Die Dehydroxylation (OH-Abspaltung) zeigt sich in der dritten und vierten TG-Stufe und äußert sich in der DSC-Kurve als relativ großer endothermer überlagerter Peak. Die fünfte TG-Stufe, die mit einem exothermen DSC-Peak bei 1106 °C korreliert werden kann, ist auf eine nicht näher definierbare Mineralneubildung zurückzuführen. Die thermische Analyse bestätigt das Vorhandensein von adsorptiv gebundenem Wasser und von OH-Gruppen, sie gibt allerdings keine Hinweise auf den Einbau von H₂O in den Glimmerzwischenschichten.

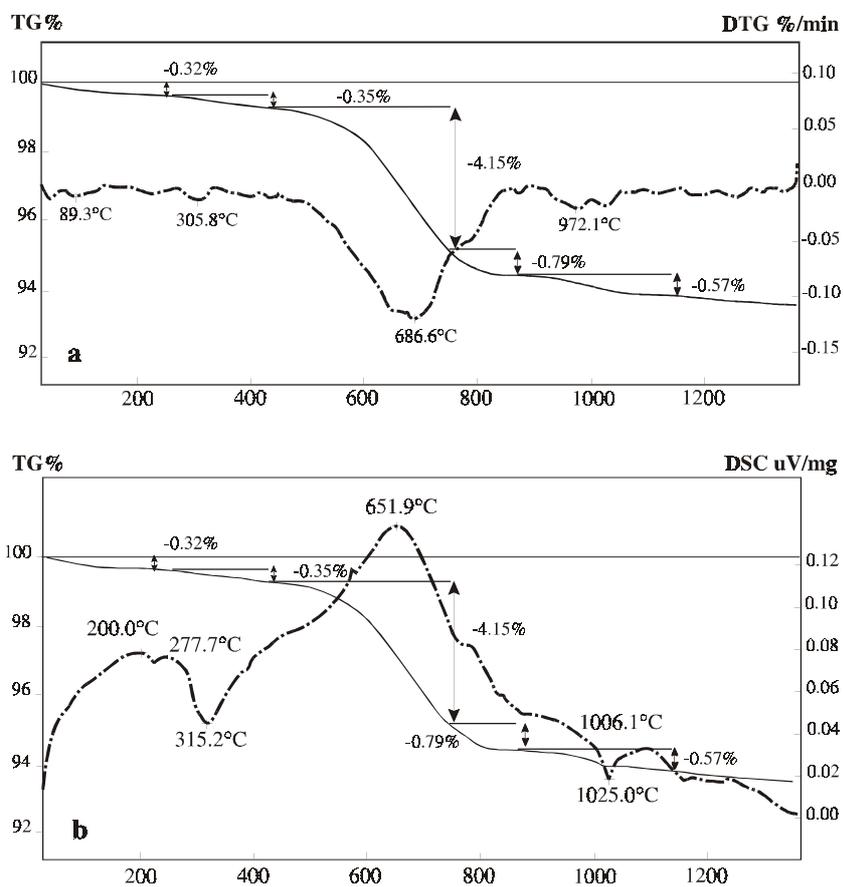


Abb. 8: Ergebnisse der thermischen Analyse einer Muskovitprobe aus Kaisersberg (Aufnahme Fa. Netzsch Gerätebau, Selb). (a) Thermogravimetrie (TG)- und Differential-Thermogravimetrie (DTG)-Kurven. (b) TG- und DSC-Kurve. Zur Interpretation siehe Text.

8. Diskussion

Vergleich mit klassischen Asbestmineralen

Asbest ist eine Sammelbezeichnung für einige Minerale der Amphibol- und Serpentin-Gruppe mit markant faserig/nadeligem Habitus. Definitionsgemäß muss die Faserlänge $>5\ \mu\text{m}$, der Faserdurchmesser $<5\ \mu\text{m}$ und das Verhältnis Länge zu Durchmesser der Fasern >3 sein [U. S. Occupational Safety and Health Administration, 1975; in Ross (1985)]. Zu den klassischen Asbestmineralen sind einerseits das Serpentinmineral Chrysotil $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, andererseits Minerale der Amphibolgruppe zu rechnen. Bei den Amphibolbesten werden Amosit (eine Varietät von Grunerit) $(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, Krokydolith (eine Varietät von Riebeckit) $\text{Na}_2(\text{Fe}^{2+}\text{Mg})_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, sowie faserige Ca-Amphibole der Tremolit-Aktinolithreihe $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ und Antophyllit $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$ unterschieden (Ross, 1985).

Entsprechend dieser Auflistung sind die als Chlorit bzw. Muskovit bestimmten Proben aus Kaisersberg *keinesfalls* als klassische Asbestminerale einzustufen. Auch hinsichtlich ihrer morphologischen Ausbildung entsprechen sie nur bedingt den Definitionskriterien von Asbestmineralen. Im Rasterelektronenmikroskop wird erkennbar, dass sich die einzelnen „Fasern“ vor allem aus *schichtig-blättrigen* Aggregaten zusammensetzen, wobei die Aggregate allerdings bevorzugt entlang einer Richtung gewachsen sind und sich, auf Grund der Krümmung der Schichtpakete, v. a. in der Chloritprobe K1, zu faserähnlichen Kristallpaketen vereinigen können.

Zur genaueren Klärung der ungewöhnlichen Morphologie dieser Schichtsilikate wurden detaillierte Untersuchungen mittels Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM) durchgeführt (RAITH & VALI, 1998; SEARS & al., 1998). Diese laufenden Untersuchungen konnten zeigen, dass die Proben aus Kaisersberg sich deutlich von typischen metamorph und magmatisch gebildeten Muskoviten bzw. Chloriten unterscheiden. Das im REM teilweise erkennbare „Einrollen“ parallel zur Längsachse konnte mit hochauflösender Transmissions-Elektronenmikroskopie (HRTEM) jedoch nicht bestätigt werden (SEARS & al., 1998).

Besetzung der Muskovit-Zwischenschicht

Wie im Kapitel Mineralchemie dargestellt, zeigen die untersuchten Muskovite eine Kationen-Unterbesetzung der Zwischenschicht (i. e. Summe der Kationen in der A-Position < 2). Mögliche Erklärungen für die niedrigen Alkaligehalte in der A-Position sind: (a) analytische Probleme (z. B. Verlust von Alkalien während der Messung); (b) der selektive Verlust von Alkalien durch Verwitterungs- oder Alterationsprozesse; (c) die Substitution von Alkalien durch H_2O und/oder H_3O^+ (LOUKS, 1991); (d) das Vorhandensein von Leerstellen in der Glimmerzwischenschicht.

Um das Vorliegen analytischer Probleme zu überprüfen, wurden einige EMS-Analysen von Muskovit mittels eines mit quantitativem EDX ausgestatteten REM an der Universität Graz kontrolliert. Auch diese Analysen belegen eine deutliche, wenn auch weniger markante Unterbesetzung der A-Position (Tab. 2). In weiterer Folge wurden die Än-

derungen der Zählimpulse (counts/s) für die K_{α} -Linien von K (am LiF-Kristall) und Na (am TAP-Kristall) in Abhängigkeit von der Messzeit untersucht. Dabei wurden die Zählimpulse in Intervallen von 10 s (Peak) plus 4 s (Untergrund) registriert, ohne dass die Probe zwischenzeitlich bewegt wurde. Es zeigte sich, dass es über eine totale Messdauer von 120 s zu einer signifikanten Erniedrigung kommt. So nahm die nicht korrigierte Intensität von K während 120 s von 1579 auf 953 cps, d. h. um ca. 40 % ab!

Oberflächenverwitterung ist durch die Probenahme auszuschließen. Die Proben zeigen keinerlei Verwitterungseinflüsse und stammen alle aus dem Untertagebau. Eine hydrothermale Alteration, z. B. durch post-metamorphe Fluide, ist auf Grund der petrographischen Untersuchungen – Muskovit ist eindeutig Teil der metamorphen Peak-Paragenese und es sind keine retrograden Mineralumwandlungen zu beobachten – und auf Grund der Ergebnisse der TEM-Studien auszuschließen (RAITH & VALI, 1998).

Der Einbau von H_2O - bzw. H_3O^+ in die Glimmerzwischenschichten konnte mittels Infrarot-Spektroskopie (FTIR-Spektroskopie) und thermischer Analyse widerlegt werden. Das FTIR-Spektrum (Abb. 7) zeigt keine Absorption bei 1635 cm^{-1} , i. e. der Position der H_2O -Knickschwingung, woraus geschlossen werden kann, dass keine signifikanten Mengen an H_2O bzw. H_3O^+ vorhanden sind. Die thermische Analyse belegt zwar die Abgabe von adsorptiv gebundenem sowie Hydroxyl-Wasser, lässt aber ebenfalls nicht auf die Abgabe von Wasser aus Glimmerzwischenschichten schließen. Die wahrscheinlichste Erklärung für die beobachtete Unterbesetzung der A-Position im Muskovit ist somit der selektive Verlust von Alkalien aus der Zwischenschicht, vor allem von K_2O , während der EMS-Analyse, der bis zu ca. 50 % ausmachen kann (Tab. 2, 3).

Bildungsbedingungen und Metamorphosegrad

Das geologische Auftreten von faserig-nadeligem Chlorit bzw. Muskovit in Graphit und in synmetamorphen schieferungsparallelen Quarzmobilisaten im Graphit, die Mineralparagenese mit Quarz, \pm Chloritoid, \pm Kyanit, \pm Chlorit und die Textur der Minerale (Quarzeinregelung, Quarz-Rekristallisation, perfekte Einregelung der Phyllosilikate) lassen auf eine Bildung im Zuge der Regionalmetamorphose und der sie begleitenden Deformation schließen. Faseriger Chlorit und Muskovit sind auf Grund des petrographischen Befundes als synmetamorphe Neubildungen anzusehen. Hinweise, dass sie durch Umwandlung aus tremolitischem Hornblendeasbest entstanden seien, wie WENINGER (1966; in SCHROLL & SPATZEK, 1984) angibt, konnten an dem vorliegenden Probenmaterial nicht bestätigt werden.

Für die Graphitlagerstätte Kaisersberg und ihre unmittelbaren Umgebungsgesteine wurden die Bildungsbedingungen mit 200–250 °C und 1,5 bis 1,8 kbar angegeben (SPATZEK, 1962; WENINGER, 1966; beide zitiert in SCHROLL & SPATZEK, 1984), wären also noch der Anchimetamorphose zuzurechnen.

Diese Druck-Temperaturangaben werden auf Grund der folgenden Daten und Beobachtungen als zu niedrig angesehen (RAITH & VALI, 1998):

Die Anwendung des empirisch kalibrierten Chlorit-Thermometers ergab Temperaturen zwischen ca. 380 und 420 °C (Mittelwert 408 ± 10 °C).

Obwohl Chloritoid vereinzelt auch aus anchizonal metamorphen Gesteinen beschrieben worden ist, ist er ein typisches und häufiges Mineral der Epizone (FREY, 1987, p. 54–55). Auch das Auftreten von Kyanit und das Fehlen von Pyrophyllit in der peak-metamorphen Paragenese sprechen für Bedingungen der unteren Grünschieferfazies. Die Reaktion $\text{Pyrophyllit} = \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{Quarz} + \text{H}_2\text{O}$ liegt für eine Wasseraktivität ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) von 1,0 bei Drucken von 1 bis 5 kbar zwischen 350 bis 400 °C. Der Nachweis von Kyanit belegt Minimumtemperaturen von 380 °C und Minimaldrucke von ca. 2,8 kbar (bei $X_{\text{H}_2\text{O}}=1,0$). Verringerte Wasseraktivitäten, wie sie bei der Metamorphose graphitischer Schiefer vorkommen können, verschieben diese Reaktion allerdings zu etwas niedrigeren Temperaturen. In Klüften gemeinsam mit Bergkristall und Chlorit auftretender Pyrophyllit (POSTL in NIEDERMAYR, 1994) scheint infolge von Abkühlung im Zuge der retrograden Metamorphose gebildet worden zu sein.

Muskovit ist als $2M_1$ -Polytyp bestimmt. Die Änderung der Struktur von Muskovit-1M zu $2M_1$ ist vom Metamorphosegrad und zwar vor allem von der Temperatur abhängig. Mit Erreichen der Epizone ist die Umwandlung von 1M bzw. $1M_d$ -Muskovit in den $2M_1$ -Polytyp weitgehend abgeschlossen. Auch experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass oberhalb von 200 bis 350 °C (bei $P_{\text{H}_2\text{O}}=2$ kbar) nur mehr der $2M_1$ -Polytyp stabil ist (FREY, 1987).

Die bereits deutliche strukturelle Ordnung der graphitischen Substanz und die Einstufung als Graphit- d_{1A} weisen darauf hin, dass die Metamorphosetemperaturen über Bedingungen der Anchimetamorphose gelegen sind (siehe Abb. 10 in ITAYA, 1981). Auch das an Graphit (in Ölimmersion) gemessene Reflexionsvermögen (R_{max} 8,6–10,6 %; $R_{\text{min}} < 1,5$ %, RAITH & VALI, 1998) weist darauf hin, dass bereits Semigraphit vorliegt und Bedingungen der Epizone erreicht wurden.

Die Halbwertsbreiten des (002) Basalreflexes der untersuchten Muskovite sind gering; Die Reflexe sind scharf ausgebildet. Dies stimmt mit regionalen Untersuchungen der Illit-Kristallinität in der Grauwackenzone überein, die größtenteils Werte $< 4,0$ ergaben (RATSCHBACHER & KLIMA, 1985; KRÁLIK & al., 1987).

Diese Ergebnisse belegen, dass während der alpidischen Metamorphose im Raum Kaisersberg Bedingungen der Grünschieferfazies und zwar der Epizone (ca. 360–400 °C, min. 2 kbar) erreicht worden sind.

Dank: Für die Erstellung einiger XRD-Aufnahmen am Institut für Geowissenschaften (Abteilung Prospektion und Angewandte Sedimentologie) sei Herr F. SEIDL und Herr Univ.-Prof. Dr. W. VORTISCH gedankt. Für die Möglichkeit der Durchführung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gilt unser Dank Herrn Univ.-Prof. Dr. H. HARMUTH, Institut für Gesteinshüttenkunde, Montanuniversität Leoben, für die Durchführung der Aufnahmen Herrn W. ROSSMANN (†). J. G. R. dankt Herrn H. MÜHLHANS für die Unterstützung bei der EMS-Analytik. Mag. Dr. Ch. HAUZENBERGER sei für seine Hilfe und Einführung am JEOL-Rasterelektronenmikroskop des Institutes für Mineralo-

gie, Kristallographie und Petrologie der Universität Graz (ehemals Vorstand Prof. Dr. G. HOINKES) unser Dank ausgesprochen. Herrn Univ.-Prof. Dr. A. BERAN sei für die FTIR-Analyse, der Firma Netzsch Gerätebau für die thermische Analyse gedankt. Herrn Dipl.-Ing. W. TWRDY, dem Betriebsleiter des Graphitbergbaues Kaisersberg, dankt J. G. R. für die Möglichkeit einer Befahrung des Graphitbergbaues Kaisersberg herzlichst.

Literatur

- BAILEY S. W. (1980): Structures of layer silicates. In: BRINDLEY G. W. & BROWN G. (Eds). Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. – Min. Soc. London, 2–123.
- BERAN A., GIESTER G. & LIBOWITZKY E. (1997): The hydrogen bond system in natrocalcite-type compounds – an FTIR spectroscopic study of the H_3O_2^- unit. – Mineral. Petrol. **61**, 223–235.
- CATHELINEAU M. (1988): Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. – Clay minerals **23**, 471–485.
- FREY M. (1987): Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In: FREY M. (Ed.). Low temperature metamorphism. – Blackie, Glasgow, 9–58.
- HAUSER L. (1938): Die Grenze Seckauerkristallin – Grauwackenzone im Profil über die Ruine Kaisersberg bei St. Michael. – Berg- hüttenmänn. Mh. **86**, 114–119.
- HEY M. H. (1954): A new review of the chlorites. – Min. Mag. **30**, 277.
- HOLZER H. (1966): Bericht 1965 über lagerstättenkundliche Arbeiten, Graphit. – Verh. Geol. B.-A, A62–A63.
- ITAYA T. (1981): Carbonaceous material in pelitic schists of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. – Lithos **14**, 215–224.
- KLAR G. (1964): Steirische Graphite. – Verlag Styria, Graz, 149 p.
- KRALIK M., KRUMM H. & SCHRAMM J. M. (1987): Low grade and very low grade metamorphism in the Northern Calcareous Alps and in the Greywacke Zone: Illite-crystallinity data and isotopic ages. In: FLÜGEL H. W. & FAUPL P. (Eds). Geodynamics of the Eastern Alps. – Deuticke, Vienna, 164–178.
- LANDIS C. A. (1971): Graphitization of dispersed carbonaceous material in metamorphic rocks. – Contrib. Mineral. Petrol. **30**, 34–45.
- LOUKS R. R. (1991): The bound-interlayer H_2O content of potassic white micas: muscovite-hydromuscovite-hydrophyllite solutions. – Amer. Mineral. **76**, 1563–1579.
- MÖHLER D. & SEITWEGER K. (1993): Neue Mineralfunde aus der Graphitlagerstätte Kaisersberg bei St. Stefan ob Leoben. – Der Steirische Mineralog **6**, 12–14.
- NEUBAUER F. & VOZÁROVÁ A. (1989): The Noetsch-Veitsch-North Gemic zone of Alps and Carpathians: correlation, paleogeography and significance for Variscan orogeny. In: MANARIKOVA D. & LOBITZER H. (Eds.). Thirty years of geological cooperation between Austria and Czechoslovakia, 167–171.
- NIEDERMAYR G., BRANDSTÄTTER F., MOSER B., PAAR W. H., POSTL W., TAUCHER J. & BOJAR H.-P. (1993): Neue Mineralfunde aus Österreich XIII. – Carinthia II **183/103.**, 265–290.
- NIEDERMAYR G., BOJAR H.-P., BRANDSTÄTTER F., HAMMER V. M. F., MOSER B., POSTL W. & TAUCHER J. (1994): Neue Mineralfunde aus Österreich XIII. – Carinthia II **184/104.**, 243–275.

- NIEVOLL J. (1984): Der Südrand der Grauwackenzone zwischen Stübing und Neuberg (Obersteiermark, ÖK 103 Kindberg). – Mitt. Österr. Geol. Ges. **77**, 63–71.
- RAITH J. G. & VALI H. (1998): Fibrous chlorite and muscovite from the Kaisersberg graphite mine, Styria, Austria. – *Canad. Mineral.* **36**, 741–754.
- RAITH J. G., SEARS S. K., VALI H. & MARTIN R. F. (1999): „Asbestos“ from the Kaisersberg graphite mine, Styria. – *Ber. Dt. Mineral. Ges., Beih. Eur. J. Mineral.* **11**, 186, Abstr. MinWien Tagung, Wien, 28. August bis 1. September 1999.
- RATSCHBACHER L. (1984): Beitrag zur Neugliederung der Veitscher Decke (Grauwackenzone) in ihrem Westabschnitt (Obersteiermark, Österreich). – *Jb. Geol. B.-A.* **127**, 423–453.
- RATSCHBACHER L. (1985): Strukturgeologische Grundlagenforschungsaspekte als Prospektions- und Abbaurichtlinien am Beispiel Graphitbergbau Sunk/Trieben (Paltental, Steiermark). – *Arch. f. Lagerst. forsch. Geol. B.-A.* **6**, 81–84.
- RATSCHBACHER L. & KLIMA K. (1985): Übersicht über Geologie und Mineralgehalt in einem Querprofil vom Altkristallin zur Kalkalpenbasis (Triebener Tauernpaß - Flitzenschlucht, Paltental, Steiermark, Österreich). – *Jb. Geol. B.-A.* **128**, 151–173.
- ROSS M. (1985): The geologic occurrence and health hazards of amphibole and serpentine asbestos. In: VEBLÉN D. R. (Ed.). *Amphiboles and other hydrous pyriboles - mineralogy.* – *Rev. Min.* **Vol. 9A**, *Min. Soc. Amer.*, 279–323.
- SCHARFE G. (1981): Steirische Graphitvorkommen. – *Mitt. Abt. Geol. Paläont. Bergb. Landesmus. Joanneum* **42**, 117–121.
- SCHROLL E. & SPATZEK H. (1984): Dickit und eine Mikroerzmineralisation aus dem Graphitbergbau Kaisersberg, Steiermark. – *Mitt. Abt. Miner. Landesmuseum Joanneum* **52**, 23–25.
- SEARS S. K., RAITH J. G. & VALI H. (1998): TEM study of unique fibrous chlorite and muscovite. – 17th General Meeting, Intern. Miner. Assoc., August 9–14, 1998, Toronto.
- SPATZEK H. (1962): Beitrag zur Aufbereitung des Graphites der Lagerstätte Kaisersberg. – Unveröffentl. Diss., Montanuniv. Leoben.
- VELDE B. & HOWER J. (1963): Petrological significance of illite polymorphism in Paleozoic sedimentary rocks. – *Amer. Mineral.* **48**, 1239–1254.
- WENINGER M. (1966): Beiträge zur Geochemie der Grafitlagerstätten der Grauwackenzone mit besonderer Berücksichtigung der Vorkommen von Kaisersberg und Sunk/Trieben. – Unveröffentl. Diss., Univ. Wien.
- WEIß A. (1992): Zur Geschichte der Nutzung steirischer Industriemineralien und Gesteine im 19. Jahrhundert. – *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr.* **38**, 185–193.

Anschrift der Verfasser:

Ao. Univ.Prof. Dr. Johann. G. RAITH
 Institut für Geowissenschaften
 Peter-Tunner-Straße 5
 A-8700 Leoben, Österreich
 raith@unileoben.ac.at

Dr. Walter POSTL
 Landesmuseum Joanneum, Mineralogie
 Raubergasse 10
 A-8010 Graz, Österreich
 walter.postl@stmk.gv.at