

Kritische Hochtechnologiemetalle – Verfügbarkeit in der EU mit Fokus auf Österreich

Frank Melcher

Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen am 29. September 2014; angenommen am 30. September 2014; online publiziert am 10. Oktober 2014

Zusammenfassung: Mittlerweile werden zwanzig mineralische Rohstoffe von der Europäischen Union (EU) als kritisch angesehen. Darunter befinden sich auch seltene Metalle, die in Hochtechnologieprodukten, z. B. in der Elektronikindustrie oder in „green technologies“, Verwendung finden. Die Bergbauproduktion dieser Rohstoffe ist innerhalb der EU derzeit gering. In Österreich bestehen trotz der Schließung der meisten Metallergbergwerke geologische Potenziale für einige Hochtechnologiemetalle. Am Beispiel von Germanium, Gallium, Indium und Kobalt werden solche Potenziale in ihrem lagerstättengeologischen und genetischen Rahmen am Beispiel sulfidischer Erze diskutiert. Um Aussagen zu heimischen Ressourcen machen zu können, wird empfohlen, das Potenzial von kritischen Metallen in den als sicherungswürdig klassifizierten Vorkommen zu erkunden.

Schlüsselwörter: Kritische Metalle, Hochtechnologiemetalle, Rohstoffversorgung, Sulfiderze

Supply of Critical High-technology Metals within the European Union, with a Focus on Austria

Abstract: Recently, the European Union (EU) has identified twenty mineral commodities as being critical, including rare metals that are used in high-technology products such as electronics and green technologies. Within the EU, primary production of these metals is very limited. Despite the closure of most metal-producing mines, Austria hosts numerous geological targets of potential significance for some of the critical metals. Such potentials are discussed in their geological and metallogenetic context for the elements germanium, gallium, indium and

cobalt in sulphide ores. Investigating critical metals in mining areas proved worth being protected is of utmost importance to estimate the domestic resources of high-technology metals.

Keywords: Critical metals, High-technology metals, Raw materials supply, Sulphide ores

1. Kritische Rohstoffe in der EU

In den vergangenen Jahren ist der Bedarf an Rohstoffen für Hochtechnologieprodukte stark angestiegen. Die „Ad-Hoc Working Group on defining critical raw materials“ der Europäischen Kommission hat in ihrer revidierten Liste 20 mineralische Rohstoffe auf der Basis des Versorgungsrisikos und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung als kritisch definiert [1]. Dazu zählen auch die für Hochtechnologie (HT)-Anwendungen wichtigen Elemente Germanium, Gallium, Indium, Kobalt, Platingruppenelemente (PGE) und Seltene Erden (SEE; Tab. 1). Im Gegensatz zu einer 2010 von der EU veröffentlichten Liste wird Tantal nicht mehr als kritisch angesehen, obwohl die Versorgung derzeit zu über 80% aus afrikanischen Staaten erfolgt [2]. Die Kritikalität erklärt sich durch die Länderkonzentration der Versorgung sowie durch den in Zukunft mit durchschnittlich 3 bis 5% pro Jahr steigenden Rohstoffbedarf (Tab. 2). Viele kritische Metalle stammen als Beiprodukte oder Koppelprodukte aus der Gewinnung anderer Metalle, z. B. Gallium aus der Aluminium-Gewinnung, Germanium und Indium aus Zink-Blei-Sulfiderzen, Platingruppenmetalle aus Chrom-, Kupfer- und Nickel-Erzen [3]. Für solche Nebenprodukte existiert oft keine eigene Produktionsinfrastruktur wie Mineral- oder Elementabtrennung. Die Metalle enden daher oft in Abgängen oder Emissionen und sind daraus kaum mehr wirtschaftlich gewinnbar. Nur aus kontrolliert deponierten Schlacken oder Schlämmen ist eine spätere Rückgewinnung möglich. Für klassische Bei- oder Koppel-

Univ.-Prof. Mag. rer. nat. Dr. mont. F. Melcher (✉)
 Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre,
 Montanuniversität Leoben,
 Peter-Tunnerstraße 5, 8700 Leoben, Österreich
 E-Mail: frank.melcher@unileoben.ac.at

TABELLE 1:

Liste der 2014 durch die Expertenkommission der EU als kritisch für die europäische Ökonomie identifizierten 20 mineralischen Rohstoffe in alphabetischer Reihenfolge [1]

Antimon	Beryllium	Borate	Chrom	Flussspat
Gallium	Germanium	Graphit	Indium	Kobalt
Kokskohle	Magnesit	Magnesium	Niob	PGM
Phosphatgestein	Schwere Seltene Erden	Leichte Seltene Erden	Siliziummetall	Wolfram

TABELLE 2:

Übersicht über Produktion, Bedarf, jährliche Steigerungsraten (CAGR: compound annual growth rate) und Recyclinganteil einiger kritischer Hochtechnologie-Metalle im Vergleich zu Kupfer und Zinn [19]

Metall	Symbol	Produktion 2011 (Tonnen)	Bedarf 2030 (Tonnen)	CAGR (20 Jahre)	Recyclinganteil 2011
Kobalt	Co	130.700	336.700	5,11 %	25 %
Niob	Nb	78.750	180.985	4,48 %	20 %
Germanium	Ge	197	433	4,25 %	40 %
Gallium	Ga	288	630	4,21 %	25 %
Tantal	Ta	988	1.820	3,27 %	20 %
Indium	In	1.360	2.500	3,26 %	53 %
Antimon	Sb	198.800	317.000	2,49 %	15 %
Wolfram	W	120.000	181.600	2,20 %	40 %
Beryllium	Be	300	405	1,59 %	20 %
Zinn	Sn	334.150	482.600	1,95 %	24 %
Kupfer	Cu	19.777.000	27.386.000	1,73 %	19 %

produkte des Bergbaus sind Aufbereitungs- und metallurgische Kapazitäten in Ländern wie z. B. China strategisch enorm wichtig. China ist größter Produzent bei vielen HT-Metallen, mit Ausnahme von Kobalt (Demokratische Republik Kongo) und den PGE (Südafrika, Russland). Die europäische Industrie ist extrem abhängig von diesen Quellen und damit anfällig für staatliche Regulationsmaßnahmen zur Förderung der eigenen Industrie.

Eine Diversifizierung von Bezugsquellen für kritische Rohstoffe schließt die Nutzung heimischer Ressourcen ein. Die Produktion kritischer Hochtechnologie-Metalle aus primären Quellen ist innerhalb der EU derzeit jedoch gering. Einzig für Wolfram ist die Situation durch den aktiven Bergbau in Österreich, Portugal und Spanien etwas entspannter; außerdem werden Kobalt und geringe Mengen PGE gewonnen (Finnland); Gallium (Ungarn) und Germanium (Finnland) werden aus importierten Rohstoffen produziert [2]. Die geologische Verfügbarkeit vieler Metalle wird innerhalb der EU als ausreichend eingeschätzt, um zumindest einen gewissen Anteil an Eigenversorgung abdecken zu können. Dies kann allerdings nur gelingen, wenn die Gewinnung von Koppelprodukten aus produzierenden oder derzeit gestundeten Buntmetallagerstätten in Angriff genommen und die nötigen Investitionen zur Produktion unverritzter Vorkommen getätigt werden.

2. Kritische Hochtechnologiemetalle: einige Beispiele

Die Hochtechnologiemetalle Germanium, Gallium, Indium und Kobalt sind in einer Vielzahl von Produkten des täglichen Gebrauchs zu finden (Tab. 3). Sie sind weltweit an Lagerstätten der Hauptmetalle Kupfer, Zink, Blei, Nickel und Aluminium gebunden und müssen somit aus Produktionsrückständen als beibehaltende Metalle gewonnen werden [4] (Tab. 3). Während Germanium, Gallium und Indium in der Regel nur in geringen Konzentrationen (einige ppm bis etwa 0,1 %) als Nebenelemente in Sphalerit [ZnS] (z. B. [5, 6]), Pyrit [FeS₂], Galenit [PbS] und Chalkopyrit [CuFeS₂] (z. B. [7]) auftreten, bildet Kobalt oft auch diskrete Mineralphasen (Tab. 3). Solche Anreicherungen sind jedoch selten, so dass die Kobaltgewinnung als Nebenprodukt von Zink, Nickel und Kupfer zunehmend interessant werden wird [4]. Das Potenzial der Gewinnung von Antimon als Beiprodukt aus Sulfiderzen ist unbekannt, im Falle von Fahlerzlagerstätten aber sicherlich vorhanden; Fahlerze sind Mischkristalle der Reihe Tetraedrit [Cu₁₀(Fe, Zn)₂Sb₄S₁₃] – Tennantit [Cu₁₀(Fe, Zn)₂As₄S₁₃], die zusätzlich zu Antimon (26 Masse-% im Tetraedrit) auch Spurenelemente wie Germanium, Silber und Cadmium ins Kristallgitter einbauen. Antimon-dominierte Fahlerze bilden das Haupterzmineral in verschiedenen historisch bedeutenden Lagerstätten in Österreich (z. B. Schwaz-Brixlegg).

TABELLE 3:

Übersicht über Geochemie, Mineralogie, Lagerstättentypen, Gewinnung und Nutzung einiger kritischer Hochtechnologie-Metalle

Metall	Kobalt	Gallium	Germanium	Indium
Ordnungszahl	27	31	32	49
Häufigkeit in der Kruste in ppm	29	17	1,5	0,05
Wichtigste Erzminerale	Cobaltin CoAsS , Safflorit CoAs_2 , Skutterudit CoAs_3 , Kobaltkies $(\text{CoNi})_3\text{S}_4$, Carrollit $\text{Cu}(\text{Co}, \text{Ni})_2\text{S}_4$, Heterogenit CoOOH , Asbolan	Gallit CuGaS_2	Germanit $\text{Cu}_{13}\text{Fe}_2\text{Ge}_2\text{S}_{16}$, Reniérit $(\text{Cu}, \text{Zn})_{11}\text{Fe}_2(\text{Ge}, \text{As})_2\text{S}_{16}$, Briartit $\text{Cu}_2(\text{Fe}, \text{Zn})\text{GeS}_4$, Argyrodit Ag_6GeS_6	Roquesit CuInS_2
Substitution in	Pyrit, Pyrrhotin, Pentlandit	Al-Hydroxide; Sphalerit	Sphalerit, Enargit, Fahlerze	Sphalerit, Chalkopyrit
Lagerstättentypen	Sedimentgebundene Kupfererze, 5-Element-Gänge, Laterite, Ni-Cu Sulfiderze, Manganknollen	Bauxit; einige Sulfiderze; oxidierte Sulfiderze	Buntmetallsulfiderze, Zinkerze, Kohlen	Buntmetallsulfiderze, Zinkerze (v. a. VMS)
Gewinnung aus	Kupfer- und Nickelerze, Kupferflotations-Konzentrate, Whole ore leach	Bauxit-Rotschlämme, Sphaleritkonzentrate	Sphaleritkonzentrate, Kohleaschen	Anodenschlämme
Top-5 Produzenten 2012 [2], Anteil an der Weltproduktion in %	DRC (67,2), China (5,3), Kanada (5,2), Australien (4,6), Sambia (4,2)	China (53,0), Kazachstan (16,8), Ukraine (13,7), Japan (6,3), Russland (6,3)	China (75,7), Finnland (14,4), Russland (4,5), USA (2,7), Japan (1,8)	China (36), Japan (23), Kanada (16), Belgien (13), Russland (5)
Produkte (mit Marktanteil in %)	Superlegierungen (44), zementierte Karbide (9), Metall (21), Chemie (26)	GaAs, GaN; elektronische Komponenten; optoelektronische Bauteile (LEDs, Laserdioden, Solarzellen)	Polymerisationskatalysatoren für PET (35), Infraroptik (25), Glasfaseroptische Systeme (20), Elektronik/Solarzellen (12), Phosphorverbindungen, Chemotherapie	Beschichtungen wie ITO (70), elektronische Komponenten, Halbleiter (12), Lote und Legierungen (12)

3. HT-Metall Vorkommen in Österreich

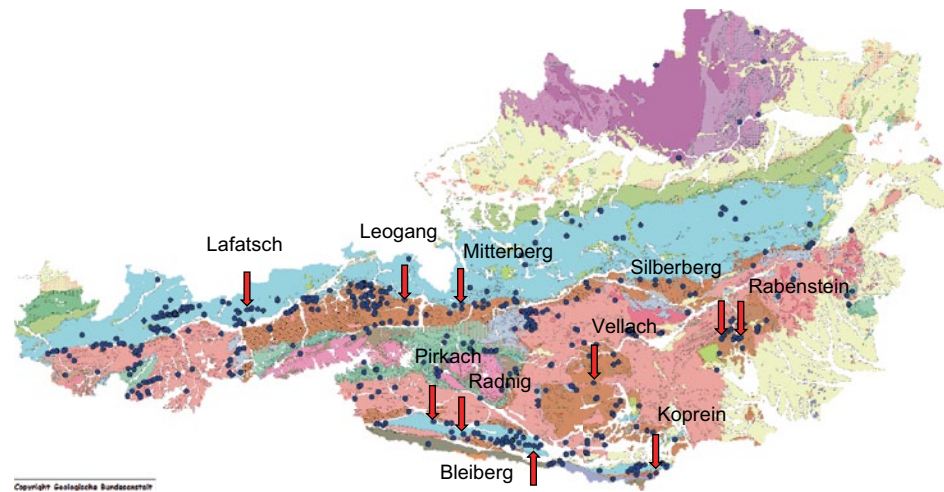
Die lagerstättengeologische Situation in Österreich ist für einige HT-Metalle durchaus günstig. So war Österreich in der jüngeren Vergangenheit ein bedeutender Bergbauproduzent von Antimon [8], von Germanium (aus Anodenschlämmen der Hütte Arnoldstein wurden in 34 Jahren 174 Tonnen Germanium gewonnen [9]) sowie in der weiter zurückliegenden Vergangenheit auch von Kobalt. Seit der Schließung der weitgehend ausgeerzten, an penninische Einheiten gebundenen Antimon-Lagerstätte in Schlaining (Burgenland) 1990 gilt das Vorkommen Rabant (Kärnten) im ostalpinen Kristallin als bedeutendste Antimonvererzung in Österreich [8]. Für Wolfram ist aufgrund des Vorkommens der Großlagerstätte im Felbertal mit dem Auftreten weiterer Erzkörper im Bereich der subpenninischen Einheiten des Tauernfensters, aber auch in ostalpinen Einheiten zu rechnen. Tantal, Beryllium und Zinn könnten als Nebenprodukte bei der Gewinnung von Lithium aus Pegmatiten und Apliten vom Typ der Weinebene im ostalpinen Kristallin gewonnen werden. Hier wurden in den letzten Jahren zahlreiche Ta-Nb, Be- und Sn-Minerale identifiziert [10, 11]. Verschiedene Spurenelemente können in bestimmten Kohlen und Kohleaschen angereichert sein [4]; einige Kohlen in den Nördlichen Kalkalpen weisen erhöhte Konzentrationen von Germanium auf [12].

Aus geologischen Gründen sind einige der im Weltmaßstab wichtigen Lagerstättentypen für die erwähnten HT-Metalle in Österreich bzw. im Ostalpenraum nicht zu

erwarten. Dies betrifft z. B. Karbonatite (SEE, Nb), geschichtete mafisch-ultramafische Intrusivkomplexe (PGE), permische Kupferschiefererze oder die an Schwarzschiefer gebundenen Cu-Co-Lagerstätten vom Typ „Katanga Copper Belt“, der derzeit die weltweit wichtigste Kobaltquelle darstellt. Aus paläogeographischen und paläoklimatischen Gründen ist das Potenzial für Gallium aus Bauxitlagerstätten in Österreich gering. Zwar wurde von 1951 bis 1964 in Unterlaussa Bauxit abgebaut (17.000 bis 26.000 Tonnen pro Jahr), doch sind die Vorkommen an der Basis der kalkalpinen Gosau kleinräumig und daher für eine zukünftige Gewinnung von Aluminium nach dem Bayer-Verfahren und nachfolgende Extraktion von Gallium aus den Rotschlämmen nicht geeignet [8]. Bedingt durch die jahrhundertelange Bergbau- und Hüttenstätigkeit im Ostalpenraum auf Kupfer, Gold, Zink, Blei, Eisen und andere Metalle kann grundsätzlich von einem erheblichen Reststoffpotenzial der Bergbau- und Schlackenhalde ausgegangen werden. Eine Quantifizierung dieser relativ leicht verfügbaren Stoffe muss Ziel der Forschung der nächsten Jahre sein.

Der Österreichische Rohstoffplan [8] hat Gebiete in Österreich identifiziert, die auf der Basis der verfügbaren Daten für die zukünftige Rohstoffgewinnung als sicherungswürdig einzustufen sind. Neun Vorkommen von Buntmetallsulfiden wurden als sicherungswürdig oder bedingt sicherungswürdig bewertet (Abb. 1). Die vorhandenen Daten lassen eine Gliederung der primären Sulfidlagerstätten für die kritischen Metalle Ga, Ge, In und Co in vier Gruppen erkennen:

Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete auf der geologischen Übersichtskarte von Österreich. Blaue Kreise markieren die im IRIS (Interaktives Rohstoffinformationssystem) der GBA katalogisierten Buntmetallvorkommen



3.1 Karbonatgebundene Blei-Zinklagerstätten

Mögliche kritische Elemente Germanium und Gallium, weitere Nebenelemente Cadmium und Thallium, sowie Flussspat als Gangart. Es handelt sich um schichtgebundene, niedrigtemperierte (<200°C), relativ kleine (meist <1 Million Tonnen Erz) Lagerstätten mit 3–10% Zn+Pb. Die karbonatgebundenen Blei-Zink-Mineralisationen der Trias in den ostalpinen Decken und im Südalpin treten in drei stratigraphischen Niveaus auf: Anis (z. B. Topla, Slowenien), Ladin (Lafatsch, Radnig, Bleiberg), und Karn (Bleiberg, Pirkach); (Abb. 1). Die 1993, nach über 700 Jahren Produktion, aufgelassene Großlagerstätte Bleiberg-Kreuth (>3 Millionen Tonnen Erz mit Zn/Pb=5–6) wird als Lagerstätte von Weltklasse angesehen und dient als Typuslagerstätte für den Alpen Typ, dem auch alle weiteren Vorkommen in den Ostalpen und Südalpen zuzuordnen sind. Die Zn-Pb-Erze sind mineralogisch monoton aus Galenit, Sphalerit und fallweise Wulfenit (Molybdänträger), Pyrit/Markasit, Flussspat, Schwerspat, Dolomit und Kalzit zusammengesetzt. Die Erze bildeten sich weitgehend epigenetisch vor etwa 200 Millionen Jahren unter Beteiligung von zwei Schwefelreservoirs, in denen bakteriogene und thermochemische Sulfatreduktion eine Rolle spielten [13]. Fast alle alpinotypen Pb-Zn-Lagerstätten zeichnen sich durch hohe Cd- (ca. 2000 ppm), Ge- (200–400 ppm) und Tl-Gehalte (ca. 100 ppm) im Sphalerit bei weitgehendem Fehlen von Cu, Co, Ni und Ag aus [9]. Die Pb/Zn Verhältnisse weisen eine extreme Variation von 2:1 bis 1:20 innerhalb einer Lagerstätte auf [14].

3.2 Sedimentgebundene, submarin-exhalative Blei-Zink-Lagerstätten („SEDEX-Typ“)

Mögliche kritische Elemente Germanium, Gallium, Indium, Kobalt, weitere Nebenelemente Cadmium, Tellur, Selen, sowie Schwerspat als Gangart. Solche Lagerstätten bestehen aus Massivsulfiden mit >50% Sulfid – meist Sphalerit, Pyrit, Pyrrhotin, Galenit, Chalkopyrit – und können Tonnagen von 20 bis >200 Millionen Tonnen Erz enthalten. Sie treten weltweit vor allem in früh- bis mit-

telproterozoischen (1700 bis 1400 Millionen Jahre) und unter- bis mittelpaläozoischen klastischen Sedimenten (500 bis 320 Millionen Jahre) auf. Aus der Typlagerstätte Rammelsberg (Harz) wurden von 968 bis 1988 etwa 7 Millionen Tonnen Metalle extrahiert. Das Erz enthielt 19% Zn, 9% Pb, 1–2% Cu, 160 ppm Ag, 20 ppm In, 3 ppm Ge, 150 ppm Co und 0.5–1 ppm Au [15]. Aus Zinkkonzentrationen der Großlagerstätte Red Dog (Alaska) wird Germanium extrahiert [4]; der Sphalerit enthält etwa 100 ppm Ge [16]. In den Ostalpen sind SEDEX-Lagerstätten unter anderem aus dem Grazer Paläozoikum (Silberberg, Rabenstein) und der Gurktaler Decke (Vellach-Metnitz) bekannt (Abb. 1). Die Lagerstätten des „Blei-Zink-Erzbezirks Grazer Paläozoikum“ bildeten sich im Unter-Devon im Bereich der Rannach- und Hochlantschfazies und einem damit einhergehenden submarinen basischen Vulkanismus in Becken dritter Ordnung unter euxinischen Bedingungen [17]. In den Jahren zwischen 1973 und 1978 begann die BBU mit geologischen, geochemischen und geophysikalischen Untersuchungen im gesamten Grazer Bergland und identifizierte die explorationswürdigen Bereiche Haufenreith, Peggau-Taschen und Großstübing-Guggenbach.

3.3 Vulkanitgebundene Massivsulfid-Lagerstätten (Kupfer, Zink; „VMS-Typ“)

Mögliche kritische Elemente Indium, Germanium, Kobalt, weitere Nebenelemente Tellur, Gold, Wismut. Die stratiformen Mineralisationen bilden sich syngenetisch aus Exhalationen von heißen (>300°C) metallführenden Fluiden am Meeresboden im Gefolge von basischem oder bimodalem Vulkanismus. Bekanntestes aktuo-geologisches Beispiel sind die „Schwarzen Raucher“ („black smokers“), die lokal bedeutende Sulfiderzakkumulationen entlang mittelozeanischer Spreizungszonen darstellen. Während die weltweit größten Lagerstätten einen Lagerstätteninhalt von über 100 Millionen Tonnen aufweisen (z. B. Kidd Creek, Kanada), enthalten gewöhnliche Lagerstätten zwischen 0.1 und 10 Millionen Tonnen Erz mit Cu+Zn+Pb<10%. Als Nebenelemente sind Silber, Gold und Indium zu nennen: so wurde ein bedeutender Anteil der Primärproduktion

von Indium aus der Großlagerstätte Kidd Creek gewonnen. Aus den Ostalpen sind diesem Typus eine Vielzahl von Kupfer- und „Kiesvererzungen“ in den penninischen und ostalpinen Deckeneinheiten zuzurechnen. Als Beispiele sind Vorkommen in der subpenninischen Habachserie, der penninischen Bündnerschieferserie, im Ennstaler Quarzphyllit und in der Grauwackenzone zu nennen. Das bedingt sicherungswürdige Zn-Cu-Pb Vorkommen von Koprein (Paläozoikum der Karawanken), in welchem erhöhte Konzentrationen an Indium beschrieben wurden [9], könnte diesem Typ angehören.

3.4 Ganglagerstätten unterschiedlicher Genese und Alters

Mögliche kritische Elemente Kobalt, Indium, Germanium, Gallium, weitere Nebenelemente Nickel, Silber, Gold, Uran, Wismut, Tellur, Antimon. Während die meisten Buntmetallvererzungen in den Ost- und Südalpen einem der drei vorgenannten „stratiformen“ Typen zugeordnet werden können, wurden in der Vergangenheit auch Rohstoffe aus Gangerzlagerstätten abgebaut, die im Zuge der kretazischen und paläogenen alpidischen Orogeneseereignisse entstanden sind [18]. Am Beispiel des Mitterberger Hauptganges (Salzburg) wurde demonstriert, dass ursprünglich schichtgebundene Metallanreicherungen durch spätere Prozesse remobilisiert werden können (z. B. [12]). Solche Prozesse treffen wahrscheinlich auch für einige der Fahlerz-dominierten Lagerstätten in paläozoischen Karbonaten zu, z. B. im polymetallischen Cu-Ni-Co-Hg-Ag-Bezirk Leogang. Während die Pb-Zn-Vererzungen von Meiselding in der Gurktaler Decke als deformierte und metamorph überprägte SEDEX-Lagerstätte klassifiziert werden können, sind die Pb-Zn-Erze von Vellach-Metnitz gangförmig an NW-SE-verlaufende tektonische Strukturen gebunden [12]. In anderen Erzdistrikten wurden Vertreter der sogenannten „5-Elemente-Gänge“ mit Bi-Co-Ni-Ag-U (\pm As \pm Sb) identifiziert (z. B. Zinkwand-Vötkern/Schladming), einem genetisch noch nicht vollständig verstandenen Lagerstättentyp, der historisch bedeutende Tonnagen von HT-Metallen geliefert hat.

4. Fazit

Prospektions- und Explorationsarbeiten auf Buntmetallvorkommen wurden seit einigen Jahrzehnten in Europa vernachlässigt. Durch die montangeologische, mineralogische und mineralchemische Untersuchung der stillgelegten Vorkommen in Österreich und anderen EU-Ländern können Potenziale für einige HT-Metalle wie Ge, Ga, In und Co identifiziert werden, die möglicherweise in Einzelfällen auch von wirtschaftlichem Interesse sein können.

Literatur

- EU: Report on critical raw materials for the EU, European Commission, Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, May 2014, 41 pp, <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report>
- Reichl, C.; Schatz, M.; Zsak, G.: World Mining Data 2014, Volume 29, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Wien, 2014, www.bmwfw.gv.at
- Melcher, F.; Wilken, H.: Wie kritisch ist die Versorgungslage? Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen, *Chemie in unserer Zeit*, 47 (2013), S. 32–49
- Gunn, F. (ed.): *Critical Metals Handbook*, 1st ed., Chichester: Wiley, 2014
- Cook, N.J.; Ciobanu, C.L.; Pring, A.; Skinner, W.; Shimizu, M.; Danyushevsky, L.; Saini-Eidukat, B.; Melcher, F.: Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (2009), pp 4761–4791
- Dill, H.G.; Garrido, M.M.; Melcher, F.; Gomez, M.C.; Weber, B.; Luna, L.I.; Bahr, A.: Sulfidic and non-sulfidic indium mineralization of the epithermal Au-Cu-Zn-Pb-Ag deposit San Roque (Provincia Rio Negro, SE Argentina) – with special reference to the “indium window” in zinc sulfide, *Ore Geology Reviews* 51 (2013), pp 103–128
- Cook, N.J.; Ciobanu, C.L.; Danyushevsky, L.; Gilbert, S.: Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (2011), pp 6473–6496
- Weber L. (Hrsg.): Der Österreichische Rohstoffplan, *Archiv für Lagerstättenforschung Geologische Bundesanstalt*, 26 (2012), S. 1–263
- Cerny, I.; Schroll, E.: Heimische Vorräte an Spezialmetallen (Ga, In, Tl, Ge, Se, Te und Cd) in Blei-Zink- und anderen Erzen, *Archiv für Lagerstättenforschung Geologische Bundesanstalt*, 18 (1995), S. 5–33
- Mali, H.: Die Spodumenpegmatite von Bretstein und Pusterwald (Wölzer Tauern, Steiermark, Österreich), *Joannea Mineralogie*, 2 (2004), S. 5–53
- Melcher, F.; Göd, R.; Konzett, J.; Mali, H.: Niobium-tantalum-tin-bearing minerals in pegmatites of the Eastern Alps: case studies, *Journal of Alpine Geology*, 52 (2010), pp. 178–179
- Weber, L. (Hrsg.): *Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs*, Archiv für Lagerstättenforschung Geologische Bundesanstalt, 19 (1997), S. 1–607
- Henjes-Kunst, E.: *The Pb-Zn Deposits in the Drau Range (Eastern Alps, Austria/Slovenia): A Multi-analytical Research Approach for Investigation of the Ore-Forming Mechanisms*, Diss., Leoben, Montanuniv., Lehrstuhl für Rohstoffmineralogie, 2014
- Cerny, I.: Die karbonatgebundenen Blei-Zink-Lagerstätten des alpinen und außeralpinen Mesozoikums. Die Bedeutung ihrer Geologie, Stratigraphie und Faziesgebundenheit für Prospektion und Bewertung, *Archiv für Lagerstättenforschung Geologische Bundesanstalt*, 11 (1989), S. 5–125
- Kraume, E.: Die Erzlager des Rammelsberges bei Goslar, Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, 18 (1955), 394 S.
- Kelley, K.D.; Leach, D.L.; Johnson, C.A.; Clark, J.L.; Fayek, M.; Slack, J.F.; Anderson, V.M.; Ayuso, R.A.; Ridley, W.I.: Textural, compositional, and sulfur isotope variations of sulfide minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska: implications for ore formation, *Economic Geology*, 99 (2004), pp 1509–1532
- Weber, L.: Die Blei-Zinklagerstätten des Grazer Paläozoikums und ihr geologischer Rahmen, *Archiv für Lagerstättenforschung Geologische Bundesanstalt*, 12 (1990), S. 1–289
- Pohl, W.; Belocky, R.: Metamorphism and metallogeny in the Eastern Alps, *Mineralium Deposita* 34 (1999), pp. 614–629
- Moss, R.L.; Tzimas, E.; Willis, P.; Arendorf, J.; Thompson, P.; Chapman, A.; Morley, N.; Sims, E.; Bryson, R.; Pearson, J.; Espinoza, L.T.; Marscheider-Weidemann, F.; Soulier, M.; Lüllmann, A.; Sartorius, C.; Ostertag, K.: Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector, JRC Scientific and Policy Reports, Report EUR 25994 EN, European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, 2013, doi: 10.2790/46338