

Lev Filippov, Caroline Izart, Horst Hejny, Knut Ansgar Hirsch, Barrie Johnson, René Kahnt, Horst Märten, Wickus Slabbert

The BIOMore Project – A New Mining Concept for Extracting Metals from Deep Ore Deposits Using Biotechnology

BIOMore is an EU funded project within the Horizon 2020 funding scheme that addresses the topic “Mining of small and complex deposits and alternative mining”. This three year project, started in February 2015, comprises 23 partners located in nine different countries with five universities being included. Germany, Poland, Austria, United Kingdom, Finland, France, Sweden, Spain and South Africa are involved.

The EU is highly dependent on the import of mineral and metallic raw materials and therefore supports developments that

strengthen European mining of these commodities. The aim of the BIOMore project is to develop a novel base metal mining technology that has lower environmental and social impacts and operates at a lower cost than conventional mining techniques.

BIOMore’s key concept is the coupled use of in situ leaching and bioleaching technologies applied to deep deposits. Kupferschiefer, a copper ore mined at three sites in Poland by the company KGHM, which is Europe’s largest producer of copper, has been selected to carry out a feasibility test of the technology.

Das BIOMore-Projekt – Ein neues Bergbaukonzept für die Förderung von Metallen aus tiefen Erzlagerstätten unter Ausnutzung von Biotechnologie

BIOMore ist ein von der EU im Rahmen des Horizon 2020-Programms gefördertes Projekt, das dem Rahmenthema „Bergbau für kleine und komplexe Lagerstätten und alternativer Bergbau“ zuzuordnen ist. Dieses Dreijahresprojekt, das im Februar 2015 begann, umfasst 23 Partner aus neun verschiedenen Ländern und schließt fünf Universitäten ein. Deutschland, Polen, Österreich, Großbritannien, Finnland, Frankreich, Schweden, Spanien und Südafrika sind daran beteiligt.

Die EU ist stark abhängig vom Import von Mineralien und metallischen Rohstoffen und unterstützt daher Entwicklungen, die den Abbau dieser Rohstoffe aus europäischen Lagerstätten stärken. Das Ziel des BIOMore-Projekts besteht darin, eine neue Abbau-

technologie zu entwickeln, die geringere soziale und Umweltauswirkungen aufweist und mit niedrigeren 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, die auf tiefliegende Lagerstätten angewendet werden. Kupfererz, das an drei Standorten in Polen von dem Unternehmen KGHM, Europas größtem Kupferproduzenten, abgebaut wird, ist für die Durchführung einer Machbarkeitsstudie und die Demonstration im Reaktormaßstab für diese Technologie ausgewählt worden.

1 Leaching technologies

Leaching involves the application of a leaching solution to solubilize metals from minerals. This can be carried out on the land surface, e.g. in heap leaching or tank leaching, or underground via in situ leaching (ISL).

ISL is widely used for uranium production. In 2012, 45% of uranium produced globally was extracted with ISL, mainly in Kazakhstan, Australia and USA (1). Some other commodities are also mined with this method, such as gold in Russia, lithium and halite (NaCl) salterns. Pilot tests for ISL of porphyry copper deposits have also been conducted in the USA (2).

1 Laugungs-Technologien

Unter Laugung ist die Anwendung einer Laugungsflüssigkeit zum Lösen von Metallen aus Mineralien zu verstehen. Dies kann an der Tagesoberfläche, z.B. bei der Haldenlaugung oder Tanklaugung, durchgeführt werden oder unterirdisch als In-situ-Laugung (ISL).

Die ISL wird häufig für die Urangewinnung verwendet. Im Jahr 2012 wurden 45% des weltweit abgebauten Urans mittels ISL gewonnen, hauptsächlich in Kasachstan, Australien und den USA (1). Einige andere Rohstoffe werden ebenfalls mittels dieser Methode abgebaut, z.B. Gold in Russland, aber auch Lithium und

In ISL, the leaching solution is injected into an underground ore body via injection wells. The solution flows through natural pathways within the ore body and/or through cracks and voids obtained by fracturing. The leaching solution becomes enriched with the target metal(s), forming the pregnant leach solution (PLS), which is extracted via extraction wells and pumped back to the surface. Metals are then recovered from the PLS using hydrometallurgical methods, e.g. solvent extraction (SX) or ion-exchange (IX). The main advantages of ISL include:

1. no underground infrastructure, no ore recovery and no ore processing;
2. no waste rock dumps;
3. no tailings from ore processing; and
4. smaller-scale metallurgical processing, all leading to considerable cost savings.

For a site to be considered suitable for ISL, the ore must be suitable for the leaching process, with natural porosity and permeability, or amenable to pressure-induced permeability, and ideally bounded by impermeable geological strata. In addition to these principal hydrogeological criteria, several other deposit conditions must be fulfilled:

1. ore morphology;
2. ore grade under consideration of magnitude and distribution;
3. mineralogy, e.g. general texture, primary metal-bearing mineral, interfering minerals or other constituents; and
4. position in relation to the water table, groundwater chemistry and original microbiology.

Bioleaching of metals has been exploited since pre-Roman times, i.e. with the recovery of copper and silver from the Rio Tinto River, southwest Spain (3). Bioleaching and bio-oxidation of sulfidic ores are currently used to extract a range of precious and base metals such as gold, copper, zinc and nickel. Bioleaching involves the use of microbial consortia, including iron-oxidizing genera such as *Acidithiobacillus* and *Leptospirillum* genera, to solubilise metals. Bio-oxidation is a related process in which the target metals such as gold are made accessible to chemical extraction, e.g. cyanide, by oxidation of sulfidic host minerals. Both bioleaching and bio-oxidation take place at acidic pH with a pH-value < 2.

Many parameters can affect the efficiency of these methods, including the mineralogy, oxygen concentration, pH and temperature. The microbially-accelerated dissolution of sulfide minerals can be mediated by bacteria attached to the mineral surface, e.g. in biofilms as “contact leaching”, or by planktonic, meaning free-swimming bacteria as “non-contact” leaching. In both cases, ferric iron mediates mineral oxidation (Figure 1), and this needs to be continuously regenerated by iron-oxidizing acidophiles from ferrous iron. An electron acceptor, e.g. O_2 , is therefore required in situ or to be provided in a controlled manner, e.g. in an aerated Ferric Iron Generating Bioreactor (FIGB).

Both contact and non-contact mineral dissolution operate concurrently in conventional biomining operations, i.e. in dumps, heaps and stirred tanks, where aeration status, pH, temperatures etc. are all conducive for the growth of mineral-degrading microorganisms (3). However, the BIOMore concept requires that metal-bearing minerals are oxidized deep, about 1 to 1.5 km be-

Halit (NaCl). Pilottests für ISL in Porphyr-Kupfer-Lagerstätten sind ebenfalls in den USA durchgeführt worden (2).

Bei der klassischen ISL wird die Laugungslösung mittels Injektionsbrunnen in unterirdische, Erz führende und in der Regel hydraulisch gut durchlässige Schichten gepumpt. Die Lösung fließt durch natürliche Wege innerhalb des Erzkörpers. Bei gering durchlässigem Gestein besteht die Notwendigkeit der Stimulation, um Risse zu erzeugen und die Kontaktfläche der Laugungslösung mit dem Gestein zu vergrößern. Die Laugungslösung reichert sich mit Zielmetall(en) an und bildet so die angereicherte Laugungslösung (PLS), die über Extraktionsbrunnen zurück an die Oberfläche gepumpt wird. Die Metalle werden dann mittels hydrometallurgischer Methoden, z.B. Flüssig-Flüssig-Extraktion (SX) oder Ionen-Austausch (IX), aus der PLS zurückgewonnen. Die Hauptvorteile der ISL sind:

1. keine unterirdische Infrastruktur, keine Erzgewinnung und keine Erzverarbeitung,
 2. keine Aufhaldung von Taubgestein,
 3. keine Rückstände aus der Erzverarbeitung,
 4. lediglich kleinvolumige, hydrometallurgische Verarbeitungsschritte,
- was alles zu erheblichen Kosteneinsparungen führt.

Damit eine Lagerstätte als geeignet für die ISL erachtet wird, muss das Erz für den Laugungsprozess geeignet sein, mit natürlicher Porosität und Permeabilität oder zugänglich für druckinduzierte Permeabilität und idealerweise umgeben von undurchlässigen geologischen Schichten. Zusätzlich zu diesen wichtigsten hydrogeologischen Kriterien müssen mehrere weitere Lagerstättenbedingungen erfüllt werden, und zwar hinsichtlich:

1. Erzmorphologie,
2. Erzgehalt unter Berücksichtigung von Größe und Verteilung,
3. Mineralogie, z.B. allgemeine Textur, primäres metallhaltiges Mineral, störende Mineralien oder andere Bestandteile,
4. Lage in Bezug auf den Grundwasserpegel, die Grundwasserchemie und die originäre Mikrobiologie.

Die Biolaugung ist schon seit vorrömischen Zeiten angewendet worden, z.B. für die Gewinnung von Kupfer und Silber aus dem Río Tinto im Südwesten Spaniens (3). Biolaugung und Bio-oxidation von Sulfiderzen werden derzeit verwendet, um eine Reihe von wertvollen Grundmetallen wie Gold, Kupfer, Zink und Nickel zu extrahieren. Die Biolaugung beinhaltet den Gebrauch mikrobieller Konsortien einschließlich eisenoxidierender Spezies wie *Acidithiobacillus* und *Leptospirillum* zum Lösen der Metalle. Die Bio-Oxidation ist ein entsprechender Prozess, in dem die Zielmetalle wie etwa Gold mittels Oxidation der sulfidischen Wirtsmineralien der chemischen Extraktion zugänglich gemacht werden, z.B. als Zyanid. Sowohl die Biolaugung als auch die Biooxidation finden in einem sauren Medium mit einem pH-Wert < 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, z.B. in Biofilmen als „Kontakt-Laugung“, oder mittels planktonischen, also freischwimmenden Bakterien, als „Nicht-Kontakt-Laugung“. In beiden Fällen katalysiert dreiwertiges

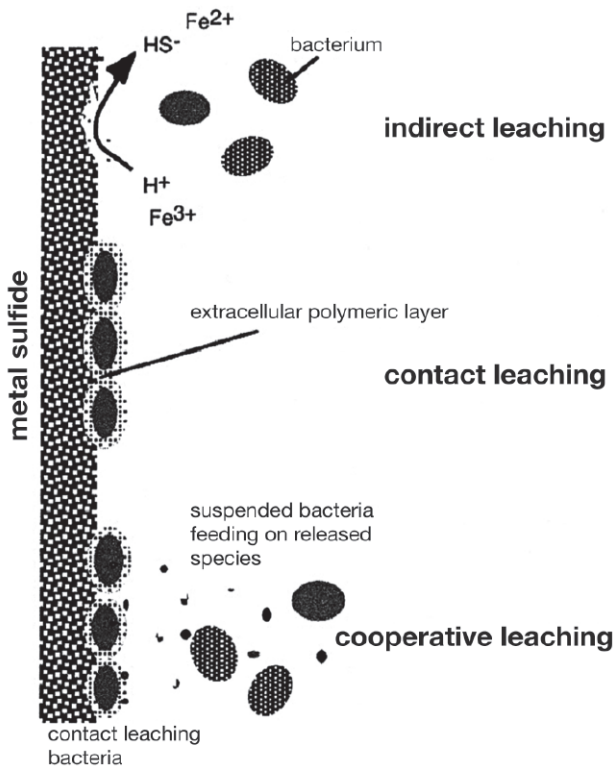


Fig. 1. Scheme visualizing indirect leaching, contact leaching and cooperative leaching of a sulfide mineral (4).

Bild 1. Schema zur Visualisierung von indirekter Laugung, Kontaktlaugung und kooperativer Laugung eines Sulfid-Mineral (4).

Eisen die Mineraloxidation (Bild 1). Daher muss dies ständig durch eisenoxidierende Acidophile aus dem zweiwertigen Eisen wiedergewonnen werden. Ein Elektronenakzeptor, z.B. O_2 , wird daher in situ benötigt oder muss in einer kontrollierten Weise bereitgestellt werden, etwa in einem belüfteten Bioreaktor zur Erzeugung von dreiwertigem Eisen (Ferric Iron Generating Bioreactor, FIGB).

Sowohl die Kontakt- als auch die Nicht-Kontakt-Mineral- laugung werden gleichzeitig in konventionellen Biobergbau- operationen betrieben, konkret in Halden-, Haufen- oder Tank- laugung, wo Belüftungsintensität, pH-Wert, Temperatur usw. für das Wachstum der mineralabbauenden Mikroorganismen entscheidend sind (3). Jedoch erfordert das BIOMORE-Konzept, dass die metallhaltigen Mineralien in der Tiefe, 1 bis 1,5 km unter der Oberfläche, innerhalb der Lithosphäre oxidiert werden, wo die Sauerstoffkonzentrationen eingeschränkt sind und hohe Drücke vorhersehbar zum Verlangsamen der mikrobiellen Ak- tivität führen, obwohl die in diesen Tiefen auftretenden erhöh- ten Temperaturen den Prozess beschleunigen könnten. Dies bedeutet, dass die indirekte Nicht-Kontaktlaugung der Haupt- prozess zum Lösen der Metalle ist. Dafür wird die mikrobielle Regeneration zum dreiwertigen Eisen in einem Bioreaktor kataly- siert, der sich an der Oberfläche, also räumlich getrennt vom unterirdischen chemischen Angriff des dreiwertigen Eisens auf Sulfidmineralien, befindet (Bilder 2, 3). Dieser Prozess wird als „tiefe In-situ-Bielaugung“ (DISB) bezeichnet.

2 BIOMORE: Herausforderungen

BIOMORE trifft auf verschiedene Herausforderungen zusätzlich zu denen, die mit der technologischen Entwicklung eines effizienten und innovativen DISB-Prozesses verbunden sind. Die erste dieser Herausforderungen besteht in der Zielsetzung, dass der neue Prozess sicherer und umweltfreundlicher ist als der traditionelle Bergbau. Außerdem muss die Technologie innerhalb Europas öf- fentlich akzeptiert und wirtschaftlich machbar sein. Weiter unten ist diskutiert, mit welchen Methoden diesen Herausforderungen entsprochen wird.

low surface, within the lithosphere, where oxygen concentrations would be restricted and high pressures would be predicted to slow down microbial activity, though the elevated temperatures at these depths would be predicted to enhance the process. This means indirect, non-contact leaching will be the major means by which metals are solubilised. For this, the microbiological regen- eration of ferric iron is mediated in a bioreactor located at the

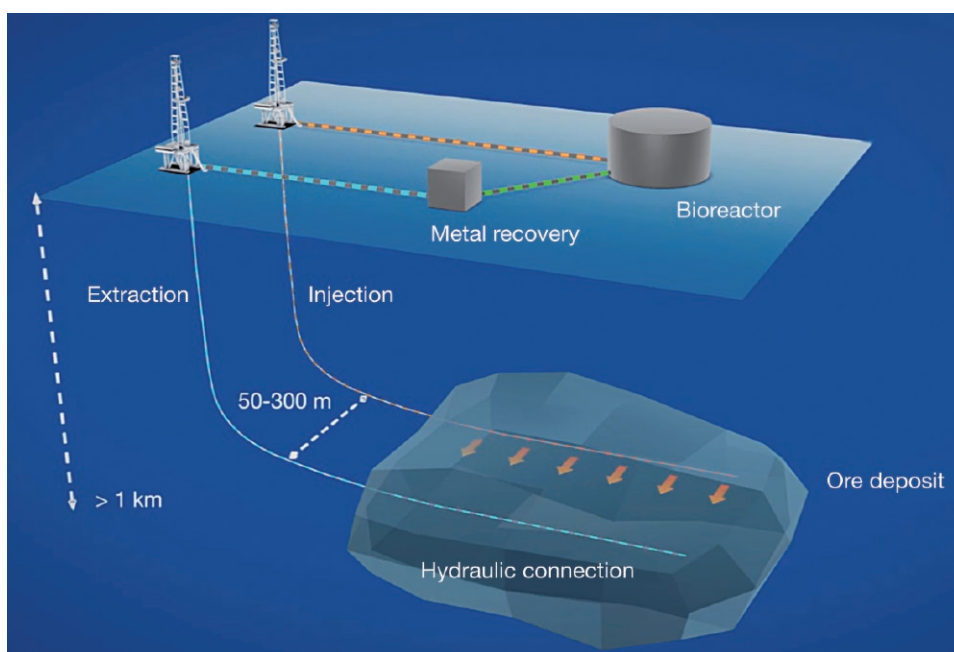


Fig. 2. Surface and sub-surface concept of an in situ bioleaching plant for the exploitation of a deep-buried deposit. Bild 2. Über- und Untertagekonzept einer In-situ-Bielaugungsanlage für den Abbau einer tiefen unterirdischen Lagerstätte. Source/Quelle: DMT

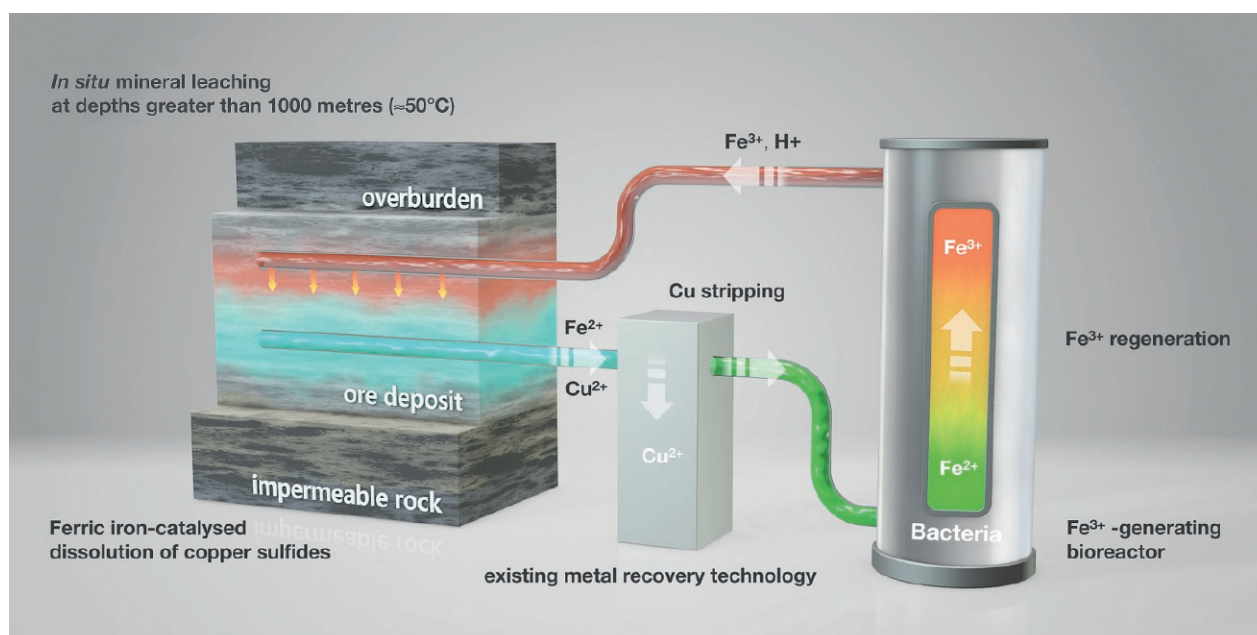


Fig. 3. Schematic representation of the mechanism of *in situ* indirect bioleaching of a copper sulfide ore.

Bild 3. Schematische Darstellung einer indirekten *In-situ*-Biolaugung eines Kupfersulfiderzes. Source/Quelle: DMT

land surface spatially separated from the underground chemical attack of ferric iron on sulfide minerals (Figures 2, 3). The process is referred to as “deep *in-situ* bioleaching” (DISB).

2 BIOMore challenges

BIOMore faces various challenges in addition to those associated with the technological development of an effective and innovative DISB process. The first of these challenges is ensuring that the new process is safer and more environmentally sound than traditional mining. In addition, the technology must be socially acceptable and economically viable within Europe. The approach taken to addressing these challenges is discussed below.

2.1 Safety and environmental issues

The advantages of DISB in terms of safety and environmental issues include:

- elimination of the requirement to haul ore to the land surface, and to grind it to fine particle size, which is estimated to account for $\sim 5\%$ of global energy consumption;
- greatly reduced mine footprints through minor surface area occupation;
- little or no solid wastes, i.e. tailing and waste rock dumps, are produced and left on the land surface;
- as with other hydrometallurgical operations, no smelting of ores is involved and therefore environmental pollution from stack emissions are eliminated;
- a smaller workforce, who are not exposed to hazards from working underground or at opencast mines.

In the BIOMore project, sustainable development indicators are used to compare the social, environmental and economic impacts of the BIOMore technology with conventional mining, an environmental impact assessment is performed for a generic site, and the current European legislation is reviewed. Solutions

2.1 Sicherheits- und Umweltaspekte

Die Vorteile des DISB hinsichtlich Sicherheits- und Umweltaspekten sind:

- Eliminierung der Notwendigkeit zum Fördern des Erzes an die Tagesoberfläche und des Zerkleinerns/Mahlens auf kleine Partikelgrößen, was schätzungsweise $\sim 5\%$ des gesamten Energieverbrauchs weltweit ausmacht,
- stark reduzierte Auswirkungen an der Tagesoberfläche durch geringere Flächennutzung,
- an der Tagesoberfläche werden wenige oder keine festen Abfälle, d.h. Reststoffe und Abraum tauben Gesteins, produziert und gelagert,
- wie bei anderen hydrometallurgischen Operationen ist kein Schmelzen von Erzen erforderlich, wodurch eine Umwteinträchtigung durch Rußemissionen verhindert wird,
- weniger Arbeitskräfte, die keinen Gefahren durch untertägige Arbeiten oder solchen im Tagebau ausgesetzt sind. Im BIOMore-Projekt werden Nachhaltigkeitsindikatoren verwendet, um die sozialen, Umwelt- und Wirtschaftsauswirkungen der BIOMore-Technologie mit denen des konventionellen Bergbaus zu vergleichen. Es wird eine Umweltverträglichkeitsanalyse für einen allgemeinen Standort durchgeführt und die geltende europäische Gesetzgebung hierzu recherchiert. Außerdem werden Lösungen für die Rekultivierung des Standorts zusammen mit der Technologie entwickelt.

2.2 Soziale Akzeptanz und Bekanntmachung des Projekts

Transparenz und Kommunikation sind wesentlich, um die soziale Akzeptanz der BIOMore-Technologie zu erreichen. Spezielle Bedenken beziehen sich auf die Anwendung von Bakterien unter Tage und die Anwendung des hydraulischen Frac-Verfahrens zum Verbessern der Permeabilität des Erzkörpers. Diese Fragen werden daher mit allen Interessenvertretern geklärt und besprochen.

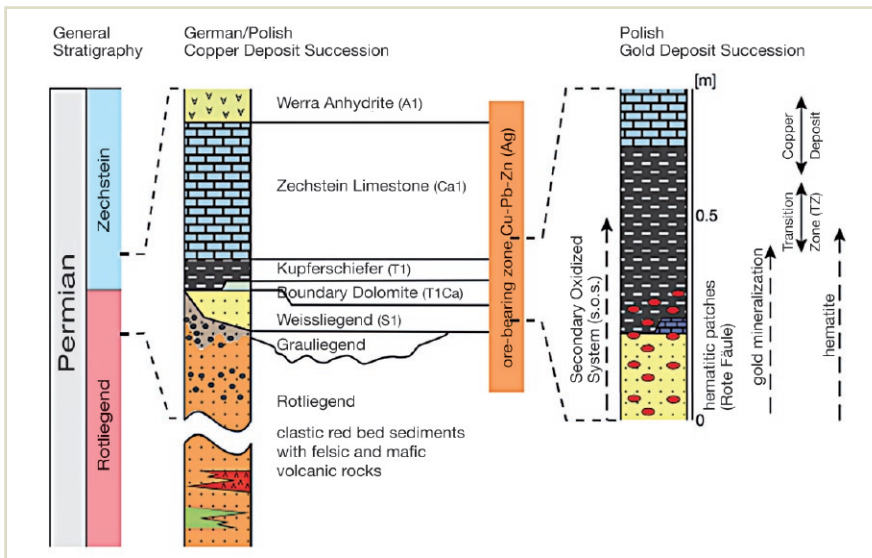


Fig. 4. Generalized ore zone stratigraphy (Poland).

Bild 4. Allgemeine Erzzonenstratigraphie (Polen). Source/Quelle: Borg et al., 2012

for site rehabilitation are also being developed alongside the technology.

2.2 Social acceptability and promotion of the project

Transparency and communication are central to obtaining social acceptance of the BIOMore technology. Particular concerns relate to the introduction of bacteria to the subsurface and the use of hydraulic fracturing to enhance permeability of the host rock. These therefore are being clarified and discussed with all stakeholders.

More generally, the social acceptability of the BIOMore technology is being studied through discussions and exchanges with a cross-section of stakeholders. BIOMore has developed an informative website describing the ambitions and challenges of the project, which is an ideal media to reach a large number of people interested in the project. The site's address is www.biomore.info. Brochures have also been produced and distributed. News and social networking services are used to extend the number of people aware of BIOMore. As such, BIOMore has a Youtube¹ channel, a Twitter² account as well as a group on the networking service LinkedIn.

An image film, accessible on Youtube³, contains information about the BIOMore project, the partners involved, objectives and our approach.

2.3 Economic challenges

The economic viability of the BIOMore process is being assessed in light of the actual metal production costs and market prices using the experimental test results. It is expected that the cost of producing metals using the BIOMore process will be lower than those resulting from conventional mining.

3 First results and ambitions

The core of the BIOMore project is the development of the BIOMore process at lab-scale and the subsequent underground testing

¹ https://www.youtube.com/channel/UCS4fohOzQjoqxqFC74vj_UQ

² https://twitter.com/BIOMore_EU

³ <https://www.youtube.com/watch?v=XTK3uv2ky4w>

Allgemein wird die soziale Akzeptanz der BIOMore-Technologie durch Diskussionen und Austausch mit einem Querschnitt der Interessenvertreter untersucht. BIOMore hat eine informative Webseite gestaltet, auf der die Absichten und Herausforderungen des Projekts beschrieben werden und die ein ideales Mittel darstellt, um eine große Anzahl am Projekt interessierter Personen zu erreichen. Zu finden ist die Seite unter der Adresse www.biomore.info. Außerdem sind Broschüren erstellt und verteilt worden. Nachrichten- und soziale Netzwerkdienste werden ebenfalls verwendet, damit noch mehr Personen BIOMore kennenlernen. So verfügt BIOMore über einen Youtube¹-Kanal, einen Twitter²-Account sowie eine Gruppe im Netzwerkdienst LinkedIn.

Ein Imagefilm³, der über Youtube verfügbar ist, enthält Informationen über das BIOMore-Projekt sowie involvierte Partner und zeigt die Ziele und den Ansatz, um diese zu erreichen.

2.3 Wirtschaftliche Herausforderungen

Die wirtschaftliche Machbarkeit des BIOMore-Prozesses angesichts der derzeitigen Metallproduktionskosten und Marktpreise wird mit Hilfe der experimentell gewonnenen Ergebnisse bewertet. Es wird erwartet, dass die Kosten der Metallproduktion mittels des BIOMore-Prozesses niedriger sein werden als diejenigen, die beim konventionellen Abbau entstehen.

3 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 Test-Erzblock. Die Tests werden an einem mit Kupfer vererzten Gesteinsblock in der Kupfermine von Rudna in Polen durchgeführt, die von KGHM Polska Miedź SA betrieben wird. Dieser Standort wurde auf Grundlage geologischer, hydrogeologischer und gesetzlicher Aspekte ausgewählt. Im Rahmen des Projekts erfolgen weitreichende theoretische Untersuchungen und Modellbetrachtungen, um unser Verständnis der BIOMore-Technologie, basierend auf Fracverfahren und Biolaugung, sowie der geologischen, hydrogeologischen und wirtschaftlichen Belange zu unterstützen und zu entwickeln.

3.1 Charakterisierung des Testorts

Kupferschiefer ist eine sedimentäre Formation, die reich ist an Mineralressourcen und die in großen Teilen Nordeuropas, einschließlich des BIOMore-Teststandorts, gefunden wird. Unterhalb der Zechstein-Schicht aus dem höheren Perm gelegen, sind mehr als 68 Mio. t Kupfer bei einem Kupfergehalt im Erz von 1,5% (5) produziert worden. Von der Kupferschieferschicht und der darunterliegenden mineralisierten Zechstein-Sandsteinformation sind Gesteinsproben für die Charakterisierung und Testarbeiten entnommen worden (Bild 4). Der Sandstein ist ein potentieller Anwendungsfall für die BIOMore-Technologie, während die Kupfer-

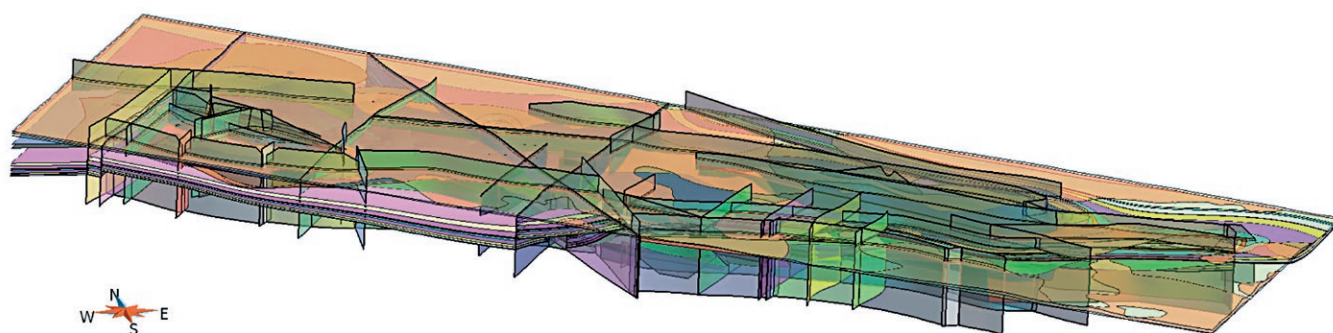


Fig. 5. Regional 3D model of the Rudna area displaying faults and formation boundaries. View from South-West with vertical exaggeration $\times 3$ (with Gocad-Skua 2009.4). // Bild 5. Regionales 3D-Modell des Rudna-Bereichs einschließlich Verwerfungen und Formationsgrenzen. Ansicht von Südwesten mit vertikaler Überhöhung $\times 3$ (mit Gocad-Skua 2009.4). Source/Quelle: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France

of the process at a test ore block. The tests will be carried out in a Kupferschiefer ore at the Rudna copper mine in Poland, operated by KGHM Polska Miedź SA. This location was selected on the basis of geological, hydrogeological and legal issues. A wide range of theoretical investigations and models are also being developed in the project to support and develop our understanding of the BIOMore technology. These address the fracturing technology and bioleaching process as well as geological, hydrogeological and economic issues.

3.1 Characterization of the test site

Kupferschiefer is a sedimentary formation rich in mineral resources and found in a large part of northern Europe, including the BIOMore test site. Located beneath the Zechstein layer from the geologic age of the Permian Superior, more than 68 mt of copper at 1.5% ore grade (5) are contained in the ore. Rock samples were taken from the Kupferschiefer layer and the underlying mineralised Zechstein sandstone formation for characterisation and test work (Figure 4). The sandstone is a possible target for the BIOMore technology while the Kupferschiefer formation, which is mainly composed of black shale, will serve as an impermeable cap.

Geological, hydrogeological, mineralogical and petro-physical characteristics of the site were analysed to determine the feasibility of ISL at the test site. Regional observations enabled the construction of a 3D geological model by CNRS (Figure 5) allowing the development of a 3D hydrogeological model, crucial to understanding the fluid mobility in the area before operations.

On a smaller scale, rock samples were taken from the target zone to study their petro-physical and mineralogical characteristics. The mineral composition of the samples has been determined using quantitative and qualitative characterization: optical

ferschieferformation, die hauptsächlich aus Schwarzschiefer besteht, vor allem als undurchlässige Schicht dienen wird.

Es wurden die geologischen, hydrogeologischen, mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften des Standorts analysiert, um die Machbarkeit von ISL am Teststandort zu bestimmen. Regionale Untersuchungen haben die Erstellung eines geologischen 3D-Modells durch CNRS (Bild 5) gestattet, was die Entwicklung eines hydrogeologischen 3D-Modells ermöglicht, das wesentlich für das Verständnis der Fluidströmungen im vorgesehenen Abbaubereich vor Beginn der Arbeiten ist.

Für Untersuchungen in kleinerem Maßstab wurden Gesteinsproben aus der Zielzone entnommen, um ihre petrophysikalischen und mineralogischen Eigenschaften zu untersuchen. Die mineralische Zusammensetzung der Proben ist mittels quantitativer und qualitativer Charakterisierung bestimmt worden: optische Mikroskopie (Bild 6), Röntgenbeugung, Infrarotspektroskopie und Röntgen-Fluoreszenz-Spektroskopie. Die kupferhaltigen Mineralien, die hauptsächlich als Sulfide identifiziert wurden, sind Covellin (CuS), Chalkosin (Cu_2S), Bornit (Cu_5FeS_4), Chalkopyrit (CuFeS_2) mit schwach kupferhaltigem Hydroxychlorid-Atacamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) (6).

Carbonat-Mineralien, Calcit (CaCO_3) und Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) wurden in der Erzformation identifiziert. Diese können potentiell problematisch sein, da sie unter sauren Bedingungen reagieren und zur Neutralisierung der für die DISB erforderlichen Säure führen. Wasserlösliches Salz – Halit (NaCl) – ist ebenfalls in signifikanten Mengen vorhanden und kann eine negative Auswirkung auf die Biolaugungsbakterien haben. Daher umfasst der Testplan, der im Labor entwickelt und getestet wurde und später an die Tests in der Rudna-Mine angepasst wurde, vier Stufen:

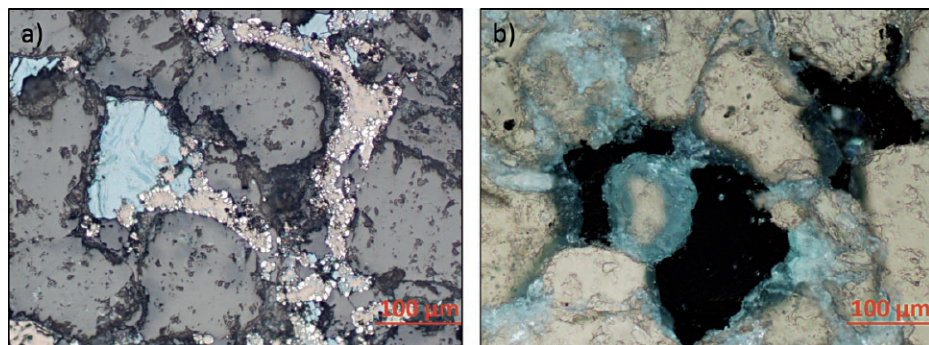


Fig. 6. Optical microscopy images of the Rudna sandstone. a) Bornite, covellite and pyrite (polarized non-analysed light), b) Copper sulfides, quartz and atacamite (in blue, polarized and analysed light). // Bild 6. Bilder aus optischer Mikroskopie des Rudna-Sandsteins: a) Bornit, Covellin und Pyrit (polarisiertes, nicht-analysiertes Licht); b) Kupfersulfide, Quarz und Atacamit (in Blau, polarisiertes und analysiertes Licht). Source/Quelle: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France

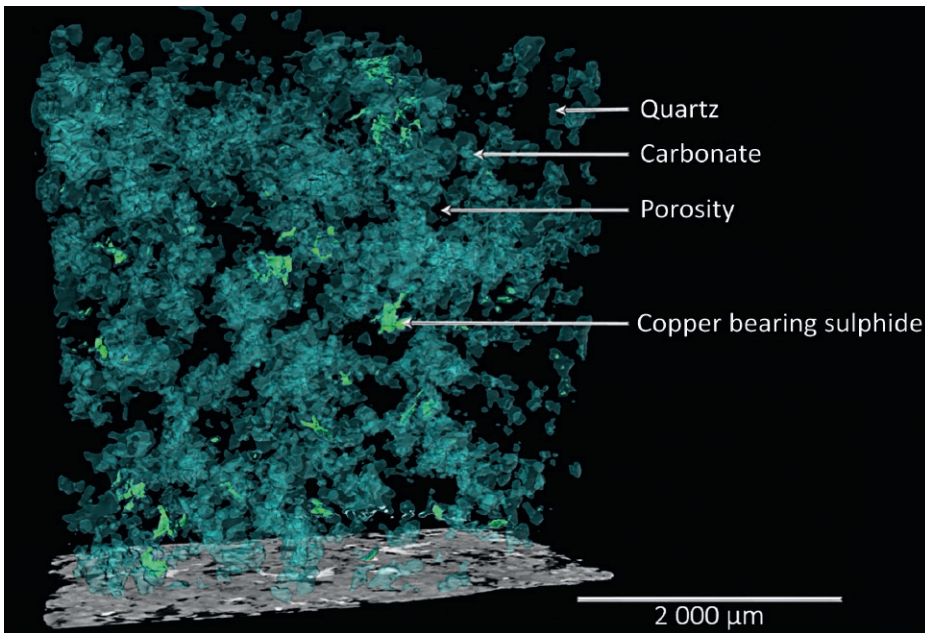


Fig. 7. 3D X-Ray tomography image of Zechstein sandstone grains. The opacity of the 3D envelope reflects the density of each mineral phase.

Bild 7. 3D-Röntgen-Tomographiebild von Zechstein-Sandstein-Körnern. Die Opazität der 3D-Hüllkurve spiegelt die Dichte jeder Mineralphase wider.

Source/Quelle: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France

microscopy (Figure 6), X-Ray Diffraction, Infrared Spectroscopy, and X-Ray Fluorescence Spectroscopy. The copper-bearing minerals identified are mostly sulfides, such as covellite (CuS), chalcocite (Cu_2S), bornite (Cu_5FeS_4), chalcopyrite (CuFeS_2) with little copper bearing hydroxychloride atacamite ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) (6).

Carbonate minerals, calcite (CaCO_3) and dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), were identified within the ore formation. These could potentially be problematic as they react under acidic conditions, neutralising the acidity required for DISB. Water-soluble salt – halite (NaCl) – is also present in significant amounts and could have a negative ef-

- Waschen des Erzblocks mit Wasser zum Entfernen des Halits,
- Säurelaugung zum Lösen von Carbonaten, wobei ebenfalls etwas Kupfer aus den säurelabilen Sulfid-Mineralien ausgelaugt wird,
- Auslaugen mit dreiwertigem Eisen zum quantitativen Oxidieren von Sulfid-Mineralien und Lösen des meisten im Erz vorhandenen Kupfers und
- Neutralisierungsschritt zum Erhöhen des pH-Werts auf neutrale Bedingungen und zum Eliminieren der restlichen Bakterienaktivität.

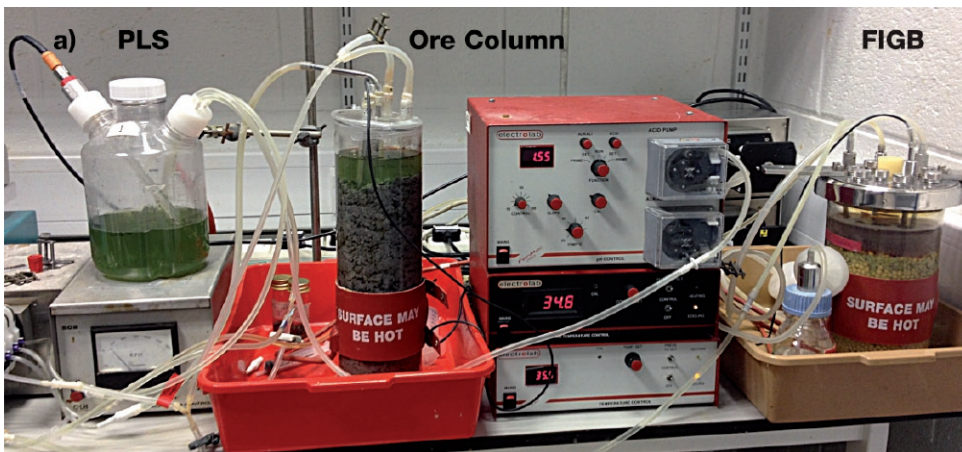


Fig. 8. a) Equipment for a column leaching test. b) Equipment for the in situ tests in Rudna.

Bild 8. a) Anordnung eines Säulenlaugungstests. b) Installation für In-situ-Tests in Rudna.

Source/Quelle: Fig. 8a) Bangor University, UK; Fig. 8b) Zeton B.V., The Netherlands

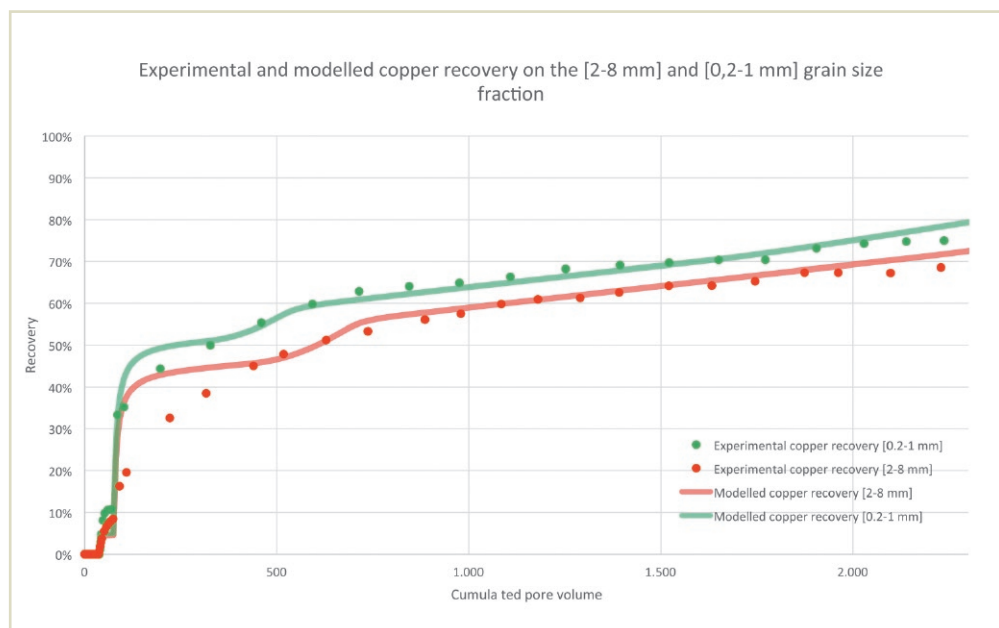


Fig. 9. Experimental and modelled copper recoveries at laboratory scale column leaching test with Zechstein sandstone. There are three successive leaching steps: water washing, acid leaching and ferric iron leaching. Bild 9. Experimentelle und modellierte Kupfergewinnung beim Säulenlaugungstest im Labormaßstab mit Zechstein-Sandstein. Es gibt drei aufeinanderfolgende Laugungsschritte: Wasserwaschen, Säurelaugen und Laugung mit dreiwertigem Eisen. Source/Quelle: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), France

fect on the bioleaching bacteria. The protocol developed and tested in the laboratory and later adopted for testing in the Rudna mine site therefore involves four stages:

- water-washing step to remove halite;
- acid leaching, to dissolve carbonates, which also leaches some copper from acid-labile sulfide minerals;
- ferric iron leaching, to oxidise sulfide minerals quantitatively, and solubilise most of the copper present in the ore; and
- neutralization step to increase pH to neutral conditions, and to eliminate residual bacterial activity.

The petro-physical characteristics of the sandstone were measured, e.g. with X-Ray tomography methods (Figure 7), to determine the effective diffusion parameter, which is crucial for modelling the leaching process.

3.2 Laboratory-scale tests, in situ tests and modelling

Different laboratory scale tests have been carried out in synergy between several partners. These tests aimed at characterising the effect of parameter variations, such as pressure and temperature, on microorganisms and/or on copper recovery kinetics. Moreover, specific experiments for decommissioning and decontamination were carried out to make recommendations about how to eliminate bacteria from the deep subsurface. The test series will be completed with the in situ pilot scale test in the Rudna mine (Figure 8). This experimental base will be used for a defensible prognosis for the efficiency of the technology at field-scale based on state-of-the-art geochemical and geo-mechanical models.

Stress fields in the study area and fracture propagation are being modelled following a mechanical and hydraulic investigation of rock samples. This work is crucial for optimizing the methodology for in situ permeability enhancement. A suitable hydrometallurgical flow sheet is being developed for stripping copper from the pregnant leaching solution, removing toxic elements, e.g. Cd, Cr, Hg etc., and recovering iron.

The test results are being used to develop numerical models that simulate the leaching process in situ at the deposit in 3D.

Es wurden die petrochemischen Eigenschaften des Sandsteins analysiert, z.B. mit Röntgentomographiemethoden (Bild 7) zum Bestimmen der effektiven Diffusionsparameter, die wesentlich für das Modellieren des Laugungsprozesses sind.

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

Es sind verschiedene Tests im Labormaßstab in Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern durchgeführt worden. Diese Tests zielten ab auf die Charakterisierung der Wirkung von Parametervariationen, wie z.B. Druck und Temperatur, auf die Mikroorganismen und/oder die Kinetik der Kupfergewinnung. Weiterhin wurden spezifische Experimente für die Stilllegung und Dekontaminierung durchgeführt, um Empfehlungen darüber zu machen, wie Bakterien aus dem untertägigen Erzkörper eliminiert werden können. Die Testreihen werden komplettiert durch Tests im In situ-Pilotmaßstab in der Rudna-Mine (Bild 8). Diese experimentellen Befunde werden für eine gesicherte Prognose der Effizienz der Technologie im Großmaßstab auf Grundlage der aktuellen geochemischen und geomechanischen Modelle benutzt.

Spannungsfelder im Untersuchungsbereich und die Bruchausbreitung werden in Anlehnung an die mechanischen und hydraulischen Untersuchungen von Gesteinsproben modelliert. Diese Arbeit ist wesentlich für die Optimierung der Methodologie für die In situ-Permeabilitätsverbesserung. Parallel dazu wird ein geeignetes hydrometallurgisches Flussdiagramm für die Gewinnung des Kupfers aus der angereicherten Laugenlösung unter Entfernen von toxischen Elementen, z.B. Cd, Cr, Hg etc., und der Rückgewinnung von Eisen entwickelt.

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 „Hochskalierung“, ist erforderlich für die wirtschaftliche Bewertung der Investitions- und Betriebskosten. Er gestattet z.B. die Bewertung des Chemikalienverbrauchs und die Vorhersage der Metallgewinnung als Funktion der Zeit und der Betriebsbedingungen. BIOMore hat eine flexible Modellierungs-Toolbox auf

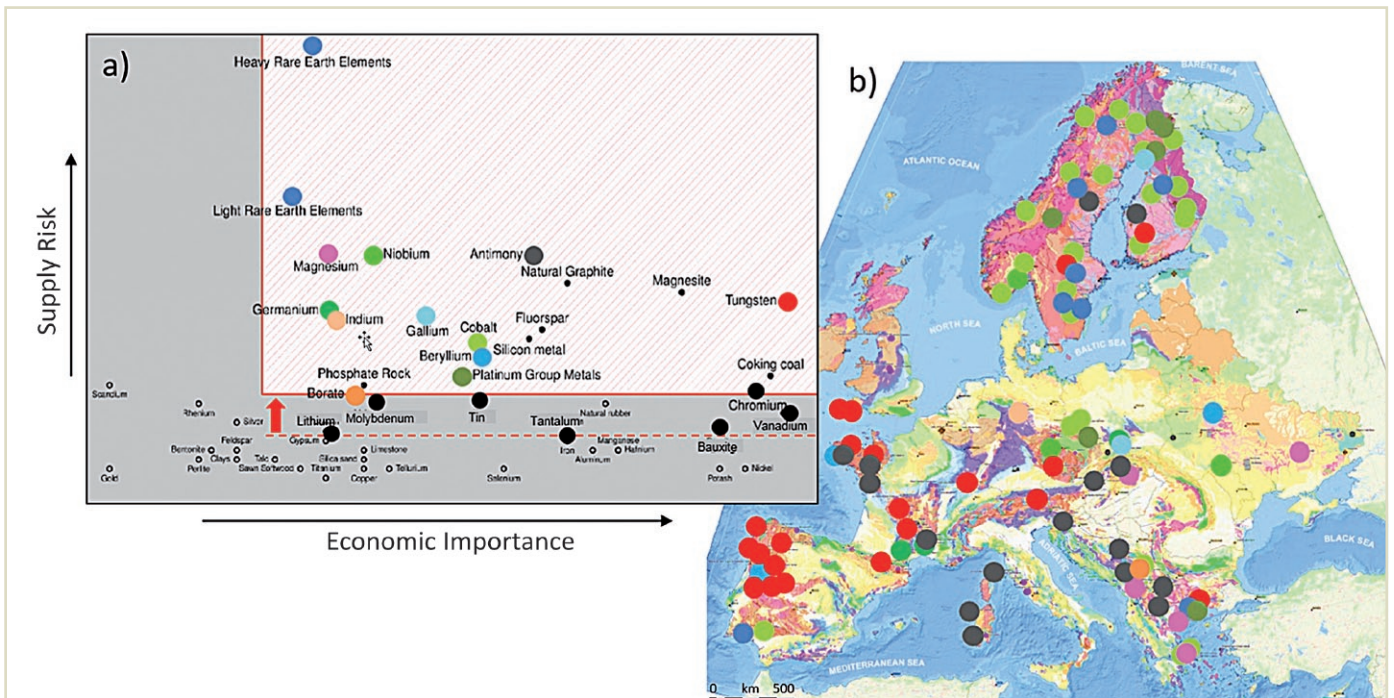


Fig. 10. Raw material criticality assessment. Elements selected, here critical metals as per EU, are shown as large coloured circles, technology strategic metals are visualized by black dots. b) Critical metal deposits of Europe – ProMine database. Refer to a) for the metal commodity legend. Bild 10. Bewertung der Kritikalität der Rohstoffe. Ausgewählte Elemente, hier kritische Metalle für die EU, werden in großen farbigen Kreisen dargestellt, technologie-strategische Metalle mittels schwarzen Punkten. b) Kritische Metallvorkommen in Europa (ProMine-Datenbank). Ziehen Sie a) zu Rate für die Metallrohstofflegende. Source/Quelle: Modified from: Raw materials criticality assessment from the European Commission (<http://ec.europa.eu>)

This modelling step, i.e. the “scale up”, is required for the CAPEX/OPEX economic evaluation. It will allow, e.g., the evaluation of reactant consumption and the prediction of metal recovery as a function of time and conditions. BIOMore has developed a flexible modelling toolbox based on the lab- and reactor-scale experiments that can be applied to a future field scale operation. The overall approach can be adapted to other deposits.

Preliminary data from column leaching tests on ground, copper-bearing Zechstein sandstone from the Rudna mine were obtained in 2016. Samples with different grain sizes particles were used and the copper recovery was modelled using different geochemical approaches. Figure 9 shows the first reactive transport model predictions of copper recovery within the Rudna sandstone, calculated using thermodynamic and kinetic data along a 1D transport path in PhreeqC (USGS). The geochemical models have been combined with geo-mechanical models that calculate the increase in permeability from sub-surface fracturing. The system simulation model used is able to conduct simulations from lab over reactor to field scale.

3.3 Feasibility study and targeting of in situ bioleaching compatible deposits in Europe

The feasibility study includes a full assessment of the costs of an optimized in situ and indirect bioleaching process and a comparison of recovery costs with other copper mining operations. The economic evaluation includes many different parameters, such as the bioreactor design and the metal stripping method and remediation costs, in order to evaluate the CAPEX/OPEX values versus

Grundlage von Experimenten im Labor- und Reaktormaßstab entwickelt, die Rückschlüsse auf künftige Operationen im Großmaßstab zulässt. 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. Es wurden Proben mit verschiedenen Korngrößen experimentell studiert und die Kupfergewinnung mittels verschiedener geochemischer Ansätze modelliert. Bild 9 zeigt die ersten reaktiven Transportmodellvorhersagen der Kupfergewinnung innerhalb des Rudna-Sandsteins, berechnet mittels thermodynamischer und kinetischer Daten in Anwendung auf einem 1D-Transportweg in PhreeqC (USGS). Die geochemischen Modelle sind mit geomechanischen Modellen kombiniert worden, die den Anstieg der Permeabilität durch das unterirdische Fracverfahren berechnen. Das verwendete Systemmodell erlaubt es, Simulationen der Labor- und Reaktortests auf den industriellen Maßstab zu übertragen.

3.3 Machbarkeitsstudie und Suche von Lagerstätten in Europa, die mit der In situ-Biolaugung kompatibel sind

Die Machbarkeitsstudie umfasst eine vollständige Bewertung der Kosten eines optimierten In situ- und indirekten Biolaugungsprozesses und einen Vergleich der Gewinnungskosten mit anderen Kupfergewinnungsmethoden. Die wirtschaftliche Bewertung beinhaltet viele verschiedene Parameter, wie z.B. das Bioreaktordesign, die Methode der Metallgewinnung und letztlich die Sanierungskosten, um die Investitions- und Betriebskosten gegenüber dem Wert der Metallgewinnung als Funktion der Laugungseffizienz und anderer Parameter zu analysieren.

⁴ <http://promine.gtk.fi>

the value of metal recovery as function of the leaching efficiency and other parameters.

The potential of the BIOMore process to be applied in Europe is assessed by identifying other potential in situ bioleachable deposits in Europe. The first screening identifies preferential European deposits containing critical raw materials (Figure 10).

This screening has to take into account mineralogy and morphology features of each deposit to determine its suitability for deep in situ bioleaching. These parameters are accessible on the European ProMine⁴ database which is used for this analysis.

4 Conclusions

The innovative technology being explored within the BIOMore project has the potential to be implemented as an alternative and much more environmentally-friendly approach for metal mining in future decades. Deep in situ bioleaching could reduce costs of extracting and recovering metals, increase the amount of ore that is accessible, and lower the environmental impact of mining activities by avoiding the building of large (underground) infrastructure and avoiding the production and long-term management of large quantities of waste materials. This paradigm shift in how we obtain essential metal commodities in the future will require social acceptance both in Europe and elsewhere in the world.

Acknowledgments

This work is funded by the European Union Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement n°642456.

References / Quellenverzeichnis

- (1) OECD report, 2014.
- (2) Seredkin, M.; Zabolotsky, A.; Jeffress, G.: In situ recovery, an alternative to conventional methods of mining: Exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics. *Ore Geology Reviews* 79, 2016, pp. 500 – 514.
- (3) Johnson, D. B.: Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology* 30, 2014, pp. 24 – 31.
- (4) Tributsch, H.: Direct versus indirect bioleaching. *Hydrometallurgy* 59, 2001, pp. 177–185.
- (5) Jébrak, M.; Marcoux, E.: *Géologie des ressources minérales*. Association Géologique du Canada, 2008, 667 p.
- (6) Marion, P.; Joussemet, R.; Royer, J. J.; Jdid, E. A.; Diot, F.; Filippov, L.: Mineralogical investigations on some samples of Rudna Mine, Poland. *Projet Biomore, rapport 2 non publié*, 2015, 37 p.

Das Potential des BIOMore-Prozesses, der in Europa Anwendung finden soll, wird durch Identifizieren anderer potentieller in situ-bioleaugbarer Lagerstätten in Europa bewertet. Das erste Screening identifiziert bevorzugt europäische Vorkommen, die kritische Rohstoffe enthalten (Bild 10).

Das Screening muss die mineralogischen und morphologischen Eigenschaften jeder Lagerstätte berücksichtigen, um seine Eignung für eine unterirdische In situ-Biolaugung zu bestimmen. Diese Parameter sind zugänglich über die europäische ProMine⁴-Datenbank, die für diese Analyse verwendet wird.

4 Schlussfolgerungen

Die im Rahmen des BIOMore-Projekts untersuchte innovative Technologie hat das Potential, als alternativer und umweltfreundlicher Ansatz für die Metallgewinnung in kommenden Jahrzehnten eingesetzt zu werden. Die unterirdische In situ-Biolaugung könnte die Kosten für das Extrahieren und Gewinnen von Metallen reduzieren, die Menge des abbauwürdigen Erzes erhöhen und die Umweltauswirkungen der Förderaktivitäten verringern, indem der Bau größerer unterirdischer Infrastrukturen und die Produktion und das langfristige Management großer Abfallmengen vermieden werden. Der Paradigmenwandel für die Bereitstellung wesentlicher Metallrohstoffe in der Zukunft wird eine soziale Akzeptanz in Europa, aber auch an anderen Orten der Welt erfordern.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von dem Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union Horizon 2020 im Rahmen der Finanzierungshilfevereinbarung Nr. 642456 gefördert.

Authors / Autoren

Prof. Dr. Lev Filippov and Eng. Caroline Izart, University of Lorraine, Nancy/France, Prof. Dr. Horst Hejny, MinPol GmbH, Dreistetten/Austria, Knut Ansgar Hirsch, DMT GmbH & Co. KG, Essen/Germany, Prof. Dr. Barrie Johnson, Bangor University, Bangor/Great Britain, Dr. René Kahnt, G. E. O. S. Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg/Germany, Dr. Horst Märten, Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH, Dresden/Germany, and Heathgate Resources Pty Ltd, Adelaide/Australia, Wickus Slabbert, Hatch LTD, Mississauga/Canada