

Stand und Perspektiven der biochemischen Wertstoffgewinnung

Dieser Vortrag wurde im November 1988 im Wissenschaftlich Technischen Zentrum der SDAG Wismut in Grüna bei Chemnitz anlässlich der Tagung: „20 Jahre Laugung in der SDAG Wismut“ gehalten und im Sonderheft: „Wissenschaftlich-Technische Information der SDAG Wismut“, Nr.4 (1989) S. 10 – 16 publiziert.

Inhaltsverzeichnis

Text	Seite
1. Einführung	2
2. Freisetzung von Metallionen durch die Tätigkeit autotropher Mikroorganismen	4
3. Laugung von Metallen durch heterotrophe Mikroorganismen	5
4. Prozesse der Metallakkumulation durch Mikroorganismen	7
4.1 Intrazelluläre Akkumulation durch spezifische Transportsysteme der Zelle	7
4.2 Extrazelluläre Akkumulation	8
4.3 Extrazelluläre Akkumulation durch Absonderung von Stoffwechselprodukten	9
5. Schlussfolgerungen	9
6. Literatur und Quellen	11

1. Einführung

Die Biotechnologie als Schlüsseltechnologie hält auch Einzug in die Gewinnung mineralischer Rohstoffe. Weltweit ist die Grundlagenforschung immer tiefer in die Lebensprozesse, insbesondere die molekularen Zusammenhänge, eingedrungen. Dabei wurden Vorgänge in und an der lebenden Zelle erkannt, die völlig neue Wirkprinzipien ermöglichen und z.T. Leistungen realisieren, die im Bereich anorganischer Wirkprinzipien nicht bekannt sind.

Die technische Nutzung dieser neuen Wirkprinzipien eröffnet Chancen zur Lösung wichtiger komplexer Probleme in den Bereichen:

- Gesundheit, durch neuartige Arzneimittel und Therapieverfahren,
- Ernährung, durch neuartige Methoden der Pflanzenzucht und Herstellung von Grundstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen landwirtschaftlicher Produktion, durch neue Methoden der Tierzucht, durch Herstellung von Futtereisweißen aus Erdölprodukten, durch Veredelung von Lebensmitteln für die menschliche Ernährung
- Umwelt, durch biotechnologische Reinigung von Abwässern, durch Sanierung von kontaminierten Böden, durch Entschwefelung von Abgasen
- Rohstoffgewinnung/Rohstoffversorgung, durch Laugung von Wertkomponenten aus Armerzen und durch biotechnologische Veredelung von Rohstoffen.

Angewandte biologische und biotechnologische Forschung kann für viele Fragen völlig neuartige Problemlösungen anbieten.

Dabei ist es wichtig, mehrere wissenschaftliche Disziplinen, wie Mikrobiologie, Genetik, Biochemie, Molekularbiologie und Ingenieurwissenschaften integriert anzuwenden, da nur eine interdisziplinäre Bearbeitung eine zunehmende Nutzung biologischer Systeme für die genannten Fragestellungen ermöglicht.

Für unsere Fragestellung (Rohstoffe), wo es gilt, die Wechselwirkungen zwischen Mikroorganismen, Wasser, Gestein und Mineral zu erkennen und technisch zu nutzen, ist selbstverständlich die Mitarbeit von Geologen, Mineralogen und Geochemikern ebenso notwendig wie die der Bergleute und Geotechniker.

Die bewusste technische Nutzung von Mikroorganismen zur Gewinnung mineralischer Rohstoffe und zur Rohstoffverbesserung ist, wenn wir es kritisch

betrachten, ein noch stärker zu entwickelnder Zweig innerhalb der angewandten Biotechnologie.

Die Ursachen für ein gewisses Zurückbleiben auf diesem Gebiet sind vielfältig. Eine Ursache sehe ich insbesondere in unserer so einseitig geprägten anorganischen Denkweise.

Als Geowissenschaftler ist es uns offensichtlich nicht genügend gelungen, tiefgründig und allseitig in die Gedanken des sowjetischen Geochemikers VERNADSKIJ (1972) einzudringen, der bereits vor dem 2. Weltkrieg sein Konzept von der überragenden Rolle der Biosphäre und ihrem Einfluss auf die Migration der Elemente und die besondere Rolle der Mikroorganismen in diesem Prozess entwickelte.

Gerade als Geowissenschaftler sollten wir es eigentlich am besten verstehen, in der Natur ablaufende Prozesse in ihrer komplexen Wirkweise aufzuklären, um schließlich Wirkprinzipien, die die Natur uns vormacht, in Technologien umzusetzen.

Grundlagenforschung und Anwendung ihrer Ergebnisse bei der mikrobiologischen Ver- und Bearbeitung mineralischer Rohstoffe nahmen und nehmen einen eigenartigen Verlauf.

Nachdem COLMER und HINKLE (1947) die Wirkung von Thiobacillus ferrooxidans bei Laugungsprozessen erkannten und TEMPLE und COLMER (1951) diese Bakterien im Jahr 1950 aus sauren Grubenwässern isolierten, folgte im Jahr 1958 das erste Patent für die bakterielle Cu-Laugung in den USA (USP 2.829.964). Seit dieser Zeit werden bis heute lediglich sulfidische Kupfererzlagerstättentypen (insbesondere des Typs „disseminated porphyry copper ores“) und Uran-Lagerstätten industriell mikrobiologisch gelaugt.

In der DDR fanden Anfang der 60er Jahre Versuche zur Laugung des Kupferschiefers mit Mikroorganismen an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität statt (SCHWARTZ und WAGNER, 1967). Da die Ergebnisse im ersten Zugriff nicht ermutigend waren, wurden allzusehr die Forschungen abgebrochen.

Gegenwärtig stehen wir vor einer neuen Situation. Die Grundlagenergebnisse der Mikrobiologie, gewonnen in den 70er Jahren, führten in den 80er Jahren zu beachtlichen Innovationsprozessen, insbesondere in solchen Anwendungsbereichen der Biotechnologie, wie Medizin, Pharmazie, Landwirtschaft und Nahrungsmittel.

Im Wettlauf mit der Zeit werden international hohe Investitionen für biotechnologische Grundlagenforschung getätigt. So beschloss Japan 1981 ein 10-Jahresprogramm, wofür 1,3 Mrd. DM aufgewendet werden. Großbritannien beschloss 1982 ein 4-Jahresprogramm zu 210 Mio. DM, die USA gaben 1982 511 Mio. US\$ aus, Frankreich steigerte von 275 Mio. DM im Jahr 1984 auf 320 Mio. DM im Jahr 1985. Die BRD gibt jährlich 1 Mrd. DM für biowissenschaftliche Grundlagenforschung aus. Das Programm zur Förderung bio-

technologischer Forschung wurde von 111,4 Mio. DM im Jahr 1984 auf rund 265 Mio. DM im Jahr 1989 gesteigert.

Um die den Mikroorganismen innewohnenden Potenzen zur Metall-Laugung und –Akkumulation aufzuzeigen, sei im Folgenden auf einige bisher bekannte Wirkprinzipien eingegangen, um damit im Zusammenhang stehende Probleme zu beleuchten.

2. Freisetzung von Metallionen durch die Tätigkeit autotropher Mikroorganismen

Der bakterielle Laugungsprozess durch autotrophe Mikroorganismen, insbesondere durch *Thiobacillus ferrooxidans* bzw. *thiooxidans*, ist der älteste bekannte Prozess. Diese Mikroorganismen realisieren Oxidationsreaktionen speziell des Sulfidschwefels zum Sulfatschwefel, des Fe^{2+} zum Fe^{3+} und des U^{4+} zum U^{6+} . Nahezu alle Metallsulfide sind laugbar, wobei Abhängigkeiten zur Kristallstruktur des Minerals bestehen. Der Mikroorganismus verfügt über relativ hohe Toleranzgrenzen seiner Lebensfähigkeit gegenüber Schwermetallen in der Lösung, womit er für Laugungsprozesse besonders geeignet ist.

Obwohl autotrophe Mikroorganismen sich bereits breiter Anwendung erfreuen, sind viele Fragen des Wirkprinzips, das sie realisieren, noch offen. Der Laugungsvorgang wird nur realisiert, wenn der Mikroorganismus direkt mit der Mineraloberfläche im Kontakt steht. Über die wirkenden Adsorptionskräfte gibt es verschiedene Vorstellungen:

1. Eine Hypothese geht von der Wirkung elektrostatischer Kräfte zwischen der meist positiv geladenen Oberfläche des zu laugenden Minerals und der meist negativen Ladung der Oberfläche des Mikroorganismus aus. Dabei zeigt sich, dass die Oberflächenladung der Mikroorganismen artenabhängig und pH-Wert-abhängig ist (ZVAGINJSE, 1973; DAMASKIN u.a. 1968; RINDER, 1979).
2. Ein zweites Konzept zur Erklärung der Adsorption geht von der Wirkung oberflächenaktiver Stoffe aus, die der Mikroorganismus produziert (ZAJIK, 1969; YAGISAWA, 1978). Bisher ist aber nicht bekannt, welche oberflächenaktiven Stoffe in Frage kommen.

Noch ungenauer sind die Erkenntnisse über die direkte Einwirkung autotropher Mikroorganismen auf das Mineral und dem Vorgang der Freisetzung von Ionen in die Lösung.

- Eine Hypothese geht davon aus, dass die Mikroorganismen nur über die Oxidation elementaren Schwefels, der als festes Produkt der sulfidischen Oberflächenoxidation unter Mitwirkung von Fe^{3+} entsteht, die Freisetzung von Kationen ermöglicht.

- Eine zweite Hypothese geht davon aus, dass die Mikroorganismen nur vorher (auf Grund von Gleichgewichtsreaktionen mit der wässrigen Lösung) aus dem Mineralverband herausgelöstes S^{2-} und Fe^{2+} -Ionen oxidieren können (DUGAN u.a., 1971).
- Eine dritte Hypothese geht davon aus, dass Enzyme der Mikroorganismen gemeinsam mit Fe^{3+} wirken, um den Sulfiden die Elektronen zu entziehen. Der Elektronentransport erfolgt durch Proteinsysteme der Mikroorganismen über die cytoplasmische Membran zur Zellwand. Das Zellinnere ist nicht an den Reaktionen beteiligt. Art und Struktur dieser hier wirkenden Enzyme sind noch weitestgehend unbekannt, so dass eine bewusste Steuerung der Prozesse erschwert ist (PANNIN, KARAVAILO u.a., 1985).

Verschiedentlich wird gegenwärtig die Meinung vertreten, dass das Potential der autotrophen Mikroorganismen für die Metalllaugung ausgeschöpft sei, das sie im Wesentlichen nur für die Laugung von Sulfiden und Uranium in Frage kommen. Gleichzeitig wird auf die vielfältigen Möglichkeiten der heterotrophen Mikroorganismen verwiesen, denen man ganz ohne Zweifel große Aufmerksamkeit schenken muss, ohne die autotrophen zu vernachlässigen. Da der Kontakt der autotrophen Mikroorganismen mit dem Mineral geradezu lebensnotwendig ist, verfügen sie über eine prinzipielle Eigenschaft, die sie für Laugungsprozesse in-situ besser geeignet erscheinen lassen als die heterotrophen. Natürlich erkennen wir auch die Einschränkungen der Anwendung autotropher Mikroorganismen insbesondere bei karbonatischer Matrix. Gleichzeitig konnten wir im Rahmen unserer Arbeiten an der Bergakademie nachweisen, dass solche Elemente, die in Silikaten auf Gitterpositionen des 2-wertigen Eisens sitzen, durch autotrophe Mikroorganismen ausgezeichnet in Lösung gebracht werden können.

Diese Erkenntnisse ermutigen uns, das Potential der autotrophen als durchaus noch nicht erschöpft anzusehen und insbesondere die Wechselbeziehungen zwischen Laugbarkeit und Bindungsart der zu laugenden Elemente weiter zu untersuchen.

3. Laugung von Metallen durch heterotrophe Mikroorganismen

Während die autotrophen Mikroorganismen ihren für das Leben notwendigen Kohlenstoff aus dem CO_2 der Luft beziehen, gewinnen die heterotrophen ihren Kohlenstoff aus organischen Verbindungen, z.B. Glucose. Man muss sie also ernähren. Das kostet nicht nur Geld, sondern stellt erhöhte Anforderungen an die Einhaltung der Parameter zur Aufrechterhaltung des Systems. Dieser Nachteil wird z.T. aufgewogen durch die Tatsache, dass heterotrophe Mikroorganismen sulfidische, oxidische, karbonatische und silikatische Matrix zu laugen vermögen.

Das Wesen des Laugungsvorganges bei heterotrophen Mikroorganismen besteht in der Produktion organischer Stoffwechselmetabolite, wie Citronensäure, Oxalsäure, Milchsäure, Gluconsäure u.a., die als Zwischen- oder Endprodukt „unvollständiger Oxidation“ ins Medium ausgeschieden werden und durch Salz- oder Komplexbildung eine Mobilisierung der Metalle bewirken (BOSECKER, K., 1984).

Diese Stoffwechselprodukte haben zweifache Wirkung auf den Laugungsprozess:

- Die organischen Säuren realisieren eine chemische Laugung. Auf Grund hoher Komplexbildungskonstanten ist sie z.T. wirksamer als die Laugung mit anorganischen Säuren.
- Die organischen Säuren verändern durch Komplexbildung der gelösten Metalle deren Verhalten.

Eine Reihe von wichtigen Parametern beeinflusst in entscheidendem Maße den Laugungsprozess durch heterotrophe Mikroorganismen (ECKHARDT, 1979). So sind, je nach Mikroorganismen-Art, die pH-Wertbereiche z.T. in einem breiteren Feld variabel als bei autotrophen. Dies ist als Vorzug der heterotrophen Mikroorganismen zu bewerten.

Großen Einfluss auf die Wirksamkeit der Mikroorganismen haben die chemische Zusammensetzung und die Struktur der Minerale. So wirken sich hohe Kalium-Gehalte stimulierend auf die Säureproduktion aus, während Kalzium mit den meisten organischen Säuren schwerlösliche Verbindungen wie Oxalate, Citrate, Gluconate und Phosphate bildet und somit die Säure ihren eigentlichen Aufgaben entzieht. Wie wir bei unseren eigenen Versuchen feststellen konnten, wird durch Anwesenheit von Magnesium die Säureproduktion zu Gunsten schwacher Komplexbildner auf Kosten starker Komplexbildner, wie Citronensäure, verschoben. Da Kalzium und Magnesium in natürlichen Systemen immer zur Verfügung stehen, ergeben sich einige prinzipielle Schwierigkeiten der in-situ-Anwendung heterotropher Organismen. In Umgehung dieser Schwierigkeiten bieten sich für die technische Nutzung eine „Zweischritt-Technologie“ an, dabei produzieren die Mikroorganismen im 1. Schritt in einem Bioreaktor unter optimal gesteuerten Lebensbedingungen das gewünschte Stoffwechselprodukt. Im 2. Schritt wird dann das Stoffwechselprodukt dem zu laugenden Material zugeführt. Gegenwärtig lässt sich für ein solches Zweischritt-Verfahren noch keine ökonomisch vertretbare Variante der Laugung erkennen.

Diese Feststellung sollte uns nicht dazu verleiten, Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet einzustellen. Vielmehr sollte die Suche nach weiteren neuen biologischen Wirkungen, insbesondere hinsichtlich der Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen, vorangetrieben werden. Es sei hier nur darauf hingewiesen, dass zahlreiche Enzyme noch stabilere Komplexe mit Schwermetallen bilden als organische Säuren, womit der Weg hinein in die Enzymtechnik schon vorgezeichnet ist.

4. Prozesse der Metallakkumulation durch Mikroorganismen

Für die Nutzung von Mikroorganismen in der Montanindustrie bieten sich weitere biochemische Wirkprinzipien an, die in Zukunft noch mehr Beachtung in unserer Forschung erhalten sollen.

Es handelt sich um Prozesse der

- Akkumulation,
- Methylierung,
- Reduktion und Oxidation und der
- Mineralisation von Organometallverbindungen.

International wird eingeschätzt, dass hier die größte wirtschaftliche Bedeutung überhaupt liegt, wobei speziell Fragen des Umweltschutzes biotechnologischen Lösungen zugeführt werden sollen.

Die Akkumulation von Schwermetallen und ihrer Verbindungen erfolgt über verschiedene Formen:

1. intrazellulär, durch ein spezifisches Transportsystem der Zelle,
2. extrazellulär, durch die anionische Wirkung der Zelloberfläche und durch freie funktionelle Gruppen der Zellwand,
3. extrazellulär, durch Absonderung von Stoffwechselprodukten.

Die letzten beiden Akkumulationsformen treten bei lebenden und nicht lebenden Organismenarten auf.

4.1 Intrazelluläre Akkumulation durch spezifische Transportsysteme der Zelle

Die intrazelluläre Aufnahme von Kationen durch ein spezifisches Transportsystem führt zu einer selektiven Konzentration von essentiellen und Spurenelementen. Magnesium ist das häufigste intrazelluläre divalente Kation, es wird durch ein energieabhängiges Transportsystem in die Zelle gebracht. Die Elemente Ni, Co und Zn nutzen offensichtlich den gleichen Weg. Auch Uranium scheint diesen Weg benutzen zu können. Versuche mit *Pseudomonas aeruginosa* (FRITZSCHE, 1985) weisen auf die enorme Leistungsfähigkeit hin. In der Zelle wurden binnen 60 sec. aus einer Lösung mit 0,1 g U/l Uran-gehalte akkumuliert die 15 % der Trockenmasse entsprachen.

Derartige Leistungen sind aus anorganischen Systemen unbekannt. Die intrazelluläre Akkumulation scheint elementspezifisch zu sein.

4.2 Extrazelluläre Akkumulation

Im Gegensatz zur energie- und temperaturabhängigen Aufnahme von Metallkationen des vorgenannten Prozesses, ist die passive Koordination von Kationen an der negativ geladenen Oberfläche von Organismen schnell, reversibel und unabhängig vom Energiegehalt.

Die Oberflächen der Zellen sind stark negativ geladen und binden die Kationen einerseits durch elektrostatische Kräfte, andererseits durch freie Bindungsstellen in der Zellmembran. Als mögliche Bindungsstellen (NORBERG, 1984) kommen die freien Carboxylgruppen des Peptidoglycans und in geringerem Maße Zuckerhydroxylgruppen und Aminogruppen der Peptidketten in Frage. Auch Phosphodiestergruppen können Metallkationen chelatisieren. Auf diese Weise ergibt sich eine enorme Vielfalt von Bindungsmöglichkeiten.

So hat die Biosorption von Radionukliden durch nicht lebende Pilzbiomasse von *Rhizopus arrhizus* bemerkenswerte Resultate gezeigt. Die Aufnahme von 170 mg Th/g TM bzw. 180 mg U/g TM weist auf die enorme Leistungsfähigkeit hin.

Die Uranium-Adsorption (TSEZOS, 1982) wird in diesem Fall als ein Dreistufenprozess beschrieben. Zunächst wird Uranium durch die Chitinmoleküle in der Zellwand komplexiert. Das so akkumulierte Uranium dient als Kern einer weiteren Desorption. In der dritten Stufe kommt es durch Hydrolyse des Uranium-Chitin-Komplexes zur Ausfällung des Hydrolyseproduktes in der Zellwand. Die dabei frei werdenden Amine des Chitins komplexieren erneut Uranium.

Untersuchungen (MANN, 1984 und 1985) zur Anlagerung von Uranium an die grünen Frischwasseralgen *Ankistrodesmus* und *Selenastrum* führten zur Abscheidung kubischer Uranium-Minerales aus einer 2 ppm Uran-führenden Lösung. In der Trockenmasse wurden 1.000 bis 10.000 ppm U nachgewiesen.

Übereinstimmend kann festgestellt werden, dass es hinsichtlich der Akkumulation an der Zellwand für einzelne Mikroorganismenarten spezifische Aufnahmemechanismen gibt. Es scheint keine selektiven Vorgänge für einzelne Elementarten zu geben, meist wird unselektiv akkumuliert. Einflussfaktoren auf die Akkumulation wie Polarisierung, Ionenstärke, Ionenradius, pH-Wert, Essentialität und Konzentration sind bisher in ihrer komplexen Wirkung noch nicht untersucht. Die guten Erfahrungen, die das IBT Leipzig (GLOMBITZA, 1984) auf dem Gebiet der Akkumulation von Hg und Cd gesammelt hat, sollten ermutigen, auf diesem Gebiet die Forschung energischer voranzutreiben. Speziell sind Methoden zur Rückgewinnung aus der Biomasse zu entwickeln.

4.3 Extrazelluläre Akkumulation durch Absonderung von Stoffwechselprodukten

Interessante Möglichkeiten bieten Vorgänge der extrazellulären Akkumulation durch Absonderung von Stoffwechselprodukten. Hier sind einerseits die Methanobakterien ebenso die sulfatreduzierenden Bakterien zu nennen, die im anaeroben Bereich in der Lage sind, Schwermetalle als Sulfid zu fällen. Dieser Vorgang wird offensichtlich durch Ausscheidung einer Schwefelreduktase der Zellmembran realisiert.

Die technische Anwendung erfordert erheblichen apparativen Aufwand, sie zeichnet sich zugleich durch platzsparende Vorzüge aus.

Erfolgversprechende Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen sind die so genannten Exopolysaccharide, kurz EPS bezeichnet. Diese Polysaccharide bilden Kapselüberzüge (NORBERG, 1983) um die Zellen. Auf ihrer Basis scheint sich eine pH-Wert abhängige Akkumulation (SCOTT, 1986) und die Möglichkeit einer selektiven Desorption der Metalle von der Biomasse zu ergeben.

5. Schlussfolgerungen

Die vielfältigen Möglichkeiten, die sich aus den Wechselwirkungen von Elementen und den unterschiedlichen Arten der Mikroorganismen für die Metallanreicherungs- und Gewinnungsprozesse ergeben, stellen ein enormes Potential für die technische Nutzung dar. Um dieses Potential einer schnelleren technischen Nutzung zugänglich zu machen, sind in der Perspektive 5 Schwerpunkte zu beachten.

1. Auf dem Gebiet der mikrobiologischen Grundlagenforschung ist das Spektrum technisch interessanter Mikroorganismen zu erweitern. Verfahren zur Suche extremophiler Mikroorganismen, zur Isolierung, Auswahl und genetischen Veränderung von Mikroorganismen sind hier ebenso zu berücksichtigen, wie die Möglichkeiten der Konstruktion neuer Mikroorganismen durch Anwendung gentechnologischer Methoden. Arbeiten zur Aufklärung der genetischen Stabilität, zur Ökologie und Toxikologie sind hier ebenso bedeutsam, wie die Suche nach weiteren neuen biologischen Wirkungen insbesondere hinsichtlich der Stoffwechselprodukte der Mikroorganismen. Speziell geht es um die Aufklärung des Potentials der Zelle zur Produktion von Biokatalysatoren mit dem Ziel der Produktion von Enzymen zur Modifizierung von Rohstoffen und zur Wandlung von Abfallstoffen. Zusammen mit mikrobiologischen Schwerpunkten geht es ferner um die Aufklärung der Wechselwirkungen zwischen Mikroorganismen und dem geologischen Material, speziell den Mineralen. Hier sind einerseits die Zusammenhänge der Bindungsart der Elemente in den Mineralen und die Wirksamkeit der Mikroorganismen und andererseits zwischen Element-

konzentration und Elementeigenschaften in der Lösung und der Lebensfähigkeit der Mikroorganismen weiter aufzuklären.

2. Für unsere weitere Strategie auf dem Gebiet der Anwendung von Mikroorganismen in der Montanindustrie sollten noch stärker als bisher schon vorhandene Kenntnisse beachtet und genutzt werden. Da autotrophe Mikroorganismen ihre Lebensfähigkeit im direkten Kontakt mit dem Mineral realisieren, werden sie ihre Bedeutung für die in-situ-Laugung nicht nur beibehalten, sondern an Bedeutung gewinnen. Heterotrophe, auf spezielle Fähigkeiten separierte, bzw. genmanipulierte Mikroorganismen, realisieren ihre außergewöhnlichen Leistungen in einem sehr engen Feld ökologischer Bedingungen. Derartige Bedingungen sind nur in entsprechend ausgelegten Bioreaktoren einzuhalten. Für in-situ-Verfahren sind sie praktisch nicht geeignet.
3. Natürliche Ökosysteme (wie z.B. Böden), insbesondere aber künstliche Ökosysteme (wie z.B. Klärschlämme) weisen außerordentliche Fähigkeiten der Metallakkumulation auf. Derartige Systeme sollten verstärkt aufgeklärt und einer bewussten Nutzung zugeführt werden.
4. Verfahren der Laugung finden nur dann ihre erfolgreiche technische Realisierung, wenn die Durchsickerbarkeit des zu laugenden Materials gewährleistet ist. In das Ensemble der die Mikrobiologie begleitenden Arbeiten sind daher bergmännische, geologisch-tektonische und hydrogeologische Untersuchungen ebenso einzuordnen wie die Erarbeitung von Durchsickerungsmodellen. Auf diesem Gebiet liegen aus der bisherigen Zusammenarbeit zwischen der Bergakademie Freiberg und der SDAG Wismut gute Erfahrungen vor. In der nächsten Etappe muss das Durchsickerungsmodell mit dem Stoffgütemodell vereint werden.
5. Eine weitere Bedingung für die Anwendung von Laugungsverfahren ist die Fähigkeit, die Wertkomponenten möglichst effektiv aus den relativ niedrigen Konzentrationen der Laugungslösungen aufzukonzentrieren bzw. als Metall zu gewinnen. Das Einbinden derartiger Prozess-Stufen in bereits bestehende Technologien der Metallgewinnung sollte hier im Mittelpunkt stehen.

6. Literatur und Quellen

- BOSECKER, K.: Laugung von lateritischen Nickelerzen mit heterotrophen Mikroorganismen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 1984
- COLMER, A.R. and M.E. HINKEL: The role of the microorganism in acid mine drainage, a preliminary report. *Science*, Washington, 106 (1947) 253 – 256
- DAMASKIN, B.B.; O.A. PETRI and V.V. BATRAKOV: Adsorption of organic substance on electrodes. Nauka, Moscow, 1968
- DUGAN, P.R. and C.I. RANGLES: Acid Mine Drainage Formation and Abatement. Ohio State Univers. Res. Found, 1971
- ECKHARDT, F.E.W.: Über die Einwirkung heterotropher Mikroorganismen auf die Zersetzung silikatischer Minerale. *Z. Pflanzenern. Bodenkunde*, Weinheim 142 (1979)
- GLOMBITZA, F.: Verfahren zur mikrobiellen Quecksilberentfernung. DD-Patent 225443A1 v. 21.03.1984
- MANN, H. and W.S. FYFE: An experimental study of algal uptake of U, Ba, V, Co, Ni from dilute solutions. *Chemical Geology* 44 (1984) 385 – 398
- MANN, H. and W.S. FYFE: Uranium uptake by algal: experimental and natural environments. *Can. J. Earth Sci.* 22 (1985) 1899 -1903
- NORBERG, A. and S.C. RYDIN: Development of a continuous process for metal accumulation by *Zoogloea ramigera*. *Biotechnol. Bioeng.* 26 (1984) 265 – 268
- NORBERG, A.: Production of extracellular polysaccharide by *Zoogloea ramigera* and its use as an adsorbing agent for heavy Metals. PhD. Thesis. Lund Univ. Lund, Sweden (1983) 42 S.
- PANNIN, V.V.; KARAVAIKO, S.I. POLKIN: Mechanism and Kinetics of bacterial oxidation of sulphide minerals. *Biotechnology of metals*, Moscow, 1985
- SCHWARTZ, W. und M. WAGNER: Geomikrobiologische Untersuchungen. *Zeitschr. f. Allg. Mikrobiologie*, Berlin 7 (1967) 33 – 52
- SCOTT, J.A.; S.J. PALMER and J. INGHAM: Dekontamination fließender Cd-haltiger Ströme durch Biomasseadsorption. *Int. Chem. Eng. Symp. Ser.* 96 (1986) 211 – 231

TEMPLE, K.L. and A.R. COLMER: The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium: *Thiobacillus ferrooxidans*. J. Bacterial. ,Baltimore, 63 (1951) 605 – 611

TSEZOS, M. and B. VOLESKY: The mechanism of uranium biosorption by *Rhizopus arrhizus*. Biotechnol. Bioeng. 24 (1982) 385 – 401

WERNADSKJ. W.I.: Einige Worte über die Noosphäre. Zeitschrift Biologie in der Schule 6 (1972) 222 – 231

YAGISAWA, N.; L.E. MURR; A.E. TORMA; C.L. BRIERLEY (Eds.): Metallurgical Application of Bacterial Leaching and Related Microbiological Phenomena. Acad. Press, New York, 1969

ZVAGINJSE, D.P.: Interaction of microorganism with Solid Surface. Moscow State University, Moscow, 1973