



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**FONA**  
Forschung für Nachhaltigkeit



Eine Initiative des Bundesministeriums  
für Bildung und Forschung

**CLIENT II**  
Internationale Partnerschaften  
für nachhaltige Innovationen



## Schlussbericht der Zuwendungsempfänger

zum

# CLIENT II – Verbundvorhaben: BioProLat - Reduktives Bioprocessing zur Kobalt- und Nickel-Gewinnung aus Lateriten in Brasilien

zur Bekanntmachung „CLIENT II – Internationale Partnerschaften für nachhaltige Innovationen“ zum Themenschwerpunkt „Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft“,

Gefördert vom

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover	033R271A
- G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH (GEOS), Halsbrücke	033R271B
Internationale Kooperationspartner:	
- Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, Brasilien	
- SGB – Serviço Geológico do Brasil, Porto Alegre, Brasilien (vormals CPRM)	
- Brazilian Nickel PLC (BRN), Piauí, Brasilien	
Titel des Vorhabens:	
<b>CLIENT II – Verbundvorhaben: BioProLat - Reduktives Bioprocessing zur Kobalt- und Nickel-Gewinnung aus Lateriten in Brasilien</b>	
Projektkoordinator:	
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	Herr Prof. Dr. Axel Schippers Tel.: +49 511 6433103 axel.schippers@bgr.de
Laufzeit des Vorhabens:	
vom: 01.02.2021 bis: 31.07.2024	
Berichtszeitraum:	Berichtsdatum:
vom: 01.02.2021 bis: 31.07.2024	10.01.2025

Zuwendungsempfänger: <b>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Stilleweg 2 30655 Hannover</b>	Förderkennzeichen: <b>033R271A</b>  Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Titel des Teilvorhabens A: <b>Biolaugung von Lateriten</b>	
Projektleiter: <b>Prof. Dr. Axel Schippers</b>	Tel.: +49 511 643 3103 E-Mail: axel.schippers@bgr.de
Zuwendungsempfänger: <b>G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH (GEOS) Schwarze Kiefern 2 09633 Halsbrücke</b>	Förderkennzeichen: <b>033R271B</b> 
Titel des Teilvorhabens B: <b>Teilvorhaben B: Metallrückgewinnung und Verfahrensbewertung</b>	
Projektleiter: <b>Mirko Martin</b>	Tel.: +49 3731 369 296 E-Mail: m.martin@geosfreiberg.de

**BGR Archiv-Nr.: OASYS 209035**

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Kurzbericht zum Projekt BioProLat .....</b>	<b>4</b>
1.	<b>Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....</b>	<b>4</b>
2.	<b>Ablauf des Vorhabens.....</b>	<b>4</b>
3.	<b>Wesentliche Ergebnisse .....</b>	<b>5</b>
<b>II.</b>	<b>Eingehende Darstellung zum Projekt BioProLat.....</b>	<b>7</b>
1.	<b>Projektziel, Notwendigkeit der Zuwendung und Zahlenangaben.....</b>	<b>7</b>
2.	<b>Projektkonsortium und Aufgabenverteilung sowie Ablauf des Projektes .....</b>	<b>7</b>
3.	<b>Eingehende Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse .....</b>	<b>9</b>
	3.1 Charakterisierung des Erzes.....	9
	3.2 Bioleaching limonitischer Erze .....	10
	3.3 Bioleaching saprolitischer Erze .....	17
	3.4 Metallrückgewinnung aus Laugungslösung .....	19
	3.5 Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung .....	23
<b>4.</b>	<b>Veröffentlichungen der Projektergebnisse.....</b>	<b>23</b>
	4.1 Publikationen .....	23
	4.2 Vorträge.....	24
	4.3 Poster .....	25

# **I. Kurzbericht zum Projekt BioProLat**

## **1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Kobalt (Co) und Nickel (Ni) werden von der EU auf der Liste der kritischen und strategischen Rohstoffe geführt. Sie sind bei der Batterieproduktion insbesondere für Elektrofahrzeuge unverzichtbar mit stark steigendem Bedarf. Der Industriestandort Deutschland ist zu 100% von Importen abhängig. Es müssen weltweit zuverlässige und neue Lieferquellen identifiziert werden, wobei der Schwerpunkt einerseits auf „konfliktfreien“ Regionen wie dem südamerikanischen Brasilien oder Indonesien und andererseits auf einer nachhaltigeren Gewinnung dieser Rohstoffe liegt. Bereits 80 % der weltweiten Nickelförderung stammen aus Lateriten.

Die Metall-Extraktion aus den Lateriterzen wird unter Verwendung pyrometallurgischer Techniken durchgeführt, die nur eine untere, an Magnesiumsilikaten reiche Ablagerungszone (d.h. die Saprolitzzone) verarbeiten können, während die obere Ablagerungszone hauptsächlich bestehend aus Eisen- und Manganoxiden (d.h. die Limonitzzone) hydrometallurgische Methoden wie HPAL (Hochdruck-Säurelaugung) erfordert. Die Methoden erfordern hohe Investitionskosten und einen hohen Energie- oder Reagenzienverbrauch, und sind häufig mit technischen und ökologischen Herausforderungen konfrontiert, die teilweise zu einer begrenzten Verwertung des Limoniterzes führen.

Eine vielversprechende Alternative zur pyro- und hydrometallurgischen Aufbereitung von Lateriten stellt die Biohydrometallurgie dar. Spezialisierte säureliebende Mikroorganismen sind in der Lage, Wertmetalle aus Erzen zu laugen. Dieser Prozess ist als Biolaugung (Bioleaching) bekannt und dessen Anwendung in der Bergbauindustrie für sulfidische Erze als Biomining. Labor- und Pilotstudien haben auch die Biolaugung oxydischer Erze wie Laterite gezeigt, es ist jedoch eine Optimierung und ein Upscaling erforderlich zur Verfahrensentwicklung. Projektziel war daher die Entwicklung eines energiesparenden, umweltfreundlichen, biohydrometallurgischen Verfahrens, basierend auf einer Kombination innovativer, reduktiver Bioleaching- und effizienter Metallrückgewinnungstechniken.

## **2. Ablauf des Vorhabens**

Gleich nach Projektbeginn im Februar 2021 erfolgte die Unterzeichnung einer BioProLat-Kooperationsvereinbarung zwischen BGR und GEOS. Zwischen der BGR und den brasilianischen Partnern SGB und CETEM bestanden ebenfalls Vereinbarungen, die gemeinsame Forschungsarbeiten zu Lateriten beinhalteten. In Kooperation mit Adelphi wurde eine CLIENT-Homepage für BioProLat erstellt <https://bmbf-client.de/projekte/bioprolat>, auf der im Projektverlauf Ereignisse und Publikationen der Projektergebnisse eingestellt wurden. Zudem wurde eine Projektseite in Deutsch und in Englisch im BGR-Internetauftritt online geschaltet [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Projekte/Lagerstaettenforschung-laufend/BioProLat/BioProLat.html?nn=5662266](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Projekte/Lagerstaettenforschung-laufend/BioProLat/BioProLat.html?nn=5662266). Bei der online CLIENT-Konferenz im Oktober 2021 wurde BioProLat mit einem online-Vortrag präsentiert sowie mit einem Ausstellungsbeitrag auf der CLIENT-Konferenz im November 2024. Halbjährlich fanden Projekttreffen mit allen Beteiligten statt im Hybrid-Format, um einem möglichst großen Personenkreis in Deutschland und Brasilien eine Teilnahme zu ermöglichen und gleichzeitig Reisekosten zu minimieren.

### 3. Wesentliche Ergebnisse

Die Erfüllung der Forschungsaufgabe im Projekt BioProLat beinhaltete eine umfassende geochemische und mineralogische Charakterisierung sowohl der aus brasilianischen Lagerstätten bzw. Bergwerken gewonnenen Lateritproben als auch der bei den Biolaugungsexperimenten anfallenden festen Rückstände, die Durchführung zahlreicher Biolaugungsexperimente mit mehreren Lateritproben unter Variation von Prozessparametern zur Prozessoptimierung und dem Upscaling, die Durchführung zahlreicher Laborversuche zur Rückgewinnung der gelaugten Metalle, das Prozessdesign sowie eine Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung.

Es wurden zahlreiche Biolaugungsexperimente in 2 L Bioreaktoren mit 10 Lateritproben aus Brasilien durchgeführt. Dabei zeigte sich eine hohe Variabilität bei der Extraktion von Kobalt und Nickel für die verschiedenen Proben. Unter optimalen Bedingungen wurden maximal 83 % Co und 83 % Ni extrahiert, was industriellen Anforderungen entspricht. Die erstmals eingesetzte umfassende geochemische und mineralogische Charakterisierung sowohl von Lateritproben als auch von Biolaugungsrückständen in Kombination zahlreicher Versuchsvarianten und begleitender Experimente zur mikrobiellen Mineralauflösung erlaubte zum einen die Aufklärung der bei der reduktiven Biolaugung von Lateriten ablaufenden Prozesse und zum anderen auf Basis dieser neuen Erkenntnisse die Entwicklung einer Systematik zur Aussage welche Laterite sich für eine biohydrometallurgische Aufbereitung eignen. Zudem konnte gezeigt und erklärt werden, dass eine Biolaugung mit acidophilen Bakterien unter aeroben Bedingungen zu höherem Ausbringen von Kobalt und Nickel führt als unter anaeroben Bedingungen wie teilweise in der Literatur von einer britischen Arbeitsgruppe beschrieben wurde. Neben den Experimenten in Bioreaktoren wurde zudem erstmals zur Simulation einer Haldenbiolaugung eine biohydrometallurgische Metallextraktion aus Lateriterzen in Perkolatoren durchgeführt, was eine vorherige Agglomeration der Laterite erforderte.

Die bei den Biolaugungsexperimenten gewonnenen mit Ni und Co und anderen Metallen angereicherten Laugungslösungen wurden einem umfassenden Versuchsprogramm unterzogen, um eine optimale Trennung der in der Lösung befindlichen Metalle zu erzielen zur Gewinnung marktfähiger Produkte. Im Ergebnis erfolgt die aufeinanderfolgende, mehrstufige Ausfällung von Fe, dann Co und Ni, dann Al und Mn durch entweder Erhöhung des pH-Werts oder Zugabe von Sulfid, so dass eine  $MgSO_4$ -Lösung am Ende des Prozesses entsteht. Es wurde ein Verfahrensbild des BioProLat-Prozesses entwickelt (Abbildung 1). Die Vorteile dieses Verfahrens sind: 1. minimaler  $H_2SO_4$ -Einsatz durch Bio-Oxidation von Schwefel; 2. kein  $CaCO_3$ -Einsatz in der Neutralisation; 3. keine  $CO_2$ -Freisetzung während der Neutralisation/Fällung; 4. kein Anfall von Gips-Schlämmen bei der Neutralisation/Fällung.

Die Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung ergab, dass eine Anwendung des BioProLat-Verfahrens zur Laterit-Biolaugung zu einer geringeren Umweltbelastung führen würde als angewandte industrielle Verfahren wie Ferronickel, saure Hochdrucklaugung und Direktnickel. Aus dem Prozessmodell ließen sich Szenarien für Aufbereitungsbetriebe entwickeln. Für einen rentablen Betrieb ist eine Betriebsgröße mit einem Durchsatz von 1.000.000 t/a Lateriterz notwendig.

Insgesamt wurde im Projekt BioProLat ein integrierter, energiesparender und umweltfreundlicher biohydrometallurgischer Prozess zur Gewinnung von Metallen, vor allem Kobalt und Nickel, aus lateritischen Erzen entwickelt, auf Basis umfassender Laborversuche verbunden mit einer Systematik zur Aussage, welche Laterite sich für eine biohydrometallurgische Aufbereitung eignen.



## **II. Eingehende Darstellung zum Projekt BioProLat**

### **1. Projektziel, Notwendigkeit der Zuwendung und Zahlenangaben**

Das BioProLat-Projekt hat ein integriertes energiesparendes, umweltfreundliches biohydrometallurgisches Verfahren zur Gewinnung von Metallen (Co, Ni) aus Lateriten entwickelt. Wirtschaftlichkeit und geringe Umweltbelastung wurden durch die Kombination innovativer Bioleaching- und effizienter Metallrückgewinnungstechniken erreicht. BioProLat kann die Gewinnung von Metallen für bestehende Bergwerke erhöhen, nicht verwertete Erze und Limonitvorräte in wertvolle Ressourcen umwandeln und so neue Rohstoffreserven erschließen.

Zur Erreichung des Projektzieles war die Förderung durch das BMBF erforderlich. Die anspruchsvollen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für innovatives Bioleaching mit effizienter Metallrückgewinnung erforderten ein sehr umfangreiches Versuchsprogramm. Die einzelnen Prozessschritte mussten durch zahlreiche gezielte Laborversuche getestet und optimiert werden. Weiterhin war zur Integration der Prozessschritte auch eine Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung vorzunehmen. Diese umfangreichen Arbeiten konnten nicht mit den begrenzten Eigenmitteln und somit nur mittels BMBF-Förderung erfolgreich durchgeführt werden.

Die während der Projektlaufzeit durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da hiermit die im Projektantrag dargelegten Untersuchungen und Aufgaben hinsichtlich der formulierten Arbeitspakete erfolgreich bearbeitet und belastbare Ergebnisse aus diesen Tätigkeiten gewonnen werden konnten. Die Projektergebnisse konnten in mehreren peer-review Publikationen und mehreren Vorträgen und Postern auf Fachtagungen sowie über CLIENT II Maßnahmen öffentlich gemacht werden (siehe unten).

Für die Bearbeitung des vorliegenden Projektes wurden erhebliche personelle Ressourcen, technisches und analytisches Equipment sowie wissenschaftliches Know-how eingesetzt. Die notwendigen personellen Kapazitäten sowie die erforderlichen Verbrauchs- und Reisemittel konnten nur durch die Forschungszuwendung seitens des BMBF finanziert werden.

### **2. Projektkonsortium und Aufgabenverteilung sowie Ablauf des Projektes**

Das Projektkonsortium umfasste vom BMBF geförderte Verbundpartner in Deutschland sowie Kooperationspartner in Brasilien.

Verbundpartner:

- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover; Koordination
- G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke (Freiberg)

Kooperationspartner in Brasilien:

- SGB - Serviço Geológico do Brasil (vormals CPRM)
- CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro
- BRN - Brazilian Nickel PLC, Piauí

Folgende Arbeitspakete (AP) umfasste das Projekt:

AP0 – Verbundprojektkoordination; AP1 - Charakterisierung des Erzes und des Biolaugungs-Rückstands; AP2 - Bioleaching limonitischer Erze; AP3 - Bioleaching von Saproliten; AP4 - Metallrückgewinnung aus Laugungslösung; AP5 - Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung

Die Federführung und Durchführung der weitaus meisten Arbeiten lag für die Arbeitspakete AP0, AP1, AP2 und AP3 bei der BGR und für AP4 und AP5 bei GEOS. Der Beitrag der Kooperationspartner in Brasilien zu BioProLat lag in der logistischen Unterstützung und Koordination in Brasilien, in der Beschaffung, Vorbehandlung und mineralogischen Analyse von Lateritproben (AP1, Stankovic et al. 2022), in einem Beitrag zur Biolaugung mit heterotrophen Bakterien und Pilzen (AP3, Carpen and Giese, 2022) sowie bei der Einordnung und Bewertung der Projektergebnisse (AP5).

Halbjährlich fanden Projekttreffen mit allen Beteiligten statt im Hybrid-Format, um einem möglichst großen Personenkreis in Deutschland und Brasilien eine Teilnahme zu ermöglichen und gleichzeitig Reisekosten zu minimieren. Es fanden jeweils Besichtigungen der Labore und technischen Anlagen vor Ort, sowie Präsentation der Partner zu den laufenden und geplanten Arbeiten mit Diskussionen statt. Im Einzelnen fanden folgende Projekttreffen statt:

Datum	Ort	Ausrichter	Besichtigung
1. Juni 2021	Hannover	BGR	Labore BGR
7. Oktober 2021	Freiberg	GEOS	Labor und Technikum GEOS
17. Juni 2022	Rio de Janeiro	CETEM	Labor und Technikum CETEM
13. Dezember 2022	Berlin	DERA/BGR	geologische Sammlung der BGR
4. Juli 2023	Freiberg	GEOS	
11. Dezember 2023	Hannover	BGR	
17. Juli 2024	Hannover	BGR	

Ein Höhepunkt war die Dienstreise von BGR- und GEOS-Projektpersonal im Juni 2022 nach Brasilien. Vor dem Projekttreffen in Rio de Janeiro wurde der Lateriterz abbauende und pyrometallurgisch verarbeitende Bergbaubetrieb Barro Alto im Bundesstaat Goiás des Unternehmens Anglo American ganztägig besichtigt (Abb. 1). Dabei wurde das Projekt BioProLat den Geologen und Aufbereitungsingenieuren vorgestellt und intensiv diskutiert. Von Barro Alto stammten auch die wesentlichen Proben für die Bearbeitung des Projektes. Von CETEM wurde hierzu eine Meldung veröffentlicht (<https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/noticias/equipe-do-projeto-bioprolat-realiza-reunioes-visitas-tecnicas-e-workshop>) und dies auch auf der CLIENT II BioProLat-Projektinternetseite dargestellt (<https://bmbf-client.de/neuigkeiten/bioprolat-projekttreffen-fachexkursion-und-workshop-brasilien>).

Über die Projekttreffen hinaus wurde mit Wissenschaftlern aus Großbritannien und des französischen geologischen Dienstes BRGM, die ebenfalls an der Biolaugung von Lateriten arbeiten (EU Framework Programme for Research and Innovation Horizon 2020, CROCoDILE Project, Grant Agreement No 776473), jeweils im Dezember 2021 und 2022 ein eintägiges Fachseminar im Hybrid-Format organisiert. Hierbei bekam das BioProLat-Konsortium wertvolle Hinweise bezüglich der Entwicklung eines Pilotprozesses und der eigenen Versuchsführung bei der Biolaugung. Zum Stand der Wissenschaft und Technik der Laterit-Biolaugung wurde ein Übersichtsbeitrag als Buchkapitel publiziert (Santos und Schippers, 2023).

Die BioProLat-Projektbearbeiter haben sich zudem in ständiger Literatur- und Datenrecherche über die Ergebnisse von Dritten informiert. Für die Durchführung des Vorhabens weitere relevante Ergebnisse durch Arbeiten Dritter wurden nicht festgestellt.



Abb. 1. Mitglieder des BioProLat-Teams von BGR, GEOS und CETEM während des technischen Besuchs des Bergbaubetriebes Barro Alto (Anglo American) im brasilianischen Bundesstaat Goiás.

### 3. Eingehende Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Die umfassenden F&E-Arbeiten zur Charakterisierung des Erzes und des Biolaugungs-Rückstands (AP1), zur Biolaugung (AP2 und AP3) und zur Metallrückgewinnung (AP4) sowie zur Bewertung der Projektergebnisse (AP5) wurden nahezu komplett von BGR und GEOS durchgeführt. Im Einzelnen gab es Beiträge der Kooperationspartner in Brasilien zu den Arbeitspaketen wie oben beschrieben, gemeinsame Tagungsbeiträge und eine gemeinsame deutsch-brasilianische Publikation (Stanković et al., 2022). Insgesamt sind aus dem Projekt „BioProLat“ über 10 Publikationen hervorgegangen (siehe unten).

#### 3.1 Charakterisierung des Erzes

In Brasilien befinden sich die wirtschaftlich wichtigsten und am weitesten fortgeschrittenen lateritischen Nickel-Bergwerke in den Bundesstaaten Goiás, Pará und Piauí. Mehrere Hundert Kilogramm von Lateritproben aus brasilianischen Erzvorkommen wurden von den brasilianischen Partnern SGB (vorherige Bezeichnung CPRM), CETEM und BRN bereitgestellt und nach Deutschland geschickt. Die Proben wurden bei CETEM, in der BGR oder bei GEOS für die Biolaugungsversuche und Analysen gesiebt und homogenisiert, teilweise auch gebrochen. Eine Liste der Proben findet sich in Tabelle 1.

Es fand für die Proben eine gründliche geochemische und mineralogische Charakterisierung mit einer Vielzahl von Methoden in der BGR statt, mit einzelnen Analysen bei GEOS und CETEM. Die Methoden und deren Aussagekraft sind ausführlich in einer gemeinsamen peer-review Publikation dargestellt (Stanković et al., 2022). Die Ergebnisse der physikalischen, geochemischen und mineralogischen Analysen sind für die meisten der Lateritproben in Publikationen dokumentiert (Hetz and Schippers, 2025; Stankovic et al. 2022; 2024).

Tabelle 1. Lateritproben aus Brasilien

Proben-kürzel	Lager-stätte	Probenbeschreibung	Proben-menge	Analysen publiziert
BA01	Barro Alto	Limonite	1,4 kg	nein
BA02	Barro Alto	Garnierite (greenish), saprolite	1,2 kg	nein
BaC	Barro Alto	Barro Alto C (calha) "Schlizprobe" in situ -3,35 mm, limonite	74,2 kg	Stankovic et al. 2022
BaSt	Barro Alto	Barro Alto Stockpile, amostra de estoque teste, limonite (+saprolite)	60,4 kg	Stankovic et al. 2022
1P5	Barro Alto	Barro Alto Mining Area 1, Pit 5, limonite	einige kg	Stankovic et al. 2022
LimSt	Barro Alto	Barro Alto Stockpile $\frac{3}{4}$ , limonite	einige kg	Stankovic et al. 2022
BaSap	Barro Alto	Barro Alto saprolite from production line, rock pieces,	98 kg	Hetz and Schippers, 2025
J1	Jacaré	lateritic crust from a profile at a road, limonite	2,3 kg	nein
J2	Jacaré	from a field close to J1 ca. 30 cm below surface, limonite	1,7 kg	nein
JacC	Jacaré	Jacaré C (calha), redish with plant roots, ca. 1-2 m depth, limonite	75 kg	Hetz and Schippers, 2025
JacF	Jacaré	Jacare F (furo), drilling sample (yellowish), limonite	74,2 kg	Hetz and Schippers, 2025
Piauí I	Piauí	Piaui laterite deposit (BRN), saprolite	230 kg	Stankovic et al. 2024
Piauí II	Piauí	Piaui laterite deposit (BRN), saprolite	360 kg	nein

Neben den Lateriterzproben wurden im weiteren Projektverlauf die festen Biolaugungs-Rückstände analysiert, um die Auflösung von Mineralphasen und die Freisetzung von Metallen in Lösung während des Prozesses zu überprüfen. Diese Daten sind im Zusammenhang mit den Biolaugungsexperimenten in Publikationen dokumentiert (Hetz and Schippers, 2025; Stankovic et al. 2022; 2024).

Die umfassenden Analysen der Lateritproben erlaubten neben der quantitativen chemischen und mineralogischen Analyse auch eine quantitative Aussage, zu welchem Anteil die Wertmetalle Co und Ni an welche Mineralphasen gebunden sind. Die vergleichenden Analysen der festen Rückstände der Biolaugung mit den originalen Lateritproben ermöglichte quantitative Aussagen zur Biolaugbarkeit der einzelnen Lateritproben (Stankovic et al. 2022).

### 3.2 Biolaugung limonitischer Erze

Es wurden zahlreiche Experimente in 2 L Bioreaktoren zur Simulation einer Tank-Biolaugung im Labormaßstab mit acht unterschiedlichen Proben (BaSt, BaC, LimSt und 1P5 aus Barro Alto sowie J1, J2, JacC und JacF aus Jacaré) sowie unterschiedlichen Ansätzen an Konsortien und Reinkulturen mit mesophilen und moderat thermophilen acidophilen Bakterien und Archaeen durchgeführt.

Laugungsversuche im Bioreaktor wurden mit 5 % oder 10 % (w/v) Feststoffgehalt bei 1,5 L bzw. 15 L Arbeitsvolumen und Zugabe von 1 % Schwefel bei konstantem pH 1,5 oder bei nicht eingestelltem pH durchgeführt über einen Zeitraum von 15 – 35 Tagen. Die automatische Einstellung des pH-Wertes erfolgte mittels pH-kontrollierter Zugabe von verdünnter Schwefelsäure bzw. Natronlauge. Die zur Biolaugung eingesetzten Mikroorganismen gehören zu den mesophilen Eisen- und Schwefel-oxidierenden acidophilen Bakterien und Archaeen (Tabelle

2) und wurden vor der Inokulation der Bioreaktoren einzeln herangezogen und erst zur Inokulation zum Konsortium vereint. Die Durchführung der Biolaugung geschah in Anwesenheit oder Abwesenheit von Sauerstoff (aerob bzw. anaerob) mit bzw. ohne Belüftung. Das Ausbringen von Metallen wurde jeweils ermittelt aus den Gehalten in Lösung (während und nach der Durchführung der Biolaugung), bestimmt mittels LA-ICP-MS und in Relation zu den Metallgehalten in der Originalprobe gesetzt. Feste Laugungsrückstände wurden wie die Originalproben analysiert.

Die Versuche wurden so konzipiert, dass die Bakterien zunächst im Bioreaktor wuchsen (Wachstumsphase) bevor das Laterit zugegeben wurde. Ab diesem Zeitpunkt begann die Laugungsphase. Es zeigte sich, dass die Wachstumsphase des Konsortiums im Bioreaktor, wenn von drei auf vier Tagen erhöht, ebenfalls zu höherem Metallausbringen führte. Zudem konnte gezeigt werden, dass ein konstant halten des pH-Wertes bei 1,5 nicht notwendig ist, da die eingesetzten Bakterien nicht nur teils deutlich niedrigere pH-Werte tolerieren, sondern durch die Oxidation des zugesetzten Schwefels das saure Milieu selbst generieren, und so zugleich der Einsatz von Säure und Base reduziert werden kann. Ebenso nicht notwendig ist der Einsatz von Reduktionsmitteln wie Pyrit oder Fe(II), um die Effizienz des Ausbringens zu erhöhen, da dies in den dazu durchgeführten Biolaugungsversuchen keinen positiven Effekt erzielte.

Versuche zur Effizienz von aerober und anaerober Laugung in Bioreaktoren hatten gezeigt, dass die aerobe Laugung deutlich effizienter war. Dies reduziert auch die Prozesskosten. Daher wurden überwiegend Biolaugungsexperimente unter aeroben Bedingungen mit einer Mischkultur verschiedener Stämme Schwefel oxidierender acidophiler Bakterien (*Acidithiobacillus thiooxidans*) als optimale Mikroorganismen durchgeführt.

Zusammenfassend zeigte sich meistens ein höheres Ausbringen von Nickel und Kobalt mittels Biolaugung als bei der chemischen Kontroll-Laugung bei identischen Startbedingungen.

Acidophile Bakterien erzielten ein deutlich höheres Metallausbringen als acidophile Archaeen. Eine Oxidation von Eisen(II) zu Eisen(III) durch acidophile Eisenoxidierer reduziert das Ausbringen von Co und Ni nicht maßgeblich bei der aeroben Biolaugung von Lateriten.

Tabelle 2. Übersicht der zur Biolaugung verwendeten Mikroorganismen. Kultivierung jeweils in saurem Medium (HBS) mit Spurenelementen

Mikroorganismus	pH	Fe <sup>2+</sup> [mM]	Schwefel und Zusätze	Temp. [°C]
<i>At. ferrooxidans</i> 14882 <sup>T</sup>	2,5	10		30
<i>At. ferrooxidans</i> 14882 <sup>T</sup>	2,5	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. ferrooxidans</i> Ram6F	3,0	10		30
<i>At. ferrooxidans</i> CF3	3,0	10		30
<i>At. thiooxidans</i> RAM8	3,0	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. thiooxidans</i> 14887 <sup>T</sup>	3,0	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. thiooxidans</i> 504	3,0	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. thiooxidans</i> 622	3,0	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. thiooxidans</i> 9463	3,0	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. thiooxidans</i> 103717	3,0	0,1	1 % S <sup>0</sup>	30
<i>At. ferridurans</i> ATCC 33020 <sup>T</sup>	1,8	50		30
<i>At. ferriphilus</i> 100412 <sup>T</sup>	2,0	0,1		30
<i>At. caldus</i> 8584 <sup>T</sup>	3,0	10	1 % S <sup>0</sup>	45
<i>Sb. acidophilus</i> 10332 <sup>T</sup>	1,8	10	1 % S <sup>0</sup> , 0,02 % Hefeextrakt	45
<i>Sb. thermosulfidooxidans</i> 9293 <sup>T</sup>	1,8	10	1 % S <sup>0</sup> , 0,02 % Hefeextrakt	45
<i>Sb. benefaciens</i> 19468 <sup>T</sup>	1,8	10	1 % S <sup>0</sup> , 0,02 % Hefeextrakt	37
<i>Sb. thermotolerans</i> 17362 <sup>T</sup>	2,0	10	1 % S <sup>0</sup> , 0,02 % Hefeextrakt	40
<i>Sb. sibiricus</i> 17363 <sup>T</sup>	2,0	10	1 % S <sup>0</sup> , 0,02 % Hefeextrakt	50
<i>Sb. harzensis</i> 109850 <sup>T</sup>	1,8	20- 40	0,02 % Hefeextrakt	45
<i>L. ferrooxidans</i> 2705 <sup>T</sup>	1,8	10	Fe <sup>3+</sup>	30
<i>L. ferriphilum</i> 14647 <sup>T</sup>	1,8	50	Fe <sup>3+</sup>	37
<i>F. acidiphilum</i> 19497 <sup>T</sup>	1,8	10	0,02 % Hefeextrakt	37
<i>Ac. cryptum</i>	3,0		0,02 % Hefeextrakt, 10 mM Glu- kose	37

*At.* – *Acidithiobacillus*; *Sb.* – *Sulfobacillus*; *L.* – *Leptospirillum*; *F.* – *Ferrimicrobium*; *Ac.* – *Acidiphilium*

Die Ergebnisse verschiedener Versuchsserien sind in den jeweils zitierten Publikationen detailliert beschrieben:

- Laugungsversuche in Bioreaktoren mit den Proben BaSt, BaC, LIMSt und 1P5 aus Barro Alto mit Reinkulturen der Typstämme *At. ferrooxidans* 14882<sup>T</sup> (anaerob), *At. thiooxidans* 14887<sup>T</sup> (aerob) und *At. caldus* 8584<sup>T</sup> (aerob) (Stanković et al., 2022)
- Laugungsversuche in Bioreaktoren mit Proben BaSt und BaC aus Barro Alto sowie Proben JacC und JacF der Lagerstätte Jacaré mit verschiedenen Bakterien und Archaeen (Tabelle 2) unter anaeroben und aeroben Bedingungen (Hetz and Schippers, 2025)
- Laugungsversuche in Bioreaktoren zur Relevanz einer Eisen-Re-Oxidation (Hetz and Schippers, 2024b)
- Laterit-Biolaugung mit Wasserstoff (Schippers et al., 2025)

Beispielhaft sind im Folgenden Ergebnisse einer Versuchsserie zu Laugungsversuchen in Bioreaktoren mit Probe BaSt aus Barro Alto mit einem Konsortium aus sechs *Acidithiobacillus thiooxidans* Stämmen (Tabelle 2) unter aeroben Bedingungen dargestellt. Dazu wurde das Konsortium zunächst in Medium (HBS/TE) pH 1,8 mit 1 % S<sup>0</sup> und 3 mM Fe(II) bei 30 °C aerob vier Tage im Bioreaktor angezogen. Anschließend wurden vor Zugabe von 10 % Lateritprobe BaSt 3 mM Fe(II) aufgrund des hohen Chromanteils der Probe gegeben. Als Kontrolle diente ein entsprechender Ansatz ohne Mikroorganismen (Mikroskopie-Vergleich, S<sup>0</sup> hydrophob). Zusätzlich zu Ansätzen mit kontrolliertem, konstantem pH-Wert von 1,5 wurden Ansätze ohne Kontrolle des pH-Wertes gefahren, da aus vorherigen Versuchen hervorging, dass der Verbrauch von Natronlauge so dezimiert werden kann. Zudem wurde angenommen, dass ein niedrigerer pH-Wert als 1,5 zu einem höheren Ausbringen von Ni und Co beiträgt. Der pH-Wert sank aufgrund der mikrobiellen Oxidation des Schwefels zu Schwefelsäure im Versuchsverlauf ab.

Die pH-Werte von Biolaugung und Kontrolle mit kontrolliertem pH-Wert lagen während der Biolaugung bei  $1,49 \pm 0,2$  und  $1,48 \pm 0,1$  (Abb. 2). Die Redoxpotentiale (hier gerechnet gegen Standardwasserstoffelektrode) unterschieden sich deutlich. Das Redoxpotential der Kontrolle stieg während der Laugung von 860 mV auf ein Maximum von 913 mV, während die Biolaugung einen Tiefstwert von 707 mV nach einer Woche erreichte, bevor das Redoxpotential bis zum Ende der Laugung auf 800 mV stieg. In den Biolaugungsversuchen ohne kontrollierten pH-Wert fiel dieser nach Tag 7 von 1,5 bis auf 1,02, während das Redoxpotential auf 700 mV fiel. Der pH-Wert der Kontrolle wurde durch Säurezugabe dem der Biolaugungsversuche ohne kontrollierten pH angepasst, er verlief, wie gewollt, mit leichten Abweichungen zu dem der zugehörigen Biolaugung. Das Redoxpotential stieg derweil auf bis 940 mV am Ende der Laugung an (Abb. 2).

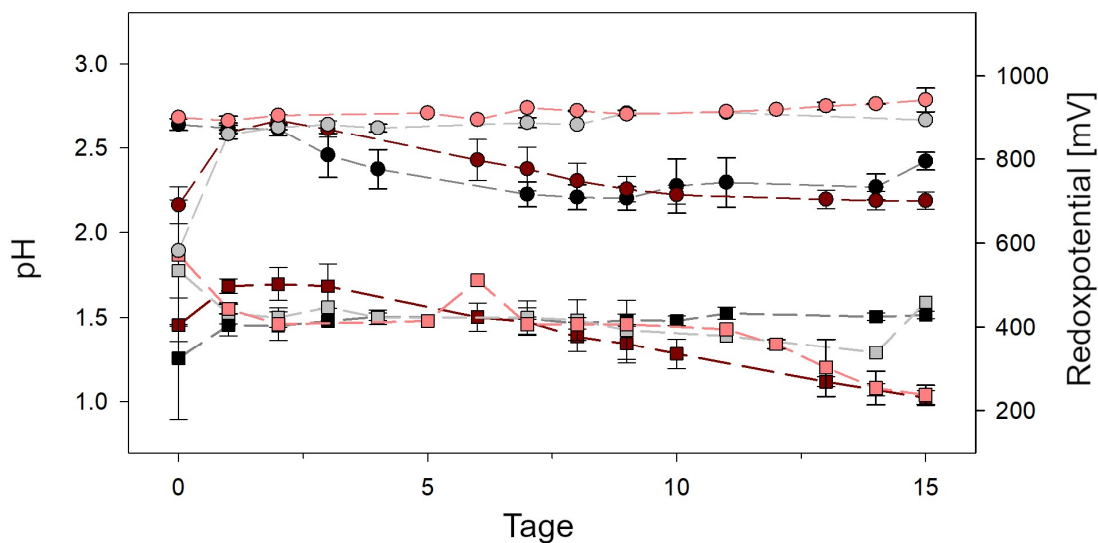


Abb. 2. Zeitlicher Verlauf von pH-Wert (Quadrate)) und Redoxpotential (hier gerechnet gegen Standardwasserstoffelektrode, Kreise) während der aeroben Biolaugung von BaSt mit *A. thiooxidans* ab der Zugabe von Laterit. Kontrolle bei pH 1,5 (n = 2), grau; Biolaugung bei pH 1,5 (n = 2), schwarz; Kontrolle bei artifiziellem pH, entsprechend der Biolaugung ohne pH Kontrolle (n = 2), rosa; Biolaugung ohne kontrollierten pH (n = 4), dunkelrot.

Die Eisenkonzentration stieg über die Versuchsdauer von Biolaugungsversuchen und Kontrollen an, mit der höchsten Eisenkonzentration in Lösung in den Biolaugungsversuchen ohne kontrollierten pH-Wert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der Hauptteil des Gesamteisens lag in allen Ansätzen als Fe(III) vor. Fe(II) erreichte ein Maximum von  $23,6 \pm 14,2$  % vom Gesamteisenanteil in den Biolaugungsversuchen ohne kontrollierten pH, während die Anteile an Fe(II) in den Biolaugungen und Kontrollen bei konstant pH 1,5 bzw. angepasstem pH am Versuchsende bei  $2,0 \pm 0,1$  %,  $1,8 \pm 0,0$  % und  $2,1 \pm 0,0$  % lagen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

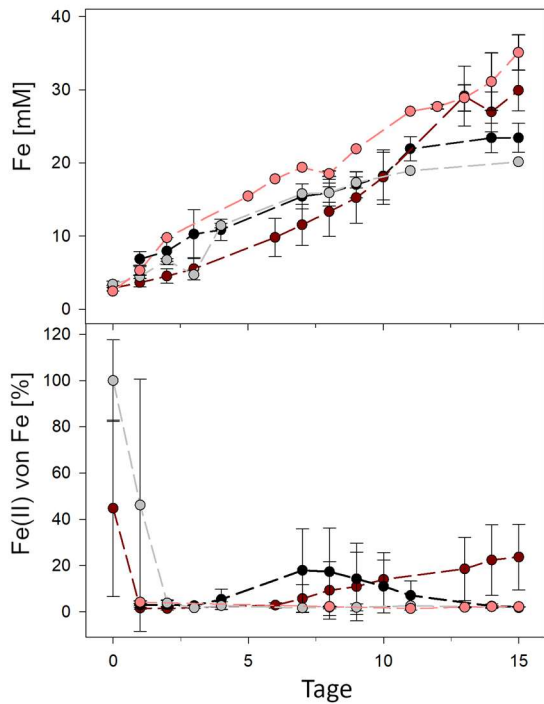


Abb. 3. Zeitlicher Verlauf der Konzentration von Gesamteisen (oben) und Fe(II)-Anteil von Gesamteisen in Prozent (unten) während der Laugungsversuche von BaSt. Kontrolle bei pH 1,5 (n = 2), grau; Biolaugung bei pH 1,5 (n = 2), schwarz; Kontrolle bei artifiziellem pH, entsprechend der Biolaugung ohne pH Kontrolle (n = 2), rosa; Biolaugung ohne kontrollierten pH (n = 4), dunkelrot.

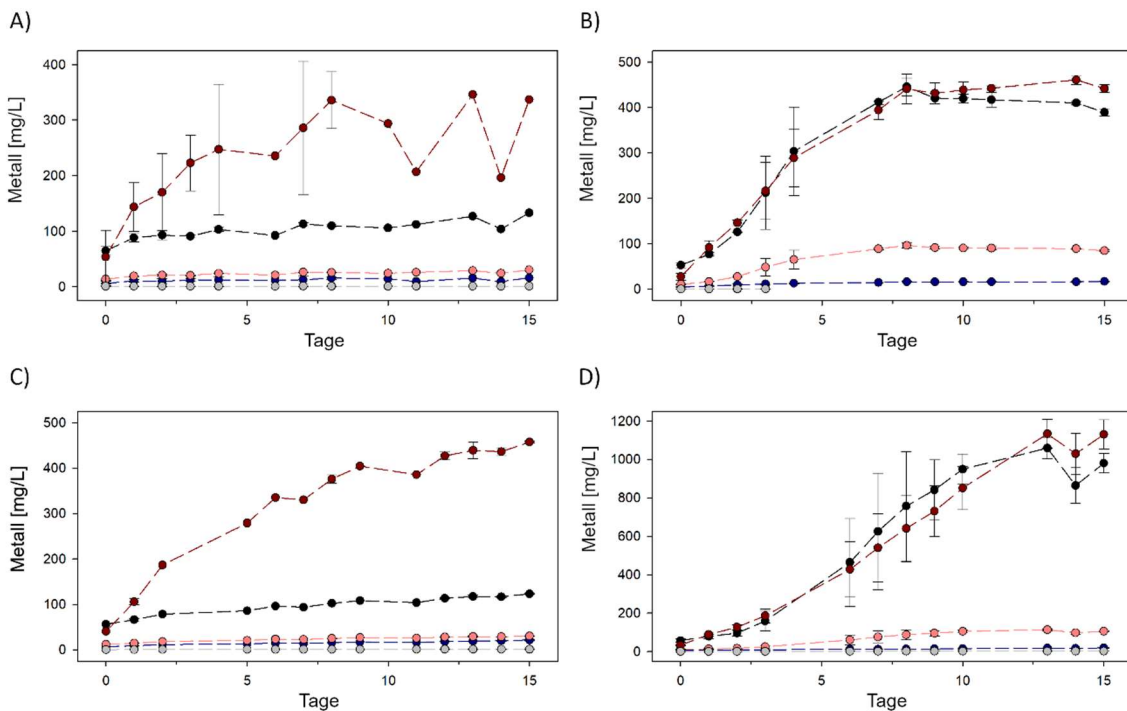


Abb. 4. Menge gelöster Metalle im Lauf der Kontroll- und Biolaugungen von BaSt bei pH 1,5 und ohne kontrollierten pH. A) Kontrolle bei pH 1,5 (n = 2); B) Biolaugung bei pH 1,5 (n = 2); C) Kontrolle bei artifiziellem pH, entsprechend der Biolaugung ohne pH Kontrolle (n = 2); D) Biolaugung ohne kontrollierten pH (n = 4). Co – rosa, Ni – dunkelrot, Cu – grau, Mn – schwarz, Cr – blau.

Die Metallgehalte in Lösung nach 15 Tagen lagen bei 133 mg L<sup>-1</sup> Mn, 1414 mg L<sup>-1</sup> Fe, 30 mg L<sup>-1</sup> Co und 337 mg L<sup>-1</sup> Ni in den Kontrollen, bei 389 ± 8 mg L<sup>-1</sup> Mn, 1616 ± 1 mg L<sup>-1</sup> Fe, 85 ± 2 mg L<sup>-1</sup> Co und 442 ± 9 mg L<sup>-1</sup> Ni in Biolaugungsversuchen bei pH 1,5 und bei 980 ± 51

mg L<sup>-1</sup> Mn, 1614 ± 175 mg L<sup>-1</sup> Fe, 175 ± 4 mg L<sup>-1</sup> Co und 1130 ± 77 mg L<sup>-1</sup> Ni in Biolaugungsversuchen ohne kontrollierten pH und bei 123 ± 1 mg L<sup>-1</sup> Mn, 1706 ± 130 mg L<sup>-1</sup> Fe, 30 ± 0 mg L<sup>-1</sup> Co und 457 ± 2 mg L<sup>-1</sup> Ni bei der zugehörigen Kontrollen (Abb. 4).

Während der Laugung wurden von der Kontrolle 0,6 mmol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pro g Erz verbraucht, wohingegen während der Biolaugung 1,9 ± 0,8 mmol NaOH pro g Erz verbraucht wurden, um den pH-Wert bei 1,5 zu halten. Am Ende der Laugungsversuche (15 Tage) zeigten sich Ausbringen von 66,7 ± 1,3 % und 32,4 ± 0,6 % für Co bzw. Ni mit Biolaugung bei pH 1,5 (Abb. 5). Die Kontrolle kam auf deutlich weniger Ausbringen. Wurde der pH nicht kontrolliert zeigte sich ein Ausbringen von 83,0 ± 3,0 % und 83,0 ± 5,7 % für Co bzw. Ni. Auch die hier zugehörige Kontrolle zeigt erneut deutlich niedrigeres Ausbringen als die Biolaugung.

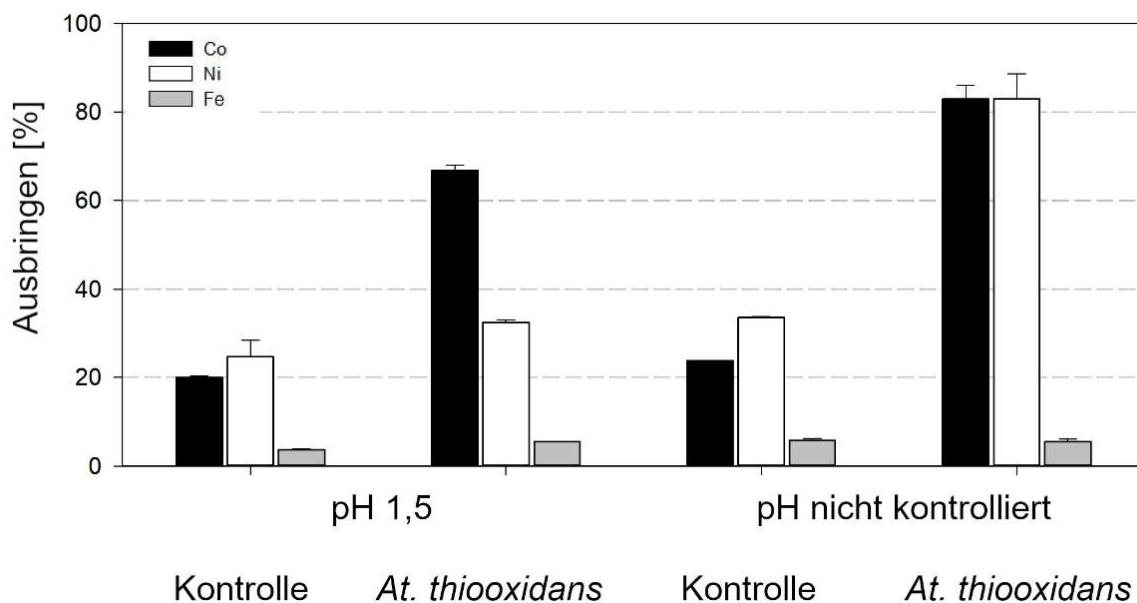


Abb. 5. Ausbringen von Co, Ni und Fe aus Probe BaSt in Biolaugungsversuchen mit *At. thiooxidans* sp. unter aeroben Bedingungen in 2 L-Reaktoren und Kontrolllixivationen ohne Mikroorganismen nach 15 Tagen.

Nachdem die Versuche in 2 L Bioreaktoren gutes Ausbringen von Co und Ni der Proben BaSt und BaC mit einem *At. thiooxidans* zeigten, wurden diese Versuchsansätze nun auf 20 L Bioreaktoren hochskaliert und durchgeführt (Abb. 6).

Die pH-Werte der Biolaugungsversuche mit den Proben BaSt und BaC fielen, nach kurzem Anstieg nach Zugabe von Laterit, während der Versuchsdauer von 35 bzw. 34 Tagen auf 0,8. Die Redoxpotentiale (gegen Ag/AgCl) unterlagen Schwankungen, verhielten sich jedoch ähnlich und lagen am Ende der Versuche bei etwa 620 mV (Abb. 7).

Die Gesamteisenkonzentrationen stiegen während der Versuchsdauer kontinuierlich an, wobei der Gesamteisenwert von BaC höher lag als der von BaSt (121 und 99 mM). Der Anteil von Fe(II) am Gesamteisenwert war bei beiden Biolaugungsversuchen gering und ging gegen Null (Abb. 8).



Abb. 6. Biolaugungsversuche in 20 L Bioreaktoren mit Rührwerk unter Zugabe von Elementarschwefel und Lateritz im Geomikrobiologielabor der BGR (Foto: Coverfoto des Sonderheftes „Special Issue on International Biohydrometallurgy Symposium (IBS) 2022“ der Fachzeitschrift „Research in Microbiology“, Vol. 175, No. 1-2, <https://www.sciencedirect.com/journal/research-in-microbiology/vol/175/issue/1> ).

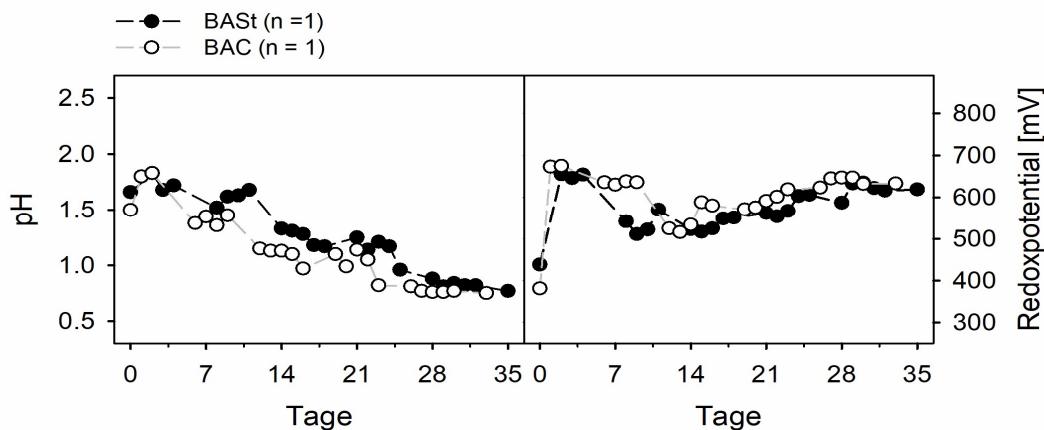


Abb. 7. Zeitlicher Verlauf von pH-Wert und Redoxpotential (gegen Ag/AgCl) während der aeroben Biolaugung von BaSt und BaC in 20 L Bioreaktoren mit *At. thiooxidans* Konsortium ab der Zugabe von Laterit.

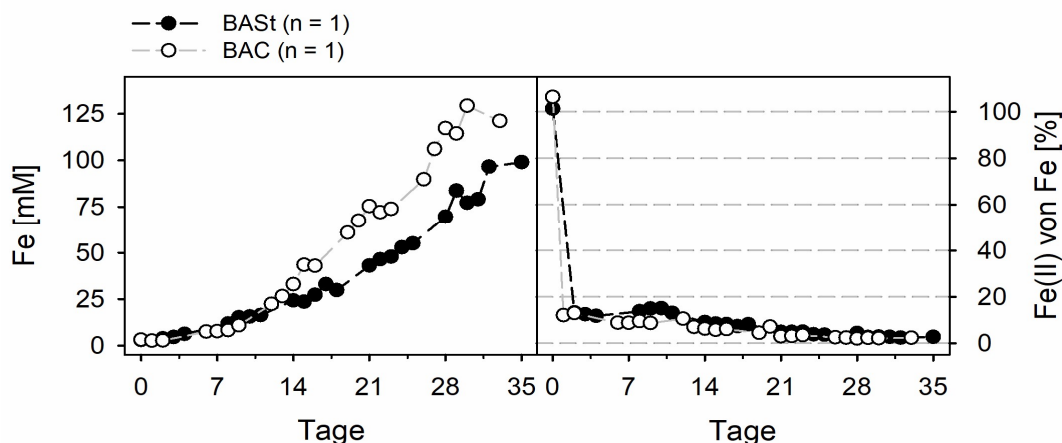


Abb. 8. Zeitlicher Verlauf von Gesamteisen und Fe(II)-Anteil von Gesamteisen in Prozent während der aeroben Biolaugung von BaSt und BaC in 20 L Bioreaktoren mit *At. thiooxidans* Konsortium ab der Zugabe von Laterit.

Das Ausbringen von Co und Ni aus Probe BaSt nach 17 Tagen lag bei 75 bzw. 39 % (Abb. 9). Eine Verlängerung der Biolaugungszeit auf 35 Tage hatte keinen Einfluss auf weiteres Ausbringen von Co, jedoch stieg das Ausbringen von Nickel auf 50 % an. Biolaugung mit Konsortium von Probe BaC zeigte nach 15 Tagen ein Ausbringen von 77 % Co und 17 % Ni (Abb. 9).

Wurde die Biolaugungsdauer auf 33 Tage verlängert stieg sowohl das Ausbringen von Co als auch das von Ni an (84 bzw. 25 %).

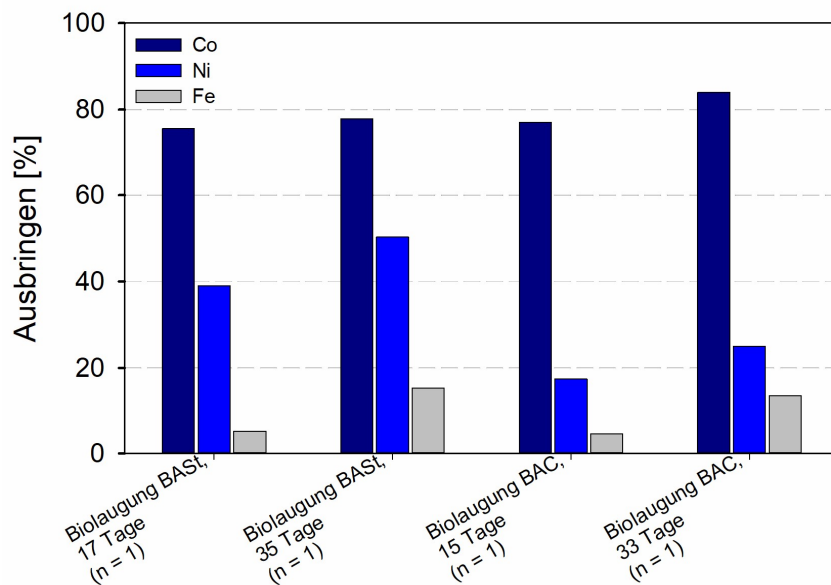


Abb. 9. Ausbringen von Co, Ni und Fe aus Proben BaSt nach 17 bzw. 35 Tagen und BaC nach 15 und 33 Tagen in Biolaugungsversuchen mit Konsortien unter nicht kontrollierten pH-Bedingungen bei 30 °C in 20 L Rührreaktoren.

### 3.3 Bioleaching saprolitischer Erze

Nach ersten Biolaugungsversuchen in Schüttelkolben und Flaschen mit Probe BA02 wurden Experimente in 2 L Bioreaktoren zur Simulation einer Tank-Biolaugung im Labormaßstab mit zwei unterschiedlichen Proben (BaSap und Probe Piauí I) sowie drei unterschiedlichen Ansätzen an Konsortien und Reinkulturen mit mesophilen und moderat thermophilen Mikroorganismen durchgeführt.

Neben den Experimenten in Bioreaktoren (Hetz and Schippers, 2025) wurde erstmals zur Simulation einer Haldenbiolaugung eine biohydrometallurgische Metallextraktion aus Lateriterzen in Perkolatoren mit der Probe Piauí I durchgeführt (Stankovic et al., 2024; Stankovic and Schippers, 2023). Hydrometallurgische und biohydrometallurgische Laugungsverfahren zur Metallextraktion aus Erzen werden in der Regel in gerührten Reaktoren (Bioreaktoren) durchgeführt und optimiert wie auch hier beschrieben. Dieses Verfahren ist recht effizient aber auch kostenintensiv (hoher OPEX und CAPEX). Die Biolaugung in Perkolatoren erforderte eine vorherige Agglomeration der feinkörnigen Reststoffe zu stabilen Agglomeraten zur Befüllung der Perkolatoren, um eine hinreichende Permeabilität zur Zirkulation der Laugungslösung zu ermöglichen (Abb. 10).

Der Prozess basiert auf der Agglomeration des Lateriterzes sowie der Biooxidation des bakteriell modifizierten „nassen Schwefels“ im Inneren der Säulenperkolatoren durch schwefeloxidierende, acidophile Bakterien der Art *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 9463. Der „nasse Schwefel“ wurde zuvor erzeugt in einem Bioreaktor mit der Bakterienkultur, geerntet und mit lateritischem Erz vermischt, bevor Agglomerate gebildet werden, die nachfolgend in die Perkolatoren gefüllt wurden. Die Laugungslösung wurde mit einer Flussrate von 8 mL/min zirkuliert. Die maximale Metallausbeute bestand zu 66 % aus Nickel, zu 95 % aus Kobalt, zu 10 % aus Eisen, zu 55 % aus Magnesium und zu 89 % aus Mangan aus dem lateritischen Erz Piauí I nach einen Monat Biolaugung. Zum Vergleich führte die chemische Laugung mit 1 M Schwef-

felsäure mit oder ohne Zusatz von 10 g/L Eisensulfat-Heptahydrat als Reduktionsmittel zu einer Extraktion von etwa 80 % Nickel, 86 % Kobalt, 33 % Eisen, 50 % Magnesium und 81 % Mangan. Bei der Biolaugung wurde ein höherer Kobaltgehalt, aber ein niedrigerer Nickel- und Eisengehalt erzielt. Es wurde eine bessere Extraktion von Nickel gegenüber Eisen sowie ein relativ höherer pH-Wert erreicht. Bezogen auf eine chemische Neutralisation der metallhaltigen Laugungslösung würde die Biolaugung daher weniger Kalkstein bzw. MgO und folglich eine geringere CO<sub>2</sub>-Emission und weniger Erzeugung von Eisenschlamm bedeuten. Insgesamt sind die Ergebnisse vielversprechend und zeigen das Potenzial einer Laterit-Biolaugung in Perkolatoren zur Simulation einer kostengünstigen Haldenbiolaugung. Eine chemische Haldenlaugung von Lateriterzen wird bereits kommerziell vom Kooperationspartner BRN in Piauí eingesetzt zur Gewinnung von Kobalt und Nickel <https://www.braziliannickel.com/piaui-nickel-project/>. Eine Erweiterung zur Haldenbiolaugung wäre nur ein weiterer Prozessschritt, mit der Aussicht den Verbrauch von Schwefelsäure deutlich zu verringern und somit die Prozesskosten und gleichzeitig die Extraktion von vor allem Kobalt zu verbessern.



Abb. 10. Agglomeration von feinkörnigem Lateriterz (Probe Piauí I) in einer rotierenden Trommel mit Schwefelsäure (links) und Perkolatoren befüllt mit Agglomeraten für Biolaugungsversuche (rechts) im Geomikrobiologielabor der BGR.

Zum Upscaling wurden weitere Biolaugungsversuche in Perkolatoren im Technikum von GEOS in größerem Maßstab als in der BGR durchgeführt. Dazu wurden zunächst in der BGR in 20 L Bioreaktoren in mehreren „batches“ mehrere kg von „nassem Schwefel“ mittels mikrobieller Oxidation von kostengünstigem industriellem Elementarschwefel (gemahlen, Reinheit: min. 99,95 %, Firma Werth-Metall, 99428 Grammetal) durch *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 9463 erzeugt, und dieser zusammen mit über 100 L biogener Schwefelsäure zu GEOS transportiert. Dort erfolgte die Laugung von 30 kg Laterit in einer Laugungssäule von 50 L Volumen (Abb. 11). Die Säule beinhaltete zwei perforierte PVC-Körbe á 18 L. Diese dienen vor allem der leichteren Entnahme des Laugungsgutes nach Ende des Betriebs. Die Agglomerate des Laugungsgutes wurden in diese Körbe gefüllt. Anschließend wurde die Säule aus einem Vorratsgefäß mit biogener Schwefelsäure beaufschlagt. Die Laugungslösung wurde über den Laugungszeitraum im Kreislauf durch die Säule geführt.

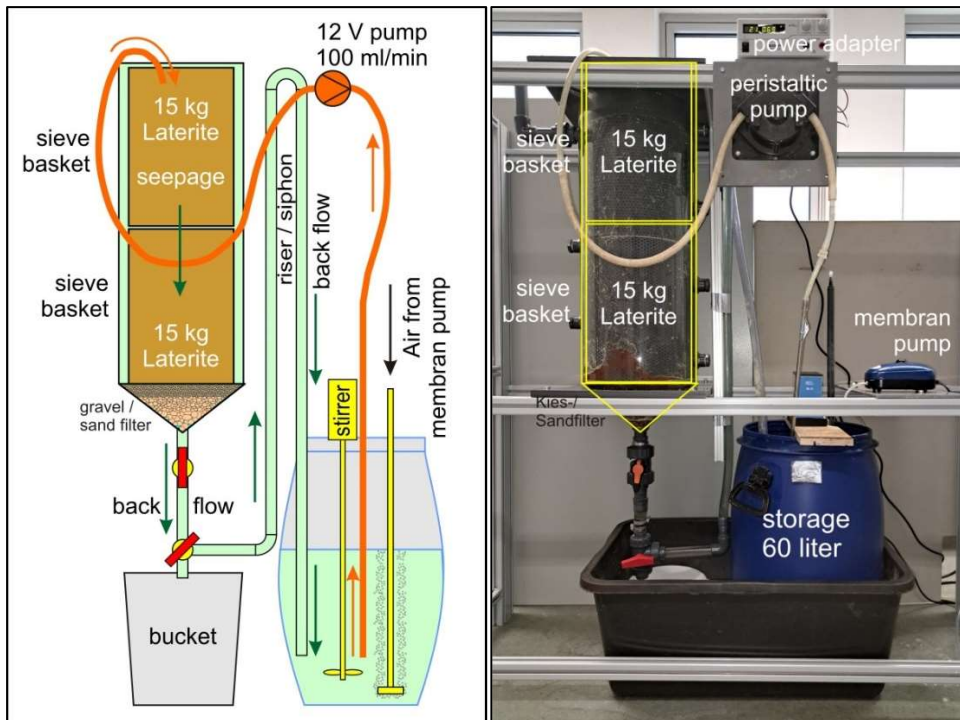


Abb. 11. Versuchsaufbau zum Upscaling der Perkolator-Bielaugung mit agglomeriertem Lateritzerz Plauí I.

### 3.4 Metallrückgewinnung aus Laugungslösung

Von der BGR wurden mehrfach Laugungslösungen aus den vorher beschriebenen Versuchen zur Laterit-Bielaugung für GEOS zur Verfügung gestellt, für Experimente zur Metallrückgewinnung aus den Laugungslösungen. Die Bielaugungslösungen wiesen jeweils hauptsächliche Zusammensetzungen auf aus Fe, Mg, Ni, Co, Mn, Al in schwefelsaurer Lösung. Generelle Herangehensweise zur Gewinnung der Metalle Ni, Co und (Cu) war in einem ersten Schritt die Entfernung von Eisen durch Anheben des pH-Wertes bis pH 3,3. Die Anhebung des pH-Wertes erfolgte durch NaOH, MgO und CaCO<sub>3</sub>. Anschließend wurde einerseits eine Metall-Hydroxidfällung durchgeführt, indem schrittweise der pH-Wert mittels MgO oder NaOH auf pH 9 bis 10 gebracht wurde (Abb. 12). Andererseits erfolgte eine Metallrückgewinnung durch die Fällung von Ni, Co und (Cu) in Form von Sulfiden.



Abb. 12. Fällung von Ni-Co-(Mn)-Phasen aus Bielaugungs-Lösung (Hydroxid-Fällung)

Nach Abtrennung der Sulfide schloss sich eine Entfernung von Aluminium und Mangan an, indem eine weitere pH-Wert-Anpassung auf ca. 8 durchgeführt wurde mit gleichzeitiger Oxidation mittels  $H_2O_2$  und/oder  $NaOCl$ . Hierbei wurde Al in Form von Al-Hydroxiden, das Mn in Form von  $MnO_2$  oder Mn-Hydroxid gefällt. Nach Abtrennung dieser Fällungsprodukte konnte eine sehr reine  $MgSO_4$ -Lösung erzeugt werden, welche über Einengen zu festem  $MgSO_4 \times 5 H_2O$  kristallisiert werden konnte (Abb. 13). Letzteres ist geeignet, in weiteren Prozessen eingesetzt zu werden.

Wesentliches Produkt ist ein gemischtes (Ni, Co, Cu)-Sulfid (mixed sulfide precipitate, MSP). Die genaue Zusammensetzung hängt vom eingesetzten Laterit ab und lässt sich aus dem Ni-Co-Cu-Verhältnis abschätzen. Industriell wird meist auf ein gemischtes (Ni, Co)-Hydroxid (mixed hydroxide precipitate, MHP) hingearbeitet. Dieses ist ein konventionelles Handelsprodukt. Der Preis liegt gewöhnlich 5-10% unterhalb des LME-Preises des enthaltenen Nickels.



Abb. 13. Hydrometallurgisch erhaltene Produkte der Metallrückgewinnung aus den Laugungs-lösungen der Laterit-Bielaugung

Anhand aller Versuchsergebnisse wurde ein Fließschema des BioProLat-Gesamtverfahrens erstellt. Dieses arbeitet mit Biolaugung, mehrstufigen Fällungsprozessen und Sulfidfällung für die Wert-Komponenten (Abb. 14). Die Vorteile dieses Verfahrens sind: 1. minimaler  $H_2SO_4$ -Einsatz durch Bio-Oxidation von Schwefel; 2. kein  $CaCO_3$ -Einsatz in der Neutralisation; 3. keine  $CO_2$ -Freisetzung während der Neutralisation/Fällung; 4. kein Anfall von Gips-Schläm-men bei der Neutralisation/Fällung. Die hydrometallurgische Verarbeitung der Biolaugungs-lösungen führt zu mehreren Zwischenprodukten, welche weiter verwendet werden können, 5.

Fe-Phasen als Sorptionsmittel bzw. Grundstoff zur Herstellung von nanoMagnetit, 6. ein Ni-Cu-Co-Konzentrat als hauptsächlichen Wertstoff, 7. Mn-Al-Phasen, welche mit 30-40% Mn-Gehalt als Mn-Rohstoff verwendet werden kann und reinem  $\text{MgSO}_4$ -Sulfat, dass in industriellen Prozessen wieder eingesetzt werden kann (Abb. 13).

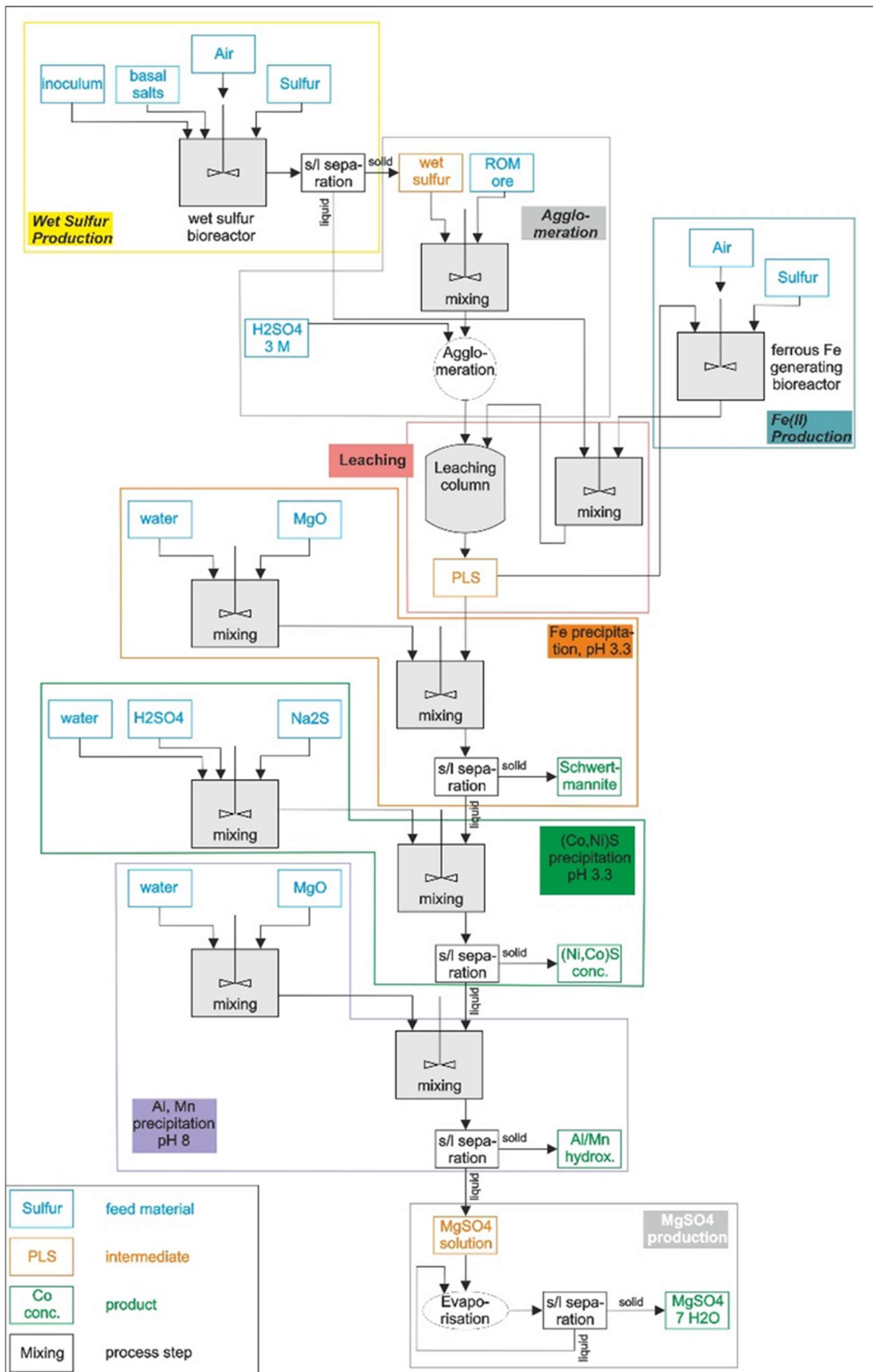


Abb. 14. Verfahrensfließbild des BioProLat-Prozesses unter Einsatz von mehrstufigen Fällungsprozessen.

### 3.5 Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung

Aus dem Verfahrensfließbild (Abb. 14) konnten Aussagen zu den Kosten getroffen werden. Als erster Schritt wurde eine Strukturierung des BioProLat-Prozesses vorgenommen und anhand der eingesetzten Materialmengen und Chemikalien und der Verweilzeiten die entsprechenden Volumina abgeschätzt sowie Aggregatgrößen und -anzahl abgeleitet. Investitionskosten wurden berechnet, wobei die Kosten der Hauptausrüstungen der Literatur entnommen wurden.

Zudem wurde ein Life Cycle Assessment durchgeführt. Die Software Umberto 11 wurde als Hauptinstrument für die Kostenbetrachtung und die Ökobilanz des Verfahrens verwendet. Die Ökobilanz ist ein Instrument zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen eines Prozesses, einer Dienstleistung oder eines Produkts, das sie in eine Mittel- und eine Endpunktkategorie einteilt, um die Umweltauswirkungen auf verständliche Weise zu quantifizieren. Die Ökobilanz in dieser Studie hat den Energieverbrauch (durch die Erstellung eines Flussdiagramms der Prozesse und der Massenbilanz), die Treibhausgasemissionen und die Belastung durch feste Abfälle des Biolaugungsprozesses analysiert, wodurch ein Vergleich zwischen der Biotechnologie in dieser Studie und angewandten hydro- und pyrometallurgischen Methoden ermöglicht wurde.

Die Wirtschafts-, Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung ergab, dass eine Anwendung des BioProLat-Verfahrens zur Laterit-Biolaugung zu einer geringeren Umweltbelastung führen würde als angewandte industrielle Verfahren wie Ferronickel, saure Hochdrucklaugung und Direktnickel. Aus dem Prozessmodell ließen sich Szenarien für Aufbereitungsbetriebe entwickeln. Für einen rentablen Betrieb ist eine Betriebsgröße mit einem Durchsatz von 1.000.000 t/a Lateriterz notwendig.

Insgesamt wurde im Projekt BioProLat ein integrierter, energiesparender und umweltfreundlicher biohydrometallurgischer Prozess zur Gewinnung von Metallen, vor allem Kobalt und Nickel, aus lateritischen Erzen entwickelt, auf Basis umfassender Laborversuche verbunden mit einer Systematik zur Aussage, welche Laterite sich für eine biohydrometallurgische Aufbereitung eignen.

## 4. Veröffentlichungen der Projektergebnisse

### 4.1 Publikationen

- Carpen, H.L., Giese, E.C. 2022. Enhancement of nickel laterite ore bioleaching by *Burkholderia* sp. using a factorial design. *Applied Water Science* 12, 181.
- Hetz, S., Schippers, A. 2024. Do ferrous iron-oxidizing acidophiles (*Leptospirillum* spp.) disturb aerobic, reductive bioleaching of laterite ores by sulfur-oxidizing acidophiles (*Acidithiobacillus* spp.)? *Front. Microbiol.* 15, 1359019.
- Hetz, S., Schippers, A. 2025. Bioleaching of different Brazilian laterite ores in stirred-tank reactors. *J. Sust. Metall.*, in preparation.
- Marbler, H., Drobe, M., Schippers, A. 2022a. Mining residues, reprocessing and related projects at BGR. *Mining Report Glückauf* 2022, 34-39.
- Marbler, H., Drobe, M., Schippers, A. 2022b. Bergbauhalden, deren Wiederaufbereitung und Projekte der BGR. *Bergbau, Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie, Umwelt; offizielles Organ des RDB e.V., Ring Deutscher Bergingenieure* 4/2022, 174-178.
- Moro, K., Haubrich, F., Martin, M., Grimmer, M., Hoth, N., Schippers, A. 2023. Reductive leaching behaviour of manganese and cobalt phases in laterite and manganese ores. *Hydrometallurgy* 220, 106101.
- Santos, A. Schippers, A. 2023. Reductive mineral bioprocessing, Chapter 15. In: *Biomining Technologies: Extracting and Recovering Metals from Ores and Wastes*, D.B. Johnson,

- C.G. Bryan, M. Schlömann, F.F. Roberto (eds.), Springer, 261-274. ISBN-13, 978-3031053818.
- Schippers, A., Hetz, S., Ostertag-Henning, 2025. Laterite ore processing with hydrogen via mild chemical pressure leaching or bioleaching. Hydrometallurgy, in review.
- Stanković, S., Schippers, A. 2024. Goethite dissolution by acidophilic bacteria. *Front. Microbiol.* 15, 1360018.
- Stanković, S., Goldmann, S., Kraemer, D., Ufer, K., and Schippers, A. 2024. Bioleaching of a lateritic ore (Piauí, Brazil) in percolators. *Hydrometallurgy* 224, 106262.
- Stanković, S., Schippers, A., 2023. Bioleaching and chemical leaching of lateritic ore in small percolators. *Metall. Mat. Data* 1, 45-49.
- Stanković, S., Hetz, S., Schippers, A. 2023. Perspectives of laterite biohydrometallurgy. Proceedings of the 5th Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe 2023 – Trebinje, Bosnia and Herzegovina.
- Stanković, S., Martin, M., Goldmann, S., Gäbler, H.E., Ufer, K., Haubrich, F., Moutinho, V. F., Giese, E.C., Neumann, R., Stropper J.L., Stummeyer, J., Kaufhold, S., Dohrmann, R., Oxley, A., Marbler, H., Schippers, A. 2022. Effect of mineralogy on Co and Ni extraction from Brazilian limonitic laterites via bioleaching and chemical leaching. *Minerals Engineering* 184, 107604.

## 4.2 Vorträge

- EMC 2025, European Metallurgical Conference, June 22-25, Hamburg, Germany. A biohydrometallurgical process for cobalt and nickel recovery from laterites. Axel Schippers, Stefanie A. Hetz, Srdjan Stankovic, Frank Haubrich, Mirko Martin (Abstract accepted).
- XVI International Mineral Processing and Recycling Conference, Belgrade, Serbia 28.-30.05.2025. Cobalt and nickel recovery from laterites via bioleaching. Srdjan Stankovic, Stefanie A. Hetz, Mirko Martin, Frank Haubrich, Axel Schippers (Abstract accepted).
- IBS 2024 – The 25th International Biohydrometallurgy Symposium within the 63rd Conference of Metallurgists (COM 2024), Halifax, Nova Scotia, Canada, 19.-22. 08.2024. Biohydrometallurgy for Cobalt and Nickel recovery from laterites: project BioProLat (keynote presentation). Stefanie A. Hetz, Srdjan Stankovic, Mirko Martin, Frank Haubrich, Simon Goldmann, Herwig Marbler, Reiner Neumann, José Luciano Stropper, Axel Schippers.
- GEO SaXonia, DGGV Annual Meeting 2024, Dresden, 23.-26.09.2024. Biohydrometallurgy for Cobalt and Nickel recovery from laterites: project BioProLat. Stefanie A. Hetz, Srdjan Stankovic, Mirko Martin, Frank Haubrich, Simon Goldmann, Herwig Marbler, Reiner Neumann, José Luciano Stropper, Axel Schippers.
- EGU General Assembly, Vienna, Austria, 14.-19.04.2024. Stirred-tank reactor bioleaching of nickel and cobalt from Brazilian laterite ores. Stefanie A. Hetz, Axel Schippers.
- Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM) - Jahrestagung 2024, 7. Gemeinsame VAAM-DGHM, Würzburg, 02.-05.06.2024. Bioleaching of nickel and cobalt from laterite ores in Brazil: A reactor-based approach. Stefanie A. Hetz, Axel Schippers.
- Biomining´23, Falmouth, Cornwall, UK, 05.-06.06.2023. Options for stirred-tank reactor and column bioleaching of nickel and cobalt from Brazilian laterite ores. Stefanie A. Hetz, Srdjan Stanković, Axel Schippers.
- Biomining´23, Falmouth, Cornwall, UK, 05.-06.06.2023. Biohydrometallurgy offers various process options for met-al recovery from primary and secondary resources (keynote presentation), Axel Schippers.
- MME SEE, 5th Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe, Trebinje, Bosnia and Herzegovina, 07.-10.06.2023. Perspectives of laterite biohydrometallurgy. Srdjan Stanković, Stefanie A. Hetz, Axel Schippers.
- Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Abfallbehandlung und Wertstoffrück-gewinnung, Energieverfahrenstechnik, Gasreinigung, Hochtemperaturtechnik, Rohstoffe (DECHEMA), Welcome Kongresshotel Bamberg, 30.03.- 01.04.2022. Reduktive Biolaugung von Lateriterzen zur Kobalt- und Nickelgewinnung. Axel Schippers, Srdjan Stankovic, Stefanie Hetz, Simon Goldmann, Herwig Marbler, Frank Haubrich, Mirko Martin.
16. DMT-Mining Forum, Berlin, 19.-20.05.2022. Cobalt and nickel production from Brazilian Ni-Laterites using bio-processing. Herwig Marbler, Srdjan Stankovic, Axel Schippers.

GeoMinKöln, 11.-15.09.2022. Mineralogy determines Co and Ni extraction from laterites via bioleaching and chemical leaching. Srdjan Stanković, Stefanie Hetz, Simon Goldmann, Hans-Eike Gäbler, Kristian Ufer, Mirko Martin, Frank Haubrich, Herwig Marbler, Axel Schippers.

International Biohydrometallurgy Symposium (IBS), Perth, Australien, 20-23.11.2022. Aerobic and anaerobic bioleaching of limonitic laterites from Barro Alto mine (Brazil). S. Stanković, M. Martin, S. Goldmann, H.E. Gäbler, K. Ufer, F. Haubrich, V. F. Moutinho, E.C. Giese, R. Neumann, J.L. Stropper, J. Stummeyer, S. Kaufhold, R. Dohrmann, A. Oxley, H. Marbler, A. Schippers.

#### **4.3 Poster**

XI Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral (SIMEXMIN), 19.05. – 22.05.2024, Ouro Preto, Brasilien. The global Co-market and exploiting new Co sources with the development of environmentally sustainable biohydrometallurgical methods. José Luciano Stropper, Herwig Marbler, Stefanie A. Hetz, Axel Schippers, Srdjan Stankovic, Mirko Martin, Frank Haubrich, Reiner Neumann, Simon Goldmann.

FEMS 10th Congress of European Microbiologists, Hamburg 9 – 13 July 2023. Stirred-tank reactor bioleaching options for the recovery of nickel and cobalt of Brazilian laterite ores. Stefanie A. Hetz, Axel Schippers.

Jahrestagung Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM), Göttingen, 10 – 13 September 2023. Stirred-tank reactor bioleaching of nickel and cobalt from Brazilian laterite ores. Stefanie A. Hetz, Axel Schippers.

GeoBerlin 2023 - Geosciences Beyond Boundaries - Research, Society, Future, Berlin 3 – 8 September 2023. Biohydrometallurgy for cobalt and nickel recovery from laterites: project BioProLat. Stefanie A. Hetz, Srdjan Stankovic, Mirko Martin, Frank Haubrich, Simon Goldmann, Herwig Marbler, Reiner Neumann, José Luciano Stropper, Axel Schippers.

Jahrestagung Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM), Düsseldorf, 20.-23.02.2022. Laterite bioleaching for the recovery of nickel and cobalt in Brazil. Stefanie Hetz, Srdjan Stankovic, Axel Schippers.

International Biohydrometallurgy Symposium (IBS), Perth, Australien, 20-23.11.2022. Options for stirred-tank reactor bioleaching of nickel and cobalt from Brazilian laterite ores. Stefanie Hetz, Srdjan Stankovic, Axel Schippers.

X Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral (SIMEXMIN), Ouro Preto, Brasilien, 27. – 30.11.2022. Cobalt Market aspects and bioprocessing as a possible economic and eco-friendly technology for cobalt production from Brazilian nickel laterites. Herwig Marbler, José-Luciano Stropper, Srdjan Stankovic, Axel Schippers, Reiner Neumann.