

Forschungsbericht BWPLUS

## **Rohstoff Exportanalyse**

von

Ursula Schließmann, Bryan Lotz, Lukas Kriem, Benjamin Wriedt

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Förderkennzeichen: BWBM 21102

Laufzeit: 01.06.2021 – 30.09.2021

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

September 2021

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Übersicht der Biomining-Technologien.....</b>	<b>3</b>
3.1	Kurzbeschreibung der Technologien .....	3
3.2	Aktueller Reifegrad der Technologien.....	4
<b>4</b>	<b>Rohstoffpotentiale in Baden-Württemberg.....</b>	<b>6</b>
4.1	Identifizierung und Bewertung von Rohstoffquellen .....	6
4.2	Erzquellen und mineralische Rohstoffe .....	6
4.3	Deponien und Abraumhalden .....	6
4.4	Elektroschrott.....	7
4.5	Abwasser und Klärschlamm(aschen).....	9
4.6	Reststoffabfall und Gärreste/Kompost .....	10
<b>5</b>	<b>Anwendungs- und Entwicklungspotentiale bei der Anwendung von Biomining-Technologien auf vorhandene Rohstoffquellen in Baden-Württemberg .....</b>	<b>11</b>
5.1	Anwendungspotential bei Erzmineralien .....	11
5.2	Anwendungspotential bei Deponien und Abraumhalden .....	12
5.3	Anwendungspotential bei Elektroschrott.....	13
5.4	Anwendungspotential bei Abwasser .....	14
5.5	Anwendungspotential bei Klärschlamm und Klärschlammaschen .....	15
5.6	Fazit zur Weiterentwicklung der Biominingansätze.....	16
<b>6</b>	<b>Nachfrage und Exportfähigkeit der Biomining-Technologien .....</b>	<b>17</b>
6.1	Nationale und internationale Nachfrage nach Biomining-Technologien .....	17
6.2	Aktuelles und zukünftiges Exportpotential von Technologie aus Baden-Württemberg .....	18
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>20</b>

# 1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie umfasst eine kurze Übersicht zu Biomining-Technologien und eine Potentialanalyse von Rohstoffen in Baden-Württemberg, zu deren Nutzung sich Biomining-Technologien anwenden und weiterentwickeln lassen. Darauf folgt eine Analyse der Exportfähigkeit dieser Technologien für in Baden-Württemberg ansässige Unternehmen.

Zunächst wurden alle relevanten sekundären Rohstoffquellen in Baden-Württemberg identifiziert. Das Potenzial dieser Rohstoffquellen zur Nutzung durch Biomining-Technologien wurde auf der Grundlage ökologischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet. In dieser Studie wurden unter anderem die Phosphorrückgewinnung aus Abwässern (z. B. aus Klärschlammaschen) und die Gewinnung von seltenen Erden aus Elektroschrott betrachtet. Aus Befragungen von relevanten Akteuren aus Forschung und Industrie wurden die Potenziale der Anwendung der Biomining-Technologien auf die Rohstoffquellen abgeleitet.

Die beschriebenen Technologien wurden in Bezug auf ihren Technology Readiness Level (TRL) und ihre aktuellen Anwendungen aufgelistet. Anschließend wurden die Technologien aufgrund ihrer Entwicklungsfähigkeit und ihrer nationalen und internationalen Exportfähigkeit bewertet.

Erkenntnisse zu den sekundären Rohstoffquellen und ihrer Exportfähigkeit stellen sich wie folgt dar:

- Einige sekundäre Rohstoffquellen sind für die Anwendung von Biomining-Technologien zur Rückgewinnung von bestimmten Wertstoffen geeignet. Insbesondere Elektroschrott zeichnet sich durch seine reichhaltige und diverse Zusammensetzung aus und ist prädestiniert, über Biomining-Technologien aufgearbeitet zu werden. Ebenso stellen Abwässer und Klärschlamm(aschen) eine Quelle an Nährstoffen wie zum Beispiel Phosphor dar, die normalerweise als Rohphosphor oder Mineralphosphordünger importiert werden müsste. Bestimmte Technologien wie Biolaugung, Biosorption und Bioelektrische Systeme zeigen großes Potential zur Anwendung im Bereich der sekundären Rohstoffquellen.
- Entwicklungspotentiale der Biomining-Technologien liegen vornehmlich in der Steigerung der Effizienz und Erhöhung der erzielten Ausbeute. Dabei sind Verfahren zur Extraktion, Fällung und Mineralisierung wichtige Bausteine zur Erhöhung der allgemeinen Ausbeute aus niedrig konzentrierten Metall- oder Wertstofflösungen.
- Die größte Exportfähigkeit haben Biomining-Technologien zum Recycling von Elektronikschrott oder Phosphorrückgewinnung. International sind Weiterentwicklungen in der Tankbiolaugung oder der umweltfreundlicheren Optimierung der Haldenbiolaugung exportfähig. Aber auch zukünftig werden Biomining-Technologien zur Erschließung von sekundären Rohstoffquellen oder zum Recycling immer wichtiger. Hier kann Baden-Württemberg eine Vorreiterrolle in der Entwicklung und Anwendung solcher Biomining-Technologien werden.

Das Land Baden-Württemberg hat mit der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie für Baden-Württemberg“ die Grundlagen zur Nutzung von alternativen oder sekundären Rohstoffquellen gelegt (Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg 2019). Die Wiederverwendung von Reststoffen und die Erschließung von sekundären Rohstoffquellen in Kombination mit einer wirtschaftlichen Verwendung von Rohstoffen sowie effizienten Produktionsprozessen, kommt einer Reduzierung der Abhängigkeit von Exporten aus Drittländern und der effektiven Verringerung der Treibhausgasemissionen zugute. Dabei ist es notwendig neue, energieeffizientere und umweltschonendere Technologien zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus sekundären Rohstoffquellen anzuwenden.

Die Studie „Biomining BaWü: Rohstoff- und Exportanalyse“ fokussiert auf sich die in Baden-Württemberg vorhandenen sekundären Rohstoffe, welche als Ausgangsmaterialien für Biomining-Technologien dienen können. Die verschiedenen Quellen werden systematisch analysiert, charakterisiert und quantifiziert. Auf dieser Basis wird ihr Potenzial für die Gewinnung von Ressourcen durch Biomining bewertet. Zudem wird das Exportpotenzial von Biomining-Technologien bewertet.

Biomining-Technologien stellen einen heterogenen Baukasten auf Basis verschiedener biologischer Prozesse zur Verfügung. Dabei unterscheiden sich die Biomining-Technologien unter anderem sehr in ihrer biologischen Anwendung und der Wirtschaftlichkeit. Zudem befinden sich die vorhandenen Technologien aktuell häufig noch im Pilot- oder Entwicklungsstadium (TRL 4 bis 6) und sind im Vergleich zu konventionellen Methoden noch zu teuer und nicht universell einsetzbar. In der großtechnischen Implementierung (TRL 8 bis 9) befinden sich in der Praxis wenige Anwendungen, z.B. Dump-, Heap-Leaching auf Erzmetallagerstätten.

Als besonders interessant gilt in diesem Zusammenhang die Metallgewinnung aus Elektroschrott. Elektroschrott ist eine vielversprechende Rohstoffquelle wichtiger Metalle für die produzierende Industrie: Diese Metalle werden derzeit nur unvollständig oder gar nicht zurückgewonnen, so dass die End-of-Life-Recyclingraten bei unter einem Prozent liegen. Die heterogene Zusammensetzung von kleinen Elektro- und Elektronikaltgeräten macht es jedoch in der Regel unmöglich, die vorhandenen Technologien auf diesen Stoffstrom anwenden zu können. Um diese wertvollen Metalle trotzdem zurückgewinnen zu können, sind genau abgestimmte Prozessketten erforderlich. Spezifische Recyclingmethoden für definierte Stoffströme mit relativ hohen Konzentrationen der Metalle sind beispielsweise für Gallium verfügbar. Prozessströme, die bereits eine Standardaufarbeitung durchlaufen haben, wie Laugungsbäder, Prozesswasser oder auch Deponiesickerwasser enthalten in der Regel nur noch geringe Mengen bestimmter Metalle. Die enthaltenen Seltenen Erden, Edelmetalle oder Schwermetalle bedeuten trotz der geringen Konzentrationen einen signifikanten Anteil an den zirkulierenden Mengen.

Neben seltenen Erden sind aber auch essentielle Elemente wie Phosphor als bedeutender Rohstoff unersetzlich. Phosphor wird als zentraler Baustein in der Lebensmittel-, Futtermittel- und Düngemittelindustrie verwendet. Da sich der wirtschaftliche Abbau zunehmend unattraktiver darstellt, durch schadstoffbelastete Quellen und zu neige gehender Verfügbarkeit, werden alternative sekundäre Rohstoffquellen immer wichtiger. Offensichtliche Stoffströme für Phosphorverbindungen finden sich vor allem in Abwasser, Klärschlamm, Klärschlammmasche, sowie in Tier- und Fleischknochenmehl. Einige Substanzen werden bereits in der Kreislaufführung als Pflanzennährstoff (Wirtschaftsdünger, Gärreste aus Biogasanlagen) zu Dünge Zwecken verwendet. Das größte Einzelpotential für Phosphor

stellt aktuell Klärschlamm respektive Klärschlammaschen dar. Vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft und der Zielstellung geschlossener Ressourcenkreisläufe kommt der Entwicklung von geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Klärschlammaschen eine hohe Bedeutung zu.

## 3 Übersicht der Biomining-Technologien

### 3.1 Kurzbeschreibung der Technologien

Im Folgenden werden die Technologien mit den größten Anwendungspotentialen einzeln vorgestellt. Eine Übersicht des Reifegrads mit TRL-Einschätzung wird in Tabelle 1 gegeben.

Mithilfe von **Bioleaching** (dt. **Biolaugung**) werden durch Bakterien Metalle aus Abraumhalden, Abfällen, Prozess- und Abwässern mobilisiert. Die Biolaugung untergliedert sich in drei verschiedene Unterklassen: Haldenlaugung, Tankbiolaugung und In-situ/in-place Biolaugung. In der Haldenbiolaugung werden acidophile Bakterien zur Metallgewinnung auf aufgeschütteten Erzhalde angewendet. Die technische Implementation ist dabei relativ einfach, da lediglich mit Wasser und mit Nährlösungen bereselt wird, vereinzelt ist eine Beheizung notwendig. In der Tankbiolaugung wird eine großtechnische Biooxidation in Rühr tanks für den Aufschluss komplexer Erze durchgeführt. Bei der in-situ/in-place wird Laugungsflüssigkeit selektiv in Böden mit natürlichem Vorkommen gepumpt und wieder Ausgepumpt (Anwendung primär für Uranerze).

Die **Biomineralisation** und **Biofällung** kann effektiv bei komplexen Erzen eingesetzt werden. Über Fällungs- und Oxidationsreaktionen können dabei aus Prozesswässern leicht trennbare Metallverbindungen abgetrennt werden. Die **Biosorption** beschreibt die passive Akkumulation von positiv geladenen Metallionen an negativ geladene Verbindungen an der Zelloberfläche. Daneben reichern sich in der aktiven Akkumulation Metalle im Cytoplasma der Zellen an. Daneben können Metalle auch adsorptiv auf Oberflächen von Polymeren und/oder Pflanzenreststücken (die als natürliche Adsorptionsmittel fungieren) akkumuliert werden.

In Mikroreaktoren können **Nanopartikel** durch Bakterien, Pilze, Hefen, Algen und Pflanzen biosynthetisiert werden. Die extrem hohe Oberfläche der Nanopartikel versprechen einen Einsatz als chemische Katalysatoren oder Adsorbentien.

**Bioelektrische Systeme (BES)** ist der Überbegriff für mikrobielle Brennstoffzellen (MFC), mikrobielle Elektrolysezellen (MEC) und die bioelektrische Aufbereitung (BET). Sie nutzen elektroaktive Mikroorganismen, die feste Elektronenakzeptoren (Elektroden) und Elektronen aus Abfallstoffen für ihren Stoffwechsel verwenden. An der Kathode werden somit Metalle reduziert und somit ausgefällt.

**Phytomining** ist ein Teilgebiet der Phytosanierung und -remediation, in denen Metalle aus dem Boden von Pflanzen in ihrer Biomasse in hoher Konzentration angereichert werden (Hyperakkumulatoren). Die ungeladenen Metalle oder auch Ionen stammen dabei aus der Erde der unmittelbaren Umgebung und werden in Zellvakuolen oder Chloroplasten angesammelt, um die vitalen Zellorganellen zu schützen. Auf diese Weise können Schwermetalle, bioverfügbare Metalle oder radioaktive Stoffe selbst aus Verbrennungsrückständen wiedergewonnen werden. Phytomining wird vornehmlich für die Sanierung von kontaminierten Böden oder Halden (Entfernung von Schwermetallen oder radioaktiven Substanzen) verwendet.

Durch den Einsatz von **Enzymen** können indirekte andere Prozessen des Biomining optimiert werden. Dabei werden beispielsweise durch Vorbehandlung von Prozesswässern oder anderen lebensfeindlichen Gebieten mit Enzymen toxische Substanzen abgebaut. Ein relativ breiter Anwendungsfall ist die Zersetzung von Verbindungen oder Polymeren, in denen Metalle gebunden sind. Die Enzyme können darüber hinaus benötigte Substanzen abbauen oder lebensfeindliche Substanzen inaktivieren, sodass Mikroorganismen überleben können.

## 3.2 Aktueller Reifegrad der Technologien

Im Folgenden werden die Biomining-Technologien dem Technology Readiness Level (TRL dt.: Technologie Reifegrad) zugeordnet. In Tabelle 1 sind hierzu die jeweilige Einschätzung und die realen Anwendungsgebiete beschrieben. Der TRL ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien, die ursprünglich von der NASA im Jahre 1970 entwickelt wurde. Die TRL-Skala wurde von der Europäischen Kommission für das Forschungsprogramm Horizon 2020 adaptiert und als Grundlage und zur Bewertung genutzt (Horizon 2020). Die Beschreibung der Stufen lautet wie folgt:

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips (8–15 Jahre)
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie (5–13 Jahre)
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre)
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

**Tabelle 1 Reifegrad und TRL-Einschätzung der Biomining-Technologien.**

Anwendung	TRL	Technische Umsetzung (Skalierung)	Quelle
Haldenbiolaugung (sulfidisch)	9	großtechnische Umsetzung, Weltweite Anwendung	Mohammad 2019
Haldenbiolaugung (nicht-sulfidisch,)	4	Pilotmaßstab, keine nennenswerten Fortschritte in den letzten 40 Jahren	Pradhan 2008
Haldenbiolaugung (nicht-sulfidisch)	7	Pilotmaßstab, erste Versuche im großtechnischer Umsetzung	Mohammad 2019
Tankbiolaugung (Flüssige Laugung, primär)	9	großtechnische Tanks mit Rührwerken	Ilyas 2014, Baniyadi 2019

Tankbiolaugung (Weiterverarbeitung des Rückstands der primären Tankbiolaugung)	9	großtechnische Tanks mit Rührwerken	Ilyas 2014, Baniyadi 2019
In-situ / in-place Biolaugung (z.B. Rammelsberg)	6	Pilotmaßstab, gezielte Einleitung von Laugungsflüssigkeit in Böden	Azubuike 2016
Biosorption (Zelloberfläche - Passiv)	6	Technikumsmaßstab	Ali Aghababai Beni 2019
<b>Anwendung</b>	<b>TRL</b>	<b>Technische Umsetzung (Skalierung)</b>	<b>Quelle</b>
Biosorption: (Cytoplasma - Aktiv)	5	Versuchsaufbau bis Technikumsmaßstab	Ali Aghababai Beni 2019
Biosorption: (Adsorptionsmittel)	4	Versuchsaufbau im Labor	Adewale 2019
Mycoremediation (Pilze)	3 bis 4	Proof-Of-Concept, bisher keine Anwendung zur gezielten Wertstoffrückgewinnung	Kumar 2021, Ferrier 2021
Biopräzipitation	6	Versuchsaufbau bis Technikumsmaßstab	Sahinkaya 2017, Ferrier 2021
Biomineralisierung & Biofällung	5	Versuchsaufbau bis Technikumsmaßstab	Sahinkaya 2017,
Biosynthese von Nanopartikeln	2	Erste Beschreibungen des Prozesses, zu geringe Datenlage	Schippers 2012
Bioelektrische Systeme:	5	Versuchsaufbau bis Technikumsmaßstab	Nancharaiah 2016, Wei 2020
Phytomining - Hyperakkumulatoren (Pflanzen)	5	Pilotmaßstab, Freilandversuche	Chaney 2021

Übersicht der Biomining-Technologien

## 4 Rohstoffpotentiale in Baden-Württemberg

### 4.1 Identifizierung und Bewertung von Rohstoffquellen

Im Folgenden werden die verschiedenen in Baden-Württemberg vielversprechendsten Rohstoffquellen gelistet, beschrieben und nach ihren Zusammensetzungen nachhaltig und wirtschaftlich bewertet.

### 4.2 Erzquellen und mineralische Rohstoffe

In Baden-Württemberg werden jährlich ca. 100 Millionen Tonnen an Steinen, Erden und Industriemineralien gewonnen, was bedeutet, dass pro Kopf und Jahr 8,4 Tonnen mineralischer Rohstoffe gefördert werden. Mengenmäßig am wichtigsten sind dabei Kiese, Sande und Kalksteine. Schwerpunktmäßig werden die gewonnenen mineralischen Rohstoffe im Verkehrswegebau, für die Herstellung von Baustoffen und als Betonzuschlag verwendet (Abfallbilanz 2020, Baden-Württemberg).

56% (40,1 Millionen Tonnen) des in Baden-Württemberg anfallenden Abfallaufkommens sind Bau- und Abbruchabfälle. Diese setzen sich aus Steinen, Bauschutt, Straßenaufbruch sowie Baustellenabfällen zusammen. Die Bau- und Abbruchabfälle lassen sich in zwei Teilmengen untergliedern: Von den 11,6 Mio. Tonnen Bauschutt und Straßenaufbruch wurde 2018 ein Anteil von rund 94 % (10,9 Mio. Tonnen) Bauschutt- und Asphaltrecyclinganlagen zugeführt und danach – nach Ausschleusung ungeeigneter Bestandteile – im Straßen- und Wegebau, im sonstigen Erdbau, in Asphaltmischanlagen oder als Betonzuschlagstoff verwertet (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2019). Von 28,5 Mio. Tonnen Boden und Steinen aus Bauvorhaben (Bodenaushub) wurden in 2018 1,0 Mio. Tonnen (4,5 %) mittels Bauschuttrecycling für eine Verwendung vor allem im Straßen- und Wegebau sowie im Deponiebau stofflich verwertet. Der größte Teil dieser Mengen, rund 20 Mio. Tonnen, wird für die Verfüllung von übertägigen Abbaustätten zur Rekultivierung eingesetzt und damit stofflich verwertet. Der Rest wird auf Deponien langfristig abgelagert (Abfallbilanz 2020, Baden-Württemberg).

### 4.3 Deponien und Abraumhalden

Bei Deponien kann zwischen verschiedenen Deponieklassen unterschieden werden (vgl. sinplastic). Deponiekategorie 0 bezeichnet Deponien, auf denen mineralische Abfälle mit geringem Schadstoffgehalt (z. B. unbelasteter Erdaushub, Bauschutt) gelagert werden. In Deponiekategorie 1 werden mäßig belastete (nicht gefährliche) Abfälle gelagert, beispielsweise Erdaushub und Bauschutt. Belastete, jedoch nicht gefährliche Abfälle, werden in Deponiekategorie 2 gelagert, wohingegen in Deponiekategorie 3 gefährliche Abfälle verwahrt werden, die oberirdisch gelagert werden können. Abschließend dient Deponiekategorie 4 zur Lagerung von gefährlichen Abfällen, die nur unterirdisch gelagert werden dürfen (vgl. sinplastic). Die Idee hinter diesem System ist, Schadstoffe, die sich im Stoffkreislauf anreichern und das Gemeinwohl beeinträchtigen würden, auf eine sichere und umweltgerechte Weise aus dem Stoffkreislauf auszuschleusen und an einem gesicherten Ort konzentriert abzulagern (vgl. sinplastic).

Durch das Recycling von Bauschutt, Straßenaufbruch und weiteren Bau- und Abbruchabfällen könnten heute bereits 10% der Primärrohstoffe substituiert werden (vgl. sinplastic).



Aktuell fristen Phytomining-Ansätze auf Deponien und Abraumhalden noch ein Schattendasein. Hyperakkumulatoren nehmen in ihrem Wachstum vornehmlich Halbmetalle auf, welche in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung keinen hohen Stellenwert haben. So erhält man beispielsweise für eine Tonne getrocknetes Pflanzenmaterial, deren verbrannte Asche aus etwa ein Fünftel aus Nickel besteht, umgerechnet maximal 80\$ für das enthaltene Nickel (BR Wissen). Für die Rückgewinnung von konventionellen Metallen (Nickel, Zink, Blei, etc.) ist der Verkaufspreis pro Kilogramm Metall momentan für eine wirtschaftliche Anwendung zu niedrig. Entweder muss die Ausbeute pro Tonne Pflanzenmaterial, oder der Verkaufspreis der Metalle steigen. Die Anwendung könnte sich bei der Rückgewinnung von Edelmetallen oder seltene Erden wiederrum lohnen, da der Bedarf und die entsprechenden Preise höher liegen. Hierzu ist jedoch eine individuelle Prüfung der Metallart, der Ausbeute und der Wirtschaftlichkeit notwendig. Aktuell eignen sich Hyperakkumulatoren mehr dafür, um belastete Deponien und Abraumhalden lediglich zu renaturieren, oder eine Verbreitung von Schwermetallen und Schadstoffen zu vermeiden.

## 4.4 Elektroschrott

2020 sind in Baden-Württemberg 87.000 Tonnen Elektroschrott angefallen. Davon entfallen 55.000 Tonnen auf Haushaltsgeräte, 14.000 Tonnen auf Informations- und Telekommunikationsgeräte und 12.000 Tonnen auf Unterhaltungselektronik (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021). Bemerkenswert ist, dass eine Tonne Elektroschrott (Computer und Laptops) durchschnittlich 70kg Kupfer, 140g Silber und 30g Gold enthält. Bei Handys sind diese Zahlen sogar noch beeindruckender, da eine Tonne Elektroschrott 240g Gold, 2,5kg Silber, 92kg Kupfer, 92g Palladium und 38kg Kobalt enthält (vgl. Engelman 2020).

Von den 87.000 Tonnen Elektroschrott, die 2020 in Baden-Württemberg angefallen sind, konnten 74.000 Tonnen bzw. 86% recycelt werden. Das Recycling ist – wie die vorgestellten Zahlen zeigen – dabei sowohl aus wirtschaftlicher/strategischer Sicht als auch aus ökologischer Perspektive sinnvoll. Allerdings geht man davon aus, dass ein gewisser Anteil an Elektroschrott nicht dem Recycling oder der Wertstofftrennung zugeführt werden. Der Verlust äußert sich in ungenutztem Elektronikschrott, der in Haushalten ohne Verwendung gelagert wird und der z.B. mit dem Restmüll entsorgt wird. Schätzungen gehen davon aus, dass die mülltonnengängigen Elektronikgeräte einen hohen Einfluss auf den Gehalt an Metallen auf Deponien ausmachen. Der jährliche Verlust an Metallen – die nicht der Wiederverwendung oder dem Recycling zugeführt werden – liegt im Bereich von wenigen Milligramm bis Gramm pro Kilogramm pro anfallenden Haushaltsmüll (Handke 2019). Auch die seltenen Erden, die in großen Mengen in unseren Laptops, Handys und anderen Elektrogeräten zu finden sind, werden nur selten tatsächlich recycelt. Dies liegt auch daran, dass die seltenen Erden im gesamten Gerät (z. B. Display und Magnet) verteilt sind und daher nur schwer von anderen Metallen und Stoffen getrennt werden können (vgl. Beyers 2019).

Für die Wiederverwertung von Edelmetallen wie Kupfer und Erz gilt, dass diese unendlich oft in den Kreislauf eingespeist werden können, ohne dabei an Qualität einzubüßen. Bei der Bearbeitung des Elektroschrotts werden i. d. R. Shredder eingesetzt, die den Elektroschrott zerkleinern sollen. Ein zentrales Problem ist allerdings, dass der Elektroschrott dadurch zwar zerkleinert wird, die einzelnen Metallkomponenten aber aufgrund der dünnen Kunststoffschichten, die zu Anwendungszeiten der Isolation dienten, dennoch oft nicht zugänglich werden. Als Alternativen kommen daher zunehmend Sensoren zum Einsatz, die besonders wertstoffhaltige Bauteile bereits vor dem Shreddern identifizieren, um diese dann gezielt zu shreddern oder extra zu behandeln, um die Kunststoffe zu entfernen (vgl. Beyers 2019).

Ein weiteres Problem ist zudem, dass das Recycling sehr aufwändig und daher mit hohen Kosten verbunden ist. So ist die unsachgemäße Entsorgung i. d. R. deutlich kostengünstiger (vgl. Mansmann 2018).

Metalle aus recyceltem Elektronikschrott werden nur unvollständig in die Kreislaufwirtschaft zurückgeführt. Ein Potential zur biotechnologischen Rückgewinnung von Metallen liegt in der Behandlung des anfallenden Haushaltsmülls, der nicht mit dem Elektronikschrott erfasst wird. Leider ergeben sich erhebliche Schwankungen des Metallgehalts im Haushaltsmüll. Eine einheitliche und wirtschaftliche Behandlung ist aufgrund dieses variablen Ressourcenstroms zum gegebenen Zeitpunkt noch nicht möglich (Handke 2019)

Gesammelte Elektro- und Elektronik-Altgeräte (EAG) stellen enormes Potential zur Rückgewinnung von Metallen, kritischen und seltenen Erden dar. Die Wirtschaftlichkeit zum Recycling von einzelnen Metallen ergibt sich aus dem aktuellen Metallpreis und aus der Menge an verwertbaren Produkten, die mit der eingesetzten Technologie erzeugt werden kann. Viele seltene Erden und Metalle sind im Verbund oder an unterschiedlichen Stellen im Gerät lokalisiert. Eine entsprechende Vorbehandlung (Shreddern oder ähnliches) der EAG ist dadurch in den meisten Fällen notwendig und sollte auf die nachfolgenden biotechnologischen Verfahren hin optimiert werden. Aber auch die biotechnologische Metallrückgewinnung benötigt einen gewissen Grad an Vorbehandlung der Stoffströme. Um die Metalle für Mikroorganismen leichter zugänglich zu machen, kann sogar eine gesamte Prozesskette notwendig sein. Insbesondere die Kombination von biotechnologischen Verfahren (Bioleaching/Bioakkumulation) mit klassischen mechanischen oder chemischen Aufbereitungsverfahren, sowie die nachfolgende Aufkonzentration über innovative Adsorbentmaterialien oder Abscheidetechniken sind vielversprechend in der Anwendung.

Konventionelles Batterierecycling hingegen wird aufwändig und teilweise in Handarbeit betrieben und basiert meist auf hydro- als auch pyrometallurgischen Prozessen. Pyrometallurgische Prozesse reduzieren als Oxide vorliegende Metalle thermochemisch, während hydrometallurgische mittels Lösungsmittel-Extraktion, Elektrolyse und chemischen Fällungsreaktionen arbeiten. Konventionelle Prozesse der thermischen Rückgewinnung (Pyrolyse, pyrometallurgische Prozesse zur Materialtrennung) arbeiten mit einer Temperatur von 800 - 1600°C, was mit hohem Energieverbrauch einhergeht. Aktuelle Batterie-Technologien verwenden neben Lithium verschiedene Rohstoffe wie Kobalt, Nickel und Mangan als Hauptbestandteile. Es ist noch nicht abzuschätzen welche Metalle neben Lithium in den Batterien der Zukunft verwendet werden. Jedoch wird das Volumen und die Anzahl an notwendigen Batterien in der Zukunft aufgrund der Bestrebungen einer CO<sub>2</sub>-neutralen Energieversorgung zwingend steigen. Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) fordert unter anderem schon jetzt eine anteilige Nutzungspflicht erneuerbarer Energien beim Bau von Häusern und öffentlichen Bauten. Ab 2026 soll der Einbau von alleinigen Öl- und Kohleheizungen verboten werden. Gleichzeitig wird die Nutzung von gebäudenah erzeugtem Strom (z.B. Photovoltaikanlagen und Windenergie) erleichtert. Damit die überschüssige Energie im Netz gespeichert werden kann, behelfen sich bereits viele Haushalte mit dezentralen Solarstromspeichern. Ein weiteres Beispiel für den zunehmenden Bedarf an Batterien ist der Ausbau der Elektromobilität.

## 4.5 Abwasser und Klärschlamm(aschen)

Die Bürger in Baden-Württemberg generieren jeden Tag zwischen 100 und 120 Liter Abwasser pro Einwohner pro Tag. Die Abbauraten verschiedener „Fraktionen“ in Kläranlagen liegen zwischen 95% (Chemischer Sauerstoffbedarf als Summenparameter für organische Verunreinigungen) und 77% (Stickstoffverbindungen). Phosphor wird durchschnittlich zu 91% entfernt (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2019).

2020 wurden in Baden-Württemberg 233.000 Tonnen Klärschlamm (Trockenmasse) entsorgt (2018: 232.000 Tonnen), allerdings wird ein Teil des in Baden-Württemberg anfallenden Klärschlammes auch in anderen Bundesländern entsorgt. Von diesen 233.000 Tonnen wurden 2020 99%, also 231.000 Tonnen, verbrannt und somit zur Energieerzeugung genutzt. 500 Tonnen wurden im Landschaftsbau verwendet. Auch konnten 600 Tonnen in der Landwirtschaft eingesetzt werden (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021).

Bei Betrachtung der Zusammensetzung des Klärschlammes wird deutlich, dass dieser durchschnittlich 3,6% Phosphor enthält und daher für eine Wiedergewinnung sehr interessant ist. Phosphor kommt insbesondere in der Landwirtschaft als Düngemittel zum Einsatz. So lassen sich theoretisch 52% des Gesamtbedarfs an Phosphor aus der Rückgewinnung aus Klärschlamm gewinnen (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021). Aus Gründen des vorsorgenden Bodenschutzes wird die Anwendung von Klärschlamm nach der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und der Düngemittelverordnung (DüMV) in der Landwirtschaft stark reglementiert. Die direkte Verwendung ist somit kaum noch möglich.

Laut Befragungen stellt sich bei Technologieanbietern und Anwendern die Frage, inwiefern Wertstoffe oder Metalle bei aktuellen Marktpreisen wirtschaftlich biologisch gewonnen werden können. So lange das Zielprodukt (beispielsweise Phosphor oder Ammonium) keinen entsprechenden Marktwert hat, ist die Nachfrage oder die Bereitschaft auf einen neuen Prozess bei Ab- oder Prozesswasser umzustellen gering. Zusätzlich spielen Faktoren wie das Marktvertrauen, die Qualität des Endprodukts und die Komplexität des neuen Prozesses eine große Rolle. So lange diese Prozesse nicht etabliert oder eindeutig kosteneffizienter als konventionelle Technologien sind, wird die Nachfrage danach als gering eingeschätzt.

Da viele Abwasserströme eine komplexe Mischung von Stoffen darstellen, ist die gezielte Aufreinigung entsprechend komplex. Zur Vorbehandlung werden entsprechend viele Prozessschritte benötigt, womit die Wirtschaftlichkeit nicht darstellbar ist. Bestimmte industrielle Abwässer stellen hier eine Ausnahme dar, da beispielsweise die Galvanik in gewissen Produktionsschritten sehr hohe Konzentrationen an Schwermetallen im Wasser aufweist. Dieses Prozesswasser enthält aufgrund seiner Anwendung viele Metalle, wie Zink, Nickel, Kupfer und Chrom, die aktuell durch eine chemische Fällung abgetrennt werden muss. Dieser Überschuss an ausgefällten Metallen wird eingedampft und über eine Fest-Flüssig-Trennung abgetrennt. Der so entstandene Schlamm wird über Abfallverwerter verbrannt und auf Endlagerstätten entsorgt.

Eine gesamte Prozesskette sollte folgende Schritte durchlaufen, damit eine selektive und wirtschaftliche Etablierung eines Prozesses möglich ist:

1. Selektion (Eingrenzen des Zielprodukts)
2. Fraktionieren (Trennung Anorganik und Organik)
3. Konzentration (Aufkonzentrierung der niedrigen Konzentrationen an Wertstoffen)

Konventionell wird die Phosphorrückgewinnung überwiegend durch chemisch,-physikalische Methoden unter hohem Energie- und Chemikalienaufwand durchgeführt (Jiao 2012). Entscheidende Faktoren für die Wirtschaftlichkeit eines bestimmten Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung sind die Produktivität, die Reinheit des erhaltenen Phosphors und der notwendige Materialeinsatz. Derzeitige Rückgewinnungsverfahren erzielen jedoch nur Phosphatspezies, die zwei- bis zehnmal teurer als nach Deutschland importierte Produkte sind.

Aktuell werden fast zwei Drittel der kommunalen Klärschlämme verbrannt, ohne den darin enthaltenen Phosphor zurück zu gewinnen. Das andere Drittel wird zur Düngung oder Landschaftsbau eingesetzt, oder als Reststoff entsorgt. Da Deutschland in der Versorgung von Mineräldüngerphosphat von Importen abhängig ist, stellt das Phosphorrecycling eine nachhaltige und kontinuierliche Quelle an verfügbarem Phosphor dar (BMU Pressemitteilung 2017). Die Neufassung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) sieht vor, dass der Phosphor zukünftig aus Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsaschen zurückgewonnen werden muss.

## 4.6 Reststoffabfall und Gärreste/Kompost

Das kommunale Abfallaufkommen betrug 2020 in Baden-Württemberg 12,74 Millionen Tonnen. Den mit Abstand größten Anteil am Gesamtabfallaufkommen haben Baumasseabfälle (56%; entspricht dem Bauschutt, Straßenaufbruch und Bodenaushub), 44% der Abfälle stammen hingegen aus dem Siedlungsbereich. Bauabfälle weisen i. d. R. hohe Verwertungsquoten auf (90%). Allerdings zählen dazu auch niederwertige Verwertungsmaßnahmen wie der Deponiebau oder die Füllung von Abgrabungen (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021).

Die Siedlungsabfälle lassen sich in Rest- und Sperrmüll, Bioabfälle und wertstoffhaltige Abfälle unterteilen. Im Jahr 2020 sind pro Kopf in Baden-Württemberg 368kg Rest- und Sperrmüll und 55kg Biomüll angefallen. Der Biomüll wurde zu 43% biologisch verwertet (Kompostierung, Nutzung als Dünger) und zu 57% direkt energetisch verwendet. Nach einer Vergärung wird der Gärrest meistens noch biologisch in einer anschließenden Kompostierung verwertet (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021).

Im Jahr 2013 fielen in Baden-Württemberg 3,6 Millionen Tonnen Gärreste an, welche insbesondere in der Landwirtschaft als organisches Düngemittel genutzt werden kann (ca. 60%). Weitere Einsatzmöglichkeiten sind der Hobbygartenbau, der Erwerbsgartenbau, der Landschaftsbau, Sonderkulturen (vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2016). Gärreste werden je nach Wassergehalt in trockene oder flüssige Gärreste unterteilt. Für weitere Verwertungswege neben dem Einsatz als Wirtschaftsdünger müssen beispielsweise stark flüssige Gärreste zuerst getrocknet werden. Entsprechend des späteren Anwendungszweck werden die Mengen in Gewicht (Tonnen) oder Volumen (m<sup>3</sup>) angegeben. Nach den Ergebnissen der Landwirtschaftszählung 2020 wurden im Zeitraum zwischen März 2019 bis Februar 2020 insgesamt 16,6 Millionen Kubikmeter (Mill. m<sup>3</sup>) flüssiger Wirtschaftsdünger (Gülle, Jauche oder flüssige Biogasgärreste) in Baden-Württemberg ausgebracht. Davon waren 5,4 Millionen Kubikmeter flüssige Biogas-Gärreste als Wirtschaftsdünger auf Acker- und Grünland ausgebracht worden (vgl. Landwirtschaftszählung 2020).

## 5 Anwendungs- und Entwicklungspotentiale bei der Anwendung von Biomining-Technologien auf vorhandene Rohstoffquellen in Baden-Württemberg

In diesem Kapitel werden die vorher identifizierten Rohstoffströme mit den jeweiligen sinnvollen Biomining-Technologien gemeinsam betrachtet und deren Applikation bewertet.

### 5.1 Anwendungspotential bei Erzmineralien

Potential ergibt sich in der Nutzung von Abwässern oder Grundwasser aus stillgelegten Minen. Im Verbundprojekt BIOMIMIC konnten Verfahren zur Behandlung von metall- und sulfathaltigen (Bergbau-)wässern (Grubenwässer) mit biotechnologischen Verfahren angewendet werden (BIOMIMIC Impact). Initiale Prämisse lag hierbei auf der Aufreinigung von unbehandelten und hochkontaminierten Bergbauwasserströmen, die zu einer erheblichen Belastung in Fließgewässersystemen beitragen (Weber und Bilek 2018). Mit Mineralisierungsverfahren (Biopräzipitation, Biofällung, BES) ist es in diesem Fall möglich, die Konzentration an Metallen zu erhöhen und eine Rückgewinnung an Metallen zu erreichen. Dabei wurde die Anwendung von Sulfat-reduzierenden Bakterien und die Biosorption auf biobasierter Kohle in Verfahrenstechnischen Ansätzen bereits näher erprobt. Dieser Anwendungstest ergab jedoch, dass die Biosorption auf Basis von Bakterien oder Kohle ihre Leistungen ihre ökologischen und ökonomischen Leistungen erheblich verbessern müssten, um eine umweltgerechtere und wirtschaftliche Alternative zu chemischen Verfahren darzustellen (Teilvorhaben: BIOMIMIC Impact und BIOMIMIC Verfahrenstechnik, 2021). Um eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeits- und Umweltbilanz zu erreichen, müssen folgende Punkte adressiert werden: (1) In der Anwendung von Sulfat-reduzierenden Bakterien sollte die Energieeffizienz und Ausbeute gesteigert und (2) der Verbrauch der notwendigen Nährstoffe (Beispielsweise Methanol als Kohlenstoffquelle) reduziert werden. Eine Alternative zu kommerziell erhältlichen und teuren Substraten ist die Integration von Kohlenstoff-haltigen / Nährstoff-haltigen Abwässern oder die Verwendung von günstigen Abfallprodukten als Substrat (Beispielsweise Gärreste).

Biosorption, Biofällung oder BES können zusätzlich geeignet sein, gelöste Metalle aus Bergbau-Grubenwässern zu fraktionieren. Dazu muss die metallhaltige Suspension energieintensiv mittels eines Pumpensystems durch Reaktionsbehälter der Biosorption, Biofällung oder durch eine mikrobielle Brennstoffzelle geführt werden. Neben der Biosorption und Akkumulation von Metallen in und an Organismen verspricht die Biosorption an Kohle, die aus nachhaltigen Ressourcen, Algen oder Gärresten hergestellt wird, eine weitere Möglichkeit zur nachhaltigeren Abtrennung von Produkten. Laut Studie zeigt die biobasierte Kohle auf Basis von Holzspänen eine bessere ökologische und ökonomische Leistung als Hydrokohle auf Basis von Algen (Teilvorhaben: BIOMIMIC Impact und BIOMIMIC Verfahrenstechnik, 2021).

Neben der Biosorption und Bio-Akkumulation stellen Bioelektrische Systeme eine weitere noch recht neue Möglichkeit zur Präzipitation dar. Die Präzipitation an der Kathode erlaubt eine einfache Trennung der Metalle aus einer gering konzentrierten Ausgangslösung. Nebenbei werden insbesondere bei Bergbau- und Grubenwässern viele toxische Metalle aus dem Ausgangsmaterial geholt, sodass eine Renaturierung stattfinden kann (Nancharaiah 2016).

## 5.2 Anwendungspotential bei Deponien und Abraumhalden

Das Anwendungspotential von biotechnologischen Methoden von Deponien und Abraumhalden konvergiert mit Anwendungen im Bergbau oder der Gewinnung von Metallen aus Elektroschrott. Dabei wird davon ausgegangen, dass konventionelle Deponien durch beispielsweise mülltonnengängige Elektrogeräte viel Potential zur Rückgewinnung von seltenen oder kritischen Erden darstellen.

Vornehmlich stellen hier die Biolaugung zum Herauslösen von Metallen aus Feststoffen ein hohes Anwendungspotential dar. Zur Anwendung der Haldenbiolaugung oder In-Situ-Biolaugung (In-Place-Biolaugung) sollten bereits beim Anlegen der Deponie ein Wasser undurchlässiger Untergrund gewählt werden, sodass eine austretende Laugungsflüssigkeit zentral gesammelt werden kann und nicht in das Grundwasser versickert. Zur In-Situ-Biolaugung sollte, wenn möglich, auf Vorrichtungen geachtet werden, um die Laugungsflüssigkeit zu seinem bestmöglichen Bestimmungsort leiten zu können. Bisherige Erfahrungen der in-situ-Biolaugung beschränken sich hauptsächlich auf die Gewinnung von Uranerzen. Eine Anwendung auf andere Metallsorten sollte vor der tatsächlichen Anwendung auf ihre Machbarkeit geprüft werden. Dazu gehört die Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien hinsichtlich seiner potentiellen Zielprodukte, seiner Toxizität gegenüber den einzusetzenden Organismen, sowie die Eignung der verwendeten Organismen zur Spezifität des Zielprodukts. Eine metallarme Laugungsflüssigkeit kann erneut auf der Deponie oder Abraumhalde verteilt werden. Ausreichend metallhaltige Laugungsflüssigkeit kann mit weiterführenden Technologien behandelt, sodass das gewünschte Zielprodukt daraus extrahiert werden kann. Zur Aufbereitung der metallhaltigen Laugungsflüssigkeit können verschiedene Prozesse oder Verfahrenskombinationen zur Extraktion oder Aufkonzentration verwendet werden (Bioelektrische Systeme, Fällung, etc.). Bei der biologischen Umsetzung des Deponiemülls werden Temperaturen von 40°C bis zu 60°C erreicht, welche die Lebensbedingungen von Archaeen oder thermophilen Eisen- und Schwefeloxidierende Bakterien begünstigen. Erwärmte Laugungsflüssigkeit kann mittels Wärmetauscher als Wärme- oder Energiequelle genutzt werden. Die Behandlung von Deponien mit Biolaugung ist grundsätzlich geeignet, vorausgesetzt die Zusammensetzung an vorliegenden Wertstoffen wurde analysiert und die verfahrens- und umweltschutztechnischen Anforderungen zur Anwendung werden erfüllt.

Alternativ kann Phytomining als minimal invasivere Art Metallrückgewinnung auf Deponien und Abraumhalden als Biolaugung eingesetzt werden. Jedoch wird von den Wurzeln der Hyperakkumulatoren nur die oberste „Bodenschicht“ durchdrungen – Für einen gesamten Entzug der Metalle müssten auf den verschiedenen Bodenschichten nacheinander Hyperakkumulatoren wachsen. Dazu könnte man die Deponien nur zu einem gewissen Grad befüllen, danach direkt mit Hyperakkumulatoren bepflanzen, ernten und erneut mit frischem Abfall befüllen. Je nach verwendetem Pflanzenmaterial liegt die Dauer zwischen Anwendung und Ernte zwischen 4 Wochen und mehreren Jahren. Laut Studien wurden bereits Ansätze erprobt, in dem Hyperakkumulatoren auf Deponien mit Klärdünger (organischer Dünger aus Klärschlamm) bewirtschaftet wurden (Kim 2010). Klärdünger eignet sich durch seine Pflanzennährstoffe: Phosphor, Stickstoff, Kalk, Magnesium und Kalium als idealer Pflanzendünger. Jedoch ist er aufgrund seiner enthaltenen Schwermetalle und Schadstoffe als konventioneller Dünger sehr umstritten und in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und der Düngemittelverordnung (DüMV) in seiner Anwendung stark reglementiert. Nach einer Übergangsfrist darf demnach kein Klärschlamm aus mittleren und großen Kläranlagen als Dünger auf wirtschaftlichen Flächen verwendet werden (AbfKlärV, Umweltbundesamt 2018). Nach Kim et. al. wird die Synergie zur Renaturierung der Deponien und der Akkumulation an Metallen in den Pflanzen hervorgehoben. Trotzdem entspricht die Anwendung von Klärdünger als Substrat einer sorgfältigen

Abwägung und Vorsichtsmaßnahmen um mögliche Umweltschäden (Schwermetallbelastung im Grundwasser) zu vermeiden.

Im Falle des Phytomining werden die Hyperakkumulatoren nach dem Wachstum geerntet, getrocknet und zu Asche verbrannt. Die Asche enthält je nach eingesetztem Hyperakkumulator und Wachstumsfläche die konzentrierten Schwermetalle, welche dann wieder mit verfahrenstechnischen Schritten herausgelöst und weiterverarbeitet werden können. Pflanzenasche eignet sich für verschiedene Biolaugungsansätze, die in geschlossenen Bioreaktoren (Tankbiolaugung) durchgeführt werden, um die Metallanteile von der Asche zu trennen.

---

Anwendungs- und  
Entwicklungspotentiale bei der  
Anwendung von Biomining-  
Technologien auf vorhandene  
Rohstoffquellen in Baden-  
Württemberg

---

### 5.3 Anwendungspotential bei Elektroschrott

Die biotechnologische Metallrückgewinnung kann eine erhebliche Rolle bei nicht vollständig getrennten Elektro-/Elektronikgeräten haben. Viele seltene Erden und Metalle sind im Verbund oder an unterschiedlichen Stellen im Gerät lokalisiert. Aufgrund dessen ist eine unspezifische biotechnologische Anwendung, wie die Biolaugung dazu geeignet, Metallionen aus diesem Verbund zu lösen. Eine spezifische Einordnung, welche Organismen bei welchem Ausgangsmaterial das gewünschte Zielprodukt liefern können, ist nicht pauschal zu beantworten. Die meisten bekannten Erfahrungen der Biolaugungen beziehen sich in der Anwendung auf Sulfat-reduzierende Bakterien. Jede Biolaugung sollte dennoch vor Anwendung auf die spezifischen Anforderungen (Ausgangsstoff, Zielprodukt, verwendeter Organismus) auf seine Eignung überprüft werden. Um die Metalle für Mikroorganismen leichter zugänglich zu machen, kann sogar eine gesamte Prozesskette aus mechanischen oder chemischen Schritten notwendig sein.

Bei einer entsprechenden Vorbehandlung (gelöste Mineralien in einer wässrigen Lösung) oder geringen Ausgangskonzentrationen können Biofällungen, oder Biopräzipitationen zur Anwendung kommen. Jedoch ist hier die maximale Konzentration an Metall je nach Organismus begrenzt und reicht für eine direkte Verwendung als Rohstoff für die weiterverarbeitende Industrie nicht aus. Hierzu ist die Kombination mit einem Verfahren zur Aufkonzentration entscheidend. Insbesondere die Kombination von biotechnologischen Verfahren mit klassischen mechanischen oder chemischen Aufbereitungsverfahren wie sequentielles Abtrennen (Hydrozyklon) und Abscheidetechniken (Filtration, Fällung, Eindampfen, Feststoffabscheider, etc.) sowie die nachfolgende Aufkonzentration über innovative Adsorbentmaterialien sind für die Anwendung von Biolaugung an Elektroschrott vielversprechend.

Bioelektrische Systeme stellt hier eine relativ neue und noch am Anfang befindliche Technologieplattform dar, die aber einen Teil innerhalb einer gesamten Prozesskette abdecken kann. Durch reduktive Präzipitation von Metallen an der Kathode von Bioelektrischen Systemen kann eine spezifischere Anreicherung aus einer gemischten wässrigen metallhaltigen Lösung durchgeführt werden.

## 5.4 Anwendungspotential bei Abwasser

Abwasser aus kommunalen oder industriellen Quellen stellen eine noch sehr variable Ressource für Metalle dar. Bisherige Technologien nutzen biologische Verfahren hauptsächlich zur Schadstoff- oder Schwermetallreduzierung in Abwässern.

Kommunale Abwässer weisen in ihrer Zusammensetzung eine sehr variable Menge an Metallen auf und sollten jeweils spezifisch untersucht werden, ob sich eine Anwendung zur Metallrückgewinnung lohnt. Die Anreicherung von Schwermetallen kann auf sehr verschiedene Quellen zurückgeführt werden (Merkblatt Nr. 4.6/1):

- Vorbelastung des Trinkwassers (beispielsweise Kupfer und Zink durch Hausinstallationen)
- Niederschlagswasser (Dachrinnen und Metalldächer)
- Ausscheidungen durch den Menschen (Spurenelemente, Zink)
- Abfälle / Ausscheidungen aus dem medizinischen Bereich (Silber, Quecksilber, Röntgenkontrastmittel)
- Wasch- und Reinigungsmittel (Nickel, Kupfer, Chrom)
- Straßenabwasser bei Mischkanalisation (Zink u. Kupfer aus Abrieb, Zink aus Motorenöl)

Anwendungspotential findet sich hauptsächlich in der Biosorption, Biomineralisierung, Biopräzipitation und BES zum Abtrennen und Extrahieren von Metallen aus dem Abwasser.

In vielen Industriezweigen, allen voran u.a. bei Galvanikunternehmen und Lackbetrieben, sind die zu behandelnden Prozessströme sehr komplex und hochanspruchsvoll. Häufig sind die Wässer stark sauer oder alkalisch und beinhalten neben unterschiedlichsten Metallverbindungen z.B. starke Komplexbildner oder Cyanid-Spezies. Auch können die enthaltenen Stoffe über die Zeit sehr stark variieren. Folglich ist ein zu Standardbedingungen betriebener Prozess keine Lösung für diese Aufgabe. Damit solch komplexe Abwässer mit biologischen Prozessen behandelt werden können, müssen entsprechende Vorbereitungen durchgeführt werden. Dies wird am Beispiel des Abwassers von Galvanikunternehmen beschrieben:

- Stark alkalischer oder saurer pH-Wert muss in einen pH-Wert-Bereich gebracht werden, in denen Mikroorganismen überleben können und einen effektiven Stoffwechsel haben
- Die Verwendung von hoch toxischen Komplexbildnern muss entweder stark reduziert oder durch z.B. enzymatische Prozesse ersetzt oder unschädlich gemacht werden.

Sobald der Abwasserstrom ideale Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen aufweist, können Verfahren der Biosorption, Biomineralisierung und BES verwendet werden um die gelösten Metalle aus dem Strom zu fällen.



## 5.5 Anwendungspotential bei Klärschlamm und Klärschlammmaschen

Aufgrund der endlichen global verteilten Reserven an Rohphosphat und der vorgeschriebenen Phosphorrückgewinnung in der Klärschlammverordnung werden neue innovative Wege der Phosphorrückgewinnung gesucht. Nach der Klärschlammverordnung gilt momentan eine Übergangsfrist von 15 (Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 50.000 Einwohnerwerten (EW) und 12 Jahren (Kläranlagen ab 100.00 EW), nach der eine Rückgewinnungspflicht von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammmaschen gilt (AbfKlärV).

Innovative biologische Methoden zur Rückgewinnung von Phosphor stehen in direkter Konkurrenz zu etablierten Verfahren. Laut dem Umweltbundesamt gibt es über 20 etablierte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmaschen, von denen nur das unspezifisch genannte Bioleaching auf biologischen Verfahren basiert. Dazu ist die Tankbiolaugung (Auslaugung oder Rückstand) die verfahrenstechnisch effektivste Methode in der Anwendung. Zu Sulfat-reduzierenden Bakterien in Tankbiolaugungsverfahren bestehen historisch und experimentell die umfangreichsten Erfahrungen. Das Potential für eine wirtschaftliche Anwendung ist hier am größten. Die Biolaugung erreicht jedoch im Vergleich zum nasschemischen Aufschluss, der thermochemischen Aufbereitung oder Elektrokinese noch nicht die notwendige Kosteneffizienz, um als alternatives Verfahren anerkannt zu werden. Organismenspezifische Unterschiede in der Effizienz verhindern zudem eine klare Aussage zu Rückgewinnungsmöglichkeiten über Biolaugungsverfahren. Die Prozessführung sollte durch die Implementierung einer Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie der Überwachung durch geschultes Personal unterstützt werden. Langfristig könnten Prinzipien des maschinellen Lernens oder der künstlichen Intelligenz zur Automatisierung erforscht und integriert werden.

Trotzdem stellen Biolaugungsverfahren einen deutlich ressourcenschonenderen Prozess im Vergleich zu den konventionellen Alternativen dar. Es werden keine extra dafür hergestellten Chemikalien oder energieintensive thermische Verfahren benötigt. Entscheidend ist die Verfahrenskombination zur kostengünstigen Extraktion oder Fällung des Phosphats aus der Laugungsflüssigkeit. Ebenfalls stellt die Versorgung mit Wachstumssubstraten / Nährstoffen für die Mikroorganismen ein dauerhaftes kostenintensives Problem dar. Hier kann eine Kombination mit nährstoffreichen Abfall- oder Ressourcenströmen die notwendige und kontinuierliche Versorgung der Mikroorganismen unterstützen und somit zur Wirtschaftlichkeit beitragen.

## 5.6 Fazit zur Weiterentwicklung der Biominingansätze

Bei Betrachtung der Rohstoffe und des Anwendungspotentials der Biomining-Technologien haben sich insbesondere die Ansätze der Biolaugung und Extraktion von löslichen Mineralien mit Biomining als zukunftssträftig herauskristallisiert.

Zur Biolaugung besteht Entwicklungspotential in der Steigerung der allgemeinen Effizienz und der erreichten Ausbeute. Die vorherrschenden Konzentrationen in den Laugungsflüssigkeiten ist meist zu gering, um diese direkt nutzen zu können. Hier ist ein weiterer Schritt zu Erhöhung der Konzentration, Extraktion oder Fällung notwendig. Auch nach Alternativen für die fortwährende Nährstoffzugabe sollte gesucht und integriert werden. Hierbei könnten Abfallströme als zusätzliche Quelle an kohlenstoffhaltigen Substraten eingesetzt werden. Grundsätzlich sollten die Weiterentwicklungen vor allem die Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen sowie die verfahrenstechnische Ausgestaltung der Prozesse betreffen sowie die Aufbereitung der sekundären Rohstoffe hinsichtlich der Maximierung der für die Mikroorganismen verfügbaren Oberflächen (Demontage, Zerkleinerung).

Alle Ansätze zur Extraktion und Fällung von Metallen aus einer niedrig konzentrierten Lösung tragen zu einer energieeffizienteren und umweltfreundlicheren Aufkonzentration bei. In Kombination mit niedrig konzentrierten Laugungsflüssigkeiten oder Abwässern besteht großes Potential zukünftig eine ernstzunehmende Alternative von chemisch-, physikalischen Extraktionsmethoden zu werden. Dabei ist besonders die Weiterentwicklung der Abtrennung und Extraktion der Zielprodukte von den Zellen notwendig. Dafür kommen unter anderem unterschiedliche mechanische-, thermische-, elektrische und physiko-chemische Verfahren, je nach Anforderung als Downstream-Prozess in Betracht. Ebenfalls sollte die Erhöhung der Ausbeute bei der Biosorption, Biomineralisierung Teil von zukünftigen Weiterentwicklungen sein, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen.

Die Präzipitation von Metallen an der Kathode einer mikrobiellen Brennstoffzelle ist eine noch recht neue Technologie, erfreut sich aber einer immer größeren Aufmerksamkeit. Besonders die Integration in bestehende Systeme und das Up-Scaling der BES-Ansätze an große Volumenströme stellen jedoch noch erhebliches Entwicklungspotential dar. Die sekundäre Nutzung der Energiegewinnung durch eine mikrobielle Brennstoffzelle ist mit den aktuell erreichbaren Stromdichten noch nicht ökonomisch sinnvoll nutzbar. Weitergehende Entwicklungen beider Anwendungszwecke fördern die Entwicklung von BES zu einer wirtschaftlich konkurrenzfähigen Technologieplattform.

Aufgrund der noch geringen Ausbeute und den niedrigen Preisen der Metalle ist die Anwendung von Phytomining über Hyperakkumulatoren zur reinen Metallgewinnung noch unwirtschaftlich. Für den Sprung in die industrielle Anwendung sollte die Entwicklung zu einer höheren Ausbeute der Metalle bei einer kürzeren Vegetationsperiode sein.

## 6 Nachfrage und Exportfähigkeit der Biomining-Technologien

### 6.1 Nationale und internationale Nachfrage nach Biomining-Technologien

Laut beteiligten Akteuren ist die Bekanntheit zur realen Anwendung von Biomining-Technologien noch relativ unbekannt. Das Interesse und die Nachfrage nach biotechnologischen Verfahren zur Metallrückgewinnung entstehe beispielsweise dadurch, dass konventionelle Verfahren entweder nicht mehr angewendet werden dürfen (z.B. gesetzliche Rahmenbedingungen zum Umweltschutz) oder der veranschlagte Preis zur Entsorgung steigt. Eine ungewollte marktwirtschaftliche Preissteigerung durch Umweltkatastrophen, Pandemien, Verknappung an notwendigen Materialien oder Chemikalien und Lieferschwierigkeiten in der globalen Logistik wirken sich auf die ausgerufenen Preise der Wertstoffe oder Entsorgung von potentiellen Rohstoffquellen aus. Beispielsweise hatte sich laut Befragung der Galvanik-Industrie der Preis zur Entsorgung des Galvanik-Schwermetallschlammes während der Corona-Pandemie im Jahr 2020 erhöht, weswegen die Nachfrage der Erzeuger nach einer alternativen Methode zur Entsorgung entstand. Jedoch hat sich der Preis innerhalb von wenigen Monaten wieder normalisiert. Die Nachfrage nach alternativen Verfahren sank ebenfalls mit sinkendem Entsorgungspreis. Ebenso kann eine Preissteigerung gezielt durch eine gesetzliche Änderung der Recyclingquoten oder Anpassung durch Umweltschutzanforderungen erzielt werden und damit zu einer erhöhten Nachfrage nach Biomining-Prozessen führen.

Biomining-Technologien können in ihrer Anwendung aber auch die direkten Kosten der Prozessindustrie senken, wenn sie nachhaltig und wirtschaftlich integriert werden können. Eine zusätzliche Einnahmequelle durch die Verwertung von Metallen oder anderen sekundären Rohstoffen im Produktionsprozess kann den Gesamtaufwand senken. Jedoch ist meist die direkte Entsorgung der Abwässer oder Restabfälle in vielen Fällen günstiger, da (1) Preise der Wertstoffe zu gering ist, (2) von hohen Investitionskosten einer neuen Technologie Abstand genommen wird oder (3) die laufenden Betriebskosten einer Biomining-Technologie aufgrund der seltenen industriellen Anwendung (geringer TRL) nicht eindeutig abgeschätzt werden können.

Abhängig vom direkten Rohstoffpreis einzelner Metalle ist die Nachfrage nach Technologien, die spezifisch ein einziges Metall gewinnen sollen, zum Teil trotzdem besonders hoch. Beispielsweise kann die Nachfrage zur Rückgewinnung von Palladium aus Leiterplatten und Elektroschrott aufgrund des Marktpreises und der geringen Verfügbarkeit von besonderer Bedeutung für einzelne Industriesektoren sein. Sobald mit biotechnologischen Verfahren, neue Rohstoffquellen erschlossen werden können, sollte das Verfahren einen annehmbaren Return-of-Investment (ROI) vorweisen. In Mischkalkulationen, können diese Verfahren genutzt werden, um Umweltschutzbedingungen zu erfüllen. Dies kann im Abbau oder Entfernen von toxischen Substanzen, beispielsweise Schwermetalle in der Galvanik, in Bergbauwasser oder Rückgewinnung von geforderten Recyclingquoten innerhalb des Prozesses sein.

Biomining-Technologien stellen in der großtechnischen Anwendung nur im Bereich Haldenbiolaugung eine etablierte Alternative zur Gewinnung von Erzen und Metallen dar. Hier konnte bereits auch international gezeigt werden, dass erhebliche Mengen an Metallen (z.B. Kupfer) mit Biomining-Technologien gefördert werden können. Entsprechend beschränkt sich der internationale Bedarf aktuell auf großtechnische Anlagen der Haldenbiolaugung, weil dies der bekannteste und erfolgversprechendste Ansatz einer Biomining-Technologie ist. Bereits jetzt wird ein Viertel des weltweit

produzierten Kupfers durch Biolaugung produziert. Gleichermaßen werden etwa 10 % des Goldes und 3 % an Kobalt und Nickel über Biomining-Technologien gefördert. Entsprechend ist die aktuelle Nachfrage nach Haldenbiolaugung besonders groß.

## 6.2 Aktuelles und zukünftiges Exportpotential von Technologie aus Baden-Württemberg

Zukünftiges Exportpotential besteht allgemein bei umweltschonenden, energieeffizienten und wirtschaftlichen Technologien. Einige der Biomining-Technologien haben zukünftig ein sehr hohes Exportpotential, da sie mit ihren besonders milden Reaktionsbedingungen und einem meist geringen Energieverbrauch direkt gegen umweltschädliche Technologien konkurrieren können. Aufgrund des Klimawandels sind mehr und mehr Technologien gefragt, die CO<sub>2</sub>-neutral und gleichzeitig auch einen geringen Wasser-footprint durch beispielsweise gekapselte Prozesse und Kreislaufführungen Wertstoffe produzieren können. Werden Biomining-Technologien auf das Recycling und der Wiedergewinnung von Metallen und Wertstoffen optimiert, trägt dies erheblich zur Selbstversorgung nachgefragter Ressourcen bei. Dadurch wird die Abhängigkeit von Importen gesenkt und natürliche Ressourcen werden geschont. Gleichermaßen erfüllt das Metallrecycling die Kriterien einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Die meisten Metalle können ohne Qualitätsverlust und unbegrenzt recycelt werden. Dies schützt die noch vorhandenen Bodenschätze und Umweltsysteme vor unnötigem Abbau und senkt insgesamt den Energiebedarf. Ebenfalls wird dadurch die Biodiversität geschützt und langfristig gefördert.

Eine erhöhte internationale Nachfrage an Biomining-Technologien entsteht also bei Ländern, die arm an natürlichen Bodenschätzen sind oder sich unabhängig von externen Bezugsquellen machen wollen. Außerdem können Biomining-Technologien den Energieverbrauch einer Region senken, wenn nasschemische, thermophysikalische Verfahren oder der klassische Bergbau ersetzt oder zumindest reduziert werden können. Länder mit Wasserknappheit könnten ebenfalls eine Nachfrage an Biomining-Technologien zeigen, da mit dem klassischen Bergbau ein starker Wasserverbrauch einhergeht und den Grundwasserspiegel senkt. Die Haldenbiolaugung ist bereits im internationalen Markt, respektive bei Minengesellschaften etabliert, weswegen das Exportpotential hier beschränkt ist. Ein großer Nachteil der Haldenbiolaugung ist die Umweltbelastung durch die Laugungsflüssigkeiten. Aufgrund der offenen Betriebsführung können diese Laugungsflüssigkeiten im schlimmsten Fall in das Umweltsystem gelangen und durch Toxizität Schaden anrichten oder das Grundwasser kontaminieren.

Mögliches Exportpotential kann sich in der Weiterentwicklung von Haldenbiolaugung zu umweltverträglicheren Bedingungen ergeben. Eine weitere Möglichkeit ist die Weiterentwicklung von Technologien der Tankbiolaugung, die als konkurrenzfähige Alternative zu Haldenbiolaugung platziert werden kann. Durch die Tankbiolaugung können die Verfahrenstechnik optimiert, viel spezifischere biologische Prozesse implementiert und Nachteile der Umweltbelastung minimiert werden. Zusätzlich müssen die bisherigen Tankbiolaugungsverfahren durch günstigere Wachstumsnährstoffe effizienter gestaltet und die Produktausbeute verbessert werden.

National bieten besonders Biomining-Technologien zur Anwendung im Recycling-Bereich die besten Exportpotentiale. Durch gesetzliche Änderungen und absehbare Fristen für die verpflichtende Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm(aschen), den Mobilitätswandel (Batterierecycling) und der angestrebten CO<sub>2</sub>-Neutralität werden bereits jetzt neue oder optimierte Technologien gefordert. Dabei haben besonders die

Biolaugungsverfahren und die biologischen Verfahren zur Extraktion, Fällung von Metallen (Biosorption, Biomineralisierung, BES) die Chance zu exportfähigen Technologien zu werden.

---

Nachfrage und Exportfähigkeit  
der Biomining-Technologien

---

Aufgrund des niedrigen TRL von vielen Biomining-Technologien verschaffen frühzeitige Technologieweiterentwicklungen bis zur Anwendungsreife einen Marktvorteil. Mit dem Aufbau der Biomining-Kompetenz in Baden-Württemberg und eines möglichen Wissensvorsprungs, könnten auch nationale und internationale Interessenten beraten werden., Deshalb ist es wichtig, das Baden-Württemberg in der Entwicklung von Technologie und praktischen Anwendung von Biomining-Technologien eine Vorreiterrolle einnimmt.

Zukünftig können auch andere Biomining-Technologien international und national interessanter werden, wenn gemeinsame Bestrebungen zum Abmildern des Klimawandels angegangen werden. Hier gelten vorherige Beispiele der Anwendung von Biomining-Technologien zum Recycling.

Abfallbilanz 2020 Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft, veröffentlicht vom Ministerium für Klima, Umwelt und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Abrufbar unter [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2\\_Presse\\_und\\_Service/Publicationen/Umwelt/Abfallbilanz-2020-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publicationen/Umwelt/Abfallbilanz-2020-barrierefrei.pdf) (zuletzt aufgerufen 13.10.2021)

AbfKlärV, Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV), Ausfertigungsdatum: 27.09.2017

Adewale George Adeniyi, Joshua O. Ighalo, Biosorption of pollutants by plant leaves: An empirical review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 7, Issue 3, 2019, 103100, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103100>.

Ali Aghababai Beni, Akbar Esmaeili, Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A Review, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 17, 2020, 100503, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100503>.

Azubuike, Christopher Chibueze; Chikere, Chioma Blaise; Okpokwasili, Gideon Chijioke (16 September 2016). "Bioremediation techniques–classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects". *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 32 (11): 180. doi:10.1007/s11274-016-2137-x. PMC 5026719. PMID 27638318.

Baniasadi Mahsa, Farzane Vakilchap, Nazanin Bahaloo-Horeh, Seyyed Mohammad Mousavi, Sebastien Farnaud, Advances in bioleaching as a sustainable method for metal recovery from e-waste: A review, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 76, 2019, Pages 75-90, ISSN 1226-086X, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.047>.

BMU Pressemitteilung 2017, Deutschland soll Phosphor aus Klärschlamm gewinnen, 18.01.2017, Pressemitteilung Nr. 017/17, Kreislaufwirtschaft; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit; <https://www.bmu.de/pressemitteilung/deutschland-soll-phosphor-aus-klarschlamm-gewinnen/> (zuletzt abgerufen 13.10.2021)

BIOMIMIC Impact und BIOMIMIC Verfahrenstechnik, Gefördert durch: BMBF Förderrahmen: Transnationale Ausschreibung ERA-MIN 2 des ERA-Nets FKZ: 033RU006A & 033RU006B, Projektträger: PTJ, Laufzeit: 01.05.2018 - 30.11.2020

BR Wissen: <https://www.br.de/wissen/phytomining-superpflanzen-schwermetalle-hyperakkumulatoren-100.html> (zuletzt abgerufen 18.10.2021)

<https://www.br.de/wissen/phytomining-superpflanzen-schwermetalle-hyperakkumulatoren-100.html>

Chaney R.L., Baker A.J.M., Morel J.L. (2021) The Long Road to Developing Agromining/Phytomining. In: van der Ent A., Baker A.J., Echevarria G., Simonnot MO., Morel J.L. (eds) *Agromining: Farming for Metals*. Mineral Resource Reviews. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58904-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58904-2_1)

Dott, W; Miachael, S.: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S.232-249, ISBN 978-3-944310-28-2

DüMV, Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln1 (Düngemittelverordnung - DüMV), Ausfertigungsdatum: 05.12.2012

Ferrier, John, Csetenyi, Laszlo, Gadd, Geoffrey Michael - Selective fungal bioprecipitation of cobalt and nickel for multiple-product metal recovery (2021), *Microbial Biotechnology, Microb. Biotechnol.*, VL 14, IS 4, SN 1751-7915; <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13843>

Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG) GEG Ausfertigungsdatum: 08.08.2020

Horizon 2020 - Work programme 2014-2015, Annex G: Technology readiness levels (TRL)

Ilyas Sadia, Jae-chun Lee, Bioleaching of metals from electronic scrap in a stirred tank reactor, *Hydrometallurgy*, Volume 149, 2014, Pages 50-62, ISSN 0304-386X, <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.07.004>.

Jiao, W.; Chen, W.; Chang, A.C.; Page, A. L.: Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review. *Environmental Pollution* 168, 2012

Kumar, V., Dwivedi, S.K. Mycoremediation of heavy metals: processes, mechanisms, and affecting factors. *Environ Sci Pollut Res* 28, 10375–10412 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11491-8>

Kwon-Rae Kim, Gary Owens, Potential for enhanced phytoremediation of landfills using biosolids – a review, *Journal of Environmental Management*, Volume 91, Issue 4, 2010, Pages 791-797, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.10.017>.

Landstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (04. Juni 2019); Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6\\_Wirtschaft/Biooekonomie/Landesstrategie-Nachhaltige-Biooekonomie-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Biooekonomie/Landesstrategie-Nachhaltige-Biooekonomie-barrierefrei.pdf) (zuletzt abgerufen: 25.11.2021)

Landwirtschaftszählung 2020; Pressemitteilung des Statistischen Landesamt Baden-Württemberg (05. Okt. 2021): Südwestlandwirtschaft: 2020 weniger Wirtschaftsdünger ausgebracht. Verfügbar unter: <https://www.statistik-bw.de/Presse/Pressemitteilungen/2021294> (zuletzt abgerufen: 26.11.2021)

Merkblatt Nr. 4.6/1 – Schwermetalle im kommunalen Abwasser und Klärschlamm; 03.11.2000; Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft.

Mohammad Jafari, Hadi Abdollahi, Sied Ziaedin Shafaei, Mahdi Gharabaghi, Hossein Jafari, Ata Akcil & Sandeep Panda (2019) Acidophilic bioleaching: A Review on the Process and Effect of Organic–inorganic Reagents and Materials on its Efficiency,

Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 40:2, 87-107, DOI: 10.1080/08827508.2018.1481063

-----  
Literaturverzeichnis  
-----

Nancharaiah YV, Mohan SV, Lens PNL. Biological and Bioelectrochemical Recovery of Critical and Scarce Metals. Trends Biotechnol. 2016 Feb;34(2):137-155. doi: 10.1016/j.tibtech.2015.11.003. Epub 2016 Jan 5. PMID: 26763129.

Pradhan N., K.C. Nathsarma, K. Srinivasa Rao, L.B. Sukla, B.K. Mishra, Heap bioleaching of chalcopyrite: A review, Minerals Engineering, Volume 21, Issue 5, 2008, Pages 355-365, ISSN 0892-6875, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.10.018>.

Sahinkaya E., Uçar D., Kaksonen A.H. (2017) Bioprecipitation of Metals and Metalloids. In: Rene E., Sahinkaya E., Lewis A., Lens P. (eds) Sustainable Heavy Metal Remediation. Environmental Chemistry for a Sustainable World, vol 8. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58622-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58622-9_7)

Schippers, A; Hedrich, S: Recycling und Rohstoffe (Band 11), Stand der Technik und Potential von Biohydrometallurgie für Recycling. Herausgeber: Thiel, S; Thomé-Kozmiensky, E; Goldmann, D.; 2012. ISBN: 978-3-944310-40-4

Simon, F.-G.; Adam, C.: Ressourcen aus Abfall. In: Chemie Ingenieur Technik, 7, 2012, S. 84

Sinplastic: <https://sinplastic.com/muelldeponien-in-deutschland/> (zuletzt abgerufen 13.10.2021)

Umweltbundesamt, Fachgebiete III 2.4 – Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer und III 2.5 – Überwachungsverfahren, Abwasserentsorgung. *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland 2018, Kapitel 6: Phosphorrückgewinnung, S.55*

Weber, A.; Bilek, F. (2018): Recherche und Wirtschaftlichkeit (mikro-)biologischer Verfahren zur Reinigung von Bergbauwässern. Bericht Vita-Min TP 1.9. Hg. v. LfULG.

Wei Xiaocheng, Dongfang Liu, Wenli Huang, Weiwei Huang, Zhongfang Lei, Simultaneously enhanced Cu bioleaching from E-wastes and recovered Cu ions by direct current electric field in a bioelectrical reactor, Bioresource Technology, Volume 298, 2020, 122566, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122566>.