

# Alternative Metallgewinnung

BIOMore – ein neues Bergbaukonzept zur Gewinnung von Metallen aus tiefliegenden Lagerstätten mittels Biolaugung

*In-situ*-Minerallaugung  
in Tiefen über 1000 Metern ( $\approx 50^\circ\text{C}$ )

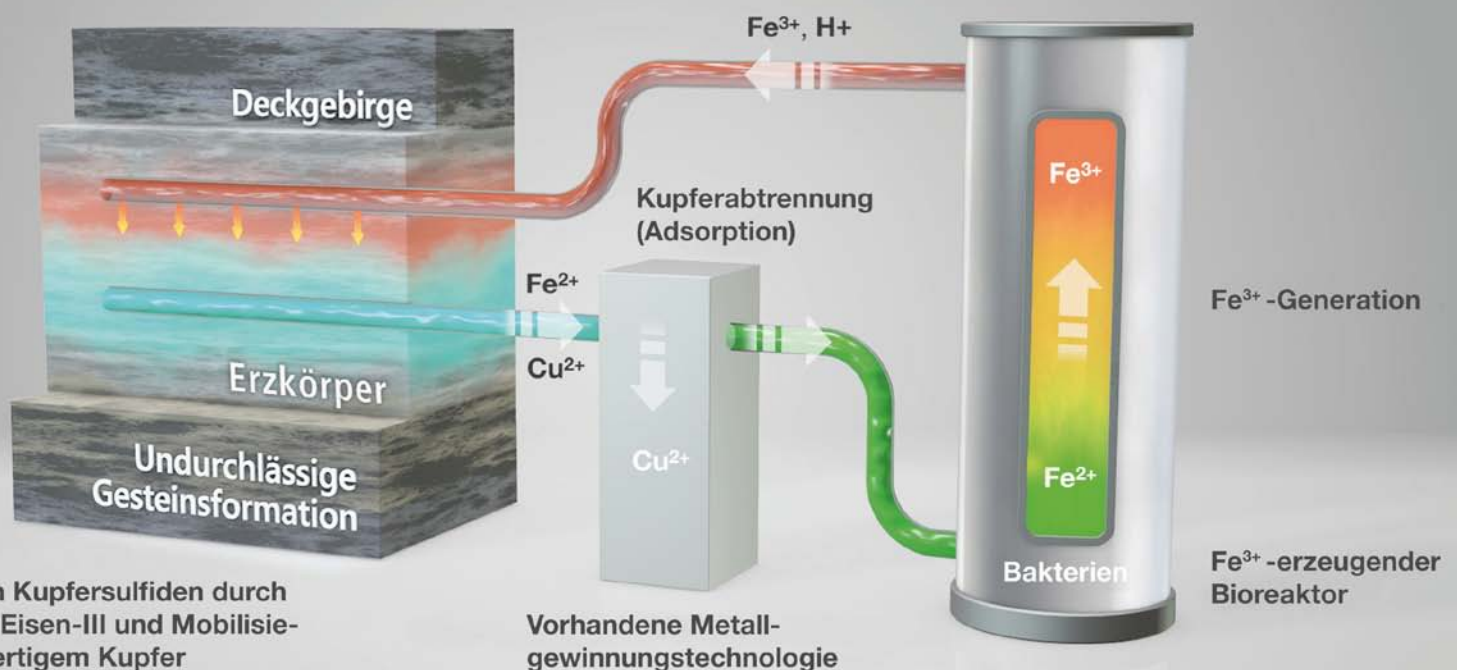


Bild 1: Schematische Darstellung einer indirekten In-situ-Biolaugung eines Kupfersulfiderzes (Bild: DMT GmbH & Co. KG/Deutschland).

**Europa und die europäischen Industrien sind stark abhängig vom Import von Metallen und anderen mineralischen Rohstoffen. Die Europäische Kommission unterstützt daher Entwicklungen, die den Abbau dieser Rohstoffe aus europäischen Lagerstätten stärken. Das Ziel des BIOMore-Projekts besteht darin, ein Gewinnungsverfahren zu entwickeln, das geringere soziale und Umweltauswirkungen aufweist und mit geringeren Betriebskosten verbunden ist als konventioneller Bergbau.**

Das Schlüsselkonzept von BIOMore besteht in der gekoppelten Anwendung von Stimulationsmaßnahmen zur Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit und In-situ-Laugungs- und Biolaugungstechnologien. Kupfererz ist für die Durchführung einer Machbarkeitsstudie und die Demonstration im Reaktormaßstab für diese Technologie ausgewählt worden.

## Laugungstechnologien

Das Lösen von Metallen aus Mineralien mit Hilfe einer Laugungsflüssigkeit (Laugung) kann an der Tagesoberfläche oder unterir-

disch als In-situ-Laugung (ISL) durchgeführt werden. Damit eine Lagerstätte als geeignet für die ISL erachtet wird, muss das Erz für den Laugungsprozess geeignet (ausreichende Löslichkeit der Metallverbindungen in der Laugungsflüssigkeit), mit natürlicher Porosität und Permeabilität ausgestattet oder zugänglich für druckinduzierte Stimulation und idealerweise umgeben von undurchlässigen geologischen Schichten sein. Zusätzlich zu diesen wichtigsten hydrogeologischen Kriterien müssen mehrere weitere Lagerstättenbedingungen hinsichtlich Erzmorphologie, Erzgehalt (Größe, Verteilung), Mineralogie (allgemeine Textur, primäres metallhaltiges Mineral, störende Mineralien oder andere Bestandteile), Lage in Bezug auf den Grundwasserpegel, die Grundwasserchemie und die originäre Mikrobiologie erfüllt werden.

Die Hauptvorteile der ISL sind: (1) keine unterirdische Infrastruktur, (2) keine Gewinnung und Verarbeitung von Erz und Anfall großer Mengen an Taubgestein, (3) keine Rückstände aus der Erzverarbeitung, (4) lediglich kleinvolumige hydrometallurgische Verarbeitungsschritte. Dies alles führt zu erheblichen Kostenersparungen.

Biolaugung und Bio-Oxidation werden derzeit verwendet, um eine Reihe von wertvollen Grundmetallen wie Gold, Kupfer, Zink und Nickel aus sulfidischen Mineralien zu extrahieren. Hierzu dienen mikrobielle Konsortien, wie z. B. eisenoxidierende Spezies wie *Acidithiobacillus* und *Leptospirillum*. Bei der Biooxidation

werden die Zielmetalle mittels Oxidation der sulfidischen Wirtsmaterialien der chemischen Extraktion zugänglich gemacht. Sowohl die Biolaugung als auch die Biooxidation finden in einem sauren Medium ( $\text{pH} < 2$ ) statt.

Viele Parameter können die Effizienz dieser Methoden beeinträchtigen, wie z. B. Mineralogie, Sauerstoffkonzentration, pH-Wert und Temperatur. Die mikrobiell beschleunigte Lösung von Sulfidmineralien kann durch Bakterien bewirkt werden, die an der Materialoberfläche haften (in Biofilmen; Kontakt-Laugung) oder mittels planktonischen (freischwimmenden) Bakterien (Nicht-Kontakt-Laugung). In beiden Fällen katalysiert dreiwertiges Eisen die Mineraloxidation, und daher muss dies ständig durch eisenoxidierende Acidophile aus dem zweiwertigen Eisen wiedergewonnen werden. Ein Elektronenakzeptor (z. B.  $\text{O}_2$ ) wird daher in situ benötigt oder muss in einer kontrollierten Weise bereitgestellt werden, zum Beispiel in einem belüfteten Bioreaktor zur Erzeugung von dreiwertigem Eisen (Ferric Iron Generating Bioreactor, FIGB).

Jedoch erfordert das BIOMore-Konzept, dass die metallhaltigen Mineralien in der Tiefe (1 - 1,5 km unter der Oberfläche) innerhalb der Lithosphäre oxidiert werden. Dort ist die Sauerstoffkonzentration eingeschränkt, und hohe Drücke verlangsamen vorhersehbar die mikrobielle Aktivität. Dies bedeutet, dass die indirekte Nicht-Kontakt-Laugung der Hauptprozess zum Lösen der Metalle ist. Dafür wird die mikrobielle Regeneration zum dreier-

tigen Eisen in einem Bioreaktor katalysiert, der sich an der Oberfläche, also räumlich getrennt vom unterirdischen chemischen Angriff des dreiwertigen Eisens auf Sulfidmineralien, befindet (Bild 1). Dieser Prozess wird als „tiefe In-situ-Bielaugung“ (DISB – deep in-situ bio-leaching) bezeichnet.

Zusätzlich zu den mit der technologischen Entwicklung eines effizienten und innovativen DISB-Prozesses verbundenen Herausforderungen beschäftigen sich die Akteure von BIOMore mit diesen weiteren Herausforderungen: Sicherheits- und Umweltaspekte, öffentliche Akzeptanz und wirtschaftliche Machbarkeit.

## Erste Ergebnisse und Absichten

Im Zentrum des BIOMore-Projekts stehen die Entwicklung des BIOMore-Prozesses im Labormaßstab und nachfolgend die untertägige Demonstration des Prozesses an einem Testerblick. Die Tests werden an einem  $100 \text{ m}^3$ -Kupfererzblock in der Kupfermine von Rudna (Polen) durchgeführt, die von KGHM Polska Miedź SA betrieben wird. Der Testblock befindet sich in einer Kupferschiefer-Formation. Dieser Standort wurde auf Grundlage geologischer, hydrogeologischer und gesetzlicher Aspekte ausgewählt. Weitreichende theoretische Untersuchungen und Modellbetrachtungen, um das Verständnis der BIOMore-Technologie (Frackverfahren und Biolaugung) sowie der geologischen, hydrogeologischen

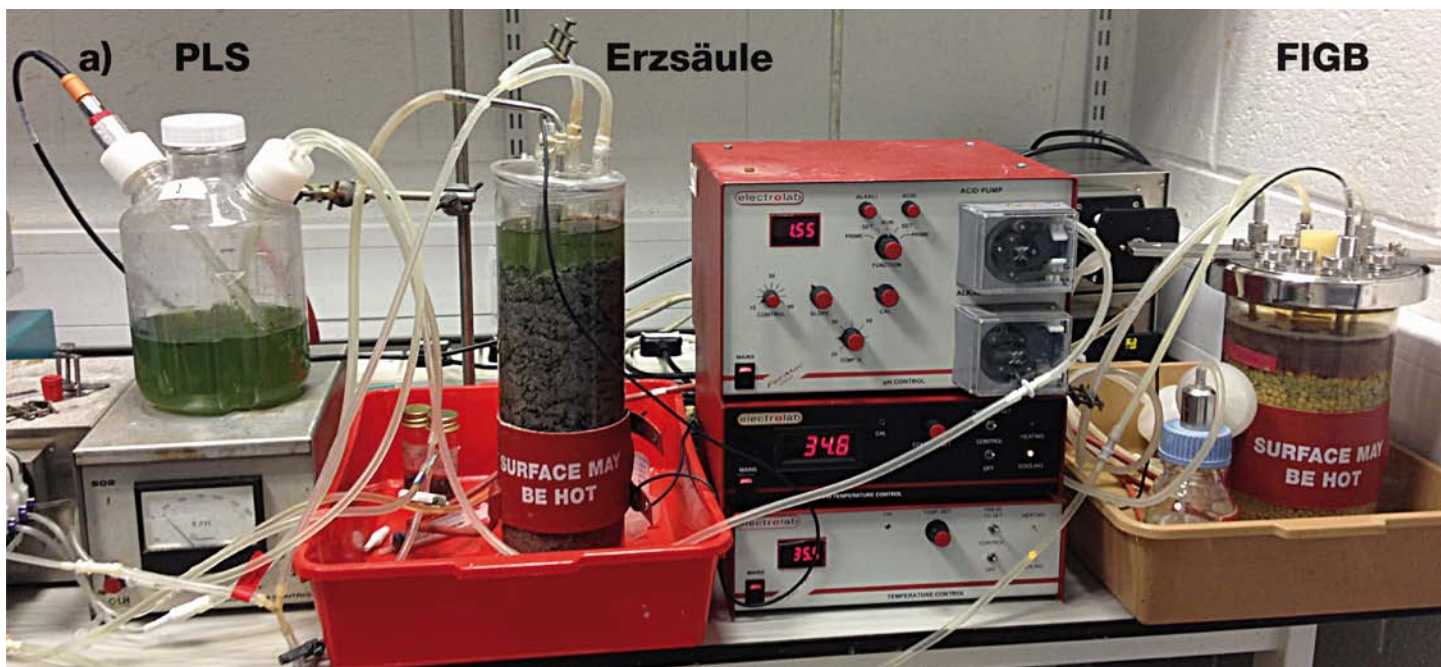


Bild 2: Anordnung eines Säulenlaugungstests (Bild: Bangor University, UK).



und wirtschaftlichen Belange zu unterstützen und zu entwickeln, werden im Rahmen des Projekts durchgeführt.

## Machbarkeit am Testort

Kupferschiefer ist eine sedimentäre Formation, die reich ist an Mineralressourcen. Man findet diese Formation in großen Teilen Nordeuropas, einschließlich des BIOMore-Teststandorts. Die im Testgebiet vorhandene Sandsteinschicht ist ein potenzieller Anwendungsfall für die BIOMore-Technologie, während die Kupferschieferformation, die hauptsächlich aus Schwarzschiefer besteht, vor allem als undurchlässige Schicht dienen wird.

Um die Machbarkeit der In-situ-Laugung am Teststandort zu bestimmen, wurden die geologischen, hydrogeologischen, mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften des Standorts analysiert. Diese Untersuchungen führten zu einem geologischen 3D-Modell, welches die Entwicklung eines hydrogeologischen 3D-Modells ermöglicht. Dieses war notwendig, um die Fluidströmungen im vorgesehenen Abbaubereich vor Beginn der Arbeiten verstehen zu können.

Zur Bestimmung der petrophysikalischen und mineralogischen Eigenschaften des Ge-

steins am vorgesehenen Standort wurden Gesteinsproben entnommen und untersucht. Zur quantitativen und qualitativen Charakterisierung wurde die optische Mikroskopie, die Röntgenbeugung, Infrarotspektroskopie und Röntgen-Fluoreszenz-Spektroskopie verwendet. Die kupferhaltigen Mineralien, die hauptsächlich als Sulfide identifiziert wurden, sind Covellin ( $\text{CuS}$ ), Chalkosin ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Bornit ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), Chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ) mit schwach kupferhaltigem Hydroxychlorid-Atacamit ( $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ ) (Marion et al., 2015).

Weiter wurden Carbonatminerale, Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) und Dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) in der Erzformation identifiziert. Diese können potenziell problematisch sein, da sie unter sauren Bedingungen reagieren und zur Neutralisie-

rung der für die DISB erforderlichen Säure führen. Wasserlösliches Salz (Halit;  $\text{NaCl}$ ) ist ebenfalls in signifikanten Mengen vorhanden und kann eine negative Auswirkung auf die Biolaugungs-Bakterien haben. Der Plan für die Tests in der Rudna-Mine, der im Labor entwickelt und getestet wurde, umfasste somit vier Stufen:

1. Waschen des Erzblocks mit Wasser zum Entfernen des Halits;
2. Säurelaugung zum Lösen von Carbonaten (wobei ebenfalls etwas Kupfer aus den säurelabilen Sulfidmineralien ausgelaugt wird);
3. Auslaugen mit dreiwertigem Eisen zum quantitativen Oxidieren von Sulfidmineralien und Lösen des meisten im Erz vorhandenen Kupfers;

## Förderprojekt BIOMore

BIOMore ist ein von der Europäischen Kommission (EC) gefördertes Projekt, das im Rahmen des Horizon-2020-Programms im Rahmenthema „Bergbau für kleine und komplexe Lagerstätten und alternativer Bergbau“ läuft. Dieses Dreieinhalb-Jahre-Projekt, das im Februar 2015 begann, umfasst 23 Partner aus neun verschiedenen Ländern (Deutschland, Polen, Österreich, Großbritannien, Finnland, Frankreich, Schweden, Spanien und Südafrika) und schließt fünf Universitäten ein.



Bild 3: Installation für In-situ-Tests in Rudna (Bild: Zeton B.V., The Netherlands).

# Zu gut, um sie auszuziehen

Nitrilhandschuhe  
von Carl Roth



## Unser Erfolgstipp fürs Labor!

Jetzt online bestellen  
und am Gewinnspiel  
teilnehmen unter  
[www.rothnitril.de](http://www.rothnitril.de)

Besuchen Sie uns!

**ACHEMA 2018**

→ Halle 4.1 / F 13

### Hautfreundliche Nitrilhandschuhe

Das Beste für Ihre Hände:

- extra weich mit höchstem Tragekomfort
- besonders gutes Tastempfinden
- frei von latextypischen Allergenen

Ihr Partner für Laborbedarf, Life Science und Chemikalien. | [www.carlroth.de](http://www.carlroth.de)





4. Neutralisierungsschritt zum Erhöhen des pH-Werts auf neutrale Bedingungen und zum Eliminieren der restlichen Bakterienaktivität.

Ferner wurden die petrochemischen Eigenschaften der Sandsteinschicht analysiert, zum Beispiel mit Röntgen-Tomographiemethoden, um die effektiven Diffusionsparameter, die wesentlich für die Modellierung des Laugungsprozesses sind, zu bestimmen.

## Tests im Labormaßstab, In-situ-Tests und Modellierung

Tests im Labormaßstab dienen zur Charakterisierung der Wirkung von Parametervariationen, wie zum Beispiel Druck und Temperatur auf die Mikroorganismen und/oder die Kinetik der Kupfergewinnung. Weitere Experimente wurden durchgeführt, um Empfehlungen geben zu können, wie die Entfernung der Bakterien aus dem untertägigen Erzkörper nach Ende der Laugungsphase sichergestellt werden kann. Die Testreihen werden komplettiert durch Tests im In-situ-Pilotmaßstab in der Rudna-Mine (Bilder 2 und 3). Alle Testergebnisse werden für eine gesicherte Prognose der Effizienz der Technologie im Großmaßstab auf Grundlage der aktuellen geochemischen und geomechanischen Modelle benutzt.

Zur Optimierung der Methodologie für die In-situ-Permeabilitätsverbesserung wurden die Spannungsfelder im Untersuchungsbereich und die Bruchausbreitung modelliert. Dies geschah in Anlehnung an die mechanischen und hydraulischen Untersuchungen von Gesteinsproben. Parallel dazu wurde ein geeignetes hydrometallurgisches Flussdiagramm entwickelt für die Gewinnung des Kupfers aus der angereicherten Laugenlösung unter Entfernen von toxischen Elementen (Cd, Cr, Hg, ...) und der Rückgewinnung von Eisen.

Die Testergebnisse sind Grundlage für die Entwicklung numerischer Modelle, die den Laugungsprozess in situ in der Lagerstätte in 3D simulieren. Dieser Modellierungsschritt, d. h. die Simulation der Verhältnisse im großtechnischen Maßstab, ist erforderlich, um eine wirtschaftliche Bewertung der Investitions- und Betriebskosten eines derartigen Betriebes abschätzen und bewerten zu können. Die Simulation gestattet zum Beispiel die Bewertung des Chemikalienverbrauchs und die Vorhersage der Metallgewinnung als Funktion der Zeit und der Betriebsbedingungen. BIOMore hat eine flexible Modellierungs-Toolbox auf Grundlage von Experimenten im Labor- und Reaktormaßstab entwickelt, die eine Vorhersage für den

Großmaßstab ermöglicht. Die Modelle können an andere Lagerstätten angepasst werden.

Vorläufige Daten ergaben sich im Jahr 2016 aus Säulenlaugungstests im Labor an kupferhaltigem Zechstein-Sandstein aus der Rudna-Mine. Dazu waren geochemische Ansätze modelliert und mit geomechanischen Modellen kombiniert worden. Das verwendete Systemmodell erlaubt es, Simulationen der Labor- und Reaktortests auf den industriellen Maßstab zu übertragen.

## Kompatible Lagerstätten in Europa

Das Potenzial des BIOMore-Prozesses wird durch Identifizieren anderer potenzieller in situ biolaugbarer Lagerstätten in Europa bewertet. Das erste Screening identifiziert bevorzugt europäische Vorkommen, die kritische Rohstoffe enthalten. Das Screening muss die mineralogischen und morphologischen Eigenschaften jeder Lagerstätte berücksichtigen, um seine Eignung für eine unterirdische In-situ-Bielaugung zu bestimmen. Diese Parameter sind zugänglich über die europäische ProMine-Datenbank, die für diese Analyse verwendet wird.

## Schlussfolgerungen

Die im Rahmen des BIOMore-Projekts untersuchte innovative Technologie hat das Potenzial als alternative und umweltfreundliche Art der Metallgewinnung in kommenden Jahrzehnten eingesetzt zu werden. Die unterirdische In-situ-Bielaugung könnte die Kosten für die Gewinnung von Metallen reduzieren und die Umweltauswirkungen der Förderaktivitäten verringern. Dies geschieht durch die Vermeidung größerer (unterirdischer) Infrastrukturen und die prozessbedingte, signifikante Reduzierung großer Abfallmengen. Durch die Spezifika des BIOMore-Prozesses erhöht sich die Zahl der abbauwürdigen Lagerstätten, weil der BIOMore-Prozess prinzipiell viele Lagerstätten ausbeuten kann, die mit konventionellen Bergbaumethoden nicht ausbeutbar wären. Der Paradigmenwandel für die Bereitstellung wesentlicher Metallrohstoffe in der Zukunft wird eine soziale Akzeptanz in Europa, aber auch an anderen Orten der Welt erfordern.

## Förderung

Diese Arbeit wurde von dem Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen

Union Horizon 2020 im Rahmen der Finanzierungshilfvereinbarung Nr. 642456 gefördert.

## Referenzen

- Jébrak M et Marcoux E, 2008. *Géologie des ressources minérales*. Association Géologique du Canada, 667p.
- Johnson DB (2014). *Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials*. *Current Opinion in Biotechnology* 30: 24-31.
- Johnson DB (2015). *Biomining goes underground*. *Nature Geoscience* 8:165-166
- Marion P, Joussemet R, Royer JJ, Jdid E A, Diot F und Filippov L (2015) *Mineralogical investigations on some samples of Rudna Mine, Poland*. *Projet Biomore, rapport 2 non publié*, 37.
- Pakostova E, Grail BM und Johnson DB (2016). *Indirect oxidative bioleaching of a polymetallic black schist sulfide ore*. *Minerals Engineering* 106:102-107.
- Seredkin M, Zabolotsky A und Jeffress G (2016) *In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: Exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics*. *Ore Geology Reviews* 79:500-514.
- Tributsch H (2001). *Direct versus indirect bioleaching*. *Hydrometallurgie* 59:177-185.

BIOMore: Forschung für künftigen Bergbau  
Gefördert vom Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der EU  
info@biomore.info  
www.biomore.info  
twitter.com/BIOMore\_EU

## AUTOREN

**Prof. Lev Filippov**

(lev.filippov@univ-lorraine.fr)

**Prof. Dr. Horst Hejny**

(hejny@hejny-consulting.de)

**Knut Ansgar Hirsch**

(knut.hirsch@dmt-group.com)

**Caroline Izart**

(caroline.izart@univ-lorraine.fr)

**Prof. Barrie Johnson**

(d.b.johnson@bangor.ac.uk)

**Dr. René Kahnt**

(r.kahnt@geosfreiberg.de)

**Dr. Horst Märten**

(h.marten@uit-gmbh.de)

**Wickus Slabbert**

(Wickus.Slabbert@Hatch.com)