



**DECHEMA**

Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.

# Geobiotechnologie

## Stand und Perspektiven

**Ein Statuspapier des Temporären Arbeitskreises  
Geobiotechnologie in der DECHEMA e.V.**



## IMPRESSUM

### Herausgeber

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

### Verantwortlich im Sinne des Presserechts:

DECHEMA e.V.

Dr. Kathrin Rübberdt

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Januar 2013

### Fotonachweis:

Abb. 2: Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0 via Wikimedia

Abb. 3, 5, 7, 13, 14: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Abb. 4: Gregor Borg, Universität Halle-Wittenberg

Abb. 6, 8, 9, 10: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft

Abb. 12: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UF

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>1. Biomining – Bergbau mit Bakterien</b>	<b>5</b>
<b>2. Bergbauhalden – Sanierung oder Wertstoffdepot?</b>	<b>10</b>
<b>3. Metall haltige Bergbauwässer – Vermeidung, Reststoff oder Rohstoff?</b>	<b>15</b>
<b>4. Rückstände aus Industrie und Umwelt – Aufbereitung mittels Geobiotechnologie?</b>	<b>23</b>
<b>5. Geomikrobiologie im Untergrund – Chancen für Geobiotechnologie</b>	<b>29</b>
<b>6. Stand der Ausbildung in der Geobiotechnologie</b>	<b>34</b>
<b>7. Übersicht von Internetadressen und weiteren Informationsquellen</b>	<b>42</b>
<b>Literatur</b>	<b>45</b>
<b>Liste der Autoren</b>	<b>49</b>

Nicht-nachwachsende Rohstoffe wie Metalle und fossile Energierohstoffe werden durch das weltweite Wachstum der Bevölkerung und der Wirtschaft in zunehmendem Maße benötigt. In absehbarer Zeit können sie durch nachwachsende Rohstoffe nicht oder nur teilweise substituiert werden. Aufgrund der Rohstoffsituation ist Deutschland bei Metallen, ausgewählten Chemierohstoffen und seltenen Erden, aber auch bei Energierohstoffen wie Erdöl und Kohle weitgehend auf Importe angewiesen. In Deutschland und Europa wird deshalb dem Thema Rohstoffeffizienz und einer umweltgerechten Gewinnung und Verarbeitung einheimischer Rohstoffe sowie dem Recycling von Rohstoffen eine hohe Bedeutung beigemessen. Die Geobiotechnologie kann hier einen wichtigen Beitrag leisten.

Die Geobiotechnologie befasst sich im Wesentlichen mit dem Einsatz mikrobieller Verfahren in Bergbau und Umweltschutz. Mikroorganismen steuern einen großen Teil der natürlichen biogeochemischen Stoffkreisläufe. So können sie bei Bildung und Alteration von Metall-, Öl-, Kohle- und Phosphatlagerstätten eine maßgebliche Rolle spielen. Die vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen Mikroorganismen und Rohstoffen in bergbauspezifischen Ökosystemen bilden die Grundlage für eine effiziente Rohstoffgewinnung mittels Biomining (Biolaugung, Bioextraktion, Biomineralisation) oder „Microbial Enhanced Oil and Gas Recovery“ (MEOR) sowie für Sanierungsmaßnahmen im Bergbau (Bioremediation). Die mikrobiellen Prozesse lassen sich auch zum Rohstoffrecycling einsetzen. Darüber hinaus befasst sich die Geobiotechnologie mit biogeochemischen Prozessen im tiefen, geologischen Untergrund, der technisch zur Lagerung von Rohstoffen und Abfällen oder geothermisch genutzt wird.

Im Jahr 2011 wurde innerhalb der DECHEMA e.V. der Temporäre Arbeitskreis Geobiotechnologie gegründet mit dem Ziel, die in Deutschland (und Europa) laufenden Aktivitäten in der Geobiotechnologie zu bündeln und Anstöße für weitere Entwicklungen zu geben. Das vom Arbeitskreis erstellte vorliegende Statuspapier fasst den Stand der Geobiotechnologie mit Schwerpunkt Deutschland zusammen und gibt Empfehlungen zum Forschungsbedarf in der Geobiotechnologie.

**Prof. Dr. Michael Schlömann**  
TU Bergakademie Freiberg

**Prof. Dr. Axel Schippers**  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Hannover

# 1 Biomining – Bergbau mit Bakterien

A. Schippers, B. Dold, M. Drobe, F. Glombitza, J. Gutzmer, J. Ondruschka, W. Sand, J. Vasters, S. Willscher

## Einleitung

Seit rund 10.000 Jahren gewinnen Menschen Metalle aus Erzmineralen. Die Erzminerale der Metalle Kupfer, Nickel, Kobalt, Blei und Zink kommen in der Natur überwiegend als Metallsulfide vor. Metallsulfide sind unter normalen Umweltbedingungen sowie bei der Verwendung von schwachen Säuren unlöslich. Deshalb werden sulfidische Erze meist über Flotationsverfahren zu Konzentraten angereichert, aus denen durch pyrometallurgische Verhüttung Rohmetalle erschmolzen werden.

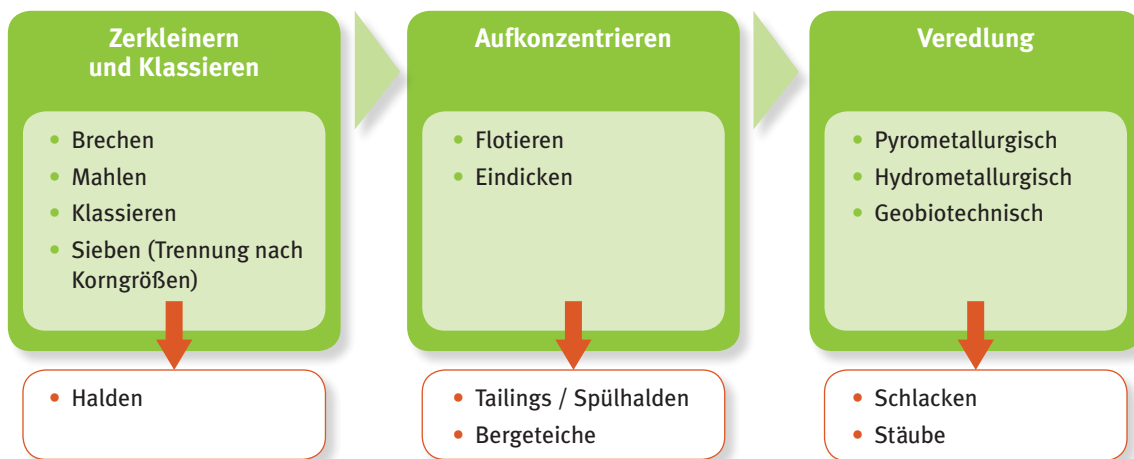


Abb. 1: Schematische Darstellung der Erzaufbereitung und der dabei anfallenden Nebenstoffströme

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 nennt man Biomining. Biomining ist eine etablierte Biotechnologie und wird auch in Europa angewendet.

Dass das Biomining sich in den letzten Jahren weltweit verbreitet hat, liegt an mehreren Faktoren: Zum einen gibt es Fortschritte in der Konstruktion von Anlagen, beim Aufbau und Betrieb von Haldenlaugungen sowie im Prozessdesign einschließlich der Anwendung. Zum anderen wächst das Wissen über die beteiligten Mikroorganismen und die Bedingungen, unter denen sie am besten arbeiten. So kann das Biomining inzwischen erfolgreich mit hydrometallurgisch-chemischen Verfahren 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 stammt aus der mikrobiellen Eisen(II)oxidation. Bei der Metallsulfid-Oxidation entstehen Schwefelverbindungen und elementarer Schwefel; sie werden durch die mikrobielle Oxidation zu Schwefelsäure umgesetzt, wodurch das saure Milieu



geschaffen wird. Während des Biolaugungsprozesses können je nach Sulfidgehalt des Erzes große Mengen an Eisensulfaten und gering konzentrierter Schwefelsäure anfallen, die im Rahmen der erforderlichen Entsorgung ausgefällt bzw. neutralisiert werden müssen. Eine Aufbereitung dieser Rückstände ist technisch bislang nur unzureichend realisiert.

Heute ist die Gewinnung von Kupfer aus Armerzen die wichtigste industrielle Anwendung von Biomining, wobei ein bedeutender Teil der Weltkupferproduktion bereits aus der Haufen- bzw. Haldenbiolaugung stammt. Außerdem wird Biomining auch zur Gewinnung von Gold, Kobalt, Nickel, Zink und Uran eingesetzt.

## Typen von Erzen:

**Primärerze:** entstanden im Zuge der Gesteinsbildung und haben noch keine Umwandlungsprozesse durchlaufen

**Sekundärerze:** bilden sich aus Primärerzen durch biogeochemische Verwitterungsprozesse oder Metamorphose

**Refraktäre Erze:** sind extrem widerstandsfähig und schwer aufzuschließen

**Armerze:** haben einen geringen Metallgehalt

**Supergene Anreicherungen:** bei Verwitterungsprozessen gehen Mineralien in Lösung, die oberflächennah in Form von Metallsalzen wieder ausfallen können

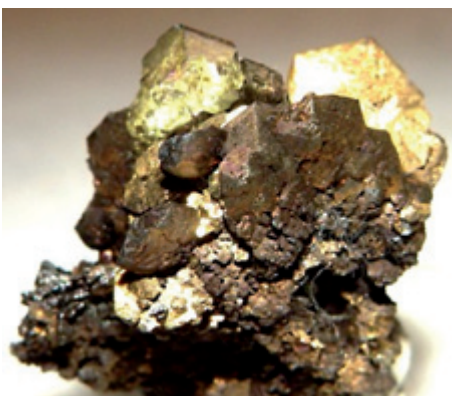


Abb. 2: Chalkosin, Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0

## Sulfidische Erze

Der größte Teil der weltweiten Kupfer- und Molybdän-Ressourcen ist in Porphyry-Lagerstätten gebunden; sie können auch Quelle von Gold, Silber, Zinn, Platin, Palladium und Wolfram sein. Dieser Lagerstättentyp ist an Subduktionszonen und vulkanische Inselbögen assoziiert. Daher finden sich die größten Lagerstätten in Regionen wie den Anden und Rocky Mountains oder Philippinen und Papua New Guinea. Momentan stammen 50-60 % der Weltproduktion von Kupfer und 95 % des Molybdäns aus diesem Lagerstättentyp. Haupterzminerale sind Kupfer-Eisen-Sulfide wie Chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ), Bornit ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), aber auch Enargit ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). Molybdän (als Molybdänit,  $\text{MoS}_2$ ) ist neben Gold ein wichtiges Koppelprodukt. In oberflächennahen Bereichen kommen supergene Anreicherungen vor, die durch das Auftreten von einfachen Kupfersulfiden (Chalkosin (Kupferglanz)-Digenit ( $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ ), Covellin ( $\text{CuS}$ )) charakterisiert sind. Die Erzgehalte sind relativ gering (0.2 -1.5 Gew.-% Kupfer), doch dank des enormen Volumens sind die Lagerstätten trotzdem sehr rentabel auszubeuten. Dabei entstehen jedoch auch riesige Mengen an Abraum, welcher generell die Tendenz hat, saure Grubenwässer (acid mine drainage) zu bilden.

Neben den Kupfer-Porphyry-Lagerstätten stellen sedimentgebundene polymetallische Lagerstätten die weltweit zweitwichtigste Quelle für Kupfer dar. Neben Kupfer enthalten sie eine Reihe wichtiger Koppelprodukte, insbesondere Silber, Kobalt, Blei und Zink. Wichtigste Beispiele für diesen Lagerstättentyp sind der zentralafrikanische Kupfergürtel in Sambia und der Demokratischen Republik Kongo sowie der Kupferschiefer des mitteleuropäischen Permbeckens vor allem in Polen und Deutschland. Haupterzminerale sind Kupfersulfide (Chalkosin) und auch Kupfer-Eisen-Sulfide (Bornit ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), wenig Chalkopyrit). Auch Kobalt, Zink und Blei treten in Sulfiden auf. Der Kupfergehalt beträgt bei diesem Lagerstättentyp zumeist 1-2 Gew.-%, mit sehr variablen Konzentrationen der Koppelprodukte.

## Biolaugung und Biooxidation

Grundsätzlich stehen zwei Verfahren zur Verfügung, zwischen denen man unterscheiden sollte: Beim industriellen Prozess der Biolaugung (bioleaching) wird ein unlösliches Wertmetallerz mittels Mikroorganismen in eine lösliche Form umgewandelt. Bei der Biooxidation schließt man überwiegend Gold aus refraktären Erzen in großen Tank-Biooxidationsanlagen für weitere Aufbereitungsschritte auf.

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

- » Haufen- oder Haldenlaugung (heap or dump bioleaching) von meistens niedriggradigen Sulfiderzen,
- » Rührwerkslaugung (stirred-tank bioleaching) von z.B. Kupferkonzentraten,
- » *In-situ-* (oder *in-place-*)Biolaugung von z.B. Uran.

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

Bei der *in-situ*-Biolaugung gewinnt man die Erze nicht bergmännisch, sondern laugt direkt in der Lagerstätte. Zur Kupfer- und Zinkgewinnung wurde diese Methode im Pilot- bzw. Demonstrationsmaßstab in Deutschland (Rammelsberg), Irland, Italien, Rumänien, Australien und Südafrika angewendet. Industriell wurde Uran in Kanada und am Wismut-Standort Königsstein mittels *in-situ*-Laugung gewonnen. Dabei wurden jeweils Erzblöcke unter Tage in der Lagerstätte abgetrennt und dort gelaugt. Eine direkte *in-situ*-Laugung, bei der die Laugungsflüssigkeit in die Erzlagerstätte gepresst wurde, wurde in Bulgarien durchgeführt. Um Verluste und Umweltprobleme zu vermeiden, muss bei Anwendung der *in-situ*-Laugung eine Basisdichtung in das Bergwerk eingebracht werden. Eine weitere Herausforderung ist es, die Laugungsprozesse im Fall der Stilllegung der Abbaustätte zu stoppen .

In der Biooxidation werden drei 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 Erzhalde.

Gold wird im eigentlichen Sinne nicht biogelaugt, denn es befindet sich bereits im metallischen Zustand und wird weder oxidiert noch reduziert. Biologisch oxidiert wird allerdings die sulfidische Eisen- und eventuell Arsen-Matrix, in der sich das Gold entweder eingebaut im Kristallgitter oder eingeschlossen als Partikel befindet. Durch das Herauslösen der oxidierten mineralischen Bestandteile wird ein Zugang zum vorher refraktären Gold ermöglicht.

## Kupfer

Im Jahr 2010 stammten laut Recherche der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mindestens 8 % der Primärförderung von Kupfer (Gesamtmenge 2010: 15,7 Mio. t) aus der Biolaugung von sulfidischen Kupfermineralen. Hierbei sind zum geringen Teil 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 überwiegend keine spezifischen Produktionszah-

### Haldenbiolaugung / Haufenbiolaugung

Die Erze werden aufgeschichtet und mit saurem Drainagewasser berieselt. Die Mikroorganismen, die in diesem Milieu natürlicherweise vorkommen, vermehren sich und die Laugungsprozesse kommen in Gang.

### Tankbiolaugung

Das zu laugende Material wird mit schwefelsaurem Wasser und Mikroorganismen in einem großen Tank gerührt.



Abb. 3: Bioleaching in Chile

len gibt, existiert ein weiterer unbekannter, aber erheblicher Anteil an biologisch gelaugtem Kupfer. Insgesamt wird der Anteil von Biomining an der primären Bergwerksförderung von Kupfer auf über 10 bis 20 % geschätzt.

### Nickel, Kobalt und Zink

Im Vergleich zur Kupferlaugung stellt die Biolaugung von anderen Metallen wie z.B. Nickel, Kobalt und Zink bislang eher die Ausnahme dar. 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 diese Haufenlaugung 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.

### Uran

Bei der *in-situ*-Biolaugung von Uranerz wird direkt in der Lagerstätte unlösliches  $UO_2$  zu wasserlöslichen Uranyl-Ionen ( $UO_2^{2+}$ ) mittels Mikroorganismen wie *Acidithiobacillus ferrooxidans* oxidiert. 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.

Autotrophe Organismen sind in der Lage, organische Substanz aus anorganischen Stoffen aufzubauen (z.B. durch Photosynthese). Heterotrophe Organismen benötigen organische Substanz.

Die Kapazität der weltweit rund 30 aktiven *in-situ*-Laugungsprojekte für Uran 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. Ein weiteres Risiko besteht darin, dass bei Vorhandensein ausreichender Substrate für laugende Mikroorganismen ( $FeS_2$ , Fe(II)) eine Laugung auch Jahrzehnte nach Produktionsende nur

schwierig abzustoppen ist, d.h. über lange Zeiträume eine weitere Gefährdung für Grund- und Oberflächenwasser besteht. In Deutschland wurde Uran bis 1990 von der SDAG Wismut sowohl mittels *in-situ*- (Königstein) als auch mittels Haldenlaugung (Ronneburg) biologisch gewonnen.

### Gold

In den derzeit mindestens 16 aktiven Goldprojekten mit Biooxidation wurden nach Angaben der BGR 2010 mindestens 90 t Gold und 161 t Silber produziert. Der Anteil des so gewonnenen Goldes an der Gesamtproduktion entspricht etwa 3,5 % der globalen Goldförderung, die sich 2010 auf rund 2.450 t belief. Zum Vergleich: die 444 Goldprojekte, bei denen in einem Haupt- oder Nebenprozess hydrometallurgisch Gold gewonnen wird, besitzen eine Gesamtproduktionskapazität von Gold in Höhe von rund 1.950 t.

### Silikatische, carbonatische und oxidische Erze

Bisher gibt es nur wenige Projekte zur biotechnischen Aufbereitung silikatischer, carbonatischer und oxidischer Erze im industriellen Maßstab. In der Slowakei wird Eisen bei der Kaolingewinnung mit Hilfe von heterotrophen Mikroorganismen entfernt, um die Materialqualität zu verbessern. Weitere Anwendungspotentiale liegen z.B. bei der Gewinnung von Aluminium und Lithium aus Spodumen ( $LiAl[Si_2O_6]$ ), Kobalt und Nickel aus Lateriten oder



Kobalt, Nickel, Kupfer und Mangan aus polymetallischen Tiefseeknollen (Manganknollen). Bedeutende Nickel-Lagerstätten des Laterittypes befinden sich hauptsächlich in subtropischen und tropischen Regionen. Aber auch im Sächsischen Grunulitgebirge sind Vorkommen von Nickellateriten mit 2% Nickel zu finden.

Im Labor konnte gezeigt werden, dass die Biolaugung solcher Erze mittels heterotropher Bakterien und Pilze grundsätzlich möglich ist. Diese Mikroorganismen benötigen die Zugabe von organischem Kohlenstoff (z.B. aufbereitete Abfälle der Landwirtschaft oder der Lebensmittelindustrie oder Biomasse (Algen)). Das macht die Prozessführung zum einen aufwändig, zum anderen können unerwünschte Mikroorganismen störend wirken, denn diese Verfahren sind nicht steril zu betreiben. Eine neue Perspektive für die Aufbereitung silikatischer, carbonatischer und oxidischer Erze bietet die kürzlich im Labor entwickelte anaerobe Biolaugung (Ferrodox process). Hierbei wird *Acidithiobacillus ferrooxidans* eingesetzt, der unter Ausschluss von Luftsauerstoff (anaerob) zugesetzten Schwefel oxidiert, Fe(III) reduziert und dabei gleichzeitig Laterite in Lösung bringt.

### Perspektiven

Die größten Kupferreserven liegen bei den primären Kupfersulfiden wie Chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ). Deren Auflösung ist bei der üblichen Haldenbiolaugung mit mesophilen Bakterien, die im gemäßigten Temperaturbereich arbeiten, bislang nur eingeschränkt möglich. Deshalb 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 Material und Prozessführung erhöhte Anforderungen stellen. Im Laborstadium befinden sich weiterhin vielversprechende Ansätze zur elektrochemisch kontrollierten Tank-Biolaugung von Chalkopyrit mit sehr hohem Kupferausbringen.

Industriell wird Biomining bislang lediglich in der Aufbereitung sulfidischer Erze und von Uranerz eingesetzt. Es existieren aber bereits biotechnische Laborverfahren zum Aufschluss silikatischer und oxidischer Erze. Der neu entwickelte Ferrodox-Prozess ermöglicht wahrscheinlich die Aufbereitung von Lateriten und oxidischen Erzen wie Manganknollen. Dabei wird eine organische Kohlenstoffquelle wie Glycerin oder günstiger Elementarschwefel oxidiert. Gleichzeitig reduziert *Acidithiobacillus ferrooxidans* im Mineral gebundenes Fe(III) zu löslichem Fe(II) in saurer Lösung. Wahrscheinlich gibt es in der Natur noch weitere, evtl. leistungsfähigere Mikroorganismen, die für anaerobes Bioleaching einsetzbar sind. Diese wurden bislang nicht gezielt gesucht und in Kultur genommen. Das Anwendungspotential für anaerobes Bioleaching muss noch erschlossen werden.

Inwieweit Biomining eine Perspektive zur Gewinnung seltener Erden und anderer Elektronikmetalle bietet, lässt sich gegenwärtig nicht abschätzen. Es besteht jedoch eine große Chance, dass Biomining als kostengünstiges Aufbereitungsverfahren einsetzbar ist.

### FORSCHUNGSBEDARF

- Upscaling vielversprechender Laborverfahren
  - Neue Biomining-Verfahren für primäre Kupfersulfide
  - Verfahren für den Aufschluss silikatischer und oxidischer Erze
- Ermittlung des Anwendungspotenzials für anaerobes Bioleaching
- Entwicklung neuer geobiotechnischer Verfahren zur Marktreife
- Analyse der Grenzflächenprozesse bei Bioleaching und Acid Mine Drainage / Acid Rock Drainage

## 2 Bergbauhalden – Sanierung oder Wertstoffdepot?

A. Schippers, G. Borg, F. Glombitza, M. Kalin, A. Kamradt, A. Kassahun, W. Sand, S. Willscher

### Einleitung

Im Harz, im Mansfelder Land, in Thüringen und im Erzgebirge wurden über Jahrhunderte Bergbau- und Hüttenhalden angelegt, um Abraum, minderwertiges Erz sowie Aufbereitungs- bzw. Verhüttungsrückstände wie Schlacken, Stäube und Schlämme zu entsorgen.



Abb. 4: Halden im Mansfelder Land

Diese Halden gefährden oftmals die Umwelt durch Emission von Stäuben und schadstoffhaltigen Sickerwässern. Vor allem bei sulfidischen Halden können durch mikrobielle und chemische Verwitterungsprozesse Sauerwässer mit teilweise sehr hohen Metallkonzentrationen freigesetzt werden (acid mine drainage). Andererseits beinhalten etliche, teilweise große Halden noch ein erhebliches Wertstoffpotential. Mit der Aufbereitungstechnologie zur Zeit ihrer Entstehung konnten Metalle wie Blei, Kobalt, Lithium, Molybdän, Nickel, Silber, Wolfram, Zink und Zinn, die in komplexen Erzen und/oder in geringen Gehalten vorliegen, nicht wirtschaftlich gewonnen werden. Außerdem enthalten sie Metalle wie Gallium, Germanium, Indium und Niob. Diese wurden damals nicht benötigt, heute werden sie in der Elektronikindustrie stark nachgefragt. Sie gelten aufgrund der begrenzten Bezugsquellen als strategische Rohstoffe. Indium und Gallium wurden beispielsweise bei der Zink- und Kupfererzverhüttung, Niob und Tantal bei der Zinnerzverhüttung und

Zinn bei der Blei-Zink-Verhüttung in den Schlacken angereichert. Halden im Mansfelder Land aus dem Kupferschiefer-Bergbau enthalten heute noch beträchtliche Gehalte an Kupfer und anderen Metallen. In Spülhalden (tailings) als Aufbereitungsrückstände der Flotation findet man oftmals noch nennenswerte Mengen von Metallen wie Silber, Blei, Lithium, Molybdän, Niob, Wolfram, Zink und Zinn. Die Metallgehalte in Bergbaurückständen sind in Deutschland teilweise höher als in primären, heute weltweit gewonnenen Erzen. Angesichts des steigenden Rohstoffbedarfs und der Verknappung strategischer Metalle ist es geboten, die sekundären Rohstoffquellen in Deutschland mit intelligenten Kombinationen von klassischen und neuen Aufbereitungstechnologien zu erschließen. Biomining als günstige Aufbereitungstechnologie kann hier eine Schlüsselstellung einnehmen.

### Biogeochemische Prozesse in Bergbauhalden

In Bergbaugebieten wurden Abraum und Aufbereitungsrückstände häufig ungesichert in Form von Halden und Bergeteichen gelagert. Die grobe Körnung des Materials ermöglicht den ungehinderten Zutritt von Luft und Niederschlägen. Unter diesen Voraussetzungen bildet sich aus Metallsulfiden durch Oxidation mit Luftsauerstoff unter Mitwirkung von Bakterien Schwefelsäure. Vorher gebundene, unlösliche Schwermetalle werden dabei gelöst. Die schwermetallhaltigen Sauerwässer (acid mine drainage oder acid rock drainage), die Umwelt, Pflanze, Tier und Mensch erheblich gefährden, können Grund- und Oberflächenwässer kontaminieren.

Mikroorganismen spielen bei der Entstehung von schwermetallhaltigen Sauerwässern in Abraumhalden des Bergbaus eine entscheidende Rolle. Pyrit wird mit Luftsauerstoff durch spezielle Bakterien zu Eisen(III) und

Schwefelsäure umgesetzt. Dieser Prozess heißt biologische Laugung. Bei neutralem pH-Wert, z. B. in Karbonat gepuffertem Haldenmaterial, wird Pyrit zunächst chemisch durch den Luftsauerstoff zu Eisen(III), Thiosulfat ( $S_2O_3^{2-}$ ), Polythionaten ( $SnO_6^{2-}$ ) und Schwefelsäure oxidiert. Thiosulfat und Polythionate werden von schwach säureliebenden, auf Schwefelverbindungen spezialisierte Bakterien (z. B. *Thiomonas intermedia*) zu Schwefelsäure oxidiert. Wenn das Neutralisationspotential des Haldenmaterials erschöpft ist, sinkt der pH auf Werte unter 4 ab, und die Löslichkeit von Eisen erhöht sich um mehrere Zehnerpotenzen.

Die chemische Oxidationsrate von Eisen(II) ist bei pH-Werten unter 4 um mehrere Zehnerpotenzen geringer als bei neutralem pH. Doch stark säureliebende Eisen(II)-oxidierende Bakterien der Arten *Leptospirillum ferrooxidans* und *Acidithiobacillus ferrooxidans* (früher *Thiobacillus ferrooxidans*) können die Eisen(II)-oxidationsrate um mehrere Zehnerpotenzen erhöhen und damit fortlaufend Eisen(III), das Oxidationsmittel für Pyrit, bereitstellen. Unter sauren Bedingungen wird Pyrit mikrobiell fast quantitativ zu Eisen(III)-Verbindungen und Schwefelsäure umgesetzt. Als nennenswertes Nebenprodukt entsteht der chemisch inerte Elementarschwefel, der durch stark säureliebende Schwefel-oxidierende Bakterien der Arten *Acidithiobacillus thiooxidans* und *Acidithiobacillus ferrooxidans* mit Luftsauerstoff zu Schwefelsäure umgesetzt wird.

Da bei der vollständigen Pyritoxidation mit  $-1.546 \text{ kJ/mol}$  eine erhebliche Reaktionsenergie frei wird, kann es zur Erhitzung von Halden kommen. In pyrithaltigen Abraumhalden des Uranbergbaus der Wismut GmbH in Thüringen wurden z. B. bis zu  $100^\circ\text{C}$  gemessen. Bei Temperaturen oberhalb von  $45^\circ\text{C}$  sind die genannten Bakterienarten nicht mehr zum Wachstum in der Lage, und es herrschen stattdessen stark säure- und wärmeliebende Eisen(II)- und Schwefel oxidierende Archaeen z. B. der Arten *Acidianus brierleyi* oder *Sulfolobus acidocaldarius* vor. Neben Pyrit können in Bergbauhalden auch Restgehalte an z. B. Bleiglanz (PbS) oder Sphalerit (ZnS) vorkommen. Diese werden im Gegensatz zu Pyrit unter sauren Bedingungen rein chemisch nicht bis zum Sulfat, sondern überwiegend zum chemisch inerten Elementarschwefel oxidiert. Die weitere Umsetzung zum Sulfat erfolgt biologisch wie oben beschrieben.

Neben Metallsulfide oxidierenden Bakterien wurden auch organischen Kohlenstoff verwertende (organotrophe) Bakterien (z. B. der Gattung *Acidiphilium*) und Pilze mehrfach in Bergbauhalden nachgewiesen. Die organotrophen Mikroorganismen können durch Bildung metallorganischer Komplexe eine Mobilisierung von Schwermetallen unter sauren und sogar unter alkalischen Bedingungen bewirken.

Die Vielfalt heterotropher Mikroorganismen in den Haldensubstraten richtet sich vor allem nach dem pH-Wert (acidophile, acidotolerante, neutrophile, alkalitolerante Arten) und nach dem vorhandenen Angebot an organischem Kohlenstoff. In mineralischen Haldenmaterialien mit mikrobieller Pyritoxidation existieren heterotrophe Mikroorganismen v.a. von den organischen Ausscheidungen der eisen- und schwefeloxidierenden Bakterien. In Kipphalden des Braunkohletagebaus bzw. Bergehalden des Steinkohlebergbaus können diese Mikroorganismen zusätzlich von den restlichen abbaubaren Komponenten der Kohle existieren.

Eine Mobilisierung von Schwermetallen und damit eine Umweltgefährdung kann in Bergbauhalden auch unter Ausschluss von Luftsauerstoff erfolgen. Unter sauren Bedingungen sind *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* und *Acidiphilium* sp. anaerob zur Reduktion von Eisen(III) befähigt. Bei neutralem pH wurden in sulfidischen Bergbauhalden oder Bergeteichen Eisen(III) und Mangan(IV) reduzierende Bakterien (z.B. *Geobac-*

Einige wichtige Prozesse bei der Pyritoxidation

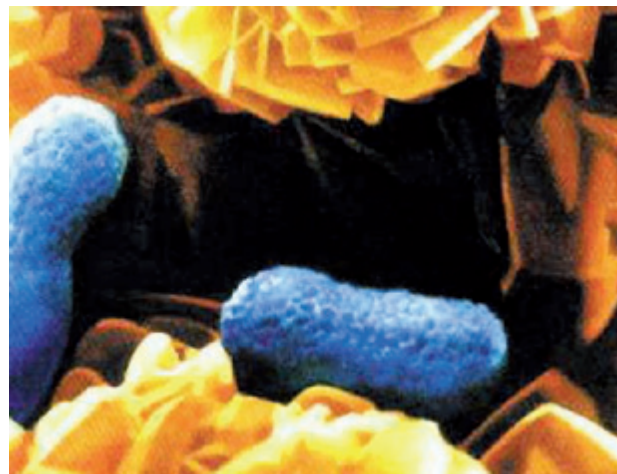
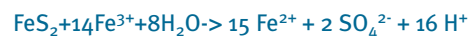


Abb. 5: *Acidithiobacillus ferrooxidans* unter dem Mikroskop.

ter sp.) nachgewiesen, die eine Auflösung von Eisen(III)- bzw. Mangan(IV)-oxiden und -hydroxiden bewirken. Diese enthalten häufig Schwermetalle, die so mobilisiert werden. Das kann z. B. bei der Unterwasserlagerung von Haldenmaterial Probleme hervorrufen.

### Sicherung von Bergbauhalden

Um biologische Laugungsprozesse in Bergbauhalden zu hemmen, können die Rückstände unter Wasser (Seen bzw. Grundwasser) gelagert werden; man kann die Halden abdecken, Hemmstoffe in den Abraum einbringen sowie die Halden bepflanzen. Die Unterwasserlagerung von sulfidischem Abraum wird häufig praktiziert. Die geringere Sauerstoffdiffusion durch das Wasser führt zu einer signifikanten, wenn auch nicht vollständige Reduzierung der Bakterienzahlen und damit der Metallsulfidoxidationsrate. Das Haldenmaterial zu sichern, indem es in den Grundwasserkörper eines renaturierten ehemaligen Tagebaues eingelagert wird und gleichzeitig protonenverbrauchende Sperrschichten zur pH-Wert-Stabilisierung eingebaut werden, ist ein extrem teurer Prozess und wurde z.B. von der Wismut GmbH durchgeführt. Trockene Abdeckungen (z.B. aus Lehm oder Kunststoffen wie HDPE) verringern oder verhindern das Eindringen von Luftsauerstoff und Niederschlagswasser in die Halde oder den Bergeteich und damit die Metallsulfidoxidation. Darüber hinaus verhindern Abdeckungen die Ausbreitung schwermetallhaltiger Stäube und sollen eine Bepflanzung ermöglichen. Die technischen Anforderungen sind erheblich, daher sind effiziente Abdeckungen sehr kostspielig. Unter anderem gefährdet die Hitzeentwicklung mancher Halden die Langzeitstabilität von Abdeckungen. Abdeckungen aus einer einfachen Lehmdecke verringern zwar die Rate der biologischen Oxidation, können diese jedoch nicht vollständig zum Erliegen bringen.



Abb. 6: Geschüttete Halden des Kupferbergbaus in Rosija Pojenie ( Rumänien)

Empfehlenswert sind Abdeckungen aus mehreren Schichten, z.B. einer Lehmschicht und einer darüber liegenden Kulturschicht, die die Lehmschicht vor Austrocknung und mechanischer Beschädigung schützt. Die Kulturschicht trägt eine stabilisierende Pflanzendecke (Erosionsschutz), die das Eindringen von Wasser und Luft in das Haldensubstrat weiter minimiert. An älteren derartig abgedeckten Haldenstandorten (>65 Jahre Abdeckung) konnte eine signifikante Reduktion von Sickerwasserneubildung und -fracht im Vergleich zu nur rekultivierten Standorten gezeigt werden.

Substanzen zur Hemmung der biologischen Laugung können eine Veränderung des pH-Werts, eine direkte biozide Wirkung auf die Bakterien oder eine Passivierung der Pyritoberfläche bewirken. Zur Anhebung des pH-Werts und zur Pufferung wird vielfach erfolgreich Kalk eingesetzt, ein allerdings erheblicher Kostenfaktor. Die Erhöhung des pH-Wertes verringert das Wachstum säureliebender Eisen(II) und Schwefel oxidierender Bakterien. Auch die Zugabe von Phosphaten zur Bildung von passivierenden Eisenphosphat-Schichten um Eisensulfide herum kann dieser Vermeidungskategorie zugeordnet werden. Eine Bepflanzung hemmt die biologische Laugung auf zweifache Weise: Erstens konkurriert das Pflanzenwurzelsystem mit den Eisen(II) und Schwefel oxidierenden Bakterien um den Luftsauerstoff, und zweitens scheiden Pflanzenwurzeln organische Substanzen aus, die hemmend wirken können. Außerdem entziehen die Pflanzenwurzeln dem Haldenmaterial Wasser. Diese Effekte werden unter dem Begriff „Phytostabilisierung“ zusammengefasst. Problematisch ist eine Bepflanzung direkt auf einer unbehandelten Haldenoberfläche, da die Pflanzen in der Regel die ho-



hen Säure- und Schwermetallgehalte nicht tolerieren. Biologische Pyritoxidation kann auch noch Jahre nach der Bepflanzung zum Absterben der Pflanzen führen. Daher sollte eine Bepflanzung vorzugsweise in Kombination mit anderen Maßnahmen wie Kalkung oder Abdeckung erfolgen.

Der gezielte Einsatz von Pflanzen erlaubt zudem die Extraktion von Schadstoffen (Metallen) über die pflanzliche Biomasse (Phytoremediation oder Phytoextraktion). Über dieses Verfahren lassen sich möglicherweise Halden sanieren und Wertmetalle gezielt anreichern. Auch hierbei werden Sickerwassermenge und -fracht vermindert, und die Schwermetalle v.a. in der oberen Bodenaufgabe „gespeichert“, aus der sie langsam über die Pflanzen extrahiert werden können.

Eine Kombination von Maßnahmen (z. B. Kalkung und Unterwasserlagerung bei der Wismut GmbH) muss in jedem einzelnen Sanierungsfall in Erwägung gezogen werden. Dabei stellt sich die Frage nach der Effizienz und den Kosten. Zur Auswahl geeigneter Maßnahmen sollten vor der Sanierung Untersuchungen zum mikrobiellen Umweltgefährdungspotential von Bergbauhalden durchgeführt werden, wie sie z. B. im Leitfaden des Bundesamtes für Strahlenschutz zur Abschätzung des Einflusses mikrobieller Prozesse auf das Grund- bzw. Sickerwasser zusammengestellt worden sind.

Da die Sanierung großflächiger Bergbauhalden nur mit immensem finanziellem und logistischem Aufwand angegangen werden kann und trotz höchsten Aufwandes eine sehr lange Nachsorgephase zu erwarten ist, wurde auch die Möglichkeit des natürlichen Schadstoffrückhalts untersucht (Natural Attenuation).

In manchen Bergbauhalden bilden sich Krusten durch Anreicherung kristalliner oder gel-artiger Sekundärphasen. Je nach Klima, Haldeninventar und Schüttabfolge entstehen vielfältige Sekundärphasen in pH-Bereichen von <1 bis >12. Diese Krusten sind charakterisiert durch eine Reduzierung des Porenraumes und damit der Permeabilität, eine chemische Metall-Anreicherung bzw. -Verarmung sowie durch charakteristische Mineralneubildungen, welche unter den gegebenen pH-Bedingungen stabil sind. Die in den Krusten angereicherten Sekundärphasen haben ein hohes Bindevermögen für Schadstoffe.

Die natürliche Schadstoffminderung in Braunkohleabraumkippen beruht im Wesentlichen auf der bereits kurzfristig wirkenden Pufferung des gebildeten Sauerwassers, wobei Schadstoffionen in Sekundärmineralphasen eingebaut oder an reaktiven Oberflächen (Tonminerale, Huminstoffe, Eisenhydroxide) adsorbiert werden, und der mittel- bis langfristig wirkenden mikrobiellen Sulfatreduktion mit anschließender Ausfällung neuer sulfidischer Mineralphasen.

Während die Pufferung hauptsächlich durch im Abraumaterial enthaltene Karbonate erfolgt, stellt die mikrobielle Sulfatreduktion einen mittel- bis langfristig wirkenden, nachhaltigen und vor allem auch die Sulfatfracht senkenden Mechanismus dar. Dabei ist die Sulfatreduktion als Stufe einer Abfolge von mikrobiellen Reduktionsreaktionen zu verstehen. Die vorausgehende Eisenreduktion läuft in fast allen Kippengrundwässern ab, wie die hohen Eisen(II)gehalte zeigen. Motor der reduktiven Prozesskette ist die mikrobielle Umsetzung der mitverstärzten tertiären organischen Substanz (Elektronendonator). Durch Zugabe von organischer Substanz als zusätzlichem Elektronendonator kann die mikrobielle Sulfatreduktion verstärkt werden (Enhanced Natural Attenuation).

### Perspektiven

Neuere weltweite Aktivitäten haben die Tür für eine Metallextraktion aus Bergbauhalden mittels biotechnischer Verfahren geöffnet. Die sekundären Rohstoffquellen lassen sich auch in Deutschland mit intelligenten Kombinationen von klassischen und neuen Aufbereitungstechnologien erschließen. Biomining als günstige Aufbereitungstechnologie kann hier eine Schlüsselstellung einnehmen. Mit der Extraktion von Wertmetallen aus Bergbauhalden lassen sich gleichzeitig Schadstoffe entfernen, so dass eine sichere, umweltgerechte Lagerung des aufbereiteten



Haldenmaterials möglich wird. Eine weitere kostenintensive Nachsorge wie die Aufbereitung von Sickerwässern ließe sich folglich vermeiden. Solche Kosten müssen bei der Beurteilung, ob eine Halde wirtschaftlich aufbereitet werden kann, mit berücksichtigt werden. Weiterhin wurden im Labormaßstab bereits wirtschaftliche Verfahren zur Aufbereitung von Spülhalden entwickelt, die Biomining beinhalten. Die Biolaugung bzw. Biooxidation sulfidischer Flotationskonzentrate wurde zur Gewinnung von Gold, Kupfer, Nickel, Silber und Uran erfolgreich getestet.

Um die sekundären Lagerstätten erschließen und Halden hinsichtlich ihres Aufbereitungspotenzials beurteilen zu können, ist es notwendig, ein Wert- bzw. Schadstoffkataster für Deutschland zu erstellen. Weitere zukunftsweisende Ansätze zur Rückgewinnung von metallischen Rohstoffen aus Sekundärlagerstätten sind die biotechnische Verfahrensentwicklung vor allem für nicht-sulfidische Schlacke-Halden, welche für anaerobes Bioleaching eine interessante Option darstellen, sowie die Integration der Biotechnologie in eine intelligente Kombination von Aufbereitungstechnologien. Halden mit geringem wirtschaftlichem Aufbereitungspotenzial können ebenfalls erhebliche Umweltbeeinträchtigungen hervorrufen. So emittieren Kippen des Braunkohlebergbaus in großen Mengen Sulfat und Säure, dem durch die biotechnische Ausnutzung mikrobieller Sulfatreduktionsprozesse in Kombination mit Verkippungstechnologien und Bewirtschaftungsstrategien für umgebende Grund- und Oberflächenwasserkörper entgegengewirkt werden kann. Forschungsbedarf besteht in jedem Fall im Upscaling der vielversprechenden Feld- und Laborverfahren, um deren Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu testen und neue geobiotechnische Verfahren in der Bergbauindustrie zu etablieren.

### **FORSCHUNGSBEDARF**

- Erstellung eines Wert- bzw. Schadstoffkatasters für Deutschland
- Entwicklung geobiotechnologischer Verfahren für nicht-sulfidische Schlacke-Halden
- Integration der Biotechnologie in eine intelligente Kombination von Aufbereitungstechnologien
- Upscaling vielversprechender Feld- und Laborverfahren

## 3 Metall haltige Bergbauwässer – Vermeidung, Reststoff oder Rohstoff?

*M. Schlömann, K. Pollmann, F. Glombitza, P. Radehaus, S. Kutschke*

### Entstehung, Typen, Beispiele

Saure Bergbauwässer aus Erz- oder Kohlebergbau, Halden, Tailings oder Kippen bergen eine erhebliche Gefahr für die Umwelt. Nicht nur der niedrige pH-Wert ist problematisch, sie enthalten auch hohe Konzentrationen von Sulfat und Eisen. Darüber hinaus können sie durch andere Schwermetalle sowie Metalloide wie Arsen belastet sein. Da oxidiertes Eisen an dem Vorgang wesentlich beteiligt ist und sich bei niedrigem pH-Wert besser löst, kann es zu einem sich verstärkenden Prozess kommen.

Neben den sauren Drainagewässern existieren aber auch neutrale Drainagewässer mit relativ hohen Schwermetallgehalten. Sie entstehen, wenn Sulfat- und Wasserstoffionen gebunden werden oder durch anaerobe Bedingungen Sulfat reduziert und dabei Schadstoffe freigesetzt werden. Im ersten Falle sind vorwiegend hohe Zinkkonzentrationen, im zweiten neben Radium auch erhöhte Mangan- und Arsenkonzentrationen anzutreffen.

Um geeignete Maßnahmen für die Wasserreinigung auszuwählen, sind die Wässer u. a. nach folgenden Kriterien zu differenzieren:

- » Handelt es sich um Wässer aus aktivem Bergbau oder aus dem Altbergbau? Im ersten Fall kann in die Gestaltung von Halden noch eingegriffen werden. Im zweiten Fall lässt sich durch Flutung der Zutritt des Sauerstoffs reduzieren.
- » Um welche Wasservolumina und Wasserkörper handelt es sich? Geht es um einen See, z. B. um ein Tagebau-Restloch, oder ist ein Wasserstrom zu behandeln, wenn letzteres mit welchem Volumen pro Zeiteinheit?
- » Welche Konzentrationen von welchen Wasserinhaltsstoffen liegen vor? Das hängt mit der jeweiligen Lagerstätte und deren mineralischem Inventar zusammen. Zudem ist dieser Punkt abhängig vom Alter des Bergbaus.
- » Wie ist das Redox-Potential, wie der Oxidationszustand der Inhaltstoffe (Speziation der Metalle und Metalloide sowie des Schwefels)?
- » Diese Punkte stehen im Zusammenhang mit der Acidität und der Alkalinität der Wässer. Diese bezieht sich nicht nur auf den aktuellen pH-Wert. Auch durch die Gegenwart von Metallionen, die Hydroxy-Komplexe bilden, oder durch Redox-Reaktionen kann sich die Acidität verändern. Für die Alkalinität spielen zusätzlich zu den Carbonatgehalten je nach Definition zusätzliche Ionen (wie z. B. Phosphat, Hydrogenphosphat, Silikat etc.) eine Rolle.



Abb. 7: Messungen an sauren Grubenwässern

Folgende Beispiele illustrieren die Charakteristik der Bergbauwässer:

- » In Gebieten mit Braunkohle-Tagebau bleiben auf Grund der Volumenreduktion durch Förderung der Kohle nach Ende des Tagesbaus zwangsläufig Restlöcher zurück. Im Rheinischen Revier betrifft dies vor allem die Tagebaue Garzweiler, Hambach und Inden, deren Flutung ab 2030 bzw. 2045 geplant ist und rund 40 Jahre dauern soll. Die Flutung der Restlöcher auf dem Gebiet der neuen Bundesländer ist teilweise bereits abgeschlossen. So entstehen Seenlandschaften (in Sachsen beispielsweise 48 Seen mit ca. 16.000 ha Fläche, gut 2.2000 Mrd. m<sup>3</sup> Volumen, Stand 2009). Durch die Pyritverwitterung haben Bergbaufolgeseen, besonders bei fehlender Pufferung durch Carbonatgesteine, z. T. sehr niedrige pH-Werte und hohe Metall- und Sulfatkonzentrationen: In Sachsen hatten 2007 von 22 Bergbaufolgeseen im Leipziger Raum drei einen pH-Wert < 3,0 und fünf einen pH-Wert zwischen 3 und 4,5, in der Lausitz von 26 Bergbaufolgeseen acht einen pH-Wert < 3,0 und neun einen pH-Wert zwischen 3 und 4,5.
- » Auch der aktive Braunkohle-Tagebau führt zu großen Wasserströmen mit Behandlungsbedarf. Hier handelt es sich um Sumpfungswässer. Sie werden rings um den jeweiligen Tagebau gehoben, um den Grundwasserspiegel zu senken und den Tagebau trocken zu halten. Vattenfall reinigt in der Lausitz im Jahr ca. 300 mio m<sup>3</sup> Wasser in mehreren Grubenwasserreinigungsanlagen. Das unbehandelte Wasser der Grubenwasserreinigungsanlage Tzschelln am Tagebau Nochten hat beispielsweise einen pH von 4-5, Sulfatkonzentrationen bis zu 3 g und Eisenkonzentrationen von 300-700 mg/l. Während die derzeit verwendete Technik durch Neutralisation und Belüftung die Eisenkonzentrationen der Sumpfungswässer effektiv begrenzt und den pH anhebt, bleibt das Problem der Sulfat-Belastung im Reinwasser nach der Reinigung. Die Belastung der nachfolgenden Vorflut Spree ist sowohl im Hinblick auf die Trinkwassergewinnung in Berlin und Frankfurt/Oder als auch im Hinblick auf die Nutzung als Kühlwasser (Betonkorrosion) und wegen möglicher ökologischer Folgen nicht unbedenklich.
- » Auch aus Halden des Steinkohlebergbaus treten z.B. in der Region Zwickau Sickerwässer mit erheblichen Konzentrationen an Zn, Ni, Cd, aber auch As und Cu aus. Auch im Ruhrgebiet kommt es an Halden zur Entstehung von Sickerwässern, bei denen u. a. auch lokal hohe Radiumbelastungen auftreten.
- » Wässer mit einem Langzeit-Behandlungsbedarf resultieren in erheblichem Maße aus dem Uran-Bergbau der Wismut in Thüringen und Sachsen von 1946 bis 1990. Die Halden sind zum großen Teil entweder saniert oder wieder in den Tagebau verfüllt und die Flutung von untertägigen Bergwerken hat große Fortschritte gemacht. Dennoch bleiben belastete Wässer, die einen langfristigen Behandlungsbedarf haben. So werden in verschiedenen Anlagen u.a. in Königstein, Ronneburg, Schlema-Alberoda, Seelingstädt und Pöhla, hauptsächlich Uran, Eisen, Arsen und Radium, aber auch Mangan, Kupfer, Kobalt und Nickel aus unterschiedlich zusammengesetzten Wässern mit verschiedenen Technologien abgetrennt.

#### Ziele

Die offensichtlichen Ziele der Wasserbehandlung sind die Entfernung der Schadstoffe aus dem Wasserpfad und die Regulierung des pH-Wertes. Anorganische Schadstoffe sind nicht wie organische Schadstoffe abbaubar. Ziel ist daher in der Regel, sie in eine weniger mobile Form umzuwandeln und durch Fällung oder Sorption abzutrennen. Aufkonzentrierte Wässer oder Sedimente können deponiert oder weiter verwertet werden, die gereinigten Wässer werden in Vorfluter entlassen. Für die Auswahl der Verfahren spielen daneben auch die Betriebssicherheit und der Aufwand eine Rolle.

Angesichts knapper werdender mineralischer Ressourcen stellt sich inzwischen auch die Frage, ob nicht manche der aus dem Wasser abgetrennten Stoffe wieder einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden können. Dies spart ggf. Kosten für die Deponierung und kann angesichts gestiegener Rohstoffpreise auch wirtschaftlich interessant sein.

#### Behandlungsstrategien

Vorrangiges Ziel bei heutigen Bergbaumaßnahmen ist es, die Entstehung saurer Bergbauwässer zu vermeiden. Auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Sicherung von Halden durch Abdeckungen oder Phytostabilisierung wird in Kapitel 2 ausführlich eingegangen. Gelingt dies nicht oder handelt es sich um Altlasten, müssen die austretenden sauren Wässer behandelt werden.

##### 1. Nicht-biologische Verfahren

Das wichtigste großtechnisch eingesetzte Verfahren, um die Eisenfracht zu reduzieren und den pH-Wert zu erhöhen, ist die Neutralisation saurer Bergbauwässer mit **Kalk** verbunden mit einer **Belüftung** der Wässer. Mit dieser Technologie kann aber der Sulfatgehalt wegen der hohen Gipslöslichkeit kaum unter ca. 1.600 mg/l gesenkt werden. Außerdem ist die Bereitstellung des Kalks teuer und energetisch aufwändig, und der gebildete Eisenoxid/hydroxid-Schlamm lässt sich schlecht entwässern.

Ein Vorteil bei der Bildung von Eisenoxiden/hydroxiden ist, dass diese eine Grundlage für die Sorption anderer Ionen von Metallen und Metalloiden bieten und sie so immobilisieren. Dieser Effekt wird genutzt, um z. B. aus Wässern des Uran-Bergbaus Arsenverbindungen zu entfernen (Reinigungsanlage Pöhla). Da hier das Eisenoxid aus dem behandelten Wasser für eine Bindung von Arsen nicht ausreicht, müssen Eisenoxide in einer separaten Sorptionsanlage zugeführt und regelmäßig erneuert werden. Die Sorption von Metallen an Eisenoxide ist unter oxidierenden Bedingungen auch ein wichtiger Schritt bei der Immobilisierung von Elementen auf Halden von Tailings.



Abb. 8: Behandlung von Bergbauwässern

Auch die **Zuführung von Gegenionen** zur Bildung schwer löslicher Salze kann zur **Fällung** von Schadstoffen verwendet werden. Eine bedeutend geringere Löslichkeit als Gips besitzt Bariumsulfat; doch ist Barium in löslicher Form toxisch und recht teuer, so dass es in der Regel nicht für eine Sulfatfällung in Frage kommt und nur für die Senkung der Radiumkonzentrationen zum Einsatz kommt. Blei kann durch Zugabe von Phosphat als Pyromorphit gefällt werden.

Aufwändiger ist die Entfernung von Metallionen aus Wässern durch **Ionenaustauscher**. Solche Verfahren spielen z. B. bei der Reinigung von mit Uran kontaminierten Wässern der Wismut GmbH eine Rolle.

**Membranverfahren** (Umkehrosmose, Nanofiltration) führen immer nur zu einer Aufkonzentrierung der Salze und damit zu einer Volumenreduktion. Deshalb müssen sie mit weiteren Schritten, z.B. Fällungen, kombiniert werden. Scaling, also das Verblocken der Membran durch Ausfällungen, begrenzt das Ausmaß der Aufkonzentrierung und damit die Wirksamkeit der Membranverfahren. Membranverfahren wurden und werden im Pilotmaßstab u. a. an Wässern des Braunkohle-Tagebaus sowie des Kupfer-Bergbaus getestet.

In der Pilotphase befinden sich außerdem Verfahren zur Membranelektrolyse (RODOSAN-Verfahren). Dabei wird Wasser elektrolytisch gespalten; im Kathodenraum fallen Eisenhydroxide aus, während im Anodenraum Schwefelsäure anfällt. Die Leistung der Zellen konnte durch CO<sub>2</sub>-Einspeisung weiter gesteigert werden.

##### 2. Prinzipien biologischer Wasserreinigungsverfahren

Bei der biologischen Behandlung von Bergbauwässern spielen Organismen, die die Oxidation oder Reduktion von Eisen oder Schwefel zur Energiegewinnung nutzen, eine herausragende Rolle. Auch Organismen, die aus Redoxreaktionen von Uran oder Arsen Energie gewinnen, sind von Interesse, ebenso wie Organismen des Kohlenstoff-Kreislaufs (Phototrophe (Biomassebildung), Gärer, Methanogene oder aerobe Heterotrophe). Sie beeinflussen

die Bergbauwässer nur mittelbar. Wasserinhaltsstoffe, die immobilisiert werden sollen, dienen entweder als Elektronendonator oder als Elektronenakzeptor; der jeweils für die gewünschte Reaktion fehlende Partner muss zugeführt werden. Angesichts der Vielfalt möglicher Stoffwechselprozesse muss man mit unerwünschten Konkurrenzreaktionen rechnen, denn Prozesse in großem Maßstab können nicht steril gehalten werden. Da in der Regel der Prozess dominiert, der unter den gegebenen Bedingungen die größte Energiegewinnung und damit Biomasseproduktion erlaubt, geht es bei der Auslegung und Steuerung darum, den gewünschten Organismen Vorteile zu verschaffen. Alternativ müssten die Zellen getrennt kultiviert und nach einer bestimmten Zahl von Prozesszyklen dem jeweiligen Reaktor wieder neu zugeführt werden.

Zu den Voraussetzungen gehört auch, dass eine Kohlenstoffquelle und die notwendigen Nährstoffe (z. B. Stickstoff, Phosphor und Spurenelemente) verfügbar sind. Kohlenstoffquellen können für viele heterotrophe Sulfat-reduzierer organische Verbindungen sein, die auch als Elektronendonator dienen. Bei anorganischen Elektronendonoren wie  $\text{Fe}^{2+}$  oder wie  $\text{H}_2$  für die Sulfatreduktion ist normalerweise  $\text{CO}_2$  die Kohlenstoffquelle. Organische Verbindungen sind für manche autotrophen Organismen sogar schädlich. Die Phosphorversorgung ist für Eisenoxidierer angesichts der geringen Löslichkeit von Eisenphosphaten nicht trivial. Ähnliches gilt für die Spurenmehalle bei den Sulfatreduzierern.

Da das Redoxpaar  $\text{Fe(III)/Fe(II)}$  ein positives Reduktionspotenzial besitzt, während Sulfat bei deutlich negativerem Potenzial reduziert wird, liegt Schwefel vor allem in oxidierter Form als Sulfat und Eisen oft noch in reduzierter Form als  $\text{Fe}^{2+}$  vor. Das Ausgangsmaterial ist also unvollständig oxidiert. Deshalb kann sowohl eine oxidative Behandlung zur Immobilisierung von Schadstoffen führen als auch eine reduktive.

Die Behandlungsverfahren werden oft in aktive und passive Verfahren eingeteilt. Aktive Verfahren sind solche, die dauernd oder häufig einer Beeinflussung bedürfen, sei es zur Wartung oder um Chemikalien zu dosieren oder Energie zuzuführen. Passive Verfahren sind solche, die nach der Konstruktion selten einer Wartung bedürfen und auf natürliche Energiequellen (z. B. Photosynthese) zurückgreifen. In der Regel benötigen die passiven Verfahren viel mehr Fläche als die aktiven, weshalb die Anwendung nur bei kleineren Volumenströmen und mäßigen Schadstoffkonzentrationen sinnvoll ist. Aktive Verfahren haben je nach Konstruktion der Anlage zudem den Vorteil, dass die ausgefallenen oder sorbierten Produkte leichter zurück zu gewinnen sind. Die Grenze zwischen aktiven und passiven Verfahren ist nicht eindeutig zu ziehen, was in Ausdrücken wie „semi-passiven Verfahren“ deutlich wird und dazu führt, dass manche Verfahren von verschiedenen Autoren unterschiedlich zugeordnet werden. Sowohl bei aktiven als auch bei passiven Verfahren können Oxidations- wie Reduktionsreaktionen und auch Biosorption oder Bioakkumulation eine Rolle spielen.

#### 3. Grundlagen der Schadstoff-Immobilisierung durch mikrobielle Redox-Prozesse

Wo das Problem der Bergbauwässer durch oxidative Prozesse entsteht, ist es naheliegend zu versuchen, es durch reduktive Prozesse zu lösen. Und in der Tat werden durch mikrobielle Reduktion von Sulfat in Gegenwart von Metallionen z. T. extrem schwer lösliche Metallsulfide (z. B.  $\text{FeS}$ ) gebildet, die ausfallen und so aus der Wasserphase entfernt werden können. Für diese Reaktion benötigen die Sulfat-Reduzierer entweder einen organischen Elektronendonator (organische Säuren, Alkohole, Zucker) oder einen anorganischen Elektronendonator wie  $\text{H}_2$ . Bei Verwendung eines organischen Elektronendonors kann durch die Aktivität von Gärern und Methanogenen als Konkurrenzreaktion Methanogenese auftreten, also die Bildung von  $\text{CO}_2$  und Methan. Vorhandenes Eisen(III) wird unter reduzierenden Bedingungen möglicherweise bevorzugt durch Eisen(III)-Reduzierer reduziert und damit remobilisiert. Mobilisiert werden in diesem Fall möglicherweise auch weitere an Eisen(III)oxide gebundene Metall- oder Metalloidionen. Das kann auch Arsenat ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) bzw. das mikrobiell hieraus unter reduzierenden Bedingungen gebildete Arsenit ( $\text{As(OH)}_3$ ) betreffen. Eine Immobilisierung ist dann ggf. nur noch durch vollständige Reduktion zu den entsprechenden Sulfiden zu erreichen.

Im Unterschied zu Eisen wird Uran, welches oxidiert als Uranylion ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) vorliegt, durch Reduktion immobilisiert. Es entsteht Uraninit ( $\text{UO}_2$ ), welcher ebenfalls aus der Wasserphase entfernt wird.



Die Fällung durch oxidative Prozesse setzt auf die Bildung von Fe(III)- und ggf. Mn(IV)-Verbindungen. Sie hat den Vorteil, dass diese Verbindungen zusätzlich weitere Ionen sorbieren und damit immobilisieren können. Diese Strategie ähnelt insofern der konventionellen Technik mit Kalken und Belüftung. Allerdings kann biologische Eisenoxidation – im Unterschied zur rein chemischen – auch bei niedrigen pH-Werten relativ schnell ablaufen. Zu berücksichtigen ist, dass es durch die Fällung in Folge der biologischen Eisenoxidation zu einer weiteren Ansäuerung kommt. Die biologische Eisenoxidation bei niedrigem pH läuft ungeplant in Restseen oder Leitungsrohren für Sumpfungswässer ab, sie kann aber durch Belüftung in entsprechenden Anlagen auch gezielt induziert werden. Vorteile gegenüber der konventionellen Behandlung liegen in der Einsparung von Kosten und Energie für den Kalk, in der gegenüber Eisenoxiden/hydroxiden verbesserten Entwässerbarkeit sowie in der Immobilisierung eines Teils des gelösten Sulfates. Träger des Prozesses sind acidophile Eisen oxidierende Bakterien. Außer  $\text{Fe}^{2+}$  kann unter den oxidierenden Bedingungen ggf. vorhandener teiloxidierter Schwefel (elementarer Schwefel, Thiosulfat, Polysulfide, Polythionate) zu Sulfat oxidiert werden oder auch Uraninit ( $\text{UO}_2$ ) zum Uranylion ( $\text{UO}_2^{2+}$ ).



Abb 9: Reduktionsbecken

#### 4. Biosorption und Bioakkumulation

Biosorption bezeichnet die Eigenschaft von Biomasse oder bestimmten Biomolekülen, Metalle zu binden und zu konzentrieren. Im Gegensatz zur Bioakkumulation ist dies ein passiver Prozess. Verantwortlich sind funktionelle Gruppen wie Carboxyl-, Hydroxyl- oder Thiolgruppen sowie Phosphate, Sulfate oder Amine an Zelloberflächen oder Biomolekülen oder auch spezielle Oberflächenstrukturen. Ihre Leistungsfähigkeit ist vergleichbar mit der von Ionenaustauschermaterialien. Häufig liefern sie bessere Ergebnisse als Aktivkohle oder natürliche Zeolithmaterialien. Nachteilig ist, dass die Biomaterialien nur in wenigen Fällen direkt als Säulenmaterial eingesetzt werden können und deshalb mehrheitlich zum Erhalt ihrer guten Bindungseigenschaften aufwändig immobilisiert werden müssen. Herausforderungen dabei sind insbesondere eine hohe mechanische Stabilität bei gleichzeitigem Erhalt der Zugänglichkeit der reaktiven Oberfläche.

Für eine Vielzahl von Biopolymeren verschiedener Organismen und Elementen wurde die Biosorption bereits beschrieben. So weisen insbesondere Alginat von Algen und Seetang, Chitosan von Pilzen, Peptidoglycane von Bakterien, aber auch die sogenannten S-Layer-Proteine – bakterielle Oberflächenproteine – besondere Metallbindungseigenschaften auf. Schwerpunkt dieser Studien waren vor allem toxische Metalle und Halbmetalle wie Blei, Cadmium und Arsen, die eine große Umweltrelevanz besitzen, aber auch Elemente wie Uran und Thorium, die bei der Gewinnung von Uran und Seltenen Erden freigesetzt werden.

Außer dieser natürlichen Sorption werden verschiedene Ansätze verfolgt, Biokomponenten gentechnisch gezielt zu optimieren, um ihre Spezifität und ihre Affinität zu Metallen zu verändern. So führt z.B. die Expression von Cystein-reichen metallbindenden Proteinen (Metallthioneinen) auf der Zelloberfläche zu einem 15-20fachen Anstieg der Bindung von  $\text{Cd}^{2+}$ . Durch de-novo-Design von Peptiden mit repetitiven Metallbindemotiven, ihre Fusion mit Oberflächenproteinen und heterologe Expression in *E. coli* konnte die Bindung von Cadmium oder Quecksilber um das 10fache erhöht werden.

Attraktiv ist die Anwendung von biosorptiven Verfahren insbesondere für die Bioremediation, also z.B. für die Entfernung von toxischen Schwer- und Halbmetallen wie Blei, Cadmium, Quecksilber, Arsen oder Uran aus Wässern. Entsprechend viele Studien erfolgten hierzu. Ein anderes Anwendungsgebiet von zunehmendem Interesse ist die Aufkonzentrierung und Rückgewinnung von Wertmetallen aus Recyclingprozessen, aber auch aus Bergbauwässern. So wurden im Gessenbach der Gessenhalde im ehemaligen Uranabbaugebiet Ronneburg Konzentrationen von Seltenen Erden, vor allem Gadolinium, Neodym, Ytterbium und Yttrium, von über 2,4 mg/l nachgewiesen.

Durch die Kombination „klassischer“ Bioverfahrenstechnik mit gentechnischen Methoden und Einbeziehung von Materialwissenschaften ist es möglich, neue Ansätze für das an sich lang bekannte und gut untersuchte Phänomen der Biosorption zu entwickeln. Gelingt eine Desorption der Metalle und sind die Materialien regenerierbar, wird die Technologie auch preislich attraktiv und mit Ionenaustauschern konkurrenzfähig. Untersucht wurde z.B. die Nutzung biosorptiver Materialien zur Rückgewinnung von Platin, Palladium und Gold und von Selten-Erd-Elementen wie Scandium, Yttrium, Lanthan, Cer, Europium und Ytterbium.

Im Gegensatz zur Biosorption werden bei der Bioakkumulation Metalle aktiv in die Zellen aufgenommen und konzentriert. Getrieben wird dieser Prozess durch selektive Metalltransporter oder durch Diffusionsprozesse aufgrund großer Konzentrationsunterschiede. Bei der Nutzung dieser Prozesse ist man im Gegensatz zur Biosorption auf lebende Zellen angewiesen. Die Materialien sind häufig nicht regenerierbar. Deshalb kann eine Gewinnung der Metalle meist nur über Verbrennung oder aufwändige Extraktionsverfahren erfolgen. Da aber bioakkumulative Prozesse im Allgemeinen selektiver als biosorptive Prozesse sind, kann ihre Anwendung für die Gewinnung von gering konzentrierten und mit herkömmlichen Verfahren schlecht zugänglichen Elementen dennoch attraktiv sein. Insbesondere für die Bioremediation sind bioakkumulative Prozesse sehr attraktiv. Ein gut erforschtes Beispiel ist die Aufnahme von Quecksilber durch Mikroorganismen. Viele Bakterien sind in der Lage,  $\text{Hg}^{2+}$  aufzunehmen und im Zellinneren enzymatisch zu  $\text{Hg}^0$  zu reduzieren, welches durch Diffusion wieder aus den Zellen gelangt. Diese Mechanismen wurden zur Entfernung von Quecksilber aus Industrielässern genutzt und Pilotanlagen installiert. Praktische Anwendung finden bioakkumulative Prozesse bereits z.B. in Kläranlagen („Bioakkumulationskarpfen“). Auch bei der Sanierung von Böden durch Phytoremediation werden Pflanzen wie z.B. Sonnenblumen oder Indischer Senf für die Extraktion von Schwermetallen aus Böden eingesetzt.

#### 5. Passive Verfahren im Altbergbau und in Restseen

Die einfachsten passiven Verfahren sind diejenigen, bei denen das Bergbauwasser durch Kalkstein-Kanäle läuft und dabei neutralisiert wird. Dabei wird zwischen offenen Kanälen mit oxidierenden Bedingungen und geschlossenen Kanälen mit anoxischen Bedingungen unterschieden. In beiden Fällen spielt Biologie keine wesentliche Rolle.



Abb. 10: Aerob konstruiertes Feuchtgebiet

Bei aeroben konstruierten Feuchtgebieten („constructed wetlands“) werden Rohrkolben, Schilfrohr oder Binsen angepflanzt. Solche Sumpfpflanzen verfügen über ein Aerenchym, ein Gewebe, über das Luft in die Rhizosphäre, den Raum um die Wurzel, gelangen kann. Dadurch wird dort eine chemische oder mikrobielle Oxidation und damit Fällung z. B. des Eisens ermöglicht. Da bei der Hydrolyse des Eisens Protonen freigesetzt werden, kommt es zu einer Ansäuerung. Für die Pflanzen ist eine zu starke Ansäuerung schädlich. Deshalb sollten aerobe konstruierte Feuchtgebiete nur bei hinreichender Alkalinität und hinreichend hohen pH-Werten eingesetzt werden. Die Pflanzen können ggf. auch einen Teil der Metalle aufnehmen (Phytoextraktion) und sie verringern die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Eine Phytoextraktion mit Armleuchteralgen zur Bioakkumulation von Radium wurde zeitweilig von der Wismut GmbH am Standort Pöhla getestet, aufgrund ungünstiger Bedingungen aber wieder aufgegeben.

Bei konstruierten Feuchtgebieten, die Kompost enthalten, wird dieser als sich langsam zersetzender Elektronendonator zur mikrobiellen Sulfatreduktion genutzt. Damit Sulfatreduktion auftritt, muss der Sauerstoff verbraucht und auch das Eisen(III) weitestgehend reduziert sein. Metallionen werden in solchen Wetlands als Sulfide ausgefällt. Ein kritischer Faktor ist die Durchlässigkeit des Kompostes.

Bei so genannten RAPS (Reducing and Alkalinity Producing Systems) wird der anoxische Kalksteinkanal mit dem Kompost enthaltenden Feuchtgebiet kombiniert. Das Bergbauwasser läuft zunächst durch den Kompost und wird

dabei reduziert. Dann fließt es durch den Kalkkanal zur Anhebung von pH bzw. Alkalinität. Da im Kompost nur ein kleiner Teil des Sulfates zu Sulfiden reduziert wird, ist davon auszugehen, dass die Sulfatfracht nicht signifikant sinkt.

Zu den passiven Verfahren kann man auch so genannte „reaktive Wände“ rechnen, Konstruktionen im Untergrund, die das kontaminierte Grundwasser positiv beeinflussen sollen. Hier kann Reduktion durch elementares Eisen ebenso eine Rolle spielen wie Sorption an Eisenoxiden/hydroxiden oder Fällung mit Phosphaten.

Zur Behandlung von Tagebauseen wurde vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ ein Verfahren entwickelt, um die mikrobielle Sulfatreduktion durch Zugabe von Carbokalk und Strohballen anzukurbeln. Es wurde im Restloch 111 bei Lauchhammer in der Lausitz in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht – Zentrum für Materialforschung und Küstenforschung in Enclosures von 30 m Durchmesser getestet. Die Sulfatreduktion konnte tatsächlich stimuliert werden, insbesondere unter den im See versenkten Strohballen. Die Rate blieb jedoch aufgrund des geringen Volumens für diese Reaktion begrenzt. Probleme bereitete zudem die höhere Geschwindigkeit der Eisen(III)-Reduktion, die dazu führte, dass das remobilisierte  $\text{Fe}^{2+}$  in oxidierende Zonen gelangte. Dort wurde es wieder oxidiert und trat damit erneut in Konkurrenz zum Sulfat als Elektronenakzeptor.

#### 6. Aktive Verfahren

Neuere technologische Ansätze trennen das Eisen durch eine mikrobielle Oxidation des  $\text{Fe}^{2+}$  im sauren pH-Bereich ab und gewinnen ein sauberes Eisenhydroxysulfat, das für verschiedene Zwecke geeignet ist. Träger des Prozesses, bei dem auch ein Teil des Sulfats entfernt wird, sind neuartige acidophile Eisen oxidierende Bakterien. Überschlägige Rechnungen haben gezeigt, dass auf diese Weise einige 10.000 t Material gewonnen werden können. Sie können zu Eisen sowie eisenhaltigen Sorptionsmitteln für die Reinigung arsenbelasteter Wässer oder für die Sulfidabtrennung aus Biogasanlagen verarbeitet werden. Die Fa. G.E.O.S. Freiberg entwickelt eine Möglichkeit, den bei der Wasserreinigung entstehenden Schwertmannit (idealisierte Formel:  $\text{Fe}_{16}[\text{O}_{16}(\text{OH})_{10}(\text{SO}_4)_3] \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) als Basismaterial für Farbstoffe zu verwenden. Ähnliche Verwertungsstrategien sind mit den eisen- und manganhaltigen Schlämmen aus Trinkwasseranlagen möglich.

Verfahren, bei denen Mikroorganismen mit Hilfe organischer Elektronendonoren oder  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  Sulfat reduzieren, laufen oft in Festbett-Bioreaktoren ab. Die Anheftung der sulfatreduzierenden Mikroorganismen an das Festbettmaterial verhindert eine Auswaschung der Mikroorganismen aus dem Reaktor. Alternativ können die Mikroorganismen in einem UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)-Reaktor eingesetzt werden. Solche Verfahren werden zuweilen den „semi-passiven Verfahren“ zugeordnet; die Durchführung in Bioreaktoren verbunden mit dem für eine Optimierung des Prozesses erforderlichen Aufwand an Mess- und Regeltechnik rechtfertigt aber die Zuordnung zu aktiven Verfahren. Am bekanntesten ist eine Gruppe von Verfahren der niederländischen Firma PAQUES. Dabei wird ein Teil des bei der Sulfatreduktion gebildeten  $\text{H}_2\text{S}$  genutzt, um vor der Einleitung in den Bioreaktor eine Reihe von Metallen als Sulfid zu fällen. Gleichzeitig wird ein anderer Teil durch partielle Oxidation zu elementarem Schwefel oxidiert. Ein großtechnischer Prozess wurde bereits 1992 für die Reinigung von Wässern einer Zinkhütte realisiert. Die Firma G.E.O.S. hat ein Methanol-basiertes Festbett-Verfahren zur Reinigung von Bergbauwässern in der Lausitz entwickelt. Arbeiten des GFI Dresden zielen auf die Nutzung von Wasserstoff zur Reinigung von Kippen-Grundwässern in horizontalen *in situ*-Reaktoren. An der Grenze zu den passiven Verfahren könnte man Bemühungen an der BTU Cottbus ansiedeln, die reduktiven Prozesse in Kippen des Braunkohle-Tagebaus durch Zuführung von Glycerin oder Methanol direkt in den Grundwasserstrom zu beschleunigen.

Um die Sulfatreduktion in Restseen zu beschleunigen, wurde vom UFZ eine aktive Variante des Verfahrens mit Carbokalk und Strohballen konzipiert, bei der das Seewasser durch die Strohballen gepumpt wurde. Noch weiter ging die BTU Cottbus mit schwimmenden Bioreaktoren für Methanol-getriebene Sulfatreduktion.

Während traditionell Sulfatreduktion bei etwa neutralen pH-Werten durchgeführt wurde, zeigt sich zunehmend, dass sie auch unter sauren Bedingungen möglich ist. Dies bietet die Chance, durch Sulfatreduktion Metalle nicht

nur summarisch aus dem Wasser zu entfernen, sondern je nach Löslichkeit der Sulfide bei unterschiedlichen pH-Werten eine selektive Fällung durchzuführen. Dies konnte bereits im Labormaßstab gezeigt werden.

Die Remediation U(VI)-belasteter Wässer durch Zugabe von organischen Verbindungen (z.B. Acetat) wurde speziell in den USA auch in Feldversuchen intensiv bearbeitet. Sowohl Fe(III) als auch Sulfat reduzierende Bakterien zeigten sich in der Lage, das Uranylion zum Uraninit zu reduzieren und zu immobilisieren. Eine Anwendung solcher Prozesse zur Sanierung von Teilbereichen der Urangrube Königstein scheint denkbar.

#### Herausforderungen

Trotz der häufig vorhandenen Vorteile biotechnischer Verfahren im Hinblick auf Energie- und Chemikalienverbrauch oder Anlagenkosten liegt ein Nachteil gegenüber rein chemisch-physikalischen Verfahren in ihrer Störanfälligkeit (mögliche Toxizität von Schadstoffen besonders bei Stoßbelastungen) sowie in ihrer Komplexität, die die Vorhersage der Ergebnisse erschweren. Diese Komplexität zeigt sich z. B. auf dem Niveau von Lebensgemeinschaften in der erwähnten Konkurrenz zwischen Sulfatreduktion und Methanogenese oder zwischen Sulfatreduktion und Eisen(III)-Reduktion. Auch die Rolle von Schwermetallen für Mikroorganismen ist ambivalent: Auf der einen Seite wirken sie als toxische Schadstoffe, auf der anderen als lebensnotwendige Spurenelemente. Zusätzlich – vielleicht auch als Folge der nicht verstandenen Komplexität – behindern unzureichende Umsatzraten, hohe hydraulische Verweilzeiten und damit hohe Anlagenkosten die Anwendung biotechnischer Verfahren. Daher ist es eine wesentliche wissenschaftliche Herausforderung, die Biologie der Prozessträger besser zu verstehen, um die Bedingungen in den technischen Anlagen entsprechend einzustellen und Störgrößen durch optimierte Steuerung zu vermeiden. Zum Beispiel waren Arbeiten zur Fe<sup>2+</sup>-Oxidation über Jahrzehnte fast ausschließlich fokussiert auf *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Heute weiß man, dass dieser Organismus bei etwas erhöhten pH-Werten in den natürlichen Systemen oft keine dominante Rolle spielt. Dank der immer leistungsfähigeren Methoden der Molekularbiologie wie Genom-, Transkriptom- oder Proteomanalysen können neue Erkenntnisse über relevante Mikroorganismen gewonnen werden. Versteht man die Prozessträger, ihre physiologischen Bedürfnisse und Limitationen besser, so lassen sich sowohl die Störanfälligkeit als auch die erforderlichen hydraulischen Verweilzeiten senken.

Besonders groß ist die Komplexität außerhalb eines Bioreaktors oder konstruierten Feuchtgebietes, also in den Kippen oder Bergbaufolgeseen selbst. Gleichzeitig ist die Problembeseitigung vor Ort oft am kostengünstigsten. Eine Herausforderung ist also auch, gut kontrollierte *in situ*-Remediationsverfahren zu implementieren.

Die Kombination geobiotechnischer mit chemisch/physikalischen Verfahren kann sicher weiter ausgebaut werden. Beispielsweise könnte man die Bergbauwässer zunächst durch Membranverfahren konzentrieren und Inhaltsstoffe dann biotechnisch fällen.

Die Behandlung von Bergbauwässern wurde lange Zeit nur unter dem Blickwinkel der Wasserreinigung gesehen. Angesichts steigender Energiepreise und zunehmender Ressourcenknappheit stellt sich die Frage, ob Elemente aus den belasteten Wässern gewonnen und einer neuen Nutzung zugeführt werden können. Bereits realisierte Beispiele sind die Gewinnung von elementarem Schwefel im THIOPAQ-Prozess oder die Nutzung ausgefallenen Schwertmannits zur Herstellung von Farbpigmenten oder von Adsorbentien. Künftige Herausforderungen werden sein, mehr Elemente aus den Wässern herauszuholen und Möglichkeiten der selektiven Abtrennung zu nutzen, um so die Gewinnung von Reinsubstanzen zu erleichtern.

#### FORSCHUNGSBEDARF

- Untersuchung relevanter Organismen auch mit Omics-Verfahren
- Biotechnologische Optimierung von Bioadsorbentien
- Entwicklung kontrollierter *in-situ*-Remediationsverfahren
- Neue Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen

## 4 Rückstände aus Industrie und Umwelt – Aufbereitung mittels Geobiotechnologie?

*F. Glombitza, W. Berger, E. Kothe, J. Ondruschka, J. Pinka, A. Schippers, S. Willscher, A. Zehnsdorf, H. Brandl*

### Einleitung

Um den Bedarf der Wirtschaft an Rohstoffen und Energie zu decken, werden ständig neue Rohstofflagerstätten erschlossen. Zusätzlich bemüht man sich darum, zumindest einen Teil der Rohstoffe wieder zu verwerten (Recycling). Der Erfolg hängt erheblich davon ab, wie gut es gelingt, die verschiedenen Stoffe voneinander zu trennen; diese Trennprozesse sind gegenwärtig immer noch unvollkommen. Dadurch fallen beim Recycling Reststoffe an, die noch erhebliche Mengen an Wertstoffen aufweisen. Besonders die Rückstände aus älteren Gewinnungstechnologien enthalten aus heutiger Sicht Konzentrationen, die zum Teil höher als in abbauwürdigen Erzen sind. Deshalb sieht die OECD die Erhöhung der Effizienz bei der Ressourcennutzung als eine der dringendsten Herausforderungen.

Wir finden heute große Mengen metallhaltiger Industrierückstände vor: Es sind Rückstände aus Hütten, in der Regel als Schlacken, und aus Erzaufbereitungsanlagen, die als Flotationsrückstände und Tailings lagern. Dazu kommen eisenhaltige Rotschlämme aus der Aluminiumgewinnung, Schlacken und Reststoffe der Phosphor- und Phosphatproduktion, Filterrückstände der Titanoxidherstellung sowie Schlämme aus den Galvanikanlagen. Auch Aschen aus den unterschiedlichsten Verbrennungsprozessen der Gas-, Öl- und Kohlekraftwerke sowie Müllverbrennungsanlagen und Stäube aus Entstaubungs- und Filteranlagen zählen dazu. Schließlich fallen vielfältige Rückstände aus Klär- und Biogasanlagen sowie Fluss- und Hafenschlämme an. Diese Rückstände sind vorrangig Oxide und Hydroxide, Phosphate, Karbonate und Silikate, die eine Reihe von wichtigen Metallen und Spurenelementen enthalten. Sie sind aber nicht nur Relikte der Vergangenheit. Sie fallen auch heute noch bei den unterschiedlichsten Verbrennungs-, Reinigungs- und Wertstoffgewinnungsprozessen an. Dazu müssen vor allem die Schlämme aus den Trinkwasser- und Wasseraufbereitungsanlagen sowie die Aschen der verschiedenen Verbrennungsprozesse und die Schlacken der produzierenden Hüttenwerke gezählt werden. Neben diesen Rückständen steigt die Zahl der wiederaufzubereitenden und in den Wirtschaftskreislauf zurück zu führenden Güter wie Elektronikschrott, Katalysatoren und Verbundmaterialien ständig an. Dazu kommen Rückstände neuer Industriezweige wie der Fotovoltaik oder der Chipindustrie. Die Wertstoff-Konzentrationen in diesen Rückständen liegen ebenfalls oft weit über denen, die in Lagerstätten vorhanden sind, oder können durch Anreicherungs- und Aufkonzentrierungsprozesse in eine solche Größenordnung gebracht werden.

Problematisch ist, dass bei einer Verwertung bzw. Abtrennung von Wertstoffen durch mikrobielle Prozesse aus diesen Rückständen in der Regel keine Energiequellen in Form von Eisen- und Schwefelverbindungen für litotrophe Mikroorganismen zur Verfügung steht. Dennoch gibt es eine Reihe geomikrobieller Prozesse, die aus den natürlichen Stoffkreisläufen abgeleitet und für eine Gewinnung von Wertstoffen genutzt werden können.

Dabei steht eine enorme Vielfalt von Mikroorganismen zur Auswahl, die eine Vielzahl an möglichen Reaktionen für die Auflösung oder Transformation der Matrix eröffnet. Die als Acidolyse bezeichnete Auflösung der Matrix erfolgt durch die Bildung anorganischer Säuren wie Schwefelsäure, Salpetersäure oder Kohlensäure. Organische Säuren wirken oft gleichzeitig als Komplexbildner; dieser Prozess wird deshalb als Komplexolyse bezeichnet. Eine besondere Rolle spielen auch extrazelluläre Substanzen. Sogenannte Siderophore sind in der Lage, Metalloxide mit geringen Löslichkeiten zu komplexieren und damit zugänglich zu machen. Andere Zerstörungs- und Auflösungsmechanismen beruhen auf der Redoxolyse, der Reduktion und Oxidation von Kationen wie  $Mn^{4+}$  oder  $Fe^{2+}$



und  $\text{Fe}^{3+}$  in einer Mineralmatrix, was zu deren Destabilisierung führt. Auch die Bildung von wasserlöslichen Cyanokomplexen durch eine mikrobielle Cyanidbildung ist möglich, selbst im alkalischen pH-Bereich. Die Umwandlung von Metallen in Organometallverbindungen durch mikrobielle Prozesse wie Methylierungen oder Ethylierungen und die Bildung flüchtiger metallorganischer Verbindungen wurde bisher kaum analysiert und in Technologien umgesetzt. Der mikrobielle Silikataufschluss eröffnet ungeahnte Möglichkeiten zur Wertstoffgewinnung.

Nachfolgende Beispiele vermitteln einen Eindruck der vielfältigen Ansätze für biotechnische (Rück)Gewinnungstechnologien. Das Thema ist jedoch sehr komplex, deshalb erhebt die Übersicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### Rückstände aus der Industrie

#### Schlämme

Die Art, Anzahl und Menge der anfallenden und deponierten Schlämme ist ungeheuer groß. Schlämme aus Beizprozessen und Galvanikanlagen werden heute weitgehend aufgearbeitet. Dafür sind auch mikrobielle Prozesse bekannt. Das trifft noch nicht auf die eisen- und titanoxidhaltigen Rotschlämme aus der Aluminiumproduktion zu. Rotschlämme sind der wasserunlösliche Rückstand nach der Extraktion des Aluminiums mit Natronlauge und enthalten neben Eisen- und Titanoxiden verschiedene Kieselsäureverbindungen. Eine Gewinnung des Eisens durch bekannte mikrobielle Prozesse, aber auch eine Auflösung der Silikatmatrix ist denkbar.

Ähnliches trifft auf die Schlämme der Grubenwasser- und Trinkwasserbehandlungsanlagen zu. Ein besonderes Problem sind Theisenschlämme. Sie sind bei der Verhüttung von Kupferschiefer angefallen. Ihre Gehalte an Spuren- und Edelmetallen sind hoch, doch bisher fehlte eine geeignete Aufarbeitungstechnologie. Im Mansfelder Revier wurden die Kupfererze nicht durch Flotation von dem Begleitmaterial getrennt, sondern direkt in den Verhüttungsprozess eingetragen. Dabei entstanden Flugstäube, die leichtflüchtige Substanzen und Schwermetalle enthielten. Mit der Einführung der Flugstaubwäsche und Verwendung des Theisenwäschers fiel ein Koppelprodukt an. Es enthielt Partikel, die mit Bitumen aus dem Kupferschiefer verklebt waren, und flüchtige Schwermetalle. Bis Anfang der 70iger Jahre wurde es in der Bleihütte Hettstedt weiterverarbeitet. Seit der Stilllegung der Hütte ist die Verwertungskette unterbrochen. Die Theisenschlämme wurden deshalb gelagert in der Hoffnung, eine geeignete Verwertungstechnologie zu finden. Die Angaben über die Mengen schwanken zwischen ca. 200.000 t und ca. 450.000 t Schlamm, die in der Monodeponie Teich 10 auf dem Gelände der Rohhütte in Helbra gelagert sein sollen. Das Wertstoffpotenzial ist mit 18 % Zink, 14 % Blei, 1,2 % Kupfer und 1,2 % Zinn sowie einer Reihe weiterer Spuren- und Nebenelemente sehr hoch. Weitere Hauptbestandteile sind 17 % Siliziumdioxid, 16 % Schwefel und 11 % Kohlenstoff. Neuere Arbeiten im Zusammenhang mit der Gewinnung von Kupfer aus bituminösem Kupferschiefer haben gezeigt, dass die organischen Komponenten mikrobiell abgebaut und die Metalle dadurch mobilisiert werden können.

Schlämme aus Kläranlagen enthalten in der Regel ebenfalls hohe Konzentrationen an Metallen. Das beruht auf der Fähigkeit von Mikroorganismen, durch Sorptions- und Akkumulationsprozesse Metalle zu speichern. Besonders hohe Konzentrationen – bis zu einigen Gramm / kg Trockenklärschlamm – findet man häufig für Zink und Kupfer. Wird Biomasse zur Biogasbildung verwendet, sind die Konzentrationen in den Rückständen oft noch bedeutend größer. Durch die Methanbildung und die Reduktion der Sulfate werden die Metalle in der Regel als Sulfide, Hydroxide oder Karbonate gefällt. Die Zusammensetzung bestimmt über die Art einer möglichen Laugung durch Mikroorganismen. Neben den Metallen machen auch die hohen Phosphatkonzentrationen diese Klärschlämme für eine Verwertung interessant. Nach Umweltdatenbank betrug die anfallende Menge 1990 ca. 17 Mio. t nach Ausfällung, die zu ca. 60 % deponiert und zu ca. 10 % der Müllverbrennung zugeführt wurde.

### Flotationsrückstände

Durch jahrzehntelangen Erzbergbau ist eine große Anzahl von Spülhalden entstanden, die unterschiedliche Wertstoffe enthalten. So hat der Zinnbergbau in Altenberg in den letzten Jahrzehnten mit der Schwarzwasserhalde, der Tiefenbachhalde und der Bielatalhalde drei große Deponien hinterlassen, die aus sehr feinkörnigen Sedimenten bestehen. Allein auf der Bielatalhalde lagern heute 10,5 Mio. m<sup>3</sup> Aufbereitungsrückstände. Sie enthalten ca. 0,2 % Zinn, ca. 200 ppm Wolfram, ca. 100 ppm Molybdän, 200 ppm Wismut, 850 ppm Lithium sowie Rubidium, Mangan, Titan und Cäsium neben weiteren Spurenelementen – ein beträchtliches Rohstoffpotenzial. Die Gewinnung von Zinn durch mikrobielle Prozesse ist bereits mehrfach probiert und publiziert, aber wegen der sehr geringen Löslichkeit von Sn<sup>4+</sup> als problematisch eingeschätzt worden. Eine Abtrennung scheint aber auch hier möglich zu sein, wenn es gelingt, eine Reduktion des Sn<sup>4+</sup> zu Sn<sup>2+</sup> in einem pH-Bereich unter 3 oder die Abtrennung als methyliertes Zinn nach einem Biomethylierungsprozess zu erreichen.

Bei der Fluss- und Schwerspatgewinnung, die im Erzgebirge derzeit etabliert wird, werden ca. 6.000 t/a sulfidhaltiger Flotationsrückstände erwartet, die einer Verhüttung zugeführt werden sollen. Eine mikrobielle Laugung und Metallgewinnung scheint aber auch hier möglich zu sein.

### Stäube

Stäube fallen bei den unterschiedlichsten Prozessen an und werden in Filteranlagen abgetrennt. Zinkhaltige Stäube werden heute vorwiegend verhüttet. Stäube aus der Farbfernseh- und Leuchtstoffröhrenproduktion enthalten relevante Mengen an Seltenen Erden – ca. 8-15 % Yttrium, 1-2 % Europium und < 0,1 % Gadolinium – neben Zink, Aluminium, Cadmium und Eisen. Um die Wertstoffe – insbesondere Europium, Gadolinium und Yttrium – abzutrennen, wurde versucht, das Material mit oxidierenden und säurebildenden mikrobiellen Prozessen aufzuschließen. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine mikrobielle Laugung der sulfidhaltigen Bildschirmmaterialien möglich ist und Yttriumkonzentrationen bis zu 500 mg/l erreicht werden können.

### Aschen

Aschen als Rückstände aus Verbrennungsprozessen enthalten eine Vielzahl von wertvollen Elementen. So sind Braunkohlen gute Sorptions- und Speichermittel für Metalle. Gegenwärtig werden in Deutschland jährlich ca. 170 Mio. t Braunkohle gefördert. Die Aschegehalte liegen bei ca. 10 bis max. 20 % bezogen auf trockene Kohle. Das bedeutet einen jährlichen Ascheanfall von mindestens 15 Mio. t. Diese Aschen bestehen hauptsächlich aus Calcium, Magnesium, Aluminium neben Silizium und enthalten darüber hinaus je nach Kohleart und Lagerstätte beträchtliche Mengen an Spurenelementen und Seltenen Erden. 1 t Asche ist auf der Basis der Preise für die in ihr enthaltenen Metalle ohne Berücksichtigung von Silizium aktuell ca. 520 € wert. Bisher wurden die Aschen deponiert, als Zuschlagstoff für die Immobilisierung von Schadstoffen oder im Bauwesen verwendet. Eine Gewinnung von Metallen aus diesen Aschen durch unterschiedliche mikrobielle Laugungsprozesse ist denkbar und teilweise bereits erprobt. Sie kann je nach Konzeption und Zielelement im sauren, neutralen oder alkalischen pH-Bereich erfolgen und zu verschiedenen Wertstoffen führen. Analoge Überlegungen gelten für Steinkohleaschen.

Die Aschen aus der Öl- und Gasfeuerung und die Filterstäube der Erdöl verarbeitenden Industrie enthalten vor allem 2-10 % Vanadium und 1-3 % Nickel. Sie werden in Trommelöfen aufgeschmolzen und mit Soda versetzt. Dadurch werden Natriumvanadat (Na<sub>4</sub>V<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) und Eisenickelstein (FeS und Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>) gewonnen. Die Vanadiumkonzentrate mit hohem Gehalt an elementarem Kohlenstoff werden bislang überwiegend deponiert. Europaweit rechnet

**Flotation:** Anreicherungsverfahren, das im Bergbau, beim Papierrecycling, der Wasseraufbereitung oder der Bodensanierung zum Einsatz kommt. Es beruht auf der unterschiedlich guten Benetzbarkeit von Partikeln mit Gasblasen; gut benetzbare Partikel sammeln sich im Schaum an der Oberfläche der Suspension. Durch Zusätze können die Benetzungseigenschaften verändert werden.

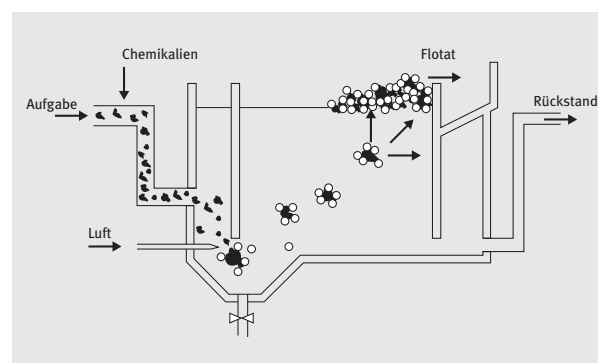


Abb 11: Flotationsverfahren (Quelle: Handbuch Bodenwäsche, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1993), S. 81)

man mit einer jährlich verfügbaren Menge an solchen Filterstäuben von ca. 100.000 t. Eine mikrobielle Laugung zur Gewinnung der Metalle erscheint erfolgversprechend.

In Laborversuchen mit Kraftwerksflugaschen konnten erhebliche Mengen an Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink durch mikrobielle Laugungsprozesse mit *Bacillus megasterium*, *Pseudomonas putida*, *Acidithiobacillus*. sp. und *Aspergillus niger* abgetrennt werden, wobei das Ausbringen bis zu 80 % betrug und von den jeweils verwendeten Stämmen abhängig war.

Besonders interessant sind Aschen aus Müllverbrennungsanlagen. Durch die Vorsortierung des Brennstoffes sind höhere Konzentrationen als in anderen Aschen zu erwarten; die Zusammensetzung hängt von den jeweiligen Ausgangssubstanzen ab. Bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen entstehen durchschnittlich 250 kg/t Hausmüllverbrennungaschen (HMVA). Bei einer derzeitigen Kapazität der ca. 70 großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland von etwa 20 Mio. t/a ergibt sich ein jährliches Aufkommen von ca. 5 Mio. t, das sich in den nächsten Jahren noch deutlich erhöhen wird. Gegenwärtig werden aus der HMVA nur ca. 8 % Metalle, davon ca. 1 % Nichteisen-Metalle, zurückgewonnen. Der überwiegende Teil – ca. 75 % – wird im Deponie- und Straßenbau verwertet. Etwa 10 % werden auf Deponien gelagert. HMVA weisen durch die heterogene Zusammensetzung des bei der Verbrennung eingesetzten Abfalls eine große Schwankungsbreite der Feststoffparameter auf. So enthalten Roh- und gealterte Aschen 1.000 – 3.500 mg/kg Blei, 200-1.000 mg/kg Chrom, 1.000-10.000 mg/kg Kupfer, 100-500 mg/kg Nickel und 2.000 – 7.000 mg/kg Zink. Dabei liegen insbesondere die durchschnittlichen Kupferkonzentrationen bereits im Bereich der Bauwürdigkeit von Kupferlagerstätten. Um die stoffliche Verwertung der Nichteisen-Metalle der HMVA zu verbessern, muss in erster Linie die Aufbereitung optimiert werden, zum Beispiel durch eine Abtrennung durch Wirbelstrom- bzw. Induktionsabscheider sowie eine Zerkleinerung der Grobfraction vor der weitergehenden Klassierung. Bei der Aufbereitung der Feinfraktionen können neben (nass)mechanischen Aufbereitungsschritten biotechnische Verfahren wie z.B. das Bioleaching zu einer besseren Verwertung der Wertstoffe beitragen.

### Schlacken

Schlacken sind die Rückstände unterschiedlicher Schmelzprozesse. Sie fallen gegenwärtig vorrangig in Hütten bei der Gewinnung von Zink, Blei, Kupfer und Nickel an. Mit dem Rückgang der Produktion wurden die Deponien von Schlacken an alten Hüttenstandorten saniert und in der Regel mit einer Oberflächenwasser reduzierenden Schicht abgedeckt. Solche Standorte finden sich u. a. im Harz, in Freiberg und von der Nickelhütte in St. Egidien in Sachsen. Bei den Schlacken der produzierenden Hütten handelt es sich vorwiegend um Silikate, die aber immer noch beträchtliche Mengen an Wertstoffen enthalten können.

In der Zinkrecycling-Hütte Freiberg wurde die Wälzoxidlaugung zur Gewinnung von Zink aus Stäuben entwickelt und großtechnisch eingeführt. Der Durchsatz ist mit 50.000 t/Jahr vergleichsweise sehr hoch. Die Analysen zum Verhalten der anfallenden Schlacken haben gezeigt, dass es mit neutrophilen und alkalophilen Mikroorganismen möglich ist, aus den Schlacken restliche Schwermetalle wie Zink, Blei und Cadmium zu extrahieren. Im sauren pH-Bereich wird dagegen bevorzugt nur Zink abgetrennt.

Die in den Bleihütten anfallenden Schlacken werden unterschiedlich behandelt. So werden die Schlacken der Sekundärbleihütte MRU Freiberg (Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik GmbH) deponiert, während in der Primärbleihütte BBH Berzelius Bleihütte Stolberg ca. 60.000 t/a einer Silikatschlacke anfallen, die als Berzelit® vor allem im Deponie- und Straßenbau Verwendung findet.

Die Aurubis-Kupferhütte (vorm. Norddeutsche Affinerie) produziert beim Einschmelzen von Kupferkonzentraten neben Kupfer und Edelmetallen eine Eisensilikatschmelze, die in zwei unterschiedlichen Verfahren zu Eisensilikat-Gestein bzw. -Granulat verarbeitet wird. Die Kupfererzkonzentrate, die zur Verhüttung eingesetzt werden, enthalten neben Kupfer und Schwefel auch ca. 30 % Eisen, das in mineralischen Phasen gebunden ist. Unter Zu-

gabe von Quarzsand wird bei einer Temperatur von ca. 1.250°C pyrometallurgisch eine eisensilikatische Schmelze erzeugt. Bei langsamer Abkühlung entsteht ein hochwertiges, kristallines Gestein. Dieses besteht zu ca. 95 % aus dem Mineral Olivin  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$  und ist vergleichbar mit magmatischen Gesteinen wie z.B. Basalt, Diabas oder Gabbro. Nach schockartiger Abkühlung im Wasserstrahl entsteht ein amorphes Granulat, vergleichbar einem gewaschenen Sand 0 - 4 mm. Dieses Eisensilikat-Granulat wird zu dem genormten Strahlmittel Nastra verarbeitet, während das Eisensilikat-Gestein als Baustoff Verwendung findet. Da in der Schlacke noch eine Vielzahl anderer Elemente vorhanden sein sollten, ist eine weitere Wertstoffgewinnung analog der zitierten mikrobiellen Auflösung von Schlacken vorstellbar.

Ein Beispiel für die Behandlung von Schlackenhalde ist St. Egidien. Mit der Stilllegung der dortigen Nickelhütte 1990 wurde ein sehr großes Industrieareal zu einem Altstandort. Insgesamt existierte neben einem mit Nickel-, Chrom- und Kobaltverbindungen belasteten Kernbereich eine Betriebsdeponie (Spülteich) mit ca. 2,3 Mio. t Schlacken und anderen Produktionsrückständen.

Dass diese Silikate mikrobiell aufgeschlossen werden können, wurde in der Vergangenheit durch die Aufschlüsse der Phosphorofenschlacken (POS) mit verschiedenen Prozessen gezeigt. POS ist ein kalziumsilikathaltiger Rückstand, der bei der elektrothermischen Produktion von Phosphor aus Apatit entsteht; er enthält ca. 1 % Seltene Erden und 2 % Strontium. Über einen längeren Zeitraum sind davon in Piesteritz ca. 120.000 t/a und in Bitterfeld ca. 25.000 t/a angefallen. Die gesamte in Deutschland angefallene Schlackenmenge wird gegenwärtig auf ca. 22,6 Mio. t geschätzt. In Bitterfeld und Piesteritz gab es vor 1990 verschiedene Untersuchungen, um die Phosphorschlacken nutzbar zu machen bzw. zu veredeln. Die biotechnischen Arbeiten hatten zum Ziel, die Silikate durch säurebildende Prozesse mit autotrophen und heterotrophen Mikroorganismen aufzuschließen. Die Abtrennung der Seltenen Erden erfolgte durch chemische und/oder mikrobiell initiierte chemische Laugungsprozesse. In Bitterfeld wurde der Aufschluss mit Abfall-Salzsäure und mikrobiell mit Gluconsäure untersucht; gleichzeitig wurde aktive Kieselsäure, Natriumsilikat, Zeolithe und Seltene Erden neben organischen Produkten wie Kalziumgluconat gewonnen. In Piesteritz bearbeitete man den Aufschluss mit Salpetersäure zur Gewinnung von Seltenen Erden und Strontium.

Neben POS sind umfangreiche Mengen an Phosphatgips aus der nasschemischen Phosphorsäureproduktion durch den Aufschluss von Apatit mit Schwefelsäure angefallen, die ebenfalls deponiert wurden. Die Gesamtmenge wird auf ca. 34 Mio. t geschätzt. Der Gehalt an Seltenen Erden liegt beim Phosphatgips aus Kola-Apatit bei ca. 0,3 - 0,4 %. In der Sonderabfalldeponie Knapsack-Hürth sollen neben Kalziumsilikatschlacke 6 Mio. t Phosphatgips abgelagert worden sein.

### Recyclbare Produktionsrückstände

Viele recyclbare Rückstände in der Industrie können durch mikrobielle Prozesse getrennt werden; dazu zählen beispielsweise Verbundmaterialien aus Pappe, Papier sowie Kunststoffen mit Metallen. Gegenwärtig werden diese Materialien verbrannt und die Metalle abgetrennt. Eine Alternative ist, die organischen Trägermaterialien mikrobiell abzubauen und/oder in wasserlösliche Verbindungen umzuwandeln.

Elektronikschrott kann durch unterschiedliche säuregenerierende mikrobielle Prozesse aufgelöst und in seine Komponenten zerlegt werden. Dabei können sowohl autotrophe als auch heterotrophe Mikroorganismen eingesetzt werden. Gleiches gilt für Autoschrott-Schredderrückstände, die ebenfalls nach einer Vorbehandlung gelaugt werden können, und für verbrauchte Katalysatoren. Bereits in den 80er Jahren wurde gezeigt, dass Nickel und Molybdän durch nickelresistente moderat azidophile Mikroorganismen aus Hydrierkatalysatoren mit einem Gehalt von 1,5 - 3 % Nickel und 4 - 11 % Molybdän neben Aluminium, Eisen und Calcium zurückgewonnen werden können. Analoge Arbeiten mit adaptierten Aspergillus-Stämmen führten zu Ausbeuten von 78 % an Nickel, 82 % an Molybdän und 65 % an Aluminium.

Für Abfälle und Fehlchargen der Fotovoltaik-Produktion fehlen bisher erprobte Recyclingtechnologien. Bei der Produktion von Dünnschichtmodulen fallen unter anderem Halbleitermaterialien wie Kadmiumtellurid und Kupfer-Indium-Gallium-Selenid ( $\text{CuIn(Ga)Se}_2$ ) an. Für die Rückgewinnung von Kadmiumtellurid existiert bisher nur ein großtechnisches nasschemisches Recyclingverfahren (First Solar). Andere Recyclingtechnologien befinden sich in der Pilotphase. Der Einsatz von Biotechnologie wäre zu prüfen und zu erproben.

### Rückstände in der Umwelt

#### Deponien

Eine weitere Wertstoffquelle sind alte Hausmülldeponien. Bei Aschedeponien entspricht der Wertstoffinhalt der Zusammensetzung der Brennstoffe mit entsprechend höheren Konzentrationen. Ist der Anteil organischer Verbindungen im deponierten Material hoch, so nehmen die Konzentrationen an Metallen durch die Umwandlung des organischen Anteiles in Deponiegas zu, sofern sie nicht mit dem Deponiesickerwasser ausgetragen werden. Eine Nutzung nach Beendigung der Methanbildungsphase ist denkbar.



Abb. 12: Behandlung schwermetallhaltiger Sedimente durch Phytoremediation

#### Fluss-, Hafen-, Meeres-, Hochwasserschlämme

In Flüssen und Talsperren lagern sich Schwebeteilchen und feine Partikel ab, die durch ihr hohes Adsorptionsvermögen Metallkationen binden. Um die Flüsse schiffbar zu halten, werden sie turnusmäßig entfernt. Ein biologischer Laugungsprozess mittels Zugabe von Schwefel zur Dekontamination von Flussschlämmen konnte im Pilotmaßstab gezeigt werden. Ebenso lagern sich an künstlichen Barrieren in Flüssen Sedimente an, die in der Regel reich an Schwermetallen und Spurenmetallen sind. So liegen allein in einem 2,5 km langen Abschnitt der Weißen Elster im Stadtgebiet von Leipzig ca. 330.000 t Sediment, die u.a. 1.300 t Zink, 81 t Nickel und 79 t Kupfer enthalten. Auch Hafenschlämme, Meereschlämme, die insbesondere bei der Reinhaltung der Boddengewässer anfallen, und Hochwasserschlämme sind in der Regel mit Schwermetallen beladen.

### FORSCHUNGS-/HANDLUNGSBEDARF

- Zentralregister von Rückständen, Reststoffen und Abfällen mit Angabe der Inhaltsstoffe und ihrer Konzentration
- Studien zur Wirtschaftlichkeit der mikrobiellen Aufbereitung verschiedenster metallhaltiger Sekundärrohstoffe
- Entwicklung von kostengünstigen naturnahen Verfahren zur Aufarbeitung und Trennung von oxidischen und hydroxidischen, silikatischen, karbonatischen, phosphathaltigen Rückständen mit dem Ziel der Gewinnung von Wertstoffen und der Minimierung der Rückstände.
- Entwicklung von Reduktionsprozessen für Metalle im stark sauren (z.B. Zinn), aber und insbesondere auch im neutralen pH-Bereich.
- Analyse der Bildung metallorganischer wasserlöslicher oder volatiler Verbindungen und Siderophorenwirkung.
- Analyse der enzymatischen Prozesse, die einer Gewinnung zu Grunde liegen, und Entwicklung enzymkatalysierter Prozesse.
- Analyse der genetischen Grundlagen mikrobieller Reaktionen und Kombination unterschiedlicher spezifischer genetisch fixierter Reaktionen in Mikroorganismen als Grundlage für die Entwicklung von neuen Technologien.



## 5 Geomikrobiologie im Untergrund – Chancen für Geobiotechnologie

M. Krüger, H.-H. Richnow, M. Wagner, C. Vogt, A. Schippers

### Lagerstätten-Mikrobiologie & MEOR-Strategien

Schon seit Jahrzehnten ist bekannt, dass durch mikrobielle Aktivität direkt in den Erdöl-, Erdgas- und Kohlelagerstätten Methan gebildet wird. Das Methan entsteht aus Kohlenwasserstoffen, die von anaeroben Mikroorganismen in Abwesenheit von Sauerstoff umgesetzt werden. Das Verständnis dieser Prozesse in tiefen Erdöl-, Erdgas- oder Kohlelagerstätten sowie weiteren Geosystemen wie marinen Sedimenten ist nicht nur wissenschaftlich interessant. Es hat auch wirtschaftlich und gesellschaftlich große Bedeutung, denn die Ölqualität wird verändert; das beeinflusst die Exploration und Gewinnung von Energierohstoffen erheblich.

Beispiele für mikrobiell bedingte Probleme bei der Förderung von Erdöl und Erdgas sind (i) die Bildung von toxischem und korrosivem Schwefelwasserstoff in Sulfat-reichen Lagerstätten („Versauerung“), (ii) die Bildung von schwierig zu fördernden Schwerölen und (iii) mikrobielle Korrosion durch Biofilme in Pipelines und Produktionsanlagen. Deshalb ist es für die Explorationsindustrie wichtig, den Degradationsgrad von Lagerstätten einschätzen zu können.

Doch die Mikroorganismen in den Lagerstätten haben nicht nur negative Auswirkungen. Ihr Einsatz beim MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery) bietet ein erhebliches Potenzial zur effektiveren Ausbeutung des Reservoirs. Dafür muss man bestimmen, welches Ausmaß die rezente Methanbildung durch Mikroorganismen in Kohle- und Öllagerstätten erreicht und welche Mikroorganismen daran beteiligt sind. Dies soll zu verlässlichen Aussagen hinsichtlich einer möglichen wirtschaftlichen Nutzung dieses Prozesses führen. Ein kostengünstiges geobiotechnisches Verfahren, um Anteile schwer förderbaren Erdöls oder von Kohle in leichter zu gewinnende Verbindungen wie Methan umzuwandeln, würde zusätzliche umweltschonende Energieressourcen bereitstellen. Auch eine entsprechende Änderung der geologischen oder geochemischen Bedingungen trägt zur effizienteren Nutzung von Lagerstätten bei. Beispiele für mikrobiell katalysierte Reaktionen, die dafür in Frage kommen, umfassen die Bildung von Biotensiden oder Säuren zur Solubilisierung des Erdöls, die Bildung von großen Mengen an Gas zur Drucksteigerung sowie die Abdichtung von Porenräumen. So lässt sich das Fließverhalten und die Fließrichtung des Öls oder Wassers („selective plugging“) mit Hilfe gezielter Biofilmbildung beeinflussen.

### Gasspeicher ( $H_2$ , $CH_4$ )

Angesichts der wachsenden fluktuierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarenergie brauchen wir neue Speichertechnologien. Hierfür wird zum einen die Transformation des Stromes in Wasserstoff oder Methan diskutiert, mit anschließender Speicherung der Gase in Poren- und Kavernengasspeichern. Ebenfalls im Gespräch ist die Einspeisung von Biogas ins bestehende Erdgasnetz und somit möglicherweise auch in die Gasspeicher.



Abb. 13: Tiefenprobennahme in einem Gasfeld

Die Speicherung von Erdgas in Poren- und Kavernenspeichern wird in Deutschland seit vielen Jahrzehnten erfolgreich praktiziert. Die untertägige Speicherung von Wasserstoff oder Biogas (Methan) stellt allerdings aufgrund der spezifischen physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften insbesondere des Wasserstoffs spezielle Anforderungen. Wird durch den Wasserstoff das Bakterienwachstum in Porenspeichern stimuliert, können sich Schwefelwasserstoff und organische Säuren bilden, die korrosiv wirken. Bakterien oder deren organische Stoffwechselprodukte können Porenräume verstopfen. Dazu kommt der Gasverlust durch den mikrobiellen Abbau, der relevante Größenordnungen erreichen kann. Leider existieren zur untertägigen Speicherung von Wasserstoff in Porenspeichern nur ungenügend dokumentierte Erfahrungen aus der Kokereigassspeicherung, die bis in die 70er Jahre praktiziert wurde. Hier besteht hoher Forschungsbedarf.

### Geothermie

Die tiefe Geothermie bietet an vielen Standorten eine wirtschaftliche und klimaschonende Alternative zu fossilen Energieträgern. In den letzten Jahren wurden in einigen Bundesländern insgesamt mehr als 15 neue Geothermieanlagen gebaut, die heißes Wasser aus großen Tiefen zur Fernwärmeversorgung und zum Teil auch zur Stromgewinnung nutzen. Die Anforderungen an Anlagen und Fördereinrichtungen sind vielfältig und werden durch Chemie und Temperatur des Fluids, die Menge und Zusammensetzung der gelösten Gase und die gewünschten Fördermengen beeinflusst. Doch auch die Mikrobiologie spielt eine Rolle: Über das Thermalwasser können Mikroorganismen aus den Aquiferen in die Anlage eingebracht werden. Diese können lokal zu Schäden durch mikrobielle Korrosion oder zur Verringerung der Flussraten durch die Bildung von Ablagerungen und Biofilmen führen. Aber die Temperaturveränderungen im Untergrund beeinflussen auch die hydrogeochemischen Verhältnisse und die Mikrobiologie. Für die Einschätzung der mittel- bis langfristigen Betriebssicherheit ist es wichtig zu wissen, ob und wie sich die mikrobielle Biozönose und lokale Geochemie in den Thermalwasser-Aquiferen während der Förderung und der Passage durch die Anlage, aber auch bei der Re-Injektion des stark abgekühlten Thermalwassers verändert.

### Kohlendioxid-Speicherung (CCS)

Deutschland will seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80 % mindern. Dafür wird neben den zentralen Ansätzen Energieeffizienz und erneuerbare Energien auch die Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> in tiefen geologischen Formationen untersucht. Diese sogenannte CCS-Technologie (Carbon dioxide Capture and Storage) ist vor allem für Kohlekraftwerke langfristig von Bedeutung. Die Technologie wird im industriellen Maßstab seit einigen Jahren in Norwegen und Algerien erprobt. Weitere Speicherprojekte sind in vielen Industrieländern in Vorbereitung. Mit dem derzeitigen Stand des Wissens ist es nicht möglich vorauszusagen, wie mikrobielle Aktivitäten und hiermit verknüpfte geochemische Reaktionen und Prozesse die Kapazität, Effizienz und längerfristige Zuverlässigkeit von CO<sub>2</sub>-Speichern beeinflussen. Ziel laufender Forschungsprojekte ist zu untersuchen, wie hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf physiologische Aktivitäten und die Zusammensetzung von Mikroorganismenpopulationen wirken und wie sich diese geochemischen Katalysatoren unter Lagerstätten-Bedingungen verhalten. In solchen extremen Umgebungen leben aktive, hochangepasste Mikroorganismen, die wichtige Rollen in biogeochemischen Stoffkreisläufen spielen. Auch sind sie von entscheidender Bedeutung für eine langfristige Umwandlung von CO<sub>2</sub> zu Methan oder Biomasse. Die Ergebnisse aus diesen Arbeiten werden zu einer besseren Einschätzung von Kapazität, Effizienz und längerfristiger Zuverlässigkeit der geplanten CO<sub>2</sub>-Lagerstätten führen.

Jüngere Forschungsarbeiten befassen sich damit, welche Folgen mögliche Leckagen aus CCS-Lagerstätten für das Grundwasser und für geobiochemische Prozesse haben. Die ökologischen Auswirkungen auf natürliche mikrobielle Gemeinschaften durch pH-Absenkung und hohe CO<sub>2</sub>-Partialdrücke in der Geosphäre sind nicht abschließend geklärt und für die Umsetzung von CCS-Maßnahmen wichtig.

### Endlagerung radioaktiver Abfälle

Mikrobielle Prozesse spielen auch für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund eine Rolle. Untersuchungen hierzu wurden für die geologischen Barrieren Granit und Tongestein durchgeführt. Dabei konnte eine geringe Besiedlung mit Mikroorganismen festgestellt werden. Von besonderer Bedeutung sind Sulfat reduzierende Bakterien, die das korrosive Gas Schwefelwasserstoff bilden, welches Korrosionsprobleme bei der technische Barriere (Metallkanister) hervorrufen kann. Mikroorganismen im Untergrund katalysieren außerdem die Bildung und den Abbau von Kohlendioxid, Wasserstoff und Methan, den Abbau und die Bildung von organischem Kohlenstoff sowie die Reduktion von Luftsauerstoff. Weiterhin beeinflussen Mikroorganismen reduzierende und oxidierende Prozesse. So spielen sie für die Mobilisierung und Immobilisierung von Metallen und Radionukleiden eine Rolle. Außerdem werden Metalle an Biomasse sorbiert. Zu klären bleibt, inwieweit die mikrobiellen Prozesse durch die Auflockerung der geologischen Barriere und die Einlagerung der Abfälle (Temperaturanstieg) stimuliert werden. Dabei sind vor allem Grenzflächen wie die Oberfläche der geologischen Barriere oder der Übergang vom Tongestein Bentonit zum Metallkanister bedeutend. Dafür müssen die mikrobiellen Prozesse simuliert und quantifiziert und in mathematische Modelle einbezogen werden, um so belastbarere Sicherheitsanalysen zu gewährleisten.

### Mikrobieller Abbau organischer Schadstoffe – Bioremediation

In Europa gibt es über 3 Millionen altlastenverdächtige Standorte. Ca. 250.000 davon werden nach bisherigem Kenntnisstand als sanierungsbedürftig eingestuft. Der ständige Ausschuss Altlasten der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz hat allein in Deutschland über 300.000 altlastenverdächtige Flächen erfasst, von denen derzeit etwa 4.000 saniert werden. Da die Standortbegutachtungen immer noch fortgesetzt werden, könnte die Anzahl der als sanierungsbedürftig eingestuften Standorte bis zum Jahr 2025 noch um 50 % ansteigen.

Altlasten aktiv zu sanieren (*ex situ*) – durch Bodenauskoffnung, Bodenwäsche und Deponierung, Pump & Treat etc –. erweist sich an vielen Standorten als wenig praktikabel: In besiedelten Gebieten sind *ex situ*-Technologien häufig technisch nicht machbar oder ökonomisch nicht sinnvoll. Angesichts des immensen Altlastenbestandes ist es dringend notwendig, wenig invasive, energiesparende, effiziente und wirtschaftlich tragfähige Standortmanagement- und Sanierungsstrategien zu entwickeln. Der Schadstoff sollte direkt im kontaminierten Umweltkompartiment (*in situ*) beseitigt werden.

Ausgangspunkt für die Entwicklung von innovativen *in situ*-Sicherungs- und Sanierungskonzepten ist das Verständnis biologischer Abbauprozesse. Beispiele hierfür sind (i) der aerobe Abbau beim Air Sparging oder Pump & Treat-Verfahren, (ii) die Beschleunigung des anaeroben Schadstoffabbaus (Enhanced Natural Attenuation, ENA), oder (iii) die reine Beobachtung natürlich ablaufender Abbauprozesse (Monitored Natural Attenuation, MNA) zur Standortsicherung. Um zu gewährleisten, dass das biologische Selbstreinigungspotenzial die Schadstofffracht an einem Standort nachhaltig verringert, müssen die wirksamen Prozesse qualitativ und quantitativ erfasst werden. Die Anforderungen an die Methoden zur Schadstoffüberwachung sind hoch. Natürliche Ab-

**Pump& Treat:** Verfahren, bei denen das Wasser für die Behandlung aus dem Untergrund gepumpt wird.

**Air Sparging:** Einleitung eines Luftstroms in den Boden. Flüchtige Verbindungen werden damit ausgetragen, die abgesaugte Bodenluft wird anschließend aufbereitet



Abb 14: Kernbeprobungen im Gasfeld zum Monitoring

bauprozesse sind relativ langsam, weshalb MNA-Maßnahmen typischerweise lange dauern (Jahre bis Jahrzehnte). Das stellt hohe Anforderungen an die Planung und Überwachung der Maßnahme und somit an die langfristige Prognose der Schadentwicklung. Vor allem soll ausgeschlossen werden, dass Gewässer oder angrenzende Boden- und Grundwasserbereiche verunreinigt werden. Stellt sich heraus, dass das natürliche Abbaupotenzial nicht ausreicht, um die Schadstofffracht schnell genug zu verringern, kann mittels ENA versucht werden, den Schadstoffabbau zu beschleunigen. Um MNA- oder ENA-Konzepte bei der Altlastenbearbeitung zu realisieren, muss die Effizienz des Schadstoffabbaus an einem Standort nachgewiesen und über lange Zeiträume prognostiziert werden können. Eine Schlüsselfrage bei der Planung von Sanierungsvorhaben ist daher, welche Faktoren die mikrobielle Abbauleistung bestimmen und ggf. limitieren.

Für die direkte Erfassung und Beurteilung des Schadstoffabbaus gibt es nur wenige Verfahren. Sie sind meist nur für bestimmte Schadstoffklassen und nicht für jede Kontamination anwendbar. Forschungsbedarf besteht zur Entwicklung quantitativer Verfahren zur Überwachung des Abbaus. Dazu kommen Methodenkombinationen, die es erlauben, (i) die Biodegradation der Kontaminanten mit geringem Zeit- und Kostenaufwand nachzuweisen, (ii) die mikrobiellen Schadstoffabbaupotenziale zu beurteilen und (iii) begründete langfristige Prognosen über die Abbauleistungen zu erstellen.

Wenn man die Stöchiometrie des Abbaus abschätzt und MNA- und ENA-Maßnahmen plant, muss man biogeochemische Umsetzungen anorganischer Verbindungen berücksichtigen. Zwischen- oder Endprodukte von anaeroben Atmungsprozessen – z.B. reduzierte Schwefelverbindungen (Sulfid oder elementarer Schwefel), Ammonium, reduziertes Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) – können wieder oxidiert werden und mit organischen Kontaminanten um Elektronenakzeptoren konkurrieren. Auch die reduktive Dehalogenierung chlorierter organischer Verbindungen kann sich in Gegenwart energetisch günstigerer Elektronenakzeptoren verlangsamen.

Über die Zusammensetzung von mikrobiellen Gemeinschaften, die Schadstoffe in der Umwelt abbauen und mineralisieren, weiß man noch nicht viel. Die Schlüsselorganismen des Abbaus am jeweiligen Standort sind meistens unbekannt, und nur ein Bruchteil der gesamten mikrobiellen Gemeinschaft ist im Labor kultivierbar. Der mikrobielle Schadstoffabbau ist oft eine gemeinsame Leistung verschiedener Mikroorganismen, die sich aus der Wechselwirkung der Gemeinschaft ergibt. In Böden, genauer in der Rhizosphäre (Wurzelbereich) ist häufig ein Zusammenspiel von Bakterien, Pilzen und Pflanzen zu beobachten. Derart komplexe Lebensgemeinschaften können mit modernen, kultivierungsunabhängigen molekularbiologischen Methoden aufgeschlüsselt werden. Kennt man die Zusammensetzung der Schadstoff abbauenden Lebensgemeinschaft, eröffnen sich neue Möglichkeiten zur gezielten Manipulation und zur Verbesserung der Abbauleistung. Um Fragestellungen zur Ökologie des Schadstoffabbaus zu beantworten, werden die neuesten Techniken aus der Molekularbiologie, Proteomik und Metabolomik eingesetzt.

Der *in situ*-Schadstoffabbau und simultan ablaufende biogeochemische Prozesse können nicht-invasiv und somit sehr elegant mit Isotopenfraktionierungstechniken charakterisiert und quantifiziert werden. Ein neuer Ansatz ist die mehrdimensionale Isotopenanalyse, mit der spezifische Abbauwege im Feld nachgewiesen werden können. Methodische Grenzen – z.B. fehlende kosteneffektive Routinemethodik für Wasserstoff- und Chlorisotopen, Schwierigkeiten bei der Isotopenanalyse von Spurenkonzentrationen – begrenzen momentan den Einsatzbereich von Isotopenanalysen in der Altlastenforschung, bieten aber Ansatzmöglichkeiten für analytische Entwicklungen.

An den meisten kontaminierten Standorten sind verschiedene Schadstoffe gemischt („Schadstoffcocktail“). Wie Einzelstoffe in Schadstoffcocktails abgebaut werden, welche Hemmungen oder Beschleunigungen des Abbaus von Einzelsubstanzen auftreten können, ist bisher unzureichend untersucht. Hier liegt Potential für grundlegende und angewandte Untersuchungen.

Viele chemische Verbindungen können als Elektronenakzeptoren des anaeroben Abbaus fungieren; um die Ökologie des Schadstoffabbaus besser zu verstehen, benötigt man neue Techniken zur hochauflösenden Charakteri-

sierung gekoppelter Elektronentransferprozesse. Der anaerobe Abbau vieler Kontaminanten ist biochemisch und mikrobiell kaum untersucht; eine genauere Kenntnis des anaeroben Abbaupotentials ist wichtig, um das Umweltverhalten von Chemikalien zu beurteilen. Der anaerobe Abbau von Schadstoffen im Grundwasser und Sedimenten wird bisher in der Chemikalienbewertung kaum betrachtet, obwohl Sedimente und Grundwasserkompartimente meist mikroaerob oder anoxisch sind. Der anaerobe Abbau von „emerging contaminants“ aus diffusen Eintragsquellen ist bis heute wenig untersucht und bildet zukünftig ein attraktives Arbeitsfeld. „Emerging contaminants“ können bspw. Pestizide, Tenside, Pharmaka, Weichmacher oder Stabilisatoren sein. Eine methodische Herausforderung zur Beurteilung dieser diffusen Kontaminationen bildet das Monitoring von Abbauprozessen auf der Skala eines Wassereinzugsgebietes oder Depositionsraumes.

### **FORSCHUNGSBEDARF**

- Erfassung und Charakterisierung der Mikroorganismen im tiefen Untergrund
- Untersuchung der Auswirkungen von Geothermie und CCS auf die mikrobielle Besiedlung
- Verständnis natürlicher biologischer Abbauprozesse und Monitoring-Verfahren
- Beteiligung von Mikroorganismen an Scaling und Biokorrosion
- Entwicklung von geobiotechnischen Verfahren für den tiefen Untergrund



## 6 Stand der Ausbildung in der Geobiotechnologie

*P. Radehaus, M. Kalin, E. Kothe, J. Ondruschka, V. Pratzka, W. Sand, M. Schlömann, K.-P. Stahmann, S. Willscher*

Die Geobiotechnologie umfasst alle mikrobiellen Verfahren in Bergbau und Umweltschutz. Dazu gehören

- » die biotechnische Gewinnung von Wertstoffen aus Lagerstätten, bergbaulichen Rückständen, Abfällen oder Prozesswässern (Biomining, Biohydrometallurgie, Biolaugung, Biooxidation, Biomineralisation, Bioakkumulation, Biosorption, Bioreduktion, Biofällung, Bioflotation, Bioflockung)
- » die Reinigung und Qualitätsverbesserung von Böden, Wasser und Luft durch Schadstofffixierung und -abbau (Bioremediationsverfahren) und die daraus resultierende Austragsminimierung
- » das Monitoring von Stoffveränderungen durch Biosensoren

Geobiotechnologen, die sich mit diesen komplexen Aufgabenfeldern beschäftigen, sollten neben Kenntnissen der allgemeinen Naturwissenschaften (Mathematik, Physik, Chemie) über Spezialkenntnisse der Geologie/Mineralogie, Umweltanalytik, Ökologie, Biotechnologie (Molekularbiologie, Mikrobiologie, Biochemie), Bioinformatik und Prozesstechnik (Bioverfahrenstechnik) verfügen. Um Prozesse für Wertstoffgewinnung und Reststoffabbau zu entwickeln, sind aktuelle Kenntnisse der Molekularbiologie und der Selektion sowie Taxonomie von Mikroorganismen unabdingbar.

### Art und Qualität der derzeitigen Ausbildungsangebote

Nach Kenntnis der Autoren gibt es an deutschen Hochschulen keinen Studiengang „Geobiotechnologie“. Viele Studiengänge bieten als Spezialisierung oder als Wahlfächer Module an, die biotechnische Grundlagen im Zusammenhang mit geologischen Problemen behandeln. Module, die sich mit Mikroorganismen allgemein beschäftigen oder sich auf Bodenschutz spezialisieren, werden fast ausschließlich als Teilmodule oder Wahlmodule angeboten. Meist geht es lediglich darum, Umwelt- und Bodenbelastungsprobleme zu diagnostizieren. Nur in wenigen Fällen werden nach- und vorsorgende Aspekte behandelt. Häufig werden für Module, die sich mit diesen Themen beschäftigen, keine mikrobiellen Kenntnisse vorausgesetzt oder vermittelt. Der Lehrplan umfasst nur chemische oder physikalische Methoden zur Aufbereitung von Altlasten, Bodennutzung und -schutz oder auch Gewinnung von Materialien. Biologische Methoden bleiben außen vor.

Beispielhaft sei hier die Technische Universität Bergakademie Freiberg genannt. Sie bietet den Diplomstudiengang „Geotechnik und Bergbau“ an, der auf Bergbau, Monitoring und Rohstoffgewinnung aus dem Flach- und Tiefbau spezialisiert ist. Geobiotechnologische Inhalte werden nur wenig behandelt, die umweltgeotechnische Ausbildung steht im Vordergrund. Seit dem WS 1996/97 bietet die TU Bergakademie Freiberg zudem den Studiengang „Geoökologie“ an, der nach 6 Semestern mit dem Bachelor oder nach 9 Semestern mit dem Diplom abgeschlossen werden kann. Im Rahmen dieses Studiengangs sind auch Leistungsnachweise in Umweltmikrobiologie/ Biotechnologie zu erbringen. Der Schwerpunkt der Ausbildung liegt im Bereich des Natur-, Umwelt-, Boden- und Gewässerschutzes. Mit diesen Grundlagen ist es schwierig, eine Weiterentwicklung von biogeologischen Technologien voranzutreiben.

Es gibt jedoch Studiengänge, deren Inhalte biotechnologischer orientiert sind. Beispielsweise werden an der Universität Trier zwei Masterstudiengänge angeboten, die der Thematik näher kommen – zum Einen der Master of Science für „BioGeo-Analyse mit Schwerpunkt Biogeographie, Ökologie und Monitoring (BÖM)“ und zum Anderen der Master of Science für „BioGeo-Analyse mit Schwerpunkt Molekularbiologie von Umweltsubstanzen und Umwelteinflüssen“. In beiden Studiengängen geht es aber mehr um Analyse von Umwelteinflüssen und Umweltmanagement als um biogeochemische Prozesse.

An der Friedrich-Schiller-Universität Jena wird sowohl im Bachelor of Science als auch im Master of Science für Biogeowissenschaften deutlich darauf hingewiesen, dass die „Ausbildung im Überlappungsbereich Biologie und Geowissenschaften“ liegt. Trotz umfangreicher biotechnologischer Module und Grundlagenvermittlungen wird auch hier der Schwerpunkt in Richtung von Sanierungsstrategien gelegt. Dies schließt nicht aus, dass sich hier wie auch an anderen Hochschulen einzelne Vorlesungen mit geobiotechnologischen Inhalten beschäftigen. So wird zum Beispiel im Pflichtmodul Umwelttechnik (Vorlesung von Prof. B. Ondruschka) ein Kapitel über „Rohstoffgewinnung durch Erzlaugung“ präsentiert. Als mögliche Wahl ist auch ein 8-semesteriger Studiengang BSc Angewandte Umweltwissenschaften in Zusammenarbeit mit der Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena möglich. Der Schwerpunkt liegt allgemein auf Geo-Bio-Interaktionen, die auch einen Teil des Studienangebots im MSc Mikrobiologie ausmachen. Dennoch, und trotz umfangreicher biotechnologischer Module und Grundlagenvermittlungen, wird auch hier der Schwerpunkt in Richtung von Remediations- und Sanierungsstrategien gelegt und weniger die Rohstoffgewinnung behandelt.

An der Hochschule Anhalt (FH) werden im Rahmen des Moduls Umweltbioverfahrenstechnik (Vorlesung von Prof. R. Pätz) biogeotechnologische Inhalte diskutiert. Gleiches gilt für die Hochschule Mittweida (FH), wo im Rahmen des Biotechnologie/Bioinformatik-Bachelorstudiengangs einige geobiotechnologische Inhalte im Rahmen der einführenden Biotechnologievorlesung (Vorlesung von Prof. P. Radehaus) präsent werden. Allgemein gilt für viele Hochschulen in Deutschland, dass der Schwerpunkt der Studienangebote zumeist auf anderen Gebieten als der für die Zukunft immer wichtiger werdenden Geobiotechnologie liegt.

Die Tabelle im Anhang 1 zeigt ein Angebot an geobiotechnologischen Studieninhalten an deutschen Hochschulen, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Als Informationsquellen dienten dabei die von Hochschulen im Internet zur Verfügung gestellten Studiengangs- und Modulbeschreibungen. Es kann selbstverständlich nicht abgeschätzt werden, inwieweit die Lehrenden von den Modulbeschreibungen abweichen. Es ist davon auszugehen, dass mehr fachübergreifendes Wissen vermittelt wird, ohne dass dies der reinen Beschreibung des Moduls formal entnommen werden kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Studiengänge, die die wesentlichen Aspekte der Geobiotechnologie abdecken, bisher nicht angeboten werden und erst entwickelt werden müssen. Dabei sollte der Fachkräftebedarf untersucht werden, um die Studienschwerpunkte an den gegenwärtigen und zukünftigen Bedürfnissen der Wirtschaft und des Arbeitsmarktes auszurichten.

### Bedarf an Geobiotechnologie-Absolventen

Die vorangegangenen Kapitel zeigen, welche wirtschaftliche Bedeutung die Biolaugung hat. Dazu kommen die geobiotechnischen Verfahren zur Boden- und Wasseraufbereitung und zur Gewinnung von Energierohstoffen. Man kann davon ausgehen, dass zunehmend geobiotechnische Verfahren eingesetzt werden und daher der Bedarf an ausgebildeten qualifizierten Geobiotechnologen in Deutschland und der Welt stetig wachsen wird].

Auf diese Entwicklung ist Deutschland jedoch bisher nicht genügend vorbereitet. Neben den bereits vorhandenen Umwelt- und Geoökologiestudienangeboten fehlen Spezialisierungsangebote in Form von Diplom- oder Masterstudiengängen der Geobiotechnologie. Ein Angebot der geobiotechnologischen Ausbildung auf dem Bachelorniveau ist nicht empfehlenswert, da in diesem hochkomplexen interdisziplinären Themenkreis sehr viel Grundlagenwissen und Methodenkompetenz vorausgesetzt wird. Spezialwissen der Geobiotechnologie sollte darauf aufbauen können.

#### HANDLUNGSBEDARF

- Spezielle Master- oder Diplomstudiengänge der Geobiotechnologie sollten in Deutschland eingerichtet werden, um einen drohenden Fachkräftemangel zu verhindern.

**Tabelle 1 Angebot an geobiotechnologischen Studieninhalten an deutschen Hochschulen**

Studiengang	Universität	Abschluss	Modulname	Inhalt
<b>Angewandte Geowissenschaften mit Schwerpunkt Umweltgeowissenschaften und -technik</b>	Technische Universität Darmstadt	Master of Science	Schadstoffe in der Umwelt	biologische Methoden der Sanierungsmaßnahmen
			Interdisziplinäres Wahlpflichtfach	Vorlesungen zur Biologie (Mikrobiologie, Physiologie der Mikroorganismen, Ökologie,..)
			Kristalle und Minerale	Biomineralisation und Biomaterialien
<b>Angewandte Geowissenschaften</b>	Karlsruher Institut für Technologie	Master of Science	Hydrogeologie III – Schutz und Qualität	pathogene Mikroorganismen, hydrobio-geo-chemische Prozesse im Grundwasser
			Hydrogeologie IV – Ökologie und Klima	Grundlagen der Grundwasser-Mikrobiologie
<b>Geoökologie</b>	Karlsruher Institut für Technologie	Bachelor of Science	Biosphäre -Flora	Anatomie und Systematik von Prokaryoten, Pilzen, Algen, Moosen, Farnen, Pflanzen
			Bodenmineralogie	Biomineralisation: Rolle der Mikroorganismen
			Einführung in die Bodenkunde	Bodenschutz und biologische Prozesse in Böden
<b>BioGeo-Analyse mit Schwerpunkt Biogeographie, Ökologie und Monitoring</b>	Universität Trier	Master of Science	Gentechnik und Genmonitoring	Umgang mit GVOs
			Molekulare Biogeographie	neuere Entwicklungen der molekularen Biogeographie, Naturschutzgenetik
			Advanced Aspects in Environmental Soil Science	Belastbarkeiten von Böden, Interaktionen, Wasserhaushalt
			Soil Use and Sustainable Management:	Verwertung von organischen Reststoffen, nachhaltige Bodennutzung
<b>BioGeo-Analyse mit Schwerpunkt Molekularbiologie von Umweltsubstanzen und Umwelteinflüssen</b>	Universität Trier	Master of Science	Ökotoxikologie	molekularbiologische Wirkungsforschung
			Soil Biology and Soil Functioning	Funktion von Bodenorganismen als Bewohner und Gestalter
			Sustainable Chemistry	Nachhaltigkeitskriterien auf Stoff- und Energiekreisläufe anwenden, Nutzungspotential von nachwachsenden Rohstoffen und Biomassereststoffe
<b>Bio-Geo-Wissenschaften</b>	Universität Jena	Bachelor of Science	Stoffkreisläufe	Verständnis der Stoffumsetzung einschließlich der mikrobiellen im Boden
			Umweltmineralogie I	Ursachen und Entwicklung der derzeitigen Belastungen
			Quartärgeologie und Einführung in die Bodenkunde	Bodenkunde aus naturwissenschaftlicher Sicht
			Limnologie I	Zentrale Rolle von Mikroorganismen im umweltbelasteten Lebensraum Wasser
			Mikrobiologie I	Methoden der Biotechnologie im Bereich Wasser/Boden/Gestein

Studiengang	Universität	Abschluss	Modulname	Inhalt
Bio-Geo-Wissenschaften	Universität Jena	Bachelor of Science	Limnologie II	aktuelle Probleme bei Abwasser und Abwasserbehandlung
			Mikrobiologie II	Grundlagen für die Verwendung von Mikroben in der Biotechnologie und Gentechnik
Bio-Geo-Wissenschaften	Universität Jena	Master of Science	Bioremediation	Wirkung von Stoffen im Boden; biologische Sanierung; Nachnutzung von Altlasten
			Geomikrobiologie / Aquatische Mikrobiologie	Interaktionen von MO mit Mineralien in aquatischen und terrestrischen Lebensräumen
			Angewandte Mikrobiologie / Biotechnologie	wichtige Umwelt-MO des Bodens; Abbau von Problemsubstanzen; Biofilme; mikrobielle Kommunikation; Fermentation; Metagenomics
			Bodenmikrobiologie	molekular-biologische Techniken und Methoden der Genomik; gentechnische Arbeiten
BioGeoWissenschaften	Universität Koblenz-Landau	Bachelor of Science	Interaktionen zwischen Organismen und ihrer Umwelt II	Häufigkeit, Schadstoffabbau, Einordnung – Mikroorganismen
			Mikrobielle Ökologie	mikrobielle Ökologie
BioGeoWissenschaften	Universität Koblenz-Landau	Master of Science	Ökophysiologie heterotropher Organismen	aquatische Mikroorganismen
			Forschungspraktikum Mikrobiologie	Fragestellungen der mikrobiellen Ökologie; Oberflächen-assoziierte, frei lebende und symbiotische MO
Bodennutzung und Bodenschutz	Hochschule Osnabrück	Master of Science	Bodensanierung	Mikrobielle Verfahren / Phytoremediation
			Bodenökologie und Umweltmonitoring	Bodenökologische Methoden; Mikrobielle Biomasse; Markersubstanzen
Geoenvironmental Engineering	TU Clausthal	Master of Science	Bodensanierung	biologische Verfahren zur Reinigung von Böden
			Aufbereitung von Wässern, Abwassertechnik	spezielle biologische Abwassertechnik
Geoökologie	Universität Bayreuth	Bachelor of Science	Pflanzenökologie und Mikrobiologie	ökophysiologische Vorgänge; morphologische Anpassungen der Pflanzen an limitierte Ressourcen, Stress und Konkurrenz; Biologie und Lebensformen von MO sowie Stoffwechselprozesse
			Biosphäre	Grundlagen der Verteilung des Lebens auf der Erde; Konzepte und Arbeitstechniken
Geoökologie	Universität Bayreuth	Master of Science	Biogeochemie	Bodenökologie; Bodenkontamination; Umweltforensik
Geoökologie	TU Braunschweig	Bachelor of Science	Biologie	Botanik, Ökologie, Zoologie, Mikrobiologie: - Chemische und zelluläre Bausteine, - Zellaufbau und Lebensstile, - Stoffwechsel und Energieumwandlung, - Taxonomie und Vielfalt, - klassische und molekulare Techniken
			Pedosphäre	Bodenkunde; Wasser- und Stoffhaushalt

Studiengang	Universität	Abschluss	Modulname	Inhalt
Geotechnik und Bergbau	TU Bergakademie Freiberg	Diplom-Ingenieur	Allgemeine Umweltgeschichte	aktuelle Entwicklung und Initiativen im Kontext der gesellschaftlichen Entwicklung
			Feste Mineralische Rohstoffe – Lagerstättenbildende Prozesse und Montangeologie	Verfügbarkeit von festen mineralischen Rohstoffen; Exploration und Rohstoffbewertung; Bestimmung von Erzen und Industriemineralien
			Geologie, Genese und Prospektion von Kohlen und Kohlenwasserstoffen	Grundlegende Kenntnisse zu Methoden, Ablauf u. Ökonomie der Suche und Erkundung von Lagerstätten; Akkumulation und Reife organischer Substanzen; Methodenvergleich; Rohstoffnachweis und -bewertung, Lagerstättenökonomie
			Grundlagen der Gewinnung/ Geotechnologische Gewinnung	Abgrenzung gegenüber klassischer Gewinnungsverfahren; Lösen – Laugen – Fracken – Form v. Geothermie – hydraulische/hydromechanische Verfahren
			Grundlagen der Hydrogeologie	Gelöste und partikuläre Inhaltstoffe, Bakterien, Viren; Dispersion, Diffusion; Kontamination und Sanierungsmethoden
			Ingenieurgeologie III / Umweltgeotechnik	1.) Deponiebau und Industrielle Absetzanlagen; 2.) Einführung in die Altlasten-Problematik; 3.) Geotechnische Sicherung und Sanierung von Altbergbau
			Rekultivierung	naturwissenschaftliche Grundlagen für die Rekultivierung; Nutzungsanforderungen und deren Umsetzung in der Bergbaufolgelandschaft
Sozioökonomische Umweltbewertung	1.) Umweltaspekte, -auswirkungen, -risiken, Modelling von Umwelt- risiken; 2.) Umweltkosten im betrieblichen Rechnungswesen; 3.) Planung, Aufbau, Implementierung und Monitoring von integrierten Managementsystemen			
Geologie/Mineralogie	TU Bergakademie Freiberg	Bachelor of Science	Allgemeine Lagerstättenlehre	Rohstoffmarkt; Ökonomische Geologie; Lagerstättenbildende Prozesse; Prozesse der Akkumulation, textuellen und stofflichen Veränderung org. Substanz in geologischen Zeiträumen
			Angewandte Geowissenschaften III	1.) Environmental Geology: Luftschadstoffe, Altlasten, Umwelteinflüsse des Bergbaus, Deponien einschließlich Endlagerung radioaktiver und hochtoxischer Abfälle; 2.) Grundlagen der Flachbohrtechnik und Aufschlussarbeiten zur Gewinnung von Proben; 3.) Praktikum zu aktuellen Projekten (Deponien, Sanierung, etc.)
			Angewandte Mineralogie I	Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und industriellen Einsatzmöglichkeiten; Überblick über Genese, Lagerstätten, Rohstoffsituation, Aufbereitungsverfahren und spezifische Einsatzparameter



Studiengang	Universität	Abschluss	Modulname	Inhalt
Geologie/Mineralogie	TU Bergakademie Freiberg	Bachelor of Science	Angewandte Stratigraphie und Fazies	„Grundlagen Mikropaläontologie“; Biostratigraphie; Bedeutung der wichtigsten Mikrofossilgruppen; Makro- und Mikropaläontologie
			Sedimentologie / Stratigraphie I	Transport- und Ablagerungsprozesse; Sedimentpetrographie; syn- und postsedimentäre Texturen; Ablagerungssysteme
Geoökologie	TU Bergakademie Freiberg	Bachelor of Science	Einführung in die Gentechnik	Vorgehensweisen; Enzyme; Vektoren und ihre Eigenschaften; Sicherheit; Recht; Methoden (Isolierung, Subklonierung, Restriktionsverdau, Southern-Blot,...)
			Grundlagen der Biochemie und Mikrobiologie	Struktur und Funktion von Biomolekülen; DNA-Replikation; phylogenetische Klassifizierung und Identifizierung von MO; Abbau von Naturstoffen; N-, S- und Fe-Kreislauf
			Grundlagen des Naturschutzes	administrative Abläufe des Naturschutzes; methodische Kompetenzen; Biotopmanagement und Landschaftspflege
			Mikrobiologisch-biochemisches Praktikum	mikrobiologische und biochemische Methoden; Steriles Arbeiten; Anreicherung, Isolierung, Identifizierung von Bakterien; Stoffwechseltypen; Laugung von Sulfiden, N <sub>2</sub> -Fixierung, Antibiotika-Synthese
			Umweltgeochemie und Ökotoxikologie	Auswirkungen von Veränderungen in Geo- und Ökosystemen auf die belebte Natur; anthropogen beeinflusste Stoffkreisläufe; Modellsysteme – Bioindikatoren – Biomonitoring
			Umweltmikrobiologie	MO zum Abbau organischer Schadstoffe sowie zur Mobilisierung bzw. Immobilisierung anorganischer Schadstoffe; ökologischer Strategien; Nachweis schädigender Wirkungen von Chemikalien
Geoökologie	TU Bergakademie Freiberg	Master of Science	Allgemeine Abfallwirtschaft	Kategorisierung von Abfallmengen und -arten sowie deren Gefährdungspotentiale; Behandlung von Abfällen; stoffliche-, thermische- und biologische Verwertung sowie Deponierung; diverse Recyclingprozesse
				Mechanismen der Schädigungen von Umweltchemikalien und andere Stressoren; Expositions- und Effektanalyse; Pharmakologie Wirkungsanalyse
			Biotechnische Produktionsprozesse	Kenntnisse und Kompetenzen biotechnischer Methoden in Produktionsprozessen; Bioraffinerie; nachwachsende Rohstoffe; Upstream- und Downstream-Processing
			Biotop- und Landschaftsmanagement	Einsatz moderner landschaftsökologischer Verfahren; Analyse und Bewertung der Landschaft und der Restaurationsökologie; Rahmen der Entwicklung

Studiengang	Universität	Abschluss	Modulname	Inhalt
Geoökologie	TU Bergakademie Freiberg	Master of Science	Biotechnology in Mining	1.) Basics: microbial energy metabolism, redox reactions; 2.) Microbial leaching: MO involved in mechanisms of leaching, production of copper, gold and diamonds; 3.) oxidation
			Ingenieurgeologie III / Umweltgeotechnik	1.) Deponiebau und industrielle Absetzanlagen; 2.) Einführung in die Altlastenproblematik; 3.) Geotechnische Sicherung und Sanierung von Altbergbau
			Microbiology of Fossile and Regenerative Energy Resources	mechanisms of aerobic and anaerobic degradation of organic compounds; microbiological processes affecting oil and gas deposits and CO <sub>2</sub> storage
			Mikrobiologisch-biochemisches Praktikum	mikrobiologische und biochemische Methoden; steriles Arbeiten; Anreicherung, Isolierung, Identifizierung von Bakterien; Stoffwechselltypen; Laugung von Sulfiden, N <sub>2</sub> -Fixierung, Antibiotika-Synthese
			Molecular Ecology of Microorganisms	molecular techniques to analyse microbial communities; molecular methods for the identification of isolated bacteria
			Rekultivierung	naturwissenschaftliche Grundlagen der Rekultivierung; Nutzungsanforderungen und deren Umsetzung in der Bergbaufolgelandschaft
			Analyseverfahren für Spurenelemente	Methoden der Spurenelementanalyse; Atomemission, Atomabsorption, Massenspektrometrie, Elektrochemie, Anreicherungs- u. Trennungsvsverfahren, Speziesanalyse
			Stressphysiologie und Ökotoxikologie	Anpassungsreaktionen und Schadmeechanismen; Abwehr toxischer Substanzen; Stellvertreterorganismen; Biotestbatterien
			Umweltbioverfahrenstechnik	Zusammenhänge zwischen Biologie und Verfahrenstechnik; Grundstoffindustrie; biologische Stoffumwandlung im Produktionsbereich und bei End-of-Pipe-Prozessen
			Umweltmikrobiologie	MO zum Abbau organischer Schadstoffe sowie zur Mobilisierung bzw. Immobilisierung anorganischer Schadstoffe; ökologische Strategien; Nachweis schädigender Wirkungen von Chemikalien
			Umweltverhalten organischer Schadstoffe	1.) Chemodynamik: Stoffbewertung, abiotische Transformationsprozesse, Fugazitätsmodelle; 2.) Biologischer Abbau: Persistenz, vollständiger Abbau vs. Cometabolismus, Biotenside, Bioverfügbarkeit; 3.) Ökotoxikologie: Bioakkumulation, Dosis-Wirkungs-Beziehung, Kombinationswirkung
Untergrundsanie rung	Risikoanalyse von Schadensfällen; moderne Methoden zur Reinigung des Untergrundes und Monitoring; sanierungsrelevante Prozesse in der gesättigten und ungesättigten Zone			

Studiengang	Universität	Abschluss	Modulname	Inhalt
<b>International Master Program Geoscience</b>	TU Bergakademie Freiberg	Master of Science	Groundwater Chemistry I	Chemistry of the elements Si, Al, Na, K, C, Ca, Mg, halogens, S, Fe, Mn, N, P and trace elements; radioactivity
			Molecular Ecology of MO	molecular techniques to analyse microbial communities; molecular methods for the identification of isolated bacteria
			Rheology, Lattice Preferred Orientation, Microtectonics	principles in rocks and minerals; kinematic analysis of microstructures, rheology of major rock-forming minerals
			Untergrundsanie rung	Risikoanalyse von Schadensfällen; moderne Methoden zur Reinigung des Untergrundes und Monitoring; sanierungsrelevante Prozesse in der gesättigten und ungesättigten Zone

## 7 Übersicht von Internetadressen und weiteren Informationsquellen

(kein Anspruch auf Vollständigkeit, Reihung ohne Wertung)

### Vereinigungen

**DECHEMA Gesellschaft für chemische Technik und Biotechnologie e.V.,  
Temporärer Arbeitskreis Geobiotechnologie**

<http://biotech.dechema.de/Fachgemeinschaft+Biotechnologie/Gremien+der+Fachgemeinschaft/Geobiotechnologie.html>

**DECHEMA Gesellschaft für chemische Technik und Biotechnologie e.V.,  
Fachgruppe Mikrobielle Materialzerstörung und Materialschutz**

<http://biotech.dechema.de/Fachgemeinschaft+Biotechnologie/Gremien+der+Fachgemeinschaft/Mikrobielle+Materialzerst%C3%B6rung.html>

- Mikrobiologisch beeinflusste Schädigung von Werkstoffen aller Art sowie geeignete Maßnahmen zum Schutz von Werkstoffen gegen diese Schädigung

**Biosaxony e.V.**

[www.biosaxony.com](http://www.biosaxony.com)

- Verband für die Biotechnologie und angrenzende Bereiche von Materialwissenschaft bis Medizintechnik in Sachsen

**Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V.,  
Arbeitskreis Bergbaufolgen**

[www.dgg.de](http://www.dgg.de)

- Förderung der Geowissenschaften in Forschung und Lehre, in Wirtschaft und Verwaltung

**Geokompetenzzentrum Freiberg e.V.,  
Arbeitsgruppe Geobiotechnologie**

[www.gkz-ev.de](http://www.gkz-ev.de)

- Forschung und Entwicklung, Weiterbildung und Promotion des Einsatzes mikrobiologischer Verfahren in Bergbau und Umweltschutz

**Innovationsforum Geobiotechnologie – mikrobiologische Verfahren in Bergbau und Umweltschutz**

[www.geobiotechnologie.de](http://www.geobiotechnologie.de)

- Verbundvorhaben im Rahmen der Unternehmen Region – BMBF-Innovationsinitiative Neue Länder

### Institutionen

**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR),  
Arbeitsbereich Geomikrobiologie**

[www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG\\_Geomikrobiol/gg\\_geomikrobiol\\_node.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geomikrobiol/gg_geomikrobiol_node.html)

- Forschung und Beratung zu Geomikrobiologie und Geobiotechnologie mit Schwerpunkt Biomining und MEOR

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),  
Abteilung Material und Umwelt**

[www.bam.de/de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung\\_4](http://www.bam.de/de/kompetenzen/fachabteilungen/abteilung_4)

- Bewertung der Wechselwirkung von Material und Umwelt durch eine multidisziplinäre Zusammenarbeit von Ingenieuren, Chemikern, Geologen und Biologen; Untersuchung langfristiger Beanspruchungen an der Schnittstelle Material/Umwelt unter Abwägung technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte

### **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Gruppe Biotechnologie**

[www.hzdr.de/db/Cms?pOid=35570&pNid=2772](http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=35570&pNid=2772)

- Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von biotechnischen Verfahren für die (Rück-)Gewinnung von metallischen Rohstoffen sowie Entwicklung von Anwendungen für bakterielle Proteine

### **Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ, Fachbereich Umwelttechnologie**

[www.ufz.de/index.php?de=13997](http://www.ufz.de/index.php?de=13997)

- Erforschung komplexer Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt in genutzten und gestörten Landschaften, insbesondere dicht besiedelten städtischen und industriellen Ballungsräumen sowie naturnahen Landschaften

### **Hochschule Lausitz, Angewandte Mikrobiologie**

[www2.fh-lausitz.de/fhl/cv/www-Stahm](http://www2.fh-lausitz.de/fhl/cv/www-Stahm)

- Forschung und Entwicklung zur Sanierung im Bergbau

### **Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik, Arbeitsgruppe Biotechnologie**

[www.mni.hs-mittweida.de/professoren/biotechnologie/prof-radehaus.html](http://www.mni.hs-mittweida.de/professoren/biotechnologie/prof-radehaus.html)

- Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur Reinigung von Industrie- und Bergbauwässern

### **TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, Arbeitsgruppe Umweltmikrobiologie**

[http://tu-freiberg.de/fakult2/bio/ag\\_mikrobio/index.html](http://tu-freiberg.de/fakult2/bio/ag_mikrobio/index.html)

- Forschung und Lehre auf den Gebieten der Ökologie, Geoökologie, Umweltmikrobiologie

### **TU Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten**

[http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_forst\\_geo\\_und\\_hydrowissenschaften/fachrichtung\\_wasserwesen/iaa](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/iaa)

- Forschung und Lehre zur Sanierung von Altlasten im Bergbau

### **Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Chemie – Biofilm Centre**

[www.uni-due.de/biofilm-centre](http://www.uni-due.de/biofilm-centre)

- Forschung und Lehre mit Schwerpunkt Biofilm, biologische Laugung und biogene Beton- und Metallkorrosion

### **Universität Jena, Institut für Mikrobiologie**

[www.mikrobiologie.uni-jena.de/cms/index.php/de/das-institut-mainmenu-1](http://www.mikrobiologie.uni-jena.de/cms/index.php/de/das-institut-mainmenu-1)

- Forschung zur Phytoextraktion von Metallen

## **Firmen**

### **Bauer Umwelt GmbH**

[www.bauerenvironment.com/de/index.html](http://www.bauerenvironment.com/de/index.html)

- Umwelttechnik-Dienstleister, reinigt, behandelt und saniert Wasser, Boden und Luft

### **G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH**

[www.geosfreiberg.de](http://www.geosfreiberg.de)

- Mikrobiologische Verfahren zur Wasserreinigung und Wertstoffrückgewinnung, Biolaugung

### **GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden**

[www.gwz-dresden.de/gfi-gmbh.html](http://www.gwz-dresden.de/gfi-gmbh.html)

- Forschung und Entwicklung zur Sanierung von Altlasten im Bergbau



### **MicroPro GmbH**

[www.microprolabs.de/index.htm?PHPSESSID=647bd80dacfbbo674432eb19736282fb](http://www.microprolabs.de/index.htm?PHPSESSID=647bd80dacfbbo674432eb19736282fb)

- Service- und Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Geomikrobiologie und der angewandten Mikrobiologie, mikrobielle Exploration von neuen Kohlenwasserstoffvorkommen, sowie die Nutzung von Bakterien bei der Produktion von Erdöl aus abgeförderten Lagerstätten (MEOR)

### **Forschungsförderung**

#### **Allianz Industrie Forschung, Aif**

[www.aif.de/aif/aif-im-profil.html](http://www.aif.de/aif/aif-im-profil.html)

- Förderung angewandter Forschung und Entwicklung für den Mittelstand

#### **Geotechnologien**

[www.geotechnologien.de/portal/cms/Geotechnologien/Home](http://www.geotechnologien.de/portal/cms/Geotechnologien/Home)

- Geowissenschaftliches Forschungs- und Entwicklungsprogramm von BMBF und DFG

#### **Projektträger Jülich**

[www.geotechnologien.de/portal/cms/Geotechnologien/Home](http://www.geotechnologien.de/portal/cms/Geotechnologien/Home)

- Forschungs- und Innovationsförderprogramme auf den Themengebieten Biotechnologie, Energie, Werkstofftechnologien, Umwelt und Nachhaltigkeit, Meeres- und Polarforschung, Schifffahrt und Meerestechnik, Technologietransfer und Unternehmensgründung sowie Regionale Technologieplattformen und Cluster

### **Internetadressen von Akteuren und Aktivitäten außerhalb Deutschlands**

#### **European Association of Mining Industries, Metal Ores & Industrial Minerals, (EUROMINES)**

[www.euromines.org](http://www.euromines.org)

#### **European Federation of Biotechnology, Section on Environmental Biotechnology**

[www.efb-central.org/index.php/Main/section\\_on\\_environmental\\_biotechnology](http://www.efb-central.org/index.php/Main/section_on_environmental_biotechnology)

#### **European Technology Platform on Sustainable Mineral Resources**

[www.etpsmr.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1&Itemid=2](http://www.etpsmr.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=2)

#### **Minerals Engineering International: the largest source of information on mineral processing & extractive metallurgy on the net**

[www.min-eng.com](http://www.min-eng.com)

#### **Project Biomine – Biotechnology for metal bearing materials in Europe**

<http://biomine.brgm.fr>

#### **Project Bioshale – Search for a sustainable way of exploiting Black Shale Ores using Biotechnologies**

<http://bioshale.brgm.fr>

#### **Project ProMine – Nanoparticle products from new mineral resources in Europe**

<http://promine.gtk.fi>

#### **4<sup>th</sup> International Symposium on Applied Microbiology and Molecular Biology in Oil Systems**

[www.ismos-4.org](http://www.ismos-4.org)

#### **20<sup>th</sup> International Biohydrometallurgy Symposium – IBS 2013**

[www.ibs2013.com/english](http://www.ibs2013.com/english)

Eine ständig aktualisierte Liste finden Sie unter [www.dechema.de/geobiotechnologie](http://www.dechema.de/geobiotechnologie)

# Literatur

## Kapitel 1: Biomining – Bergbau mit Bakterien

- Brandl H. 2001. Microbial leaching of metals. In: Rehm HJ et al. (eds.), *Biotechnology*, Vol. 10, Wiley-VCH, pp. 191-224.
- Brierley JA. 2008. A perspective on developments in biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 94: 2-7.
- 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, Viera MR, Tavani EL, Giaveno MA, Lavalle TL, Chiacchiarini, PA. (eds.). 2009. *Biohydrometallurgy: a meeting point between microbial ecology, metal recovery processes and environmental remediation*. *Advanced Materials Research*, Vol. 71-73, Trans Tech Publications, Switzerland.
- du Plessis CA, Slabbert W, Hallberg KB, Johnson DB. 2011. Ferredox: a biohydrometallurgical processing concept for limonitic nickel laterites. *Hydrometallurgy* 109: 221-229.
- Rawlings DE, Johnson DB, (eds.). 2007a. *Biomining*. Springer.
- Rawlings DE, Dew D, du Plessis C. 2003. Biomineralization of metal-containing ores and concentrates. *Trends in Biotechnol.* 21: 38-44.
- Rohwerder et. al. 2003 (T. Rohwerder, T. Gehrke, K. Kinzler, W. Sand (2003) *Bioleaching Review Part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation* *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 63, 239-248)
- Santos Sobral LG., Monteiro de Oliveira D., Gomes de Souza CE, (eds.). 2011. *Biohydrometallurgical processes: a practical approach*. CETEM, Centre for Mineral Technology, Rio de Janeiro, Brazil.
- 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, Switzerland.
- Schippers A, Vasters J, Drobe, M. 2011. Biomining – Entwicklung der Metallgewinnung mittels Mikroorganismen im Bergbau. *Commodity top news* 39. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). [www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Rohstoffwirtschaft/39\\_biomining.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/39_biomining.html)
- Watling HR. 2006. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – a review. *Hydrometallurgy* 84: 81-108.

## Kapitel 2: Bergbauhalden – Sanierung oder Wertstoffdepot?

- Coto O, Galizia F, Hernández I, Marrero J, Donati E. 2007. Cobalt and nickel recoveries from laterite tailings by organic and inorganic bioacids. *Hydrometallurgy* 94: 18-22.
- G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH. 2005. *Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereiches – Mikrobiologie in Halden und Absetzanlagen Vorhaben*. Bundesamt für Strahlenschutz, StSch 4418. [www.bfs.de/de/ion/anthropg/altlasten/fachinfo/forschungs\\_vh/Endbericht\\_StSch4418.pdf](http://www.bfs.de/de/ion/anthropg/altlasten/fachinfo/forschungs_vh/Endbericht_StSch4418.pdf)
- G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH. 2008. *Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten – Mikrobiologisch induzierte Freisetzung von natürlichen Radionukliden aus Halden mit dem Sickerwasser*. Bundesamt für Strahlenschutz, StSch 4555. [www.bfs.de/de/ion/anthropg/altlasten/fachinfo/forschungs\\_vh/Abschlussbericht\\_StSch4555.pdf](http://www.bfs.de/de/ion/anthropg/altlasten/fachinfo/forschungs_vh/Abschlussbericht_StSch4555.pdf)
- Gock, E., A. A. Nagy, D. Goldmann, A. Schippers, and J. Vasters. 2008 *Sanierung einer Bergbaualtlast-Rückbau und Metallrecycling durch Biotechnologie*, In: *Recycling und Rohstoffe*, Bd. 1, (Hrsg.). Karl J. Thomé-Kozmiensky, TK-Verlag, S. 321-340.
- Höglund, L.O., Herbert, R. (Eds.). 2004. *MiMi – performance assessment main report*. MiMi 2003:3. The MISTRA-programme MiMi, Mitigation of the environmental impact from mining waste. MiMi Print, Luleå, Sweden. Online: [www.mistra-research.se/program/mimi/guide/home/documentation/mimiperformanceassessmentmainreport.4.c791f4103209a06ec80008117.html](http://www.mistra-research.se/program/mimi/guide/home/documentation/mimiperformanceassessmentmainreport.4.c791f4103209a06ec80008117.html)
- Hoth N., Rammilmair D., Gerth J., Häfner F. 2008. Leitfaden des KORA Themenverbund 6 – Natürliche Schadstoffminderungsprozesse an großräumigen Bergbaukippen/-halden und Flusssauensedimenten. BMBF 2008. [www.natural-attenuation.de/media/document/15\\_7191kora-tv6-leitfaden.pdf](http://www.natural-attenuation.de/media/document/15_7191kora-tv6-leitfaden.pdf)
- Ledin, M., Pedersen, K. 1996. The environmental impact of mine wastes – roles of microorganisms and their significance in treatment of mine wastes. *Earth-Science Rev.* 41, 67-108

- Rzhepishevskaya, O.I., Lindstrom, E.B., Tuovinen, O.H., Dopson, M., 2005. Bioleaching of sulfidic tailing samples with a novel, vacuum-positive pressure driven bioreactor. *Biotechnol. Bioeng.* 92, 559-567.
- Sagdieva, M.G., Borminskiy, S.I., Sanakulov, K.S., Vasilenok, O.P., 2007. Development of a biotechnological process for re-processing flotation tailings from almalyk mining and metallurgical complex, Rep. of Uzbekistan. In: Schippers, A., Sand, W., Glombitza, F., Willscher, S., (Eds.), *Biohydrometallurgy: From the single cell to the environment*. Advanced Materials Research, Vol. 20/21, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 26-29.
- Sand, W., Jozsa, P.-G., Kovacs, Zs.-M., Säsäran, N., Schippers, A., 2007. Long-term evaluation of acid rock drainage mitigation measures in large lysimeters. *J. Geochem. Explor.* 92, 205-211.
- Schippers A, Nagy AA, Kock D, Melcher F, Gock ED. 2008. The use of FISH and real-time PCR to monitor the biooxidation and cyanidation for gold and silver recovery from a mine tailings concentrate (Ticapampa, Peru). *Hydrometallurgy* 94: 77-81.
- Schippers, A. 2009. Biomining zur Metallextraktion aus Erzen und Abfällen / Biomining for metal extraction from ore and waste. *Advanced Mining Solutions – AMS Online* 2009/1: 28-34.
- Schippers A, Breuker A, Blazejak A, Bosecker K, Kock D, Wright DL. 2010. The biogeochemistry and microbiology of sulfidic mine waste and bioleaching dumps and heaps, and novel Fe(II)-oxidizing bacteria. *Hydrometallurgy* 104: 342-350.
- Willscher, S., Starke, S., Felix, M., 2009. Environmental impact after 30 to 60 years of remediation: microbial investigation of hard coal mining in Germany. In: Donati ER, Viera MR, Tavani EL, Giaveno MA, Lavalle TL, Chiacchiarini, PA. (eds.). *Biohydrometallurgy: a meeting point between microbial ecology, metal recovery processes and environmental remediation*. Advanced Materials Research, Vol. 71-73, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 701-709.

### Kapitel 3: Metallhaltige Bergbauwässer – Vermeidung, Reststoff oder Rohstoff?

- Chen, X.Q., et al., Precious metal recovery by selective adsorption using biosorbents. *J. Hazard. Mater.*, 2011. 186(1): p. 902-910.
- Johnson, D. B. & K. B. Hallberg. 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment* 338: 3-14.
- Karavaiko, G.I., et al., Biosorption of Scandium and Yttrium from solutions. *Biotechnol. Lett.*, 1996. 18(11): p. 1291-1296.
- Koschorreck, M. 2008. Microbial sulphate reduction at low a pH. *FEMS Microbiol. Ecol.* 64: 329-342.
- Kratochvil, D. and B. Volesky, Biosorption of Cu from ferruginous wastewater by algal biomass. *Water Res.*, 1998. 32(9): p. 2760-2768.
- Matheickal, J. T. and Q. Yu (1997). „Biosorption of lead(II) from aqueous solutions by *Phellinus badius*.“ *Minerals Engineering*10(9): 947-957.
- Merten et al. Rare earth element patterns: A tool for understanding processes in remediation of acid mine drainage. 2005. *CHEMIE DER ERDE-GEOCHEMISTRY*.pp 97-114
- Pollmann et al. Metal binding by bacteria from uranium mining waste piles and its potential applications.2006. *Biotechnol. Adv.*pp.58-68
- Soltmann, U. et al. Biosorption of heavy metals by sol-gel immobilized *Bacillus sphaericus* cells, spores and S-layers. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2002. pp. 1209-1212
- Texier, A.C., Y. Andres, and P. Le Cloirec, Selective biosorption of lanthanide (La, Eu, Yb) ions by *Pseudomonas aeruginosa*. *Environ. Sci. Technol.*, 1999. 33(3): p. 489-495.
- Volesky, B., Biosorption of heavy metals. 1990, Boca Raton, Florida: CRC Press. 396.
- Volesky, B., Advances in biosorption of metals: Selection of biomass types. *FEMS Microbiol. Rev.*, 1994. 14: p. 291-302.
- Volesky, B. Biosorption and me. *Water Research* 41. 2007: 4017-4029
- Wagner-Döbler Pilot plant for bioremediation of mercury-containing industrial wastewater.2003. *APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*.pp. 124-133
- Wolkersdorf, C. 2006. *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*. Springer, 2008.
- Younger, P. L., S. A. Banwart & R. S. Hedin. 2002. *Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.

### Kapitel 4: Rückstände aus Industrie und Umwelt – Aufbereitung mittels Geobiotechnologie?

- Brandl H., Lehmann S., Faramarzi M.A., Martinelli D. 2008. Biomobilization of silver, gold and platinum from solid materials by HCN-forming microorganisms, *Hydrometallurgy* 94: 14 – 17.

Glombitza F., Janneck E., Arnold I., Rolland W., Uhlmann W. 2007. Eisenhydroxysulfate aus der Bergbauwasserbehandlung als Rohstoff, Sonderheft FA Rohstoffwirtschaft, in: Consulting – Erfahrungen und Kontakte für Neuanfänge, Untertägiger Bergbau auf Industriemineralen in Deutschland, Heft 110 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik, Eds: GDMB e.V. Clausthal Zellerfeld, pp 31-40, ISSN 0720-1877, ISBN 3-935797-35-4

Hoque ME, Philo OJ. 2011. Biotechnological recovery of heavy metals from secondary sources – an overview. *Materials Science and Engineering C* 31: 57-66.

Ishigaki T. 2011. Bioleaching of metals from solid waste incineration ash, in: Soda S. (Ed.), *Handbook of Metal Biotechnology, Applications for Environmental Conservation and Sustainability* – Chapter 9, p. 101-110, Pan Stanford Publishing.

Iske U., Bullmann M., Glombitza F. 1987. Organoheterotrophe Laugung resistenter Materialien, *Acta Biotechnol.* 7, 401–407.

Karwowska E. 2010. Copper and Zinc bioleaching from galvanic sludge in mixed microbial cultures, In: *Environmental Engineering III* –Eds.: Pawlowski Dudzinska, Taylor & Francis Group London, 291 pp ISBN 978-0-415-54882-3.

Karsson S., Sjöberg V., Grandin A. 2011. Heterotrophic leaching of LD slag – Formation of organic ligands, in *IMWA 2011 – Aachen, Mine Water – Managing the Challenges* Eds.: Rüde, Freund & Wolkersdorfer pp. 371 – 374.

Lee JC, Pandey BD. 2012. Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction – a review. *Waste Management* 32: 3-18.

Lorenz R. 1993. Erfahrungen, Versuche und Konzepte zur Verwertung von Theisenschlamm in: *Theisenschlamm, Manuskriptsammlung zum Fachkolloquium Theisenschlamm vom 07. 12. 1993*, pp. 1 – 16, Autor: Sanierungsverbund e.V. Mansfeld, im Auftrag Ministerium für Umwelt und Naturschutz des Landes Sachsen-Anhalt.

Pinka J. 1994. Chemische und biochemische Prozesse bei der Wechselwirkung von Wässern mit abgelagerten Braunkohlefilteraschen in Bergbaufolgelandschaften, Dissertation TU Freiberg, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften – 09.06.1994.

Sadowski Z., Szubert A., Maliszewska I., Jazdyk E. 2007. A view on the organic matter and metalloporphyrins biodegradation as characteristic components of black shale ores. In: Schippers, A., Sand, W., Glombitza, F., Willscher, S., (Eds.), *Biohydrometallurgy: From the single cell to the environment. Advanced Materials Research, Vol. 20/21*, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 95-99.

Santhiya D., Ting Y-P. 2006. Use of adapted *Aspergillus niger* in bioleaching of spent refinery processing catalyst *Journal of biotechnology*. Vol 121, pp. 62 – 74.

Ten W.K. Ting Y.P. 2003. Bioleaching of electronic scrap material by *Aspergillus niger*, In: *Proceedings of the 15. th international Symposium on Biohydrometallurgy IBS 14.* – 19. 09. 2003 Athen. M.Tsezos, A. Hatzikioseyan, E. Remoundaki (Eds.), National Technical University of Athens, *Electronic means of production* – pp. 137 – 146 N. J. Zographakis ISBN – 960 – 88415 – 1 – 8.

Willscher S., Katzschner M., Jentsch K., Matys S., Pöllmann H. 2007. Microbial leaching of metals from printed circuit boards. In: Schippers, A., Sand, W., Glombitza, F., Willscher, S., (Eds.), *Biohydrometallurgy: From the single cell to the environment. Advanced Materials Research, Vol. 20/21*, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 99-102.

Zehndorf A., Hoffmann P., Seidel H., Müller U. 2011. Reinigung schwermetallhaltiger Sedimente mithilfe von Pflanzen und Mikroorganismen, Überführung des Konditionierungsverfahrens in die Praxis, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 4 (10), 558 – 563.

## Kapitel 5: Geomikrobiologie im Untergrund – Chancen für Geobiotechnologie

Ehinger, S., J. Seifert, A. Kassahun, L. Schmalz, N. Hoth, and M. Schlömann. 2009. Predominance of *Methanobrevibacter* spp. and *Methanococcus* spp. in the Archaeal Communities of Saline Gas Field Formation Fluids. *Geomicrobiology Journal* 26:326-338.

Feisthauer S., Seidel M., Bombach P., Traube S., Knöller K., Wange M., Fachmann S., Richnow H. H. (2012) Characterization of the relationship between microbial degradation processes at a hydrocarbon contaminated site using isotopic means. *J. Contam. Hydrol.*, 133, 17–29

Feisthauer, S., Siegert, M., Seidel, M., Richnow, H.-H., Zengler, K., Krüger, M. (2010) Isotope fingerprints of methane and CO<sub>2</sub> for exploring methane formation from aliphatic and aromatic hydrocarbons. *Org. Geochem.* 41: 482-490.

GEOTECHNOLOGIEN Science Report 14 (2009) Die dauerhafte geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> in Deutschland – Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven.

GRS (2011). *Microbial Processes Relevant for Long-Term Performance of Radioactive Waste Repositories in Clays*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) – 291

Head, I.M., D.M. Jones, and S.R. Larter, Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil. *Nature*, 2003. 426(6964): p. 344-352.

Krüger, M., Beckmann, S., Engelen, B., Thielemann, T., Cramer, B., Schippers, A., and Cypionka, H. (2009) Microbial methane formation from hard coal and timber in an abandoned coal mine. *Geomicrobiology Journal* 25: 315-321.

McInerney, M.J., D.P. Nagle, and R.M. Knapp, Microbially Enhanced Oil Recovery: Past, Present and Future, in *Petroleum Microbiology*, M. Magot and B. Ollivier, Editors. 2005, ASM Press: Washington. p. 215-237

Pedersen K. (2000). Microbial processes in radioactive waste disposal. Technical Report TR-00-04. SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden.

Stroes-Gascoyne, S., C. Sergeant, A. Schippers, C. J. Hamon, S. Nèble, M.-H. Vesvres, V. Barsotti, S. Poulain, and C. Le Marrec. 2011. Biogeochemical processes in a clay formation in situ experiment: Part D – Microbial analyses – Synthesis of results. *Appl. Geochem.* 26: 980-989.

Sunde, E. and T. Torsvik, Microbial control of hydrogen sulfide production in oil reservoirs, in *Petroleum Microbiology*, B. Ollivier and M. Magot, Editors. 2005, ASM Press: Washington, D.C. p. 201-213.

Youssef, N., M.S. Elshahed, and M.J. McInerney, Microbial Processes in Oil Fields: Culprits, Problems, and Opportunities, in *Advances in Applied Microbiology*, S.S. Allen I. Laskin and M.G. Geoffrey, Editors. 2009, Academic Press. p. 141-251.



## Liste der Autoren

<b>Dr. Wolfgang Berger</b>	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
<b>Prof. Dr. Gregor Borg</b>	Martin-Luther-Universität Halle
<b>Dr. Helmut Brandl</b>	ETH Zürich (Schweiz)
<b>Prof. Dr. Bernhard Dold</b>	FCFM - Universidad de Chile, Santiago de Chile (Chile)
<b>Dr. Malte Drobe</b>	Deutsche Rohstoffagentur, Hannover
<b>Dr.rer.nat.habil. Franz Glombitza</b>	G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH
<b>Prof. Dr. Jens Gutzmer</b>	Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
<b>Margarete Kalin</b>	Boojum Technologies Ltd., Toronto (Kanada)
<b>Andreas Kamradt</b>	Martin-Luther-Universität Halle
<b>Andrea Kassahun</b>	GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH, Dresden
<b>Dr. Sabine Kutschke</b>	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
<b>Prof. Dr. Erika Kothe</b>	Friedrich-Schiller-Universität, Jena
<b>Dr. Martin Krüger</b>	GeoZentrum Hannover
<b>Dr. Jelka Ondruschka</b>	TU Dresden
<b>Dr. Jana Pinka</b>	Sächsischer Landtag, Dresden
<b>Dr. Katrin Pollmann</b>	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)/HIF
<b>Victoria Pratzka</b>	Hochschule Mittweida
<b>Prof. Dr. rer. nat. Petra Radehaus</b>	Hochschule Mittweida
<b>Dr. Wolfgang Reimer</b>	Geokompetenzzentrum Freiberg e.V.
<b>Priv.-Doz. Dr. Hans-Hermann Richnow</b>	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
<b>Prof. Dr. Wolfgang Sand</b>	Universität Duisburg-Essen
<b>Prof. Dr. Axel Schippers</b>	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
<b>Prof. Dr. Michael Schlömann</b>	TU Bergakademie Freiberg
<b>Prof. Dr. Klaus-Peter Stahmann</b>	Fachhochschule Lausitz, Senftenberg
<b>Dr. Jürgen Vasters</b>	Deutsche Rohstoffagentur, Hannover
<b>Dr. Carsten Vogt</b>	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
<b>Dr. Martin Wagner</b>	MicroPro GmbH, Gommern
<b>Dr. Sabine Willscher</b>	TU Dresden
<b>Dr. Andreas Zehnsdorf</b>	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ





