



Was ist in den letzten 25 Jahren an Weiterentwicklung in der Exploration im Ausland geschehen, während in Deutschland nichts geschah?

Bernd Lehmann

Kurzfassung: Gegenwärtig werden neue Lagerstätten immer noch zumeist nur bis in 100 m (greenfield: unbekanntes Gelände) bis 300 m (brownfield: nahe bereits bekannter Lagerstätte) Überdeckung gefunden. Die Lagerstätten-Exploration wird künftig vor allem in bereits regional gut explorierten Ländern in größere Tiefen zielen. Verfeinerte und kostengünstige Messmethoden in Geochemie (Multielement-Analytik) und Geophysik (speziell elektromagnetische Verfahren mit hoher Eindringtiefe) erlauben zunehmend größere Informationsdichte. Allerdings bleibt der entscheidende Test weiterhin die Bohrung. Hier wird kostengünstiges Präzisions-Bohren die Exploration in den nächsten Jahren revolutionieren. Gute geologische Geländearbeit und kritisches Verständnis der Lagerstättenbildung bleiben aber entscheidend für die erfolgreiche Suche von mineralischen Rohstoffen.

1 Einleitung

Im September 1990 kamen die zwei wichtigsten deutschen Rohstoffkonzerne als Aufsteiger in den damals erst zwei Jahre alten DAX: Preussag AG und Metallgesellschaft AG. Beide Unternehmen überlebten die lange Flaute in den Rohstoffpreisen nicht (Abb. 1). Die Preussag AG verwandelte sich in ein Dienstleistungsunternehmen und wurde schließlich in 2002 zur TUI. Die Metallgesellschaft AG scheiterte an gewagten Öl-Termingeschäften und wurde 1993 weitgehend zerschlagen. Damit war auch die seit den 1960er Jahren zunächst zögerlich und dann in den 1970er und 1980er Jahren sehr erfolgreich betriebene Auslands-Exploration auf Metalle weitgehend beendet. Insbesondere die Explorations-Aktivitäten der Metallgesellschaft AG wirken heute noch in diversen aktuellen Bergbauprojekten nach, die inzwischen von großen internationalen Konzernen realisiert werden. Der historisch sehr gute Ansatz der Metallgesellschaft, von einem weltweiten Netzwerk von Metall-Konzentrat-Einkäufern aus vertikal zu diversifizieren, ist perfekt von Glencore Xstrata (Umsatz 2014: 220 Mrd USD; Hauptsitz in Bern, Schweiz, bzw. Jersey) auf dem Weg zum größten Rohstoff-Konzern der Welt weiter entwickelt worden.

2 Internationale Explorations-trends

Deutsche Firmen spielen heute im internationalen Bergbau auf metallische Rohstoffe keine Rolle, obwohl rund 5 % der Weltbergbauproduktion bei der deutschen Industrie in der Weiterverarbeitung landen. Im nationalen Maßstab hat Exploration bis auf kleine Ausnahmen seit der Schließung der letzten bedeutenden Metallgruben (Rammelsberg, Bad Grund, Meggen) vor 20-25 Jahren nicht stattgefunden. Angesichts der Größe von Deutschland (~0,24% der Landoberfläche der Erde) kann allerdings auch nicht mit im heutigen Maßstab wirtschaftlich relevanten Ressourcen auf breiter Ebene gerechnet werden. Trotzdem besteht Potential in einzelnen Bereichen mit unterschiedlichem Erkundungsgrad, wie etwa in dem schon länger bekannten Kupfer-Vorkommen Spremberg in der Lausitz. Hierbei geht es um Ressourcen von rund 1,5 Mt Cu, entsprechend einem wirtschaftlichen Wert von rund 9 Milliarden USD. Ein ähnliches aber größeres Vorkommen wird 100 km östlich in Polen von KGHM mit wirtschaftlichem Erfolg abgebaut, müsste also auch in Deutschland funktionieren. Kleinere Vorkommen von Zinn und Lithium sind ebenfalls schon des längeren aus dem

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Bernd Lehmann

Lagerstätten und Rohstoffe, Technische Universität Clausthal,

Adolph-Roemer-Straße 2a,

38678 Clausthal-Zellerfeld;

bernd.lehmann@tu-clausthal.de

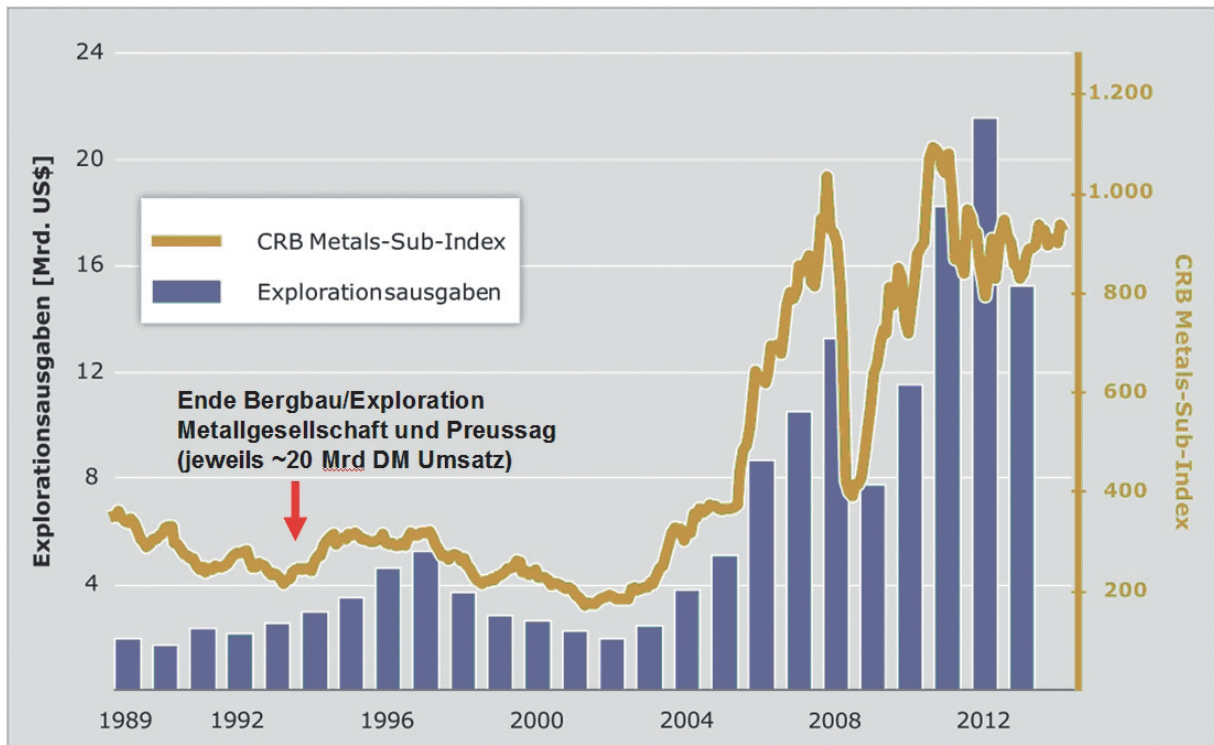


Abb. 1. Entwicklung der globalen Explorationsausgaben und des CRB-Metall-Preisindex (Eisen und Buntmetalle) (BGR 2014). In 1993 beenden Metallgesellschaft und Preussag nach langer Metall-Preisflaute aus verschiedenen Gründen ihr Bergbau-/Explorationsgeschäft. Das Diagramm macht den fundamentalen Zusammenhang zwischen Rohstoffpreisen und Explorationsausgaben deutlich: Exploration wird in einer Marktwirtschaft aus den Gewinnen der Bergbauindustrie bezahlt. Die Gewinne sind naturgemäß von den Metallpreisen abhängig. Somit hängen die Explorationsbudgets sehr stark vom jeweiligen Rohstoffpreis ab.

Erzgebirge bekannt und könnten bei deutlich höheren Rohstoffpreisen durchaus wirtschaftlich werden. Alle diese Vorkommen wurden zu Zeiten der DDR gründlich exploriert, d.h. im Kalaschnikow-Stil abgebohrt. Im westlichen Deutschland wurden ebenfalls im Bereich der Lagerstätten Meggen/Sauerland (Pb-Zn) und Rammelsberg/Goslar (Cu-Pb-Zn) nach Fortsetzungen der Mineralisation gesucht, allerdings mit wesentlich geringerem Bohreinsatz und ohne Erfolg. Moderne Exploration mittels indirekter geophysikalischer Untersuchungen mit großer Eindringtiefe könnte hier erfolgreich sein. Allerdings nur, wenn auch der lange finanzielle Atem gegeben ist, um größere Bohrkampagnen durchzuführen. Bohren ist und bleibt die einzige Methode, eine Lagerstätte nachzuweisen. Entsprechend spielt die Weiterentwicklung der Bohrtechnik eine große Rolle für künftige Exploration. Präzisionsbohren mit "coiled tubing" könnte den Preis pro Bohrmeter gegenüber dem heutigen Bohren mit klassischem Bohrgestänge halbieren und das Explorationsgeschäft revolutionieren. Dem parallel muss eine bessere Nutzung der Bohrkern-Information gehen, d.h. nicht nur die übliche visuelle Ansprache, sondern digitales Logging auf mineralogisches, chemisches und strukturelles Inventar. Hierzu gibt es bereits diverse tragbare Geräte, aber es bleibt im Lernpro-

zess von Techniken aus der Erdölindustrie noch viel Entwicklungs-Spielraum. Ebenfalls entscheidend ist die kostengünstige Aufbereitbarkeit von Erzen, also die Trennung von Wertkomponenten von sterilem Material. Hierbei sind schnelle Methoden der Geometallurgie (speziell quantitative Mineralogie und Partikelanalyse mittels Mineral Liberation Analysis per Elektronenmikroskopie) und neue Aufbereitungstechniken wichtig.

Explorationsbudgets hängen in der Marktwirtschaft sehr stark vom jeweiligen Rohstoffpreis ab (Abb. 1). Nachdem im vergangenen Jahr die Rohstoffpreise im Durchschnitt gesunken sind, und gegenwärtig auch weiter sinken, sind die globalen Explorationsausgaben stark zurückgegangen. In 2014 wurden weltweit rund 15 Milliarden USD für Exploration in der Privatwirtschaft auf mineralische Rohstoffe ausgegeben (gegenüber 30 Milliarden USD in 2012). Drei Viertel dieser Summe gingen in die klassischen Metalle Gold, Kupfer, Nickel, Blei, Zink, sowie Eisenerz und Kohle, wobei zum größten Teil in der Umgebung bereits bestehender Bergbaue gesucht wurde ("brownfields"-Exploration). Wirklich neue Targets in bisher unbekanntem Lagerstättenbezirken ("greenfields"-Exploration) sind die Ausnahme. Diese Tatsache folgt dem seit der Antike bekannten Prinzip, auch bei Pilzsuchern bekannt: "Wo einmal eine Lagerstät-

te gefunden wurde, ist wahrscheinlich eine weitere nicht weit davon entfernt" (Plinius der Ältere, Naturalis Historia, 77 n.Chr.). Oder übersetzt in US-amerikanisch: "If you wish to hunt elephants, go to elephant country". Der Grund für diese Regel liegt darin begründet, dass Lagerstätten Ausdruck großräumiger Prozesse sind und entsprechend häufig zu mehreren in Lagerstätten-Provinzen auftreten. Aus diesem Grund konzentriert sich ein großer Teil der Welt-Explorationsausgaben je nach Lagerstättentyp bzw. dessen geotektonischem Milieu auf relativ kleine Bereiche. Dabei ist besonders der relativ schmale aktive Kontinentalrand von Südamerika mit den Andenländern Chile, Peru, Kolumbien von großem Lagerstättenpotential und entsprechendem Explorationsinteresse, weshalb hier 20-25 % aller weltweiten Explorationsausgaben und Bergbau-Investitionen insgesamt liegen.

Auch in Europa spielt sich Lagerstätten-Exploration im Wesentlichen in bereits länger bekannten Bergbaubezirken ab (Kupfer vom Massivsulfid-Typ in Süd-Spanien/Süd-Portugal; Kupfer-Gold vom Porphyry-Typ in Serbien; Pb-Zn vom Mississippi Valley-Typ in Irland; Cu vom Kupferschiefer-Typ in Polen). Ausnahme ist hier Finnland, wo ein breites Spektrum von Rohstoffen exploriert wird (mit Schwerpunkt orogenes Gold) und in den vergangenen Jahren zahlreiche neue Bergbaubetriebe entstanden sind. Finnland ist nicht nur in Bezug auf Bildungswesen und BIP pro Einwohner Spitze, sondern auch in der Bergbau-Attraktivität (nach regelmäßigen weltweiten Umfragen bei führenden Bergbaumanagern; geologisch bis politisch, gewichtet) noch vor Nevada, USA, oder West-Australi-

en (JACKSON & GREEN 2015). Deutschland taucht in internationalen Explorations-Statistiken nicht auf, da hier so gut wie keine ernsthafte Metall-Exploration stattfindet. Die Vergabe der Erkundungs-Konzession Spremberg in 2007 an eine bolivianische Kleinbergbaufirma und gegen die potenten Mitbieter Anglo American and KGHM hat für größere Firmen sicherlich nicht zur Attraktivität des Standorts Deutschland beigetragen.

Seit bereits 30 Jahren ist Gold im Zentrum der Metall-Exploration (heute mit 30 % aller globalen Explorationsausgaben). Dies ist insofern interessant, als Gold nur zum geringen Teil industriell gebraucht bzw. verwendet wird, nämlich nur etwa 10 % der Bergbauproduktion. Mehr als die Hälfte der Welt-Bergbauproduktion von Gold wandert in Form von Schmuck und Goldbarren nach China und Indien, von Tradition und tief verwurzelten Gefühlen gesteuert, die allerdings auch im Rest der Welt in etwas geringerem Maße bestehen. Der volkswirtschaftliche Nutzen des Goldbergbaus ist insofern nicht rational zu begründen, und muss nicht unbedingt stattfinden, insbesondere, da die Goldgewinnung immer mit Einsatz von Cyanid verbunden ist. Speziell dieser Aspekt, zum Teil ebenfalls irrational übertrieben, hat bisher modernen Goldbergbau in Tschechien und Rumänien verhindert.

Exploration erfasst erst langsam auch Lagerstätten unter größerer Überdeckung. Dieser Trend wird sich vor allem in den bereits gut explorierten Ländern verstärken. Für den Zeitraum 2005-2013 ergeben sich mittlere Teufenlagen von neu entdeckten Gold-Lagerstätten in Kanada von 101 m, in USA

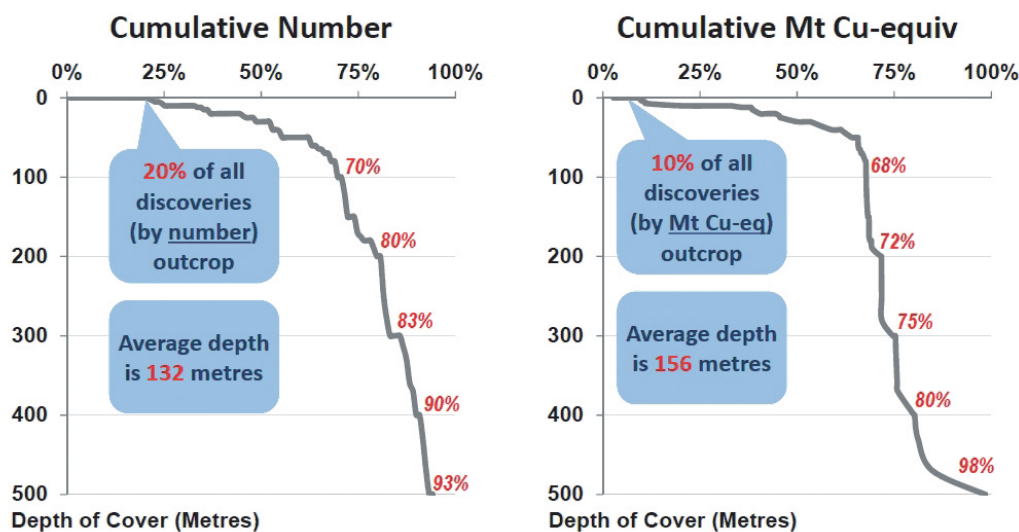


Abb. 2. Überdeckung von Buntmetall- (Cu, Pb, Zn, Ni) Lagerstätten mit >0,1 Mt Kupfer-Inhalt (Cu-Äquivalent), die im Zeitraum 2005-2013 gefunden wurden; sowohl brownfield- wie greenfield-Exploration (119 Lagerstätten, ohne Ni-Laterit-Lagerstätten). SCHODDE (2014), Daten von MinEx Consulting.

von 82 m, in Australien von 71 m, und in Lateinamerika von 30 m. In der Türkei oder im unterexplorierten Afrika werden dagegen immer noch die meisten Gold-Lagerstätten unmittelbar an der Oberfläche oder sehr nahe dazu gefunden (durchschnittliche Teufe der Gold-Lagerstätten-Entdeckungen in Afrika 2005-2013: 10 m; Ausnahme: Gold in Südafrika; SCHODDE 2013). Gold-Lagerstätten wurden im Wesentlichen durch geochemische Verfahren aufgrund von primärer oder sekundärer Dispersion eingegrenzt.

Für massive Sulfidlagerstätten (Cu-Pb-Zn) ergeben sich insgesamt größere Teufenlagen, da derartige Lagerstätten einfacher mit geophysikalischen Methoden nachgewiesen werden können (massive gut leitende Körper mit hoher Dichte). Entsprechend dem Technologie-Fortschritt gelten hier für Neu-Entdeckungen 2005-2013 mittlere Teufen in Kanada von 148 m, in USA von 381 m, in Australien von 144 m, und in Lateinamerika von 85 m. Der Mittelwert für Afrika liegt bei 25 m (SCHODDE 2014). Entsprechend den zunehmenden Explorationstiefen muss auch tiefer gebohrt werden; also steigt der Kostenaufwand für Bohrprogramme und für Exploration insgesamt.

3 Explorationsmethoden

Entgegen einer weit verbreiteten Vorstellung werden Lagerstätten nicht von Satelliten aus dem Weltall gefunden. Multispektrales "remote sensing" und Radar-Interferometrie erlauben die Erstellung kostengünstiger topographischer Karten mit erster geologischer Information für Gegenden mit wenig Vegetation, in denen keine Detailkarten zur Verfügung stehen. Die geologische Arbeit findet aber weiterhin im Gelände statt (zu Fuß, Pferd, Jeep, Hubschrauber, oder sonstigen Transportmitteln), eventuell unter Zuhilfenahme von Satellitenbildern. Beobachtung im km- bis cm-Bereich (und dann weiter im mm- bis sub- μ m-Bereich im Labor) ist notwendig, um Gesteinseinheiten an der Oberfläche richtig anzusprechen und daraus eine dreidimensionale Vorstellung vom Aufbau des Geländes zu gewinnen. Im Idealfall sollte dann mit ergänzenden Daten (bereits bekannt oder erst im Labor zu gewinnen) noch die zeitliche Entwicklung des Geländes rekonstruiert werden. Erst nach möglichst guter Kenntnis des geologischen Rahmens kann dann an zielgerichtete Lagerstätten-Exploration gedacht werden. Hierbei sind es drei Techniken, die eine wesentliche Rolle spielen:

- (1) Geologische Modellvorstellungen, die erlauben, den Geländebefund mit einem möglichen metallogenetischen Modell bzw. mit vergleichbaren Objekten abzugleichen;
- (2) Geochemische Multielement-Daten von Boden, Gestein, Bachsedimenten, und eventu-

ell Wasser, die anomale Elementanreicherungen anzeigen, die typisch sind für bestimmte Lagerstätten;

- (3) Geophysikalische Daten, die bestimmte physikalische Parameter im Untergrund (speziell Dichte, Magnetisierung und Leitfähigkeit) widerspiegeln. Alle drei Bereiche haben in den letzten 25 Jahren große Fortschritte gemacht und spielen je nach Lagerstättentyp und Maßstab (regional bis lokal) eine unterschiedliche Rolle.

Kostengünstige geochemische Multielementanalytik ist für relativ oberflächennahe Lagerstätten bzw. deren primäre und sekundäre Dispersionshöfe die wichtigste Prospektionsmethode. Mit zunehmender Tiefe sind geophysikalische Messmethoden, speziell elektromagnetische Verfahren, zunehmend wichtig, soweit der gesuchte Lagerstättentyp durch anomale elektrische, magnetische, gravimetrische oder seismische (d.h. Geschwindigkeitsunterschiede) Eigenschaften gekennzeichnet ist. Hier sind vor allem massive (und möglichst große) Erzkörper mit Magnetit oder Sulfiden günstig, wobei inzwischen Eindringtiefen bis 1000 m in Erprobung sind. Die Datenfülle aus den drei Bereichen wird zunehmend mittels GIS und sonstigen Computermodellen aufbereitet, wobei aber immer der kritische menschliche Verstand (mit Papier und Bleistift) sowohl Input wie Ergebnisse übersehen muss.

Es sind nicht grundlegend neue Entdeckungen, die in den letzten 25 Jahren die Exploration bestimmen. Vielmehr haben sich graduell zunehmend bessere geologische Modelle, kostengünstige geochemische Analytik und empfindlichere geophysikalische Techniken entwickelt. Die wirkliche Revolution im Denkansatz zum Verständnis von Lagerstättenbildung und der Entwicklung der Erde insgesamt fand in den 1970er Jahren mit dem fundamentalen Modell der Plattentektonik statt. Hier entstanden die Grundlagen der heute gültigen Lagerstättenmodelle. Seitdem haben technische Entwicklungen dazu geführt, dass zunehmend genauere und mehr chemische oder physikalische Parameter zur indirekten Lagerstättensuche zur Verfügung stehen. Diese Innovationen kamen im Wesentlichen von außerhalb der Geowissenschaften, wie etwa das GPS im Gelände, Multielement-Analytik im chemischen Labor, oder Elektronik für geophysikalische Verfahren. Allerdings ist der direkte Nachweis nach wie vor durch Bohrungen zu führen. Es wird manchmal angenommen, dass geophysikalische Untersuchungen Bohrungen ersetzen könnten. Dies ist nicht ganz richtig. Vielmehr erlaubt die Definition von geophysikalischen Anomalien eine erste Zielführung von Bohrpunkten. Im Verlauf einer Bohrkampagne sind es im Wesentlichen die Ergebnisse der Bohrungen bzw. Erzproben im Kontext der geo-

logischen Interpretation, die den weiteren Explorationsverlauf bestimmen. Wie erfahrene US-amerikanische Explorateurs zu sagen pflegen: "IQ gets you there, but NQ finds it!" (NQ ist ein Standardmaß für Bohr-Durchmesser) (siehe auch MUESSIG 2014). Diese Devise entspricht dem inhärent konservativen Charakter der Metall-Bergbauindustrie, die insofern der besonders innovativen Erdölindustrie etwas nachhängt, und dadurch aus dem Erdölbereich auch immer wieder wichtige Impulse erhält (Bohrtechnik, Messverfahren, Computer-Modellierung). Grundsätzlich gilt aber bei der Exploration von Rohstoffen, dass dies ein langwieriger Prozess sein kann, der ein besonderes Maß an Ausdauer verlangt. Erfahrungsgemäß muss bis zum Erfolg mit Jahren zäher Geländearbeit gerechnet werden, inklusive einer Reihe von zunächst ergebnislosen Bohrungen. Ein besonders bekanntes Beispiel ist die überraschende Entdeckung von Diamant-Vorkommen im Nordwesten von Kanada (heute 10 % der Welt-Diamant-Reserven) in den frühen 1990er Jahren durch ein kleines aber besonders hartnäckiges Explorations-Team um den Geologen Charlie Fipke, nachdem diverse große Bergbauunternehmen (inklusive DeBeers) nach vieljährigen Explorationskampagnen schon aufgegeben hatten.

Der Zusammenhang zwischen Ressourcen und Bohrmetern auf überlegtem geologischen Hintergrund lässt sich u.a. am Beispiel Neves Corvo, Portugal, zeigen (O'BRIEN & WEST 2013) (Abb. 3). Diese Lagerstätte mit insgesamt 60 Mt @ 5 % Cu, also 3 Mt Cu bei sehr hohem Metallgehalt, wurde 1977 entdeckt. Voraus gegangen waren gravimetrische

Untersuchungen, die mehrere deutliche Anomalien zeigten. Die stärkste Anomalie wurde auf eine Tiefe von 80 m berechnet und in 1973 bis auf 244 m Tiefe abgebohrt. Ohne Ergebnis. Dem folgte gründliche Geländearbeit, die ein geologisches Modell erlaubte. In 1977 wurde am gleichen Bohrpunkt 100 m tiefer gebohrt und zwischen 350 und 400 m Tiefe wurde die high-grade Massivsulfid-Lagerstätte angetroffen. Der Rest war fleißiges Bohren, bis 1988 der Bergbau begann. Die Exploration wurde auf ein Minimum reduziert, bis 20 Jahre später die Reserven fast abgebaut waren. Dann wurde mit neuem Eigentümer trotz Finanzkrise ein ausführliches Explorationsprogramm aufgelegt, das alle Möglichkeiten der Geophysik (Seismik, Gravimetrie, Elektromagnetik verschiedener Spielarten von im Bohrloch bis airborne) einschloss. Die Bohrmeter wurden von 20.000 m/Jahr auf 100.000 m/Jahr gesteigert, wobei Präzisions-Bohrtechnik eingesetzt wurde. Im Ergebnis wurde die Lebensdauer von Neves Corvo um zunächst rund 20 Jahre verlängert, was einem volkswirtschaftlichen Wert von einigen Milliarden USD entspricht.

In diesem Sinne werden wahrscheinlich auch in Deutschland noch kleinere Ressourcen identifiziert werden. Für die deutsche vom Export bestimmte Wirtschaft spielen mögliche inländische Metall-Ressourcen keine wesentliche Rolle. Vielmehr wäre hier die Versorgungs-Sicherheit nur durch Rückwärts-Integration in ausländische Bergbauaktivität bzw. verlässliche und langfristige Lieferverträge herzustellen.

In Bezug auf Weiterentwicklung von Messtech-

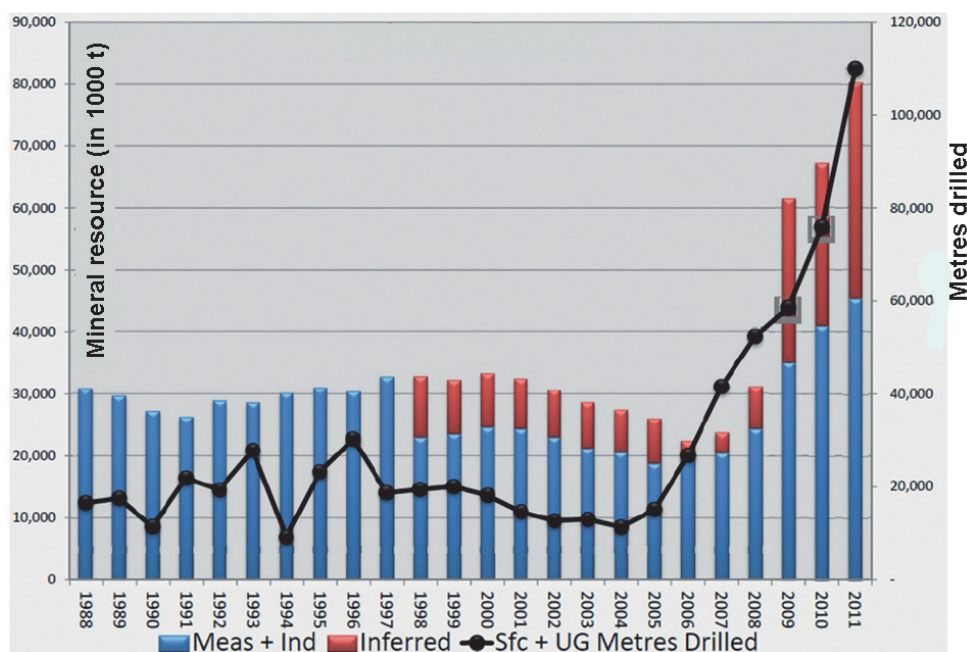


Abb. 3. Entwicklung der Erzressourcen (in den verschiedenen Kategorien nach Aussagewahrscheinlichkeit: measured, indicated, inferred) in der Cu-Zn-Lagerstätte Neves Corvo, Portugal, als Funktion der jährlichen Explorations-Bohrmeter, sowohl von der Oberfläche aus (Sfc) wie Untertage (UG) (aus O'BRIEN & WEST 2013).

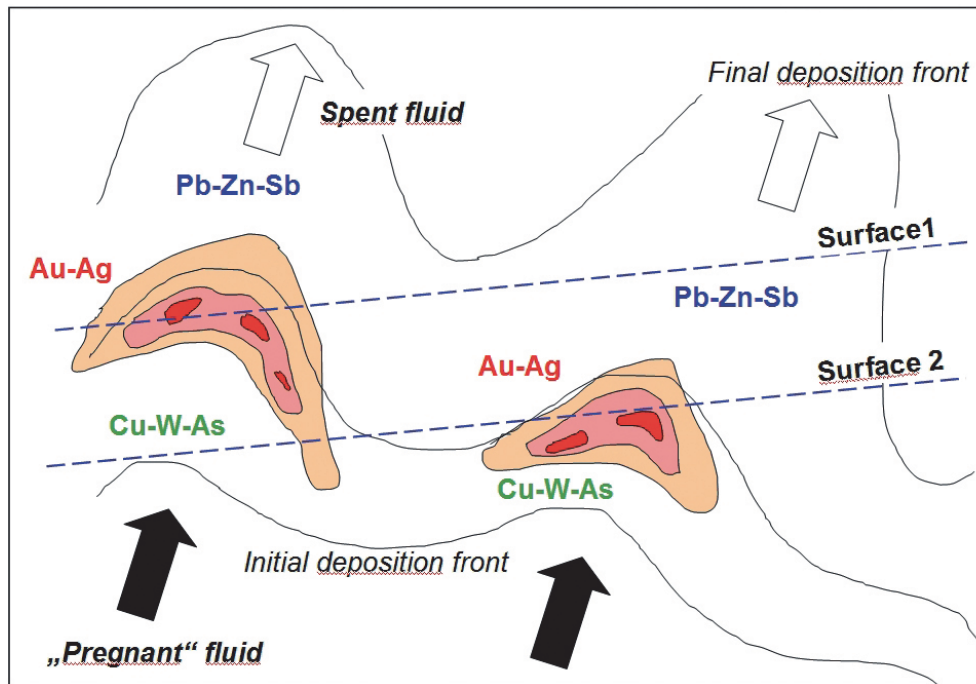


Abb. 4. Modell (Longitudinalschnitt) eines hydrothermalen Gangsystems im km-Maßstab. Die Lagerstätte ist Teil eines viel größeren verschlungenen zonierten Erzbandes, dessen Geometrie von der Paläo-Permeabilität kontrolliert ist. Metall-Verhältnisse als Ausdruck der chemischen Entwicklung des Fluidsystems definieren die Nähe zur Lagerstätte, speziell deren relative Lage zum Beobachtungspunkt (über oder unter aktueller Land-Oberfläche bzw. Bohrpunkt). Das Metallspektrum im Beispiel bezieht sich auf magmatisch-hydrothermale Lagerstättensysteme und muss je nach geotektonischem Milieu modifiziert werden. LEHMANN (Vorlesungsunterlagen) in Anlehnung an PETERSEN (1990).

nik besteht in Deutschland ein exzellentes Reservoir an Know-how, wie auch im Maschinenbau für moderne Bergbautechnik. Jedoch brauchen R+D bzw. angewandte Forschung die enge Zusammenarbeit mit den Anwendern, also Bergbau- und Explorations-Firmen. Im nationalen Rahmen fehlt diese Komponente weitgehend und muss auf dem globalen Markt gesucht werden. Der praktische Fokus ist entscheidend, damit Lagerstättenforschung in Deutschland nicht (wie schon weitgehend geschehen) ein Teil der im wesentlichen akademischen bzw. Grundlagen-orientierten Petrologie wird.

Geologische Lagerstätten-Modelle sind in den letzten 25 Jahren vorwiegend aus praktischen Explorations-Erfahrungen in Südamerika, Australien und Ostasien erwachsen. Speziell das Cu-Au Lagerstättenspektrum von porphyry bis epithermal ist heute gut verstanden (z.B. HEDENQUIST et al. 2000; SILLITOE 2010). Für polymetallische Ganglagerstätten entwickelte sich aus der Silber-Blei-Zink-Exploration in Peru ein Explorations-erprobtes Zonierungsmodell (PETERSEN 1990), das prinzipiell auch für die zahlreichen deutschen Gangvorkommen gelten sollte (Abb. 4).

4 Schlussbemerkung

Bereits 1972 wurde öffentlichkeitswirksam durch den Bericht des "Club of Rome" auf die Endlichkeit der natürlichen Ressourcen hingewiesen (MEADOWS et al. 1972). Allerdings erwiesen sich die damaligen Hochrechnungen in Bezug auf baldige Rohstoff-Knappheit als falsch. Im Höhepunkt des letzten Rohstoff-Booms bzw. der Höhenentwicklung der Rohstoff-Preise (2002-2008) wurde das Thema vom bevorstehenden Rohstoff-Ende oder zumindest Engpass wieder aufgenommen, und mit dem inzwischen gewachsenen politischen Apparat auf nationaler und EU-Ebene in Rückkopplung verstärkt. Auch diese Vorstellungen haben sich in den letzten Jahren mit fallenden Rohstoffpreisen teilweise wieder verflüchtigt. Interessanterweise starten gerade jetzt mit 5-10-jähriger Vorlaufzeit (!) diverse nationale und EU-gesteuerte Rohstoff-Forschungsprojekte. Es wird sich zeigen, ob daraus ein längerfristiges Konzept entstehen kann. Ein großes Problem der Explorationsindustrie ist die fehlende Kontinuität aufgrund der zunehmend kurzfristigen Engagements von Investoren. Der Grund für diesen Trend ist die viel zu geringe Langzeit-Gewinnmarge in der Bergbau-Industrie verbunden mit der zunehmend langen Entwicklungszeit von Entdeckung bis Kommerzialisierung einer Lagerstätte (rund 10 Jahre). Die IT-Industrie hat dagegen

Entwicklungszeiten von eventuell nur Monaten, extrem hohe Produktivität und entsprechend wesentlich höhere Renditen, die dann wiederum ganz andere Innovationsraten erlauben (BARTOS 2008). Der relativ niedrige Rohstoffpreis ist hier der kritische Parameter.

Der globale Rohstoff-Markt ist erstaunlich stabil, obwohl bzw. gerade weil staatliche Planung (oder gar überstaatliche Planung) hier keine Rolle spielt. In Bezug auf Kupfer wird diese Situation in Abb. 5 deutlich. Trotz des enormen Anstiegs in der Kupfer-Bergbauproduktion ist zwischen 1950 (2,5 Mt Cu) und 2013 (18,3 Mt Cu) die Relation von verfügbaren Reserven zu jährlicher Kupfer-Bergbauproduktion (statische Reichweite) relativ konstant bei rund 40 Jahren geblieben. Dieses dynamische Gleichgewicht gilt mit anderen Zeitfenstern auch für andere Rohstoffe, z.B. Blei und Zink mit 20-25 Jahren oder Chromit mit >100 Jahren (SCHOLZ & WELLMER 2013). Die statische Reichweite ist schlichtweg von der Explorations-Intensität (Explorationsaufwand pro Metallmenge) des jeweiligen geologischen Lagerstättentyps kontrolliert (McLAUGHLIN 1939), die wiederum als Funktion des Preises variiert. Die vielfältige Rückkopplung im Gleichgewicht von Rohstoffangebot und Preis wurde von WELLMER & DALHEIMER (2012) als "Feedback control cycle" sehr gut beschrieben.

Vor Erreichen der Grenze der Verfügbarkeit von metallischen Rohstoffen sind vermutlich ganz andere Grenzen erreicht, nämlich die Tragfähigkeit der Biosphäre unseres Planeten angesichts eines exponentiellen Bevölkerungswachstums (BARNOWSKI et al. 2012). Dieses Grundproblem war bereits bei MEADOWS et al. (1972) erkannt und ist zurzeit durch

den Neben-Schauplatz "Klima-Katastrophe" etwas in den Hintergrund gedrängt.

5 Literatur

- BARNOWSKI, A.D. et al. (2012): Approaching a state shift in Earth's biosphere.– *Nature*, **486**: 52-58.
- BARTOS, P.J. (2008) How does the mining industry rate? A look at innovation and productivity advance.– *SEG Newsletter*, **78**: 1, 8-12.
- BGR (2014): Deutschland - Rohstoffsituation 2013.– 157 S.; Hannover.
- HEDENQUIST J.W., ARRIBAS, A. & GONZALEZ-URIEN, E. (2000): Exploration for epithermal gold deposits.– *Reviews in Economic Geology*, **13**: 245-277.
- JACKSON, T. & GREEN, K.P. (2015): Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies, 2014. Fraser Institute <<http://fraserinstitute.org>>
- McLAUGHLIN, D.H. (1939): Geological factors in the valuation of mines.– *Economic Geology*, **34**: 589-621.
- MEADOWS, D.H., MEADOWS, D.L., RANDERS, J. & BEHRENS III, W.W. (1972): The limits to growth: A report to the Club of Rome on the predicament of mankind.– 205 p.; (Universe Books.).

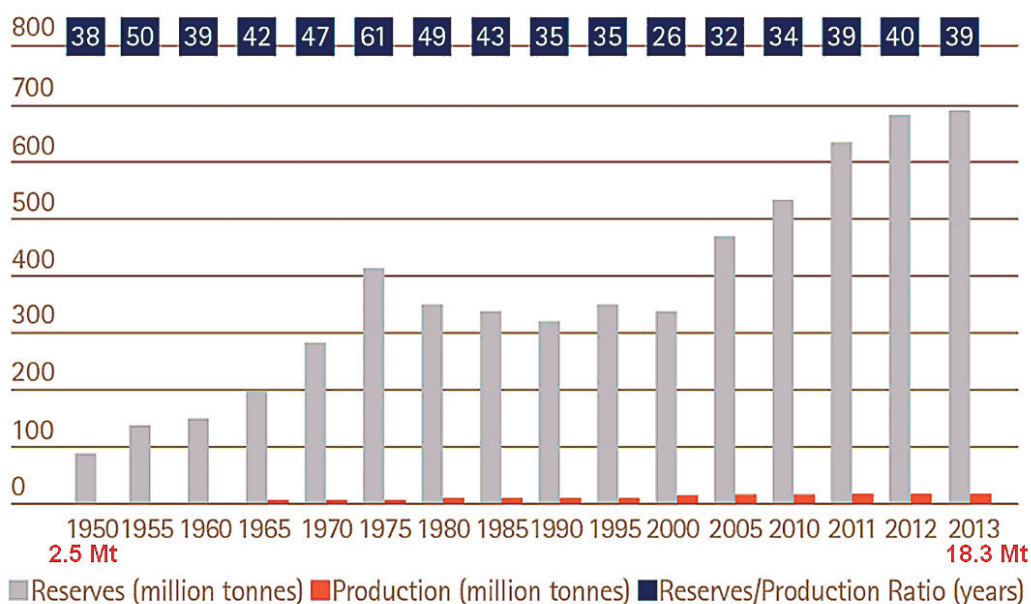


Abb. 5. Historische Kupfer-Bergbauproduktion versus Kupfer-Reserven. Die Bergbauproduktion in 1950 war 2,5 Mt und in 2013 18,3 Mt. Das Verhältnis von verfügbaren Reserven zu jährlicher Kupfer-Bergbauproduktion (sogenannte „statische Reichweite“) über diesen Zeitraum ist mit 40 ±8 Jahren relativ konstant (USGS 2014).

- MUESSIG, S. (2014): The ore finders.– SEG Newsletter, **97**: 17-19.
- O'BRIEN, N. & WEST, D. (2013): Key elements for mineral exploration success: an example from Neves Corvo, Portugal.– Presentation at Toronto Geological Discussion Group, Toronto, 30 April 2013. <<http://ludinmining.org>>
- PETERSEN, U. (1990): Presidential address: Ore distribution, zoning, and exploration of hydrothermal ore deposits.– Economic Geology, **85**: 424-435.
- SCHOLZ R.W. & WELLMER, F.-W. (2013): Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus?– Global Environmental Change, **23**: 11-27.
- WELLMER, F.-W. & DALHEIMER, M. (2012): The feedback control cycle as regulator of past and future mineral supply.– Mineralium Deposita, **47**: 713-729.
- SCHODDE, R. (2014): The global shift to undercover exploration - How fast, how effective?– Presentation at Society of Economic Geologists (SEG) Conference, Keystone, Colorado, 30 September 2014.
- SILLITOE, R.H. (2010): Porphyry copper systems.– Economic Geology, **105**: 2-41.
- USGS (2014) Copper statistics.– <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/ds140-coppe.pdf>>