
FAKTEN ■ ANALYSEN ■ WIRTSCHAFTLICHE HINTERGRUNDINFORMATIONEN

BIOMINING – ENTWICKLUNG DER METALLGEWINNUNG MITTELS MIKROORGANISMEN IM BERGBAU

Axel Schippers, Jürgen Vasters & Malte Drobe

1 EINLEITUNG

Biomining ist ein zunehmend angewandtes biotechnologisches Verfahren zur Aufbereitung von Erzen im Bergbau (Biohydrometallurgie). Die Gewinnung von Kupfer aus Armerzen ist heutzutage die wichtigste industrielle Anwendung, wobei ein bedeutender Teil der Weltkupferproduktion bereits aus der Haufen- bzw. Haldenbiolaugung stammt. Begrifflich muss zwischen dem industriellen Prozess der Biolaugung (bioleaching), die eine Umwandlung eines unlöslichen Wertmetalls in eine lösliche Form mittels Mikroorganismen ist, und der Biooxidation (biooxidation), bei dem überwiegend Gold aus refraktären Erzen in großen Tank-Biooxidationsanlagen für weitere Aufbereitungsschritte aufgeschlossen wird, unterschieden werden. Neben Kupfer und Gold wird Biomining auch zur Gewinnung von Kobalt, Nickel, Zink und Uran eingesetzt. Industriell wird Biomining bislang als Verfahren lediglich in der Aufbereitung sulfidischer Erze und von Uranerz eingesetzt. Es existieren aber bereits biotechnologische Labor- bzw. Pilotverfahren zum Aufschluss silikatischer und oxidischer Erze (z. B. Laterite), zur Laugung von Aufbereitungsrückständen bzw. Bergbauhalden (mine tailings), sowie zur Extraktion von Metallen aus industriellen Rückständen und Abfällen (Recycling). Dieser Beitrag schätzt den Anteil der Weltproduktion an Kupfer, Gold und anderer Metalle mittels Biomining und chemischer Laugung (Bio-/Hydrometallurgie) gegenüber der durch pyrometallurgische Verfahren erzeugten Metallproduktion ab. Grundlage für diese Studie sind Informationen aus den DERA/BGR-Rohstoffdatenbanken sowie Angaben aus der Literatur. Darüber hinaus wird ein Überblick zum

Stand neuer Entwicklungen beim Biomining gegeben. Außerdem werden Perspektiven für zukünftige Anwendungsfelder aufgezeigt.

2 HINTERGRUND

Die Erzminerale der Metalle Kupfer, Zink und Nickel kommen überwiegend in Form von Metallsulfiden vor. Metallsulfide sind unter normalen Umweltbedingungen sowie bei der Verwendung von schwachen Säuren, anders als z. B. die oxydischen Minerale dieser Metalle, unlöslich. Deshalb werden sulfidische Erze durch das Flotationsverfahren zu Konzentraten angereichert, aus denen, über den Weg der pyrometallurgischen Verhüttung (smelting), Rohmetalle erschmolzen werden. Die Verhüttung beginnt mit der Erzeugung von Kupferstein aus vorgetrockneten Konzentraten zumeist in Wirbelbetтанlagen oder Schwebeschmelzöfen. Hierbei erfolgen die Röstung, die Verschlackung und das Steinschmelzen gleichzeitig in einem Arbeitsschritt. Das Rösten bzw. die Oxidation des Metallsulfids führt zur Emission von Schwefeldioxidgas, welches in Schwefelsäureanlagen aus dem Abgas entfernt werden muss, um Umweltprobleme zu vermeiden. Der entstehende Metallstein, der Gehalte von 50 – 70 % Cu und 20 – 30 % Schwefel aufweist, wird durch eine abschließende Oxidation in einem Konverter zu Rohmetall verblasen, das nach dem Schlackenabstich in Formen gegossen werden kann und in einem weiteren Schritt raffiniert werden muss.

Eine umweltfreundliche und wirtschaftliche Alternative für sulfidische Armerze, deren Metallsulfide sich wirtschaftlich nicht durch Flotation anreichern lassen, ist die Extraktion von Metallen mittels Mikroorganismen. Dieses Verfahren wird als Biomining bezeichnet. Biomining ist heutzutage eine etablierte Biotechnologie und wird weltweit angewendet. Fortschritte in der Konstruktion von Anlagen, dem Aufbau und Betrieb von Haldenlaugungen sowie im Prozessdesign, einschließlich der Anwendung und dem Monitoring der Metallsulfide oxidierenden Mikroorganismen, führen zu einer Verbreitung der Technologie und ermöglichen es dem Biomining erfolgreich mit anderen hydrometallurgischen, chemischen Verfahren zu konkurrieren.

Beim Biomining werden die Erze „gelaugt“. Biolaugung ist die biologische Umwandlung einer unlöslichen Metallverbindung in eine wasserlösliche Form. Im Falle der Biolaugung von Metallsulfiden werden diese von aeroben, Säure liebenden Fe(II)- und/oder Schwefelverbindungen oxidierenden Bakterien oder Archaeen zu Metallionen und Sulfat in saurer Lösung oxidiert. Wichtige Arten von Laugungsbakterien sind beispielsweise *Acidithiobacillus ferrooxidans* (früher *Thiobacillus ferrooxidans*) und *Leptospirillum ferrooxidans*. Das Oxidationsmittel Fe(III) für die Metallsulfide wird durch die mikrobielle Eisen(II)oxidation bereit gestellt. Die im Zuge der Metallsulfidoxidation entstehenden Schwefelverbindungen wie Elementarschwefel werden durch die mikrobielle Oxidation zu Schwefelsäure umgesetzt, wodurch das saure Milieu geschaffen wird. Während des Biolaugungsprozesses fallen in Abhängigkeit vom Sulfidgehalt des Erzes oftmals große Mengen an Eisensulfaten und gering konzentrierter Schwefelsäure an, die im Rahmen der erforderlichen Entsorgung ausgefällt bzw. neutralisiert werden müssen. Eine Aufbereitung dieser Abfälle ist technisch bislang nicht realisiert.

Im Gegensatz zur Biolaugung fallen bei der pyrometallurgischen Prozessroute gasförmige Schwefeldioxid-Emissionen an. Diese stellen in modernen Anlagen allerdings kein Umweltproblem dar, da im Hüttenprozess das Schwefeldioxid mit dem in der heutigen Industrie gängigen Doppelkontaktverfahren zu über 99 % zu Schwefelsäure umgesetzt wird. Schwefelsäure ist ein wichtiges Koppelprodukt der Kupfererzeugung und der Verkauf der Schwefelsäure macht derzeit einen Anteil von rund 20 % am Erlös der chilenischen Kupferhütten aus.

3 KUPFER

3.1 Industrieproduktion

Kupfer aus sulfidischen Erzen wird überwiegend mittels Flotation und pyrometallurgischer Verhüttung gewonnen. Nach einem starken Anstieg der Laugung von Kupfer (chemische und biologische Laugung) in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts und zu Anfang des 21. Jahrhunderts von 10 % auf 20 % an der Gesamtförderung (Abb. 1), verblieb der Anteil des durch Laugung produzierten Kupfers bei rund 21 %. In absoluten Zahlen ist die Kupferproduktion aus Laugungsprozessen jedoch gewachsen. Da aber auch die Minenproduktion insgesamt stark zugenommen hat, ist in den letzten zehn Jahren kein nennenswerter prozentualer Anstieg an der Gesamtproduktion zu erkennen. Im Jahr 1981 betrug die Produktion aus Laugungsprozessen rund 0,6 Mio. t und ist bis heute auf rund 3,3 Mio. t gestiegen. Im gleichen Zeitraum verdoppelte sich die Gesamtproduktion von Kupfer von ca. 8 Mio. t auf ca. 16 Mio. t.

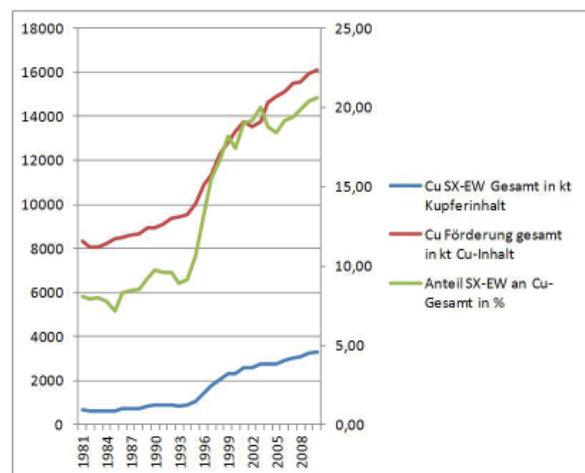


Abb. 1: Entwicklung der primären Kupferproduktion sowie des Laugungsanteils (chemische und biologische Laugung) in kt Cu und % (rechte Achse). SX-EW (Solvent Extraction-Electrowinning) ist ein Standardverfahren für die Erzeugung von Kathodenkupfer im Laugungsbergbau.

Innerhalb des Kupferlaugungsbergbaus ist es in diesem Zeitraum zu Verschiebungen gekommen. Die traditionelle Laugung von oxydischen Erzen mit verdünnter Schwefelsäure wird aufgrund abnehmender Ressourcen dieses Erztyps immer stärker durch die Biolaugung von sulfidischen Erzen ersetzt. Im Jahr 2010 stammten laut Datenbank- und Literaturrecherche rund 38 % des gelaugten Kupfers bzw. 8 % der primären Bergwerksförderung

Tab. 1: Identifizierte jährliche Kupferproduktion aus derzeit aktiven Projekten mit Biolaugungsprozessen, laut Datenbank- und Literaturrecherche, Stand 2010.

Kupferproduktion aus Biolaugungsprojekten				
Land	Projekt	Eigentümer	Prozess	Cu in t
Australia	Whim Creek	Venturex		4.000
Chile	Tres Valles	Vale SA	Heap Leach	18.500
China	Zijinshan Copper	Zijin Mining Group Co Ltd	Heap Leach	12.840
Chile	Andina Division	Codelco	Stockpile/Heap Leach	25.000
Chile	Escondida Sulf. Leach	BHP Billiton Group	Stockpile/Heap Leach	180.000
China	Huogeqi	Local Government	Heap Leach	20.000
Chile	Ivan Zar	Cia Minera Milpo SA	Heap Leach	10.000
Chile	Los Bronces	Anglo American plc		50.000
Chile	Quebrada Blanca	Teck Resources Ltd	Heap Leach	85.000
Chile	Spence	BHP Billiton Group		120.000
Chile	Rodomiro Tomic	Codelco	Heap Leach	100.000
Chile	Collahuasi	Xstrata Plc		60.000
Chile	Cerro Colorado	BHP Billiton Group	Heap Leach	100.000
Chile	Andacollo	Teck Resources Ltd	Dump Leach	10.000
Chile	Zaldivar	Barrick Gold Corp		140.000
Chile	Chuquicamata	Codelco		20.000
USA	Morenci	Freeport-McMoran	Heap/Dump Leach	230.000
Peru	Cerro Verde	Freeport-McMoran	Heap Leach	66.000
Myanmar	Monywa	Rio Tinto, State of Myanmar	Heap Leach	9.000
gesamt				1.260.340

von Kupfer (Primärförderung 2010 15,7 Mio. t) aus der Biolaugung von sulfidischen Kupfermineralen (Tab. 1). Hierbei sind zum geringen Teil auch die Haldenlaugungsprozesse mit einbezogen, bei denen geringhaltige sulfidische Erze ohne weitere Zerkleinerung (run-of-mine) direkt nach dem Abbau einer Biolaugung unterzogen werden (dump bioleaching, z. B. in den USA). Da es zu letzterem aber überwiegend keine spezifischen Produktionszahlen gibt, existiert ein weiterer unbekannter, aber erheblicher Anteil an biologisch gelaugtem Kupfer. Dieser wird von einigen Autoren¹ als sehr hoch eingeschätzt. So sollen über 20 % der primären Bergwerksförderung von Kupfer mittels Biomining erzeugt werden.

Durch die Produktionsaufnahme des Großprojektes La Granja von Rio Tinto in Peru mit einer geplanten Jahresproduktion in Höhe von 300.000 t Cu aus Biolaugungs-

prozessen, sowie weiterer kleinerer Biolaugungsprojekte mit einer Gesamtproduktion in Höhe von 200.000 t Cu würde sich die Produktion aus der Kupferbiolaugung laut Datenbankrecherche bis 2014 gegenüber dem Stand 2010 um 40 % erhöhen.

Bei der Biolaugung von sulfidischen Erzen werden drei unterschiedliche Prozesse unterschieden:

- Haufen- oder Haldenlaugung (heap or dump bioleaching) von sekundären, meistens niedriggradigen Sulfiderzen, die Minerale wie Chalkosin (Cu_2S) und Covellin (CuS) enthalten,
- Haufenlaugung von niedriggradigen primären Kupfersulfiden wie z. B. Chalkopyrit (CuFeS_2),
- Rührwerkslaugung (stirred-tank bioleaching) von Kupferkonzentraten.

¹ Brierley 2008; Rawlings and Johnson 2007; Brandl 2001

Die Haufen- oder Haldenlaugung von sekundären Kupfererzen hat derzeit die größte Bedeutung bei der Biolaugung von Kupfer. Rund 80 % des biogelaugten Kupfers stammen aus Projekten mit sekundären Kupfererzen.

Außerdem wird zunehmend geringhaltiges Primärerz über Haufenlaugungsprozesse biologisch gelaugt. Vor allem Codelco und BHP-Billiton sind Vorreiter auf diesem Feld. Der derzeitige Anteil der Biolaugung von primären

Kupfererzen an der Gesamtbiolaugung von Kupfer dürfte bei rund 20 % liegen.

Für die Länder Chile und Peru, die zusammen 42 % der globalen Bergwerksförderung und 38 % der globalen Reserven an Kupfer besitzen, lässt sich ein Verhältnis des Kupferinhalts von oxydischen zu sulfidischen Erz in Höhe von rund 1 : 4 für peruanische und 1 : 3 für chilenische Lagerstätten ausrechnen (Tab. 2).

Tab. 2: Anteil von Oxid- und Sulfidkupfererz in peruanischen und chilenischen Kupferlagerstätten nach Sillitoe, 2005.

Deposit Name	Oxidised zone		contaned	Enriched zone		contained	Exotic Zone		contained	total
	Tonnage	Grade		Tonnage	Grade		Tonnage	Grade		
Peru										
Cerro Verde-Sana Rosa	85	1,1	0,9	270	0,8	2,2				3,1
Cuajone	24	1,3	0,3	75	1,5	1,1				1,4
Quellaveco				232	0,92	2,1				2,1
Toquepala				465	1,07	5,0				5,0
Chile										
Cerro Colorado	228	1	2,3	228	1	2,3	minor			4,6
Sagasca	unknown			unknown			44,5	1,72	0,8	0,8
Quebrada Blanca	4,5	1,08	0,05	166	1,36	2,3	minor			2,3
				211	0,44	0,9				0,9
Rosario (Collahuasi)	23	1,26	0,3	52	1,33	0,7	29	1,07	0,3	1,3
Ujina	39	1,22	0,5	150	1,71	2,6	minor			3,0
El Abra	836	0,5	4,2	minor			absent			4,2
Radomiro Tomic	850	0,62	5,3	180	0,93	1,7	4	0,96	0,0	7,0
Chuquicamata	506	1,56	7,9	2229	1,41	31,4				39,3
Mina Sur							409	1,22	5,0	5,0
Quetena	237	0,44	1,0	30	0,6	0,2	fairly minor	0,5		1,2
Toki	365	0,46	1,7	205	0,45	0,9	minor			2,6
Spence	79	1,18	0,9	230	1,14	2,6	minor			3,6
Mantos Blanco	154	1,04	1,6	minor			absent			1,6
El Tesoro	low grade			minor			256	0,87	2,2	2,2
Gaby	890	0,4	3,6	minor						3,6
Vicky							180	0,45	0,8	0,8
Lomas Bayas	615	0,31	1,9	minor			minor			1,9
Escondida Norte-Zaldívar	330	0,77	2,5	1280	1,24	15,9	absent			18,4
Escondida	219	0,63	1,4	1670	1,59	26,6	minor			27,9
El Salvador	41	0,62	0,3	340	1,5	5,1				5,4
Damiana							389	0,34	1,3	1,3
Turquesa							52	0,27	0,1	0,1
Potrerillos-San Antonio	184	0,91	1,7	126	1,1	1,4	minor			3,1
Mantoverde	212	0,63	1,3	minor			absent			1,3
Andacollo	absent			25	0,8	0,2	absent			0,2
Los Pelambres	minor			560	0,93	5,2	minor			5,2
Los Bronces	minor			170	0,96	1,6	absent			1,6
El Teniente	minor			956	1,68	16,1	absent			16,1
Gesamt	5921,5		39,5918	9850		127,9567	1363,5		10,6041	178,1526

Unter der Annahme, dass oxydisches Kupfererz normalerweise durch einen konventionellen chemischen Säureaufschluss aufbereitet wird, ist langfristig mit einem konventionellen Laugungsanteil an der Kupferproduktion in diesen beiden Länder von maximal rund 20 % in Peru und 28 % in Chile zu rechnen. Derzeit beträgt der Anteil der konventionellen Laugung an der chilenischen Kupferproduktion bereits rund 23 % und dürfte somit nur schwerlich weiter steigerbar sein. Der Anteil der Biolaugung am Gesamtlauungsaufkommen in Chile beträgt derzeit laut Recherche mindestens 42 % (918.500 t Cu von insgesamt 2.160.000 t Cu). Eine Steigerung des gesamten Laugungsanteils an Chiles Kupfergesamtproduktion ist also langfristig nur möglich, wenn der Anteil der Biolaugung sulfidischer Kupfererze weiter ausgebaut wird. In Peru stammen derzeit rund 15 % der Kupferförderung aus Laugungsprozessen. Der Anteil der Biolaugung an der Gesamtlauung von Kupfer in Peru macht derzeit laut Recherche in etwa ein Drittel aus. Es ist zu erwarten, dass der Laugungsanteil an der Gesamtförderung in Peru in Kürze weiter steigen wird. Die Steigerung kann hier sowohl durch die verstärkte Laugung von oxydischen Kupfererzen, als auch die Biolaugung von sulfidischen Erzen erreicht werden.

3.2 Neue Entwicklungen

Im Hinblick auf die abnehmenden Metallgehalte in den Erzen bzw. der zunehmenden Abbauteufe der bekannten, abbauwürdigen Lagerstätten werden klassische Aufbereitungstechniken (Zerkleinern, Flotation, Rösten und Schmelzen) an Bedeutung verlieren, sofern dies nicht durch Funde neuer Lagerstätten und/oder die Einführung alternative Abbauverfahren für steigende Betriebsgrößen, wie z. B. das Bruchbau-Abbauverfahren (siehe unten), kompensiert werden kann. Bei klassischen Aufbereitungstechniken nimmt der Energiebedarf umgekehrt proportional zu den Metallgehalten im Erz zu, d. h. bei sehr geringen Metallgehalten werden diese konventionellen Verfahren zunehmend unwirtschaftlich. Bei dem gleichzeitig prognostizierten dramatisch zunehmenden Bedarf an Metallrohstoffen, und dem Erschöpfen von oxydischen Erzen, wird daher die biohydrometallurgische Aufbereitung von sulfidischen Erzen eine wichtigere Rolle spielen. Da bei Kupfer die größten Reserven bei den primären Kupfersulfiden wie z. B. Chalkopyrit (CuFeS_2) liegen und deren Auflösung bei der üblichen Haldenbiolaugung mit mesophilen Bakterien im gemäßigten Temperaturbereich bislang nur eingeschränkt möglich ist, konzentriert sich die Forschung derzeit auf die Entwicklung neuer Biomining-Verfahren für primäre

Kupfersulfide. Ein hohes Kupferausbringen konnte bei der Biolaugung mit thermophilen Archaeen (Gattungen *Acidianus*, *Metallosphaera*, *Sulfolobus*) bei ca. 65 °C erzielt werden. Im Pilot- und Demonstrationsmaßstab befinden sich sowohl Tankbiolaugung als auch Haldenbiolaugung bei hohen Temperaturen, die an das Material und an die Prozessführung erhöhte Anforderungen stellen.

3.3 Perspektiven

Bruchbau-Abbauverfahren, wie z. B. der Blockbruchbau, bei der untertägigen Gewinnung von Kupfer aus porphyrischen Lagerstätten, stellen ein kostengünstiges Abbauverfahren dar, welches von den Kosten mit dem Abbau über Tage vergleichbar ist und daher auch bei niedrighaltigen Kupfererzen eingesetzt werden kann, insbesondere wenn die technisch wirtschaftliche Grenzteufe eines Tagebaus erreicht wird. Dies ist bei dem Bergwerk Grasberg, der Freeport-McMoran in Indonesien, das zu den größten Kupferbergwerken der Welt zählt, bereits der Fall und wird für den Übergang des Tagebaus Chuquicamata zum Untertagebetrieb von Codelco in Chile geplant.

Aufgrund der bei der Erzförderung aus dem abzubauenen Block zunehmenden Verdünnung mit Bergematerial, verbleiben rund 25 – 30 % des Erzes in dem Abbaublock (Abb. 2). Nach dem Abzug des Erzes, das bis zu einem berechneten cut-off Gehalt durchgeführt wird, verbleibt das mit Bergematerial vermischte Erz im Abbaubereich. Das Resterz ist hierbei durch die natürlichen Bruchvorgänge zerkleinert bzw. aufgelockert und ähnelt von seiner Struktur und dem Mineralbestand einer übertägigen Armerzhalde. Daher kann vermutet werden, dass der Alte Mann (der mit Gestein gefüllte Abbau-Hohlraum nach Beendigung der Gewinnung) für eine *in-situ* Laugung zugänglich sein wird. Das Unterschneiden des Abbaublockes mit Abzugstrichtern und Herrichtungsbauten würde bei einer *in-situ* Laugung des Haufwerks eine großflächige Drainage des Abbauraums ermöglichen, so dass die Lauge nach der Perkolation durch das Haufwerk konventionell in einem Kreislauf eingesetzt werden kann. Aufgrund der relativ geringen Kapital- und Betriebskosten wäre ähnlich wie bei der Haldenlaugung die zu erwartende langsame Reaktionsgeschwindigkeit des Biolaugungsprozesses nicht von größerem Nachteil. Die geothermisch bedingte Zunahme der Temperatur mit größerer Teufe und konstante Umweltbedingungen unter Tage könnten sogar förderlich für die Kinetik der Biolaugung sein. Der für die Reaktion erforderliche Sauerstoff müsste über Druckluft in das Haufwerk eingeblasen wer-

den. Die hierfür erforderliche Infrastruktur ist bei vielen Untertagebergwerken bereits vorhanden. *In-situ* (oder *in-place*) Biolaugung zur Kupfer- und Zinkgewinnung im Pilot- bzw. Demonstrationsmaßstab wurde bereits in Deutschland (Rammelsberg), Irland, Italien, Rumänien und Südafrika durchgeführt. Um Verluste und Umweltprobleme zu vermeiden muss bei Anwendung der *in-situ* Laugung eine Basisdichtung in das Bergwerk eingebracht werden.

Nach Kenntnis der BGR hat noch niemand den Einsatz der Biolaugung für die beim Bruchbauverfahren entstehenden Erzverluste in Betracht gezogen. Durch das Berücksichtigen einer *in-situ* Laugung bereits in der Planungsphase von großen Blockbruchbauprojekten könnte die Effektivität des Bergbaubetriebes weiter erhöht und die Ressourceneffizienz verbessert werden.

Das neue Untertagebergwerk Chuquicamata, das 2018 in Betrieb gehen soll, wird Blockbruchbau einsetzen um eine Tagesförderung in Höhe von 140.000 t Erz zu ermöglichen. Bei einem durchschnittlichen Gehalt des Erzes von 0,81 % Kupfer würde somit jährlich rund 350.000 t Kupferinhalt produziert werden. Bei einem angenommenen Abbauverlust von 30 % würden folglich pro Jahr 105.000 t Kupfer in vorgerichtetem Kupfererz in den abgebauten Blöcken verbleiben. Unter der Annahme eines bei der Biolaugung von Halden typischen Ausbringens in Höhe von 50 % könnten durch eine *in-situ* Nachlaugung zusätzlich über 50.000 t Kupfer pro Jahr gewonnen werden. Dies entspricht der jährlichen Förderung eines mittelgroßen Kupferbergwerks.

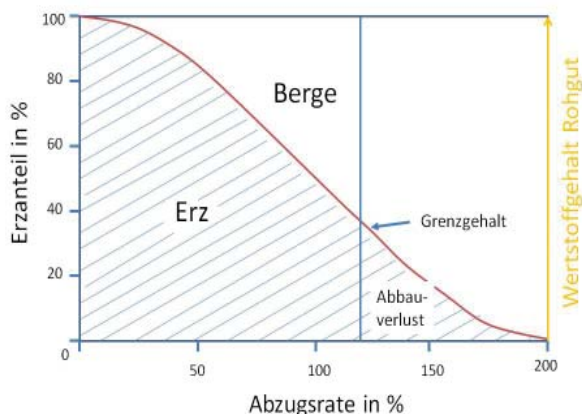


Abb. 2: Gewinnungsverluste beim Blockbruchbau durch zunehmende Verdünnung beim Erzabzug, nach S. v. Wahl, 1990.

Neben diesen mittel- und längerfristigen Entwicklungen beim Kupferbergbau ist bereits jetzt die Biolaugung bei Konzentraten interessant, die aufgrund von hohen Schadstoffgehalten (z. B. Arsen und Wismut), durch die ungünstige Zusammensetzung von polymetallischen Konzentraten, oder hohe Transportkosten der Konzentrate, keine Abnahme in regulären Kupferhütten finden.

Neuere Aktivitäten haben die Tür für eine Metallextraktion aus bergbaulichen Abgängen wie Aufbereitungsrückständen des Bergbaus (mine tailings) geöffnet. Im Falle der Aufbereitungsrückstände könnte Biomining zudem eine Option für eine biologische Sanierung (bioremediation) von Bergbauabfällen, die saure Grubenwässer produzieren, sein. Die Biolaugung bzw. Biooxidation sulfidischer Flotationskonzentrate in Tanks ist derzeit noch von relativ geringer Bedeutung und befindet sich im Pilotstadium. Die Machbarkeit wurde nicht nur für die Gewinnung von Kupfer sondern auch für eine Reihe weiterer Metalle wie Nickel, Gold, Silber und Uran gezeigt. Auch die Gewinnung von Elektronikmetallen wie Indium, Gallium und Germanium (BGR Commodity Top News Nr. 33) mittels Biolaugung von Sulfidmineralen konnte im Labor gezeigt werden.

4 GOLD

Gold wird im eigentlichen Sinne nicht biogelaugt, da es zu keiner Oxidation des bereits im metallischen Zustand befindlichen Goldes kommt. Biologisch oxidiert wird allerdings die sulfidische Eisen- und eventuell Arsen-Matrix, in dem sich das Gold, entweder eingebaut im Kristallgitter oder eingeschlossen als Partikel, befindet. Durch das Herauslösen der oxidierten mineralischen Bestandteile wird ein Aufschluss des vorher refraktären Goldes mit Hilfe von z. B. Zyanidlaugung ermöglicht.

Die Anzahl der sogenannten Biooxidationsprojekte im Goldbergbau hat seit den Anfängen in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts stark zugenommen. In den mindestens 16 aktiven Goldprojekten mit Biooxidation, die in der Projektdatenbank der Minerals Economic Group und mittels anderer Quellen identifiziert werden konnten (Tab. 3) wurden 2010 mindestens 90 t Gold und 161 t Silber produziert. Der Anteil des so produzierten Goldes an der Gesamtproduktion entspricht in etwa 3,5 % der globalen Förderung, die sich 2010 auf rund 2450 t belief. Zum Vergleich: die 444 Goldprojekte die in einem Haupt- oder Nebenprozess hydrometallurgisch

Tab. 3: Identifizierte Goldproduktion aus aktiven Projekten mit Biolaugungsprozessen, Jahresproduktion 2010.

Goldproduktion aus Projekten mit Biooxidation				
Land	Projektname	Eigentümer	Erzquelle	Au in oz
South Africa	Barberton	Shanduka Resources	Abgänge	98.000
Ghana	Bogoso-Prestea	Government of Ghana		280.000
Peru	Coricancha	Unnamed company	Abgänge	20.000
Australia	Fosterville	NuEnergy Capital Ltd		112.000
China	Jiaojia			55.000
China	Jinfeng	China National Gold Group Corp		150.000
Ghana	Obuasi	Anglogold Ashanti	Abgänge	400.000
Russia	Olimpiada		Erzhalde	839.000
Greece	Olympias	Aktor SA		235.000
New Zealand	Reefton	Royalco Resources Ltd		87.300
United States	Silver Valley			
Australia	Tasmania	BCD Resources NL		80.000
Australia	Wiluna	Franco-Nevada Corp		120.000
Kazakhstan	Suzdal	Nord Gold (Severstal)		72.000
Usbekistan	Kokpatas	Navoi Mining		353.000
China	Laizhou			
			Gesamt	2.901.300

Gold gewinnen, besitzen eine Gesamtproduktionskapazität in Höhe von rund 1950 t Gold. Der Anteil der Projekte mit einer Biooxidationsstufe im Aufbereitungsprozess würde daher bei den Projekten mit hydrometallurgischen Aufbereitungsverfahren rund 4,5 % betragen.

Da die leicht laugbaren, oberflächennahen, oxydischen Goldvorkommen in der Vergangenheit verstärkt im Abbau standen, ist davon auszugehen, dass in der Zukunft der Anteil der Goldförderung aus refraktären oder niedrighaltigen sulfidischen Erzen signifikant zunehmen wird. Viele der neu entwickelten, tiefer liegenden Goldvorkommen sind von ihrer Natur her als refraktär einzuschätzen, da das Gold eingekapselt in sulfidischen Mineralen vorliegt. Um diese refraktären Erze einer späteren Zyanidlaugung zugänglich zu machen, ist eine Vorbehandlung erforderlich, die eine Oxidation der Sulfide beinhaltet.

Lange Zeit war die Röstung der sulfidischen Erze das einzige technisch-wirtschaftlich Verfahren, um sulfidische Erze für eine Zyanidlaugung vorzubehandeln. Ein weiteres Verfahren, das vor allem für die Vorbehandlung von sulfidischen Reicherzen und Konzentraten wirtschaftlich

eingesetzt werden kann, ist die Druckoxidation in Autoklaven. Seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde die Biooxidation als alternative Vorbehandlung insbesondere für niedrighaltige sulfidische Golderze gangbar. Der Prozess der Biooxidation findet in einer Reihe von großen Tankreaktoren statt, in denen mehrere Faktoren wie Temperatur, pH, O₂ - und CO₂ - Versorgung kontrolliert werden. Damit lassen sich optimale Bedingungen für die Metallsulfide oxidierenden Bakterien schaffen und die Verweilzeiten im Bioreaktor auf wenige Tage begrenzen. Im Gegensatz zur Druckoxidation ist der Energieeinsatz bei der Biooxidation erheblich geringer, da lediglich Energie zum Belüften und Pumpen der Lösungen aufzuwenden ist.

Aus 13 neuen Projekten mit Biooxidationsprozessen, die sich derzeit in der Feasibility oder Prefeasibility-Phase der Umsetzung befinden, soll in den nächsten Jahren zusätzlich rund 26 t Gold pro Jahr mittels Einsatz von Biooxidationsprozessen erzeugt werden.

In der Biooxidation werden drei verschiedene Verfahren unterschieden

- die Biooxidation in der Haufenlaugung für niedriggradige, refraktäre Golderze,
- die Biooxidation in der Rührwerkslaugung von refraktärem Golderz mit höheren Gehalten an Gold,
- der Überzug von inertem Bergematerial mit sulfidischem Goldkonzentrat und dessen anschließende Laugung in belüfteten Tanks oder Erzhalden.

Biooxidation mit Tank-Rührwerkslaugung: Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Reaktionsrate aus. Allerdings sind die Kapital- und Betriebskosten im Vergleich zu den andern Verfahren wesentlich höher, so dass sich der Einsatz nur für hochgradige Golderze und -konzentrate rentiert.

Biooxidation in Haufen: Die Reaktionsrate ist relativ langsam (Monate bis Jahre für einen Erzhaufen), aber die Betriebskosten sind sehr niedrig. Nachteilig ist neben der hohen Zeit auch das im Vergleich zu den anderen Verfahren reduzierte Goldausbringen, das in der Regel nur zwischen 50 - 75 % liegt. Dies macht einen Einsatz nur für niedrighaltige sulfidische Golderze rentabel.

Biooxidation mit Dünnschichttechnologie (coating): Dieses Verfahren liegt bei den Leistungs- und den technisch-betriebswirtschaftlichen Parametern zwischen der Rührwerks- und Haufenlaugung.

5 NICKEL, KOBALT UND ZINK

Im Vergleich zur Kupferlaugung bzw. der Biooxidation von refraktären Golderzen stellt die Biolaugung von anderen Metallen wie z. B. Nickel, Kobalt und Zink eher die Ausnahme dar und wird bei diesen Rohstoffen nur dann eingesetzt, wenn die Rahmenbedingungen (niedrige Gehalte bzw. refraktärer Charakter des Erzes, Entlegenheit der Produktionsstätte) eine konventionelle Aufbereitung wirtschaftlich ausschließen. Ein Beispiel für die Haufenlaugung eines polymetallischen Erzes ist das Projekt Talvivaara in Finnland. Bei voller Produktion sollen hier durch biologische Haufenlaugung 50.000 t Nickel, 90.000 t Zink, 15.000 t Kupfer und 1.800 t Kobalt pro

Jahr aus geringhaltigen Erzen gewonnen werden. Damit könnte dieses Haufenlaugungsprojekt in 2012 etwa 3 % des weltweit produzierten primären Nickels liefern.

In einer Tankbiolaugungsanlage bei Kasese, Uganda, werden täglich 240 t Pyritkonzentrat zur Gewinnung von Kobalt, Kupfer, Nickel und Zink oxidiert, dabei werden etwa 1.100 t Kobalt pro Jahr produziert. Dies sind rund 1,25 % der Weltproduktion an Kobalt, die 2010 rund 88.000 t betrug.

6 URAN

Bei der chemischen *in-situ* Laugung von Uran wird in Abhängigkeit von den säureverbrauchenden Charakteristiken des Nebengesteins entweder ein Säureaufschluss oder ein alkalischer Aufschluss des Uranerzes in der Lagerstätte vorgenommen. Hierzu wird eine oxidierende, mit Komplexbildungsmitteln versehene Lösung über Bohrlöcher in die Lagerstätte eingebracht und die mit Uran angereicherte Lösung wieder über Tage zur weiteren Verarbeitung gefördert.

Die *in-situ* Biolaugung von Uranerz ist ein relativ neues Verfahren, bei dem direkt in der Lagerstätte unlösliches UO_2 mittels Mikroorganismen wie *Acidithiobacillus ferrooxidans* zu wasserlöslichen Uranyl-Ionen (UO_2^{2+}) oxidiert wird. Uran(IV) wird dabei zu Uran(VI) oxidiert indem in einer Redoxreaktion Fe(III) zu Fe(II) reduziert wird. Das Oxidationsmittel Fe(III) für UO_2 wird durch die mikrobielle Eisen(II)oxidation erneut bereit gestellt.

Die Kapazität der weltweit rund 30 aktiven Uran *in-situ* Laugungsprojekte liegt bei 34.000 t Uraninhalt, also einem Drittel der weltweiten Produktionskapazität für Uran. Die *in-situ* Laugung von Uran ist mit einem Ausbringen von 70 – 80 % als sehr effektiv einzuschätzen. Umweltprobleme bei der *in-situ* Laugung können durch unkontrolliertes Versickern der Lösung entstehen. In Deutschland wurde bis 1990 von der Wismut Uran sowohl mittels *in-situ* (Königstein) als auch mittels Haldenlaugung (Ronneburg) biologisch gewonnen.

7 SILIKATISCHE, CARBONATISCHE UND OXIDISCHE ERZE

Eine biotechnologische Aufbereitung silikatischer, karbonatischer und oxidischer Erze gibt es bislang nicht im industriellen Maßstab. Anwendungspotentiale liegen z. B. bei der Gewinnung von Aluminium und Lithium aus Spodumen, Kobalt und Nickel aus Lateriten, oder Kobalt, Nickel, Kupfer und Mangan aus polymetallischen Tiefseeknollen (Manganknollen). Eine Biolaugung solcher Erze mittels heterotropher Bakterien und Pilze konnte im Labormaßstab gezeigt werden. Diese Mikroorganismen benötigen allerdings (anders als die autotrophen Metallsulfide oxidierenden Bakterien und Archaeen) die Zugabe von organischem Kohlenstoff (z. B. aufbereitete Abfälle der Landwirtschaft oder der Lebensmittelindustrie). Dies macht die Prozessführung zum einen aufwendig, zum anderen können unerwünschte Mikroorganismen in diesen nicht steril zu betreibenden Verfahren störend wirken. Eine neue Perspektive für die Aufbereitung silikatischer, karbonatischer und oxidischer Erze bietet die kürzlich im Labor entwickelte anaerobe Biolaugung (*Ferredox process*). Hierbei wird *Acidithiobacillus ferrooxidans* eingesetzt, der unter Ausschluss von Luftsauerstoff (anaerob) zugesetzten Schwefel oxidiert, Fe(III) reduziert und dabei gleichzeitig z. B. Laterite in Lösung bringt.

8 METALLRECYCLING

Industrielle Rückstände wie Flugaschen der Abfallverbrennung, Schlacken, Galvanikschlämme, Elektronikschrott etc. lassen sich, wie im Labor- bzw. Pilotmaßstab gezeigt, ebenfalls entweder mit autotrophen Mikroorganismen (*Acidithiobacillus*) und/oder heterotrophen Mikroorganismen aufbereiten. Auch die Extraktion von Metallen aus Abwässern des Bergbaus und der Industrie mittels biotechnologischer Verfahren (Bioremediation/Biosorption) wird bereits angewandt. Einige Mikroorganismen haben zudem die Fähigkeit Nanopartikel aus reinen Metallen oder Metallverbindungen zu bilden (Biominalisation).

9 FAZIT

Biomining wird industriell zunehmend zur Gewinnung von Kupfer und Gold, aber auch von Nickel, Kobalt, Zink und Uran eingesetzt. Halden- und Haufenbiolaugung und Tankbiolaugung (bzw. Biooxidation) sind die wichtigsten Verfahren. Das Bruchbau-Abbauverfahren in Kombination mit *in situ* Biolaugung könnte zukünftig für die Kupfergewinnung eine große Rolle spielen, ebenso die Biolaugung primärer Kupfersulfide mit thermophilen Archaeen. Zur Biolaugung von Elektronikmetallen sowie Bergbau- und Industrieabfällen (mine tailings, Aschen etc.) existieren vielversprechende Labor- und teilweise Pilotverfahren. Der neu entwickelte *Ferredox process* (anaerobes Bioleaching) ermöglicht die Aufbereitung von Lateriten und oxidischen Erzen wie Manganknollen.

10 LITERATUR

- BOSECKER K. 1997. Bioleaching. Metal solubilization by microorganisms. FEMS Microbiol. Rev. 20: 591-604.
- BRANDL H. 2001. Microbial leaching of metals. In: Rehm HJ et al. (eds.), Biotechnology, Vol. 10, Wiley-VCH, pp. 191-224.
- BRIERLEY CL. 2008. How will biomining be applied in future? Trans. Nonferrous Met. Soc. China 18: 1302-1310.
- BROMBACHER C., BACHOFEN R., BRANDL H. 1997. Biohydrometallurgical processing of solids: a patent review. Appl. Microbiol. Biotechnol. 18: 577-587.
- DONATI ER., SAND W. (eds.). 2007. Microbial Processing of Metal Sulfides. Springer.
- DONATI ER. et al. (eds.). 2009. Biohydrometallurgy: a meeting point between microbial ecology, metal recovery processes and environmental remediation. Advanced Materials Research, Vol. 71-73, Trans Tech Publications, Schweiz.
- EDELSTEIN DL. 2011. 2009. Minerals Yearbook – Copper, U.S. Geological Survey, July 2011; <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/myb1-2009-coppe.pdf>
- RAWLINGS DE., JOHNSON DB. (eds.). 2007. Biomining. Springer.
- RAWLINGS DE., DEW D., DU PLESSIS C. 2003. Biominalization of metal-containing ores and concentrates. Trends in Biotechnol. 21: 38-44.

- SCHIPPERS A. 2009. Biomining zur Metallextraktion aus Erzen und Abfällen. Advanced Mining Solutions - AMS Online 2009/1: 28-34.
- SCHIPPERS A., SAND W., GLOMBITZA F., WILLSCHER S. (eds.). 2007. Biohydrometallurgy: From the single cell to the environment. Advanced Materials Research, Vol. 20/21, Trans Tech Publications, Schweiz.
- SILLITOE RH. 2005. Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists. 723-768.
- v. WAHL S. 1990. Bergwirtschaft Band I, Verlag Glückauf, Essen.
- WATLING HR. 2006. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – a review. Hydrometallurgy 84: 81-108.

Hannover, den 13.12.2011

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Kontaktbuero-rohstoffe@bgr.de