

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 1 – Kurzbericht (max. 2 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: REMINTA- Recycling mineralischer Fraktionen aus Tailings am Beispiel des Bergeteichs am Bollrich in Goslar	
Zuwendungsempfänger: TU Clausthal Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD) Institute of Geo-Engineering (IGE) CUTEC Forschungszentrum (CUTEC) Walther-Nernst-Str. 9 38678 Clausthal-Zellerfeld	Förderkennzeichen 033R266A
Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	Laufzeit 01.02.2021 – 31.07.2024

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes hatte das **IFAD** hauptverantwortlich folgende Aufgaben:

Im AP1 wurde neben der Bereitstellung des Materials durch Flotation des Bergematerials insbesondere Flotations- und Laugeverfahren entwickelt, die es ermöglichen das Bergematerial in einsatzfähige Fraktionen zu überführen. Im AP5 wurde die Konzeptionierung und Erstellung des Leitfadens durchgeführt. Im AP6 wurde die chemische Analytik für Flotation und Laugung dargestellt. Im AP7 wurde im Rahmen der Projektkoordination die projektinternen Treffen, Materialaustausch, Vertretung auf Veranstaltungen und Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes hatte das **IGE** hauptverantwortlich folgende Aufgaben:

Im AP2 wurden Zielparameter der zu erzeugenden Fraktionen für verschiedene Einsatzzwecke identifiziert und diese mit den in AP1 erzeugten Ergebnissen abgeglichen. Im AP3 wurden geotechnische Rahmenbedingungen für Standsicherheit beim Rückbau. Im AP6 wurden die physikalischen Eigenschaften des Bergematerials sowie die der erzeugten Fraktionen aus AP1 analysiert.

Im Rahmen des Projektes hatte das **CUTEC** hauptverantwortlich folgende Aufgaben:

Im AP2 soll eine technisch-wirtschaftliche Gesamtkonzeption zum Materialabsatz entwickelt werden. Im AP3 stand die Ermittlung der rechtlichen Rahmenbedingungen für eine Umsetzung des Vorhabens sowie der Umgang mit verbleibenden Reststoffen sowie eine technisch-wirtschaftlich-rechtliche Gesamtkonzeptionierung im Vordergrund. Im AP4 werden eine ökologische Bewertung sowie die Rückkopplung des Prozesses im Hinblick auf ein Betriebs- und Verwertungskonzept betrachtet.

Alle beteiligten Institute haben zudem in nahezu allen anderen AP Arbeitsbeteiligungen gehabt sowie Informationen und Arbeitsbeiträge geliefert.

Im AP4 wurde die ökologische Bewertung des entwickelten Aufbereitungsprozesses (AP1) insbes. aus ökologischer Sicht betrachtet. Im AP5 wurden umfassende Daten für die ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen gesammelt.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war zwischenzeitlich durch die Covid-Pandemie geprägt. Aufgrund von Zugangsbeschränkungen in den Instituten und damit einhergehenden beschränkten Laborkapazitäten für die Versuchsdurchführungen sowie der Analytik bestanden im Jahr 2021 unverschuldete Verzögerungen, welche sich aber bis zum Projektende inklusive der kostenneutralen Verlängerung aufholen ließen. Hinzu kamen zusätzliche Mengenanforderungen an aufbereitetem Bergematerial für zusätzliche Großversuche, insbesondere unter Berücksichtigung der neu gewonnenen Erkenntnisse, die zu einem erhöhten Arbeitsaufwand führten.

Trotz der oben genannten Widrigkeiten wurden die gesetzten Ziele erreicht.

3. Wesentliche Ergebnisse

Die Labor- und Upscale-Versuche der Flotation zeigten, dass es möglich ist, hochwertig verwertbare Fraktionen zu erzielen, wobei das Hauptaugenmerk auf der Gewinnung eines einsetzfähigen Mineralikkonzentrates lag.

Als Ergebnis der Flotation konnte sowohl in den Laborversuchen, als auch in den Großversuchen (Probemenge jeweils 120 kg) gezeigt werden, dass eine gute Auftrennung in drei Fraktionen möglich ist, die jeweils einzeln einer Verwertung zugeführt werden können. Ca. 40% der Ausgangsmasse wird als Mineralik-Konzentrat gewonnen. Durch die Abfolge von Sulfid-Flotation, Baryt-Flotation – jeweils mit Rougher und Scavenger-Stufe- konnten mehr als 70% der Mineralik im entsprechenden Konzentrat ausgebracht werden. Dieses ist als Vorkonzentrat für die finale Abreinigung in einer nachgeschalteten Laugung geeignet. In vollständig geschlossenen Kreisläufen sollten am Ende bis zu 50 % der Ausgangsmasse in ein verwertbares Mineralikkonzentrat überführt werden können.

Die vor allem als Sulfide gebundenen restlichen Schwermetalle können in einer nachfolgenden schwefelsauren Laugung, sowie einer Laugung mit organischen Säuren reduziert werden. Hierbei können die Grenzwerte für den Einsatz der Mineralik-Fraktion in der Zement- und Grobkeramik-Produktion eingehalten werden.

Das Bergeteichmaterial wurde erstmalig praktisch vollständig auf seine geotechnischen Eigenschaften hin untersucht um die notwendigen Informationen für den zu entwerfenden Abbauplan zu generieren. Ebenso wurden die bei der Flotation erzeugten Fraktionen auch bezüglich ihrer physikalischen Charakteristika im Hinblick auf ihr Eignung für verschiedene Einsatzmöglichkeiten untersucht.

Hierbei konnten verschiedene Absteuerungswege und Einsatzbereiche auf Grundlage der chemischen und der Phasen-Zusammensetzung sowie der physikalischen Eigenschaften identifiziert werden. Insbesondere der Einsatz in Grobkeramik (Klinker) und Zement bieten vielversprechende Möglichkeiten.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Umsetzung eines Rückbaus der Bergeteiche am Bollrich wurden untersucht und in einem Rechtskataster dokumentiert. Es wurde eine grundsätzliche Kostenplanung für die Gewinnung der Schlämme aus Bergeteichen unter Berücksichtigung von Aspekten der Standsicherheit sowie möglicher Kontaminationen der Umgebung durchgeführt. Eine Nutzung des freigeräumten Raums als Rückhaltebecken für Grubenwässer konnte ebenfalls beschrieben werden.

Die Ergebnisse der entsprechenden Ökobilanzierung zeigen, dass die Behandlung von Tailings zwar mit Umweltbelastungen verbunden ist, dass aber auch das ökologische Potenzial in Bezug auf die Verwertung der Mineralik-Fraktion und die wirtschaftsstrategischen Rohstoffe, die in den Teichen enthalten sind, enorm ist. Durch die Identifizierung von wesentlichen Stell-schrauben mit großen negativen und positiven Potentialen und die Bewertung der Umweltauswirkungen können gezielte Maßnahmen zur Optimierung der Prozesse hinsichtlich der Minimierung des ökologischen Fußabdruckes ergriffen werden.

Um die gewonnenen Erkenntnisse auch außerhalb des Projektes zu kommunizieren ist ein Leitfaden konzipiert und erstellt worden. Da ein auf das Projekt REMINTA aufbauendes Folgeprojekt in Planung ist, in welchem unter anderem auch Fragen der Logistik geklärt und Upscaling-Untersuchungen durchgeführt werden sollen, die zur Vervollständigung des Leitfadens dienen werden, wird im Rahmen des Projektes REMINTA zunächst ein vorläufiger Leitfaden erstellt, der durch die zusätzlich erwarteten künftigen Erkenntnisse fortgeschrieben und vervollständigt wird.

Insgesamt lässt sich sagen, dass durch das Projekt der weltweit erstmalige Rückbau eines komplexen Alt-Bergeteiches mit vielfältigen Herausforderungen deutlich näher gerückt ist. Hierdurch würde zum einen die lokale Umweltgefährdung, sowie ein Gefährdungspotential durch das Geobauwerk selbst beseitigt werden. Zudem könnten wirtschaftsstrategische Rohstoffe sowie Mineralik-Sekundärrohstoffe für den Baubereich und Schwefelsäure dem heimischen Markt zur Verfügung gestellt werden.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2 – Eingehende Darstellung (max. 20 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: REMINTA- Recycling mineralischer Fraktionen aus Tailings am Beispiel des Bergeteichs am Bollrich in Goslar	
Zuwendungsempfänger: Zuwendungsempfänger: TU Clausthal Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD) Institute of Geo-Engineering (IGE) CUTEC Forschungszentrum Walther-Nernst-Str. 9 38678 Clausthal-Zellerfeld	Förderkennzeichen 033R266A
Projektleiter*in Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	Laufzeit 01.02.2021 – 31.07.2024

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Die Wiederaufnahme von feinkörnigen, in Bergeteichen abgelagerten Rückständen aus der Aufbereitung komplexer Erze stellt weltweit eine große Herausforderung dar. Rohstoffrückgewinnung, Entlastung von Umweltgefährdungspotentialen und Gefahrenabwehr etwa durch potentielle Dammbürche sind Herausforderungen der nächsten Jahrzehnte. Der Bergeteich am Bollrich, der die Abgänge der Aufbereitung des Erzbergwerks Rammelsberg birgt, ist ein prototypisches Beispiel, welches zudem alle denkbaren Herausforderungsebenen aufweist. Zur Lösung entsprechender Probleme sind einzelne, kurzlaufende Forschungsprojekte allein nicht in der Lage, wohl aber aufeinander aufbauende Projekte, die einzelne Segmente Schritt für Schritt abarbeiten. Das Projekt REMINTA setzt auf den Vorarbeiten des ebenfalls vom BMBF geförderten vorlaufenden Projektes REWITA (FKZ 033R136) auf und hatte das Ziel, neben den wirtschaftsstrategischen Metallen sowie dem Industriemineral Baryt nun auch die verbleibende Mineralik so aufzubereiten, dass diese einer Verwertung zugeführt werden kann. Neben technischen waren auch ökonomische und ökologische Rahmenbedingungen zu klären. Gleichzeitig war im Hinblick auf eine spätere industrielle Umsetzung bereits der Schritt zur Einbindung der Zivilgesellschaft zur erforderlichen „social license to operate“ und die Berücksichtigung von weiteren Aspekten im Rahmen eines solchen Unterfangens Inhalt des Arbeitsprogramms. Die im Rahmen des Projektes REMINTA angestrebten Ziele konnten vollumfänglich erreicht werden. Bedingt durch die Corona-Pandemie kam es bei der Durchführung des Projektes zu Verzögerungen, die aber im Rahmen der gewährten kostenneutralen Verlängerung aufgeholt werden konnten.

Ziel des vorliegenden Abschlussberichts ist es, die Ergebnisse der Arbeiten der beteiligten Institute der TU Clausthal zu den einzelnen Arbeitspakete zusammenzufassen, zu analysieren und eine Gesamtbewertung vorzunehmen.

AP 1 ENTWICKLUNG EINES GEEIGNETEN AUFBEREITUNGSVERFAHRENS

Gegenstand des Arbeitspaketes 1, das den zentralen technischen Kern des Projektes bildet, war die Entwicklung eines Verfahrens, welches es ermöglicht die mineralischen Anteile des Bergematerials, die aus feingemahlenem Nebengestein sowie der silikatisch-karbonatischen Gangart des Erzes selbst bestehen, in verwertungsfähige Konzentrate zu überführen, die zur Baustoffproduktion genutzt werden können.

Ein mehrstufiger Prozess wurde entwickelt, welcher aus Gewinnung der Metallträger mittels Sulfid-Flotation, einer sich anschließenden Flotation des Industrieminerals Baryt (jeweils mit Rougher- und Scavenger-Stufen), biologischer Laugung und chemischer Laugung besteht. Im Projekt wurden neben Laborversuchen auch Großversuche (jeweils mit ca. 120 kg Ausgangsmaterial) durchgeführt, die erste Hinweise für ein Upscaling bieten sollen. Als Versuchsmaterial wurden die im Vorgängerprojekt aus dem Bergeteich gewonnenen Materialien verwendet. Durch entsprechende Lagerung konnten so auch Veränderungen des Materials in Folge von Luft-Exposition mit untersucht werden, was für eine großindustrielle Umsetzung wichtige Zusatzinformationen liefert.

Flotation

Bei der Sulfid-Flotation (Rougher Stufe) zeigte sich, das unter Einsatz gleicher Reagenzienregime wie im Vorgängerprojekt REWITA, bei welchem frisch gefördert Material verarbeitet wurde, hier geringere Ausbringen erreicht wurden, die auf eine Alterung/Oxidation der Sulfidminerale zurückgeführt werden können. Durch eine Adaption des Reagenzienregimes insbesondere in der Scavengerstufe (insbesondere durch Einsatz von Aktivierern), die die Flotation anoxidierter Sulfidphasen verbessern sollte, konnten geeignete Lösungen gefunden werden. Im Wesentlichen bildeten Kupfersulfat, Aerophin und Flotanol die Hauptreagenzien hierfür. Aus diesen Untersuchungen ergeben sich Rückschlüsse für die Verarbeitung in einer industriellen Anlage in Abhängigkeit von möglicherweise zeitweise zwischenzulagerndem Material oder der Aufbereitung von stärker der Oberflächenoxidation ausgesetzten Ablagerungen im Bergeteich (insbesondere dort, wo die überlagernde Wasserlamelle dünn ist und bei längeren Trockenphasen ein zeitweises Trockenfallen eintreten kann).

Bei der Baryt-Flotation wurde ebenfalls auf die im Projekt REWITA entwickelten Reagenzienregime zurückgegriffen. Aufbauend auf den seinerzeitigen Tests wurden jedoch die Versuche nicht am Ausgangsmaterial, sondern wie in der Verfahrenskette letztlich durchzuführen, an den Abgängen der Sulfid-Flotation (Scavenger-Stufe) durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass dies zu bessern Ausbringen und Qualitäten führt, als dies an originärem Material ohne vorgeschaltete Sulfid-Abtrennung (im Projekt REWITA) möglich war.

Die an den Abgängen der Scavenger-Stufe durchgeführten Mikrosondenuntersuchungen und Siebanalysen zeigen, dass der dort verbliebene Baryt meist sehr fein verwachsen ist. Dementsprechend wäre in weiterführenden Folgeuntersuchungen eine Aufmahlung der Scavenger-Abgänge in Betracht zu ziehen, gefolgt von einer Feinstkornflotation. Im Hinblick auf die Anforderungen an maximale Baryt-Gehalte in der Mineralikfraktion, sind ohne diese Stufe keine besonderen Probleme zu erwarten, es ließe sich aber ggfs. das Baryt-Ausbringen erhöhen.

Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Dosierungen von Natriumsilikat, Lupromin und Flotanol durchgeführt, die zu einer leichten Verbesserung der Barytausbeute, jedoch zu Lasten der Gehalte/Barytqualität im Konzentrat führten (Abbildung 1). Daraus können Vorgehensweisen für nachgeschaltete Cleaner- und Scavengerstufen abgeleitet werden.

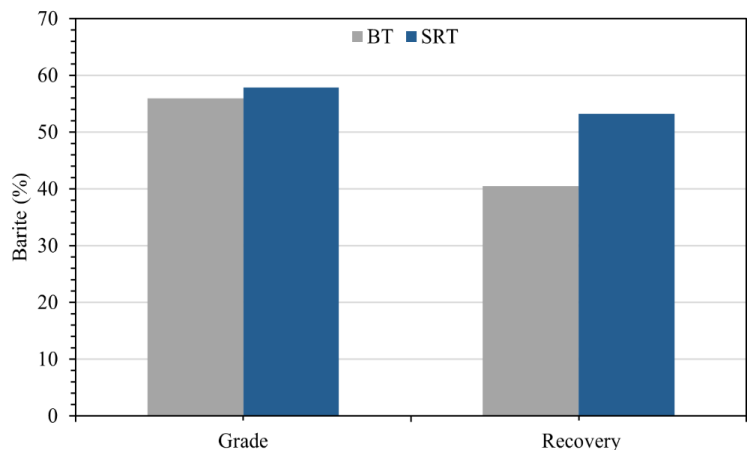


Abbildung 1 Gehalt und Gewinnung von Baryt bei der Flotation von Bollrich-Tailings (BT) und nach einer vorgeschalteten Sulfid-Flotation (SRT).

Die Abtrennung von Karbonaten aus der überwiegend silikatischen Mineralikfraktion aus den Scavenger-Abgängen der Baryt-Flotation wurde untersucht, um ggfs. den Säureverbrauch in den nachfolgenden Laugungsschritten zur Abreinigung von Restmetallgehalten zu verringern. Die Ergebnisse zeigten, dass unter Verwendung von 300-400 g/t Flotinator FS-100 eine geringe Ausbeute an Karbonaten im Flotat erzielt werden konnte. Der verhältnismäßig hohe Sammlereinsatz bei geringer Abreicherung der Karbonatfracht in der verbleibenden Mineralikfraktion zeigte, dass dieser Weg nicht zielführend ist. Daher wurde dieser Weg nicht weiterverfolgt.

Die Untersuchungen zur Flotation von Sulfidmineralien und Baryt aus dem Bergematerial haben gezeigt, dass die Gewinnung von Sulfiden und Baryt durch aufeinander folgende Flotations-schritte technisch möglich ist und welche Ansätze für die jeweiligen Rougher-Cleaner-Scavenger-Kreisläufe zu wählen wären, die in aufsetzenden größeren Pilotversuchen zu testen sind.

Die Upscaling-Versuche gaben darüber hinaus Aussagen, in welchem Umfang sich Flotationszeiten verlängern, wenn mit entsprechend größeren Zellen gearbeitet wird und folglich längere Zeiten für das Aufsteigen der Blase-Feststoffaggregate zur Zelloberfläche anzusetzen sind. Dies ist für Auslegungen eines späteren Upscalings der Anlagen wichtig.

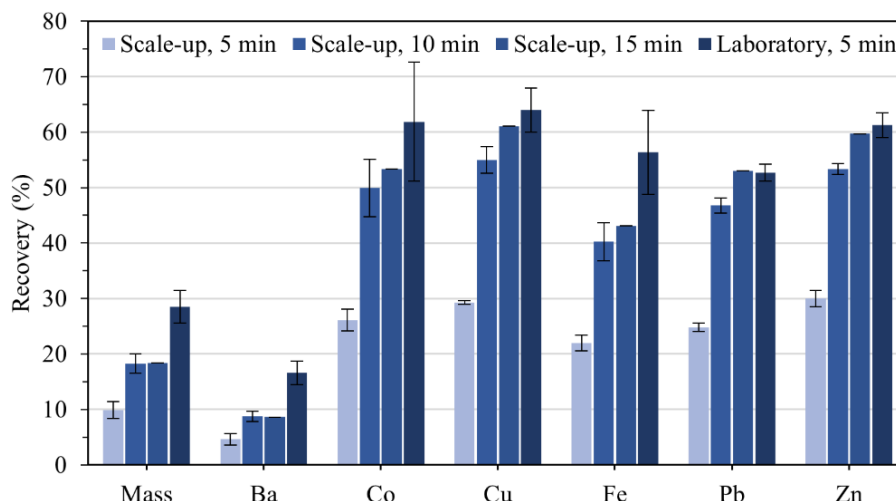


Abbildung 2 Vergleich von Scale-up- und Laborversuchen zur Flotation von Sulfidmineralien

Mit dem gewählten Ansatz wird in den Sulfid-Konzentraten eine kumulative Gewinnung von 18 % - 26 % der nicht mit den Sulfidmineralphasen assoziierten Elemente und 74 % - 94 % der sulfidgebundenen Elemente erzielt (Abbildung 2). Der Pyrit ist fast vollständig aus dem Bergematerial entfernt, was auch die hohe Ausbeute an Co und As (89 % - 94 %) im Sulfidkonzentrat erklärt, die stark mit Pyrit korreliert. Die hohe Ausbeute an Schwerspat (20%) muss durch den Einsatz weiterer Chemikalien sowie durch Reinigungsschritte gesenkt werden, damit sie in ein Baryt-Konzentrat überführt werden kann (Abbildung 3). Dies dürfte letztlich durch die Ergänzung um eine Cleaner-Stufe erreichbar sein. Der komplette Rougher-Cleaner-Scavenger-Kreislauf, der nur in größeren Pilotversuchen abbildbar ist, wurde im Projekt RE-MINTA nicht untersucht, in früheren Studien hatten sich aber vielversprechende Ergebnisse gezeigt.

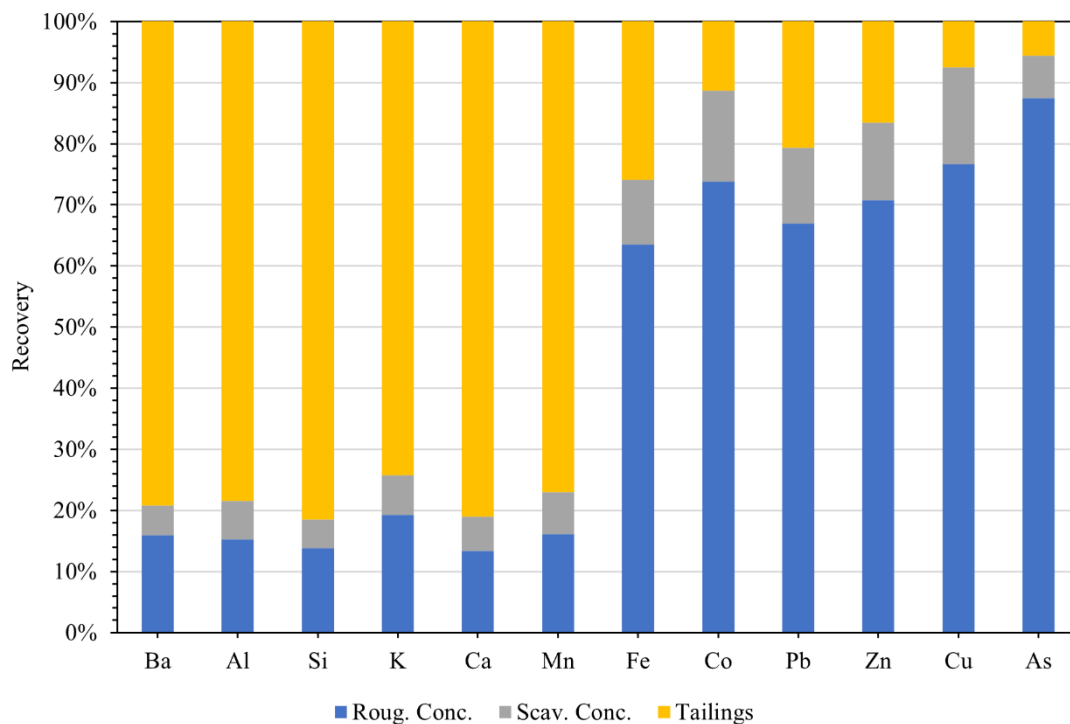


Abbildung 3 Elementverteilung in den Produkten kombinierten Rougher- und Scavenger-Stufen für die Flotation von Sulfid.

Der Vergleich von Labor- und Pilotversuchen der Baryt-Flotation, die unter denselben Bedingungen nach der vorgeschalteten Sulfid-Flotation durchgeführt wurden zeigt, dass die Baryt-Flotation im Maßstab 1:1 etwa 5 mal länger dauert als im Labormaßstab. Die Kinetik der Baryt-Flotation ist langsamer als die der Flotation von Sulfidmineralien (bei der Flotation von Sulfidmineralien betrug das Verhältnis Maßstab:Labor 3:1). Entsprechend ist dies bei der Auslegung von größeren Anlagen im Upscaling zu berücksichtigen. Wie bei der Flotation von Sulfidmineralien ist die Flotation im Pilotmaßstab jedoch selektiver, was insbesondere bei der Baryt-Flotation durch die geringeren Fe-, Pb- und Zn-Gehalte im Konzentrat zu auffällt. Dies ist durch den verlängerten Zeitraum für den Aufstieg der beladenen Gasblasen durch die Trübesäule aufgrund der größeren Flotationszellen auch zu erwarten (Abbildungen 4-6).

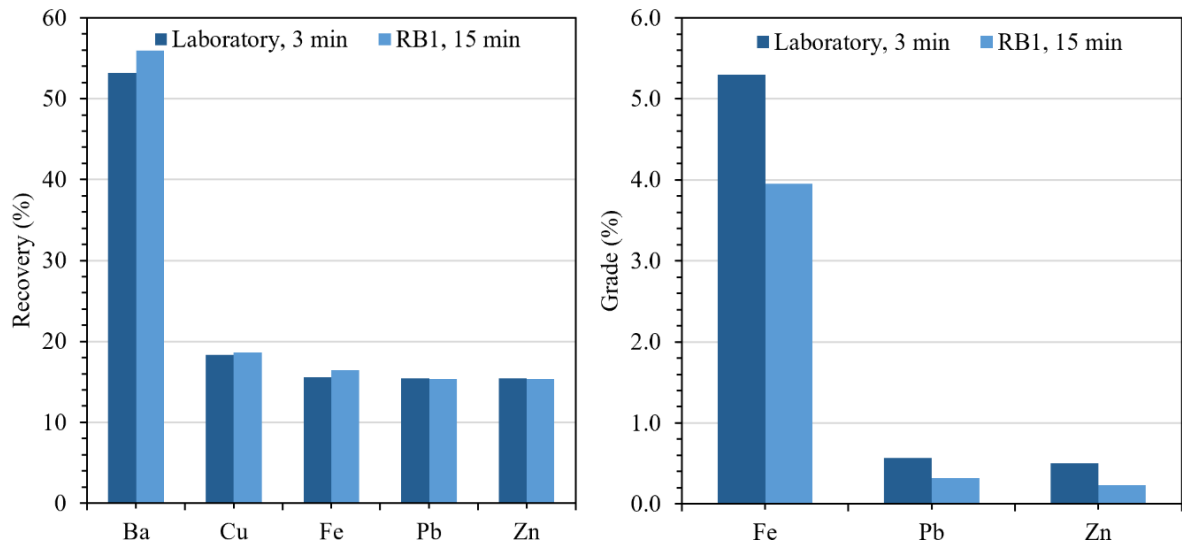


Abbildung 4 Vergleich von Labor- (Lab) und Scale-up-Tests (RB1) der Baryt-Flotation

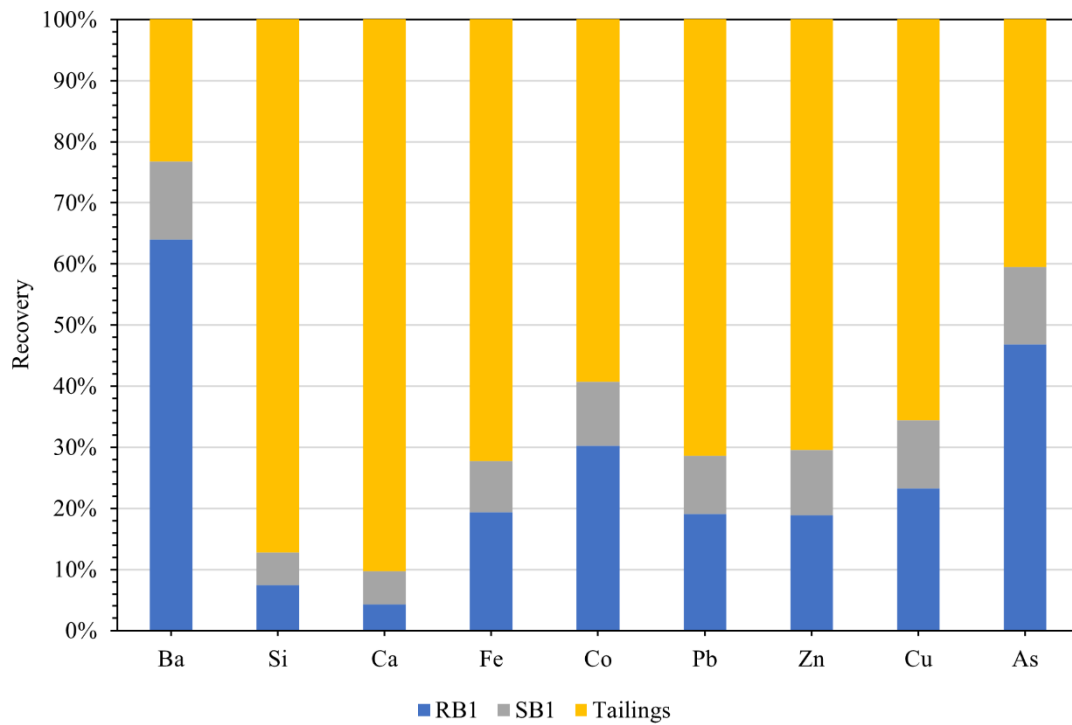


Abbildung 5 Elementverteilung in den Produkten kombinierten Rougher- und Scavenger-Stufen für die Flotation von Baryt.

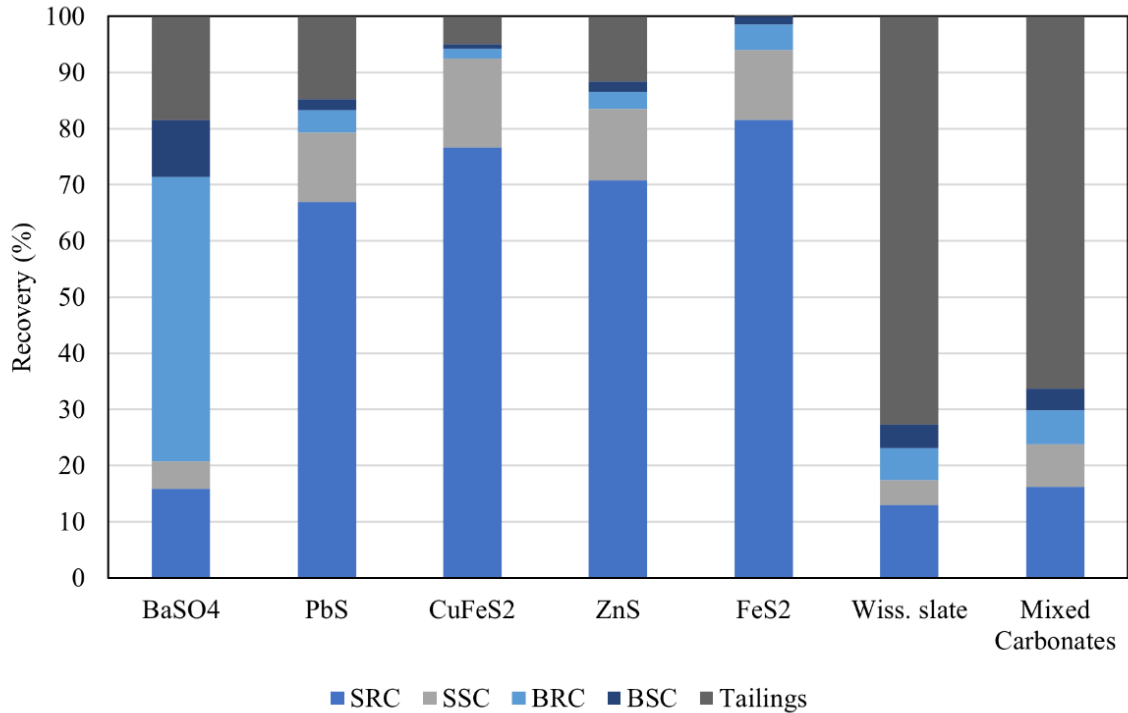


Abbildung 6 Gewinnung der einzelnen Mineralphasen in den Endprodukten aus der Scale-up-Flotation. (SRC: Sulfid-Konzentrat Rougher; SSC: Sulfid-Konzentrat Scavenger; BRC: Baryt-Konzentrat Rougher; BSC: Baryt-Konzentrat Scavenger; Tailings: Karbonat-Konzentrat)

Laugung

Um die verbleibenden Schwermetall-Konzentrationen in der Mineralik nach der Flotation zu senken, muss eine nachfolgende Laugung erfolgen. Um zusätzliche Einträge, wie zum Beispiel Chloride, in die Umwelt zu minimieren, wurde Schwefelsäure als Agens gewählt, da dieses artverwand mit der sulfidischen Phase des Bergeteichmaterials ist.

Um erste Erkenntnisse bei der Laugung des Bergeteichmaterials zu erhalten, wurden auch Untersuchungen zur Laugung des Bergeteichmaterials selbst, also vor der Flotation durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass eine gute Laugeeffizienz bei 0,5 bis 1 mol/L Schwefelsäure zu erwarten ist (Abbildung 7). Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde die Schwefelsäurekonzentration auf 1 mol/l festgesetzt. Nachfolgend fanden Laugeversuche mit den Barytkonzentraten und der Mineralikfraktion selbst statt.

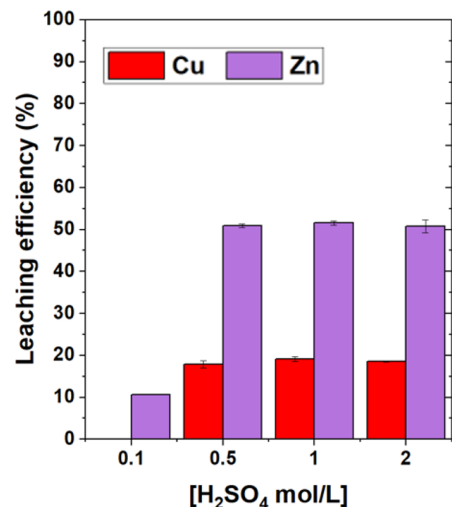


Abbildung 7 Vorversuche zur benötigten Schwefelsäurekonzentration

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Abreinigungslaugung am Mineralik-Konzentrat (Abgänge des Baryt-Scavengers) zeigten, dass bei einer Laugung mit Schwefelsäure (1 mol/L) unter Zusatz von Wasserstoffperoxid von 2 mol/L der Hauptteil des restlichen enthaltenen Cu und Zn extrahiert werden konnten. Eine Verringerung der H₂O₂-Konzentration war direkt mit einem Rückgang der Cu-Auslaugung verbunden, die bei einer Konzentration von 0,125 mol/L nur noch etwa 30 % erreichte. Umgekehrt blieb die Zn-Auslaugung bei allen getesteten H₂O₂-Konzentrationen mit etwa 60-70 % relativ hoch. Abbildung 8 zeigt auch die Extraktion von As,

Co, Fe und Mn. Mn wurde analysiert, da es die Qualität der Baryt- und Mineralfraktion beeinflussen könnte.

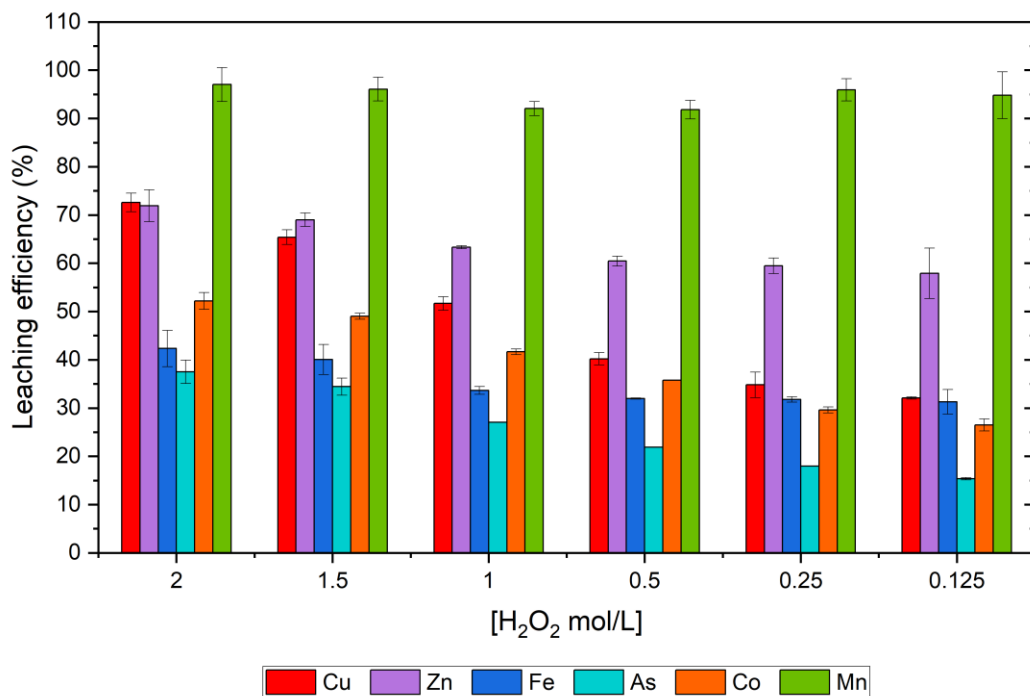


Abbildung 8 Auslaugungseffektivität der Metalle unter verschiedenen H₂O₂ Konzentrationen

Da Pb nicht mit Schwefelsäure ausgelaugt werden kann, sind die Ergebnisse für dieses Element nicht dargestellt. Die Auslaugung von Mn lag unabhängig von der H₂O₂-Konzentration bei nahezu 100 %, während die Auslaugbarkeit der anderen Metalle auch mit der Verringerung der Oxidationsmittelkonzentration zusammenhing und zeitabhängig war (Abbildung 9).

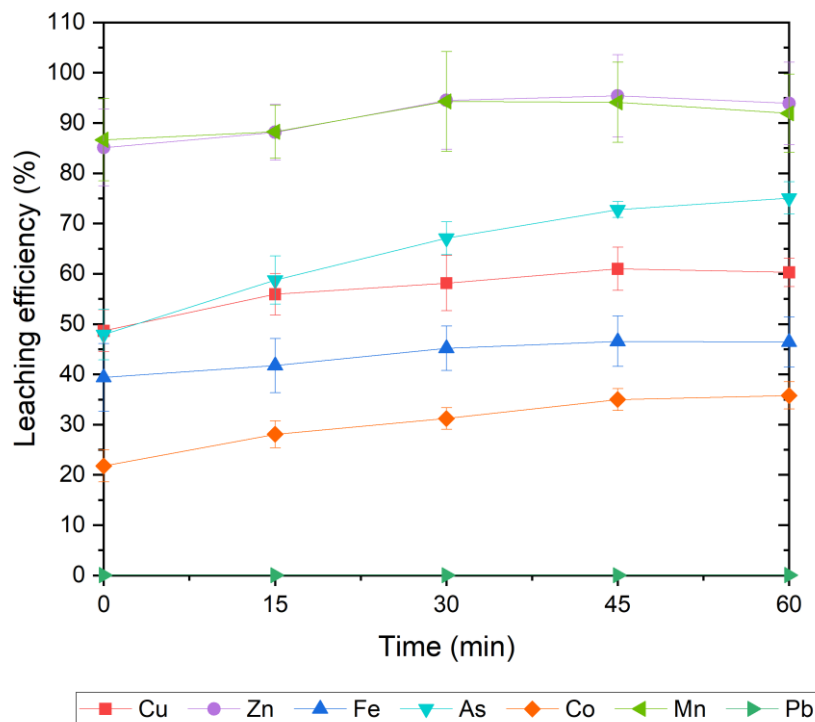


Abbildung 9 Auslaugungseffizienz der Metalle aus der Mineralik-Probe nach der Laugung im Pilotmaßstab

Die durchgeführten Tests im Labormaßstab ermöglichten die Durchführung von Tests im Pilotmaßstab. Auch hier zeigte sich, dass bis zu 90% von Mn und Zn gelaugt werden, Fe wird besser, Co schlechter in Lösung gebracht. Insgesamt lässt sich festhalten, dass eine der Flotation nachfolgende Laugung nochmals zur Verbesserung der Verwertbarkeit der Mineralik durch Absenkung der Metallkonzentrationen beiträgt. Da das Blei nicht mit Schwefelsäure in Lösung zu bringen ist, ist eine zusätzliche biologische Laugung, bzw. Laugung mit organischen Säuren nötig. Entsprechende Untersuchungen wurden beim Projektpartner HZDR durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass sich der Bleigehalt auf ca. 30% senken lässt. Parallel wurden Tests außerhalb des geförderten Projektes in Kooperation mit der BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe mit anderen Bakterienkulturen durchgeführt und separat am IFAD mit organischen Säuren, die die entsprechenden Bakterien im Rahmen ihres Metabolismus erzeugen. Die Ergebnisse waren außerordentlich vielversprechend und sollen in einem Folgeprojekt weiterverfolgt werden. Das entwickelte Gesamtverfahren, sowie die Ergebnisse eines hierzu durchgeführten Großversuchs sind in den Anhängen zu finden.

AP 2: ÜBERPRÜFUNG DER TECHNISCHEN EINSETZBARKEIT DER AUFBEREITETEN MINERALIKFRAKTION

Ziel des Arbeitspaketes war die Definition von Zielgrößen für den Einsatz in der Zementproduktion, im Deponiebau und die Identifikation von alternativen Absteuerungswegen. Des Weiteren sollten die Aufbereitungsergebnisse mit Zielgrößen abgeglichen, standardisierbare Eigenschaftsparameter für die Mineralikfraktionen definiert sowie die Entwicklung von Maßnahmen zur Produkteinschleusung ermittelt werden.

Das Vorgehen bestand darin, zuerst in umfangreichen Untersuchungen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der aufbereiteten Mineralikfraktion zu ermitteln. Anhand der Erkenntnisse wurden allgemeine Absteuerungswege ermittelt. Für diese Einsatzgebiete wurden anschließend die zugehörigen Richtlinien geprüft um Zielgrößen festzulegen. Aufbauend darauf wurden die Untersuchungsergebnisse mit den Zielgrößen abgeglichen und Maßnahmen zur Produkteinschleusung festgehalten.

Als Absatzwege der Mineralikfraktion wurden die folgenden fünf großen Bereiche identifiziert:

- Mineralischer Ersatzbaustoff in technischen Bauwerken
Die Ersatzbaustoffverordnung, EBV (Ersatzbaustoffverordnung, 2021) reguliert in Verbindung mit weiteren Regelwerken die Einbringung verschiedener Sekundär-Materialien in bestimmte Bereiche des Erdbaus. Dafür werden Materialien nach Ihrem Ursprung unterteilt, wobei Tailings in keine konkrete Kategorie fallen. Eine Einordnung in die Materialien „Bodenmaterial (BM) und Baggergut (BG)“ ist nach Definition der EBV, der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 2021) und des Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG, 2021) nicht ausgeschlossen.
- Deponieersatzbaustoff
Die Grenzwerte der DepV regulieren die Verwertung und Entsorgung eines Materials in einer Deponie. Der Einsatz als Ersatzbaustoff in einer Deponie kann teilweise auch nach dieser Klassifizierung zugelassen oder ausgeschlossen werden. Wobei die einzelne Einsatzgebiete nach Bundeseinheitliche Qualitätsstandards (BQS) geregelt sind.

- Zemente und Klinker

Der Einsatz der feinen Mineralikfraktion ist theoretisch als Zuschlag in verschiedenen Herstellungsphasen von Zement umsetzbar. Da sich die physikalischen Korneigenschaften der anthropogen hergestellten Mineralikfraktion von natürlichen Tonen unterscheidet, sind für die Verwendung neben Untersuchungen am Rohmaterial ebenfalls Eignungsprüfungen am verarbeiteten Zement, z.B. dem ausgehärteten Beton, durchgeführt worden.

- Grobkeramik

Die Mineralikfraktion ist grundsätzlich für den Einsatz in der Grobkeramik technisch geeignet. Obwohl der Anteil an Tonmineralien eher gering ist, sind die wichtigen technischen Eigenschaften sowohl im ungebrannten wie im gebrannten Zustand vergleichbar mit dem einer gängigen keramischen Masse. Die umweltrelevanten Eigenschaften und genauen Mischungsanforderungen müssen abhängig von den Anforderungen individueller Ziegelhersteller geprüft werden.

- Weitere Baustoffe

Ein Absatz der Mineralikfraktion in Spezialbaustoffen ist gesondert zu überprüfen. Einsatzbereiche sind z.B. Bentonitersatz in Suspensionen des Tunnelbaus, Verfüllung in bergbauliche Hohlräume oder Zuschlag in Leichtbaustoffen und anthropogen erzeugten Gesteinskörnungen.

Spezifisch wurden die ersten 4 Bereiche untersucht. In der nachfolgenden Tabelle 1 werden die Anwendungsgebiete und die Einsetzbarkeit mit den dazugehörigen Regelwerken aufgeführt. Während der Einsatz als mineralischer Ersatzbaustoff nach der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) und die Anwendung im Deponiebau streng reguliert sind, müssen in der Keramik- und Zementindustrie einsetz- und produktionsabhängige Voraussetzungen berücksichtigt werden.

Bezüglich der möglichen Einsetzbarkeit und den vorhandenen mechanischen Eigenschaften ist zu berücksichtigen, dass für das jeweilige Einsatzgebiet weitere spezifische Untersuchungen notwendig sind, welche im Projektumfang nicht abgedeckt werden konnten.

Mehrere Werte der untersuchten Mineralikfraktion vor Laugung, wie etwa Zink und Blei, überschritten auch die Klasse die höchsten Grenzwerte um mehr als das doppelte. Insbesondere die Eluatwerte sind als kritisch anzusehen. Vermutet wird, dass sich die Schadstoffe aufgrund der vorherigen Aufbereitung leichter im Eluat lösen als bei natürlichen Böden. In der direkten Gegenüberstellung der Werte der Mineralikfraktion aus GV4 und den Grenzwerten der chemischen Zusammensetzung für die Anwendungsbereiche der EBV ist ersichtlich, dass der regulierte Einsatz in den aufgeführten Bereichen ausgeschlossen wird. Der Einsatz in der Depo-nieklasse 3 für gefährliche Abfälle ist weiter zu untersuchen. Ausnahmen stellen Sondergenehmigungen zum Einsatz des Materials bei der zuständigen Behörde dar. Eine Sondergenehmigung ist jedoch in vielen Fällen mit einem hohen Aufwand und Kosten verbunden. Der Mehrwert einer Sondergenehmigung ist daher oft erst bei großen Mengen regelmäßig anfallender Mineralik gegeben.

Anwendungsgebiet	Einsetzbarkeit		
	nach mechan. Eigenschaften	nach chemisch. Zusammensetzung	Voraussetzung/ Regelung
Mineralischer Ersatzbaustoff			
Dambauwerke außer Wasserbau	✓	X	EBV, Regelwerke des Bahn- und Straßenbaus
Verkehrswegebau	✓	X	EBV, Regelwerke des Bahn- und Straßenbaus
Auffüllungen	✓	X	EBV, BBodSchV, BodSchG
Deponiebau			
Ertüchtigung der geol. Barriere	✓	X	DepV, BQS 1-0
Mineralische Basisabdichtung	✓	X	DepV, BQS 2-0, BQS 2-3
Trag- und Ausgleichsschichten	X	X	DepV, BQS 4-1
Mineralische Oberflächenabdichtung	✓	X	DepV, BQS 5-0, BQS 5-3
Rekultivierungsschicht	✓	X	DepV, BQS 7-1, BQS 7-2
Ersatz von Tonmehl (Produkt)	X	X	DepV, BQS 5-5
Zementzuschlagsstoff			
Rohmaterialkomponente Klinker	✓	✓	Feinheit: R90µm <15% und R200µm <100% Nach Abreicherung von Barium und den Schwermetallen einsetzbar.
Ersatz / Zusatz Hauptbestandteil Zement	X	X	Kein Beitrag zur Festigkeitsentwicklung
Nebenbestandteil Zement	✓	✓	Das REMINTA Material ist nach DIN EN 197-1 nicht als Zementkomponente zugelassen, es bedarf einer bauaufsichtlichen Einzelzulassung. Material kann als Füller eingesetzt werden.
Grobkeramik			
Ziegelindustrie	✓	(✓)*	Einhaltung regionaler behördlicher Auflagen, *Individuell nach Produktionsstandort zu prüfen

✓ Anwendung möglich

X Anwendung nicht möglich

Tabelle 1 Einsatz der Mineralikfraktion in der Baubranche

Eine deutliche Reduktion der Grenzwerte im Hinblick auf die Gehalte an Schwermetallen ist durch die Laugung möglich (siehe AP 1 und Anhang 2). Dieser Prozessschritt ist aus wirtschaftlichen Gründen aber eigentlich nur tragbar, wenn Einsatzstoffe für die Erzeugung von Zement oder Grobkeramik erzeugt werden können. Da die Mineralikfraktion dann aber thermischen Prozessen vorläuft, spielen die Eluationswerte der Einsatzmaterialien keine Rolle sondern nur die erreichten Maximalgehalte. Der in der Tabelle 1 aufgeführte Einsatzbereich als „Nebenbestandteil Zement“ würde erst mit gebranntem Klinker zusammen genutzt und nicht als Rohmehl für die Klinkerproduktion. Inwieweit dennoch ein Zuschlag in Betonen denkbar ist, wurde von anderen Projektpartnern beleuchtet.

Zusammenfassend kann für das AP2 festgehalten werden, dass die Anwendungsgebiete starke Unterschiede in den Anforderungen und der Prüfung voraussetzen. Daher ist es erstrebenswert zuerst den Schadstoffgehalt durch den Aufbereitungsprozess zu minimieren und anschließend die mit der erreichten Konzentration an Schadstoffen möglichen Einsatzgebiete nach den mechanischen Voraussetzungen zu prüfen.

AP 3 GESAMTKONZEPTIONIERUNG ORGANISATORISCH, TECHNISCH, WIRTSCHAFTLICH

Geotechnische Rahmenbedingungen und Rückschlüsse für den Rückbau

Die bodenmechanischen Eigenschaften der abgelagerten Tailings wurden umfangreich untersucht um Literaturwerte zu verifizieren und fehlende Parameter zu ermitteln. Anschließend konnten die Ergebnisse aus dem vorherigen REWITA-Projekt (2015-2019) zur Standsicherheit der Dämme überprüft werden und das entworfene Rückbaukonzept und die dazugehörigen Maßnahmen erweitert werden.

Im REWITA-Projekt wurde bereits umfangreich die Lage des Bergkörpers, das Volumen und die Zusammensetzung der Tailings mittels Modelle dargestellt. Weitere Untersuchungen am IFAD und am IGE der TU Clausthal zur chemischen Zusammensetzung und zu den bodenmechanischen Eigenschaften der Tailings bestätigen die Ergebnisse der Literatur und des Rewita-Projekts und ergänzen diese. Eine Auflistung der ermittelten bodenmechanischen Parameter von Mischproben sind in der 2 aufgeführt.

Parameter	Wert	Bemerkung
Wassergehalt w	7 – 44,5%	w nimmt mit der Teichtiefe ab Mittelwert ca. 20-30%
Trockendichte ρ_d	1,8 – 2,6 g/cm^3	ρ_d nimmt mit der Teichtiefe zu
Kornrohichte ρ_s	3,2 – 3,9 g/cm^3	punktueller Abweichungen
Porenanteil n	44 – 50%	n nimmt mit der Teichtiefe ab
Sättigung S_r	90 – 100%	überwiegend 100% wassergesättigt
Porosität e	0,65 – 0,8 [-]	e nimmt mit der Teichtiefe ab
Plastizitätsbereich $I_P = w_p - w_L$	9 – 10 %	$w_p = 15 - 20\%$; $w_L = 24 - 29\%$
Konsistenzzahl I_c	0,25 – 0,75	breiig bis steif → variabel je Wassergehalt, Augenscheinlich/haptisch eher steif
Reibungswinkel φ	29 – 37°	Mittelwert ca. 30 – 35°
Kohäsion c	1 – 12 kN/m^2	unabhängig von der Normalspannung 25 bis 400 kN/m^2
Steifemodul E_s	6,6 – 8,5 Erstbelastung 16,6 – 26,8 Widerbelastung	Referenzwert für 100 bis 200 kN/m^2
Widerstände q	$\leq 7,5 \text{ MN/m}^2$	Drucksondierung
Durchlässigkeit k_f	$1,4 \cdot 10^{-7} - 4,6 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$	vermutlich tiefenabhängig
Proctordichte $\rho_{proc} (100\%)$	2,0 – 2,4 g/cm^3	
Proctorwasserg. $w_{proc} (100\%)$	12,0 – 17,0%	

Tabelle 2 Bodenmechanische Kenngrößen des Originalmaterials

Die Plastizität des Bergematerials liegt in einem Bereich, bestehend aus einem Sand-Ton-Gemisch und einem leicht plastischen Ton (CiL). Die Ergebnisse stimmen mit der ermittelten Korngrößenverteilung überein. Auffällig ist die hohe Wasser-Sättigung der Proben. Bis zu 100% des Porenraums ist mit Wasser gefüllt. Dieses kann dazu führen, dass bei einer dynamischen Belastung eine Umlagerung einzelner Körner einsetzt und sich das Material belastungszeitig verflüssigt. Zur Ermittlung der Fließgrenze w_L für die Einstufung der Konsistenz wurde daher der Fallkegelversuch verwendet. Nicht regulierte Untersuchungen konnten ein verflüssigendes Verhalten nicht bestätigen. Die Spannweite der Zustandsform von weich bis sehr weich existiert, da die Proben an verschiedenen Orten entnommen worden sind und Konsistenz vom Wassergehalt abhängig ist. Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Tailings als inhomogen und instabil (mechanisch sensitiv) einzustufen und sehr anfällig gegen Wassergehaltsänderungen sind. Aufgrund des hohen Metallgehalts ist der genaue organische Anteil mittels einem Glühverlust nicht eindeutig zu ermitteln. Beim Erhitzen der Probe werden die Metalle zum Oxidieren angeregt. Während der Lagerung der Bergbaurückstände im Ablageungsteich tritt aufgrund der niedrigen Durchlässigkeit der Tailings eine ausgeprägte Oxidation nur etwa in den oberen 10 cm auf.

Bezüglich des Aufbaus der Tailings im Ablagerungsbecken wurde die Konsolidierung, also die Zusammendrückung des Bodens infolge des Eigengewichts der Tailings weiter untersucht. Die Ergebnisse bestätigen die Aussage vom Standsicherheitsbericht 2005¹. In dem Bericht wird erwähnt, dass die Tailings zur schnellen Konsolidation neigen. Die Begründung liegt vor allem in der hohen Kornrohichte. Das bedeutet, dass die Ablagerung mit zunehmender Zeit fester wird, was sich positiv auf die Standsicherheit auswirkt. Es kann angenommen werden, dass der Prozess seit geraumer Zeit abgeschlossen ist.

Die neuen Untersuchungsergebnisse der Tailings konnten die Wahl des Rückbauverfahrens aus dem REWITA-Projekt bestätigen. Berücksichtigt wurden umweltspezifische und Technische Anforderungen. Demnach ist eine Nassförderung mit schwimmenden Geräten und mit konstanter Förderung für einen kontinuierlichen Betrieb geplant. So kann der Abbau parallel zur Aufbereitung betreiben werden oder mit einem Zwischenlager. Es wird ein Rückbau des gesamten Bauwerks mit einem schichtweisen Abbau der Tailings parallel mit einem Abtrag des Dammes angestrebt. Eine konkrete Auswahl der Geräte erfolgt im Ausschreibungsverfahren, bzw. je nach Angebot. Dabei werden auch betriebswirtschaftliche Anforderungen berücksichtigt. Abhängig von den eingesetzten Geräten kann eine unterschiedliche Infrastruktur benötigt werden.

Notwendig sind in jedem Fall temporäre Tragschichten, welche in der Regel aus einer Aufschüttung aus einem Schotter- oder Kies-Gemisch bestehen. Bei besonders hohen Last-Belastungen werden diese verstärkt z.B. mit Geogitter. Bei nicht standfestem Untergrund, wie am Bollrich, kann es notwendig sein, diesen auszutauschen, zu verdichten oder zu verstärken, z.B. mit Injektionen oder Kalk. Des Weiteren kann eine Drainageschicht aufgebracht werden, wenn zu erwarten ist, dass durch die Belastung der Tragschicht, Wasser aus dem Boden gedrückt wird. Für den leichteren Rückbau und zur Abtrennung verschiedener Schichten der Tragschicht, wird Trennvlies verwendet. Es empfiehlt sich auf der grobkörnigen Tragschicht eine Ausgleichsschicht mit geringerer Körnunggröße zu erstellen, um das Begehen und Befahren zu erleichtern. Während die historischen, noch bestehenden Gleise zwischen der Aufbereitungsanlage und dem alten Hüttengelände der Preussag reaktiviert und für den Konzentrat-Transport genutzt werden können, ließe sich die alte, ebenfalls noch bestehende Trasse, entlang derer die Spülleitung für die Aufbereitungsabgänge in die Bergeteiche verlief, für den inversen Transport via Pumpleitung zurück in die zu reaktivierende Aufbereitungsanlage realisieren. Das belastete Wasser der Teiche findet Anwendung für den Transport des Materials in den Pipelines. Nach der Aufbereitung der Tailings sollte das Prozesswasser zurück in den Teich geführt werden, um den Kreislauf aus Abbau und Aufbereitung mit möglichst wenig Frischwasser zu gewährleisten.

Wenn die Standsicherheit des Hauptdammes während des Rückbaus nicht gewährleistet werden kann, müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden, wie die Errichtung eines Fangedamms, der die Dammstruktur während des Abbaus unterstützt. Die Notwendigkeit solcher Maßnahmen hängt stark vom ausgewählten Abbauverfahren ab. Erste Standsicherheitsberechnungen weisen eine Standsicherheit der Dämme während des schichtweisen Rückbaus ohne besondere Baustrukturen nach. Des Weiteren muss der Zwischendamm oberhalb der Geländeoberfläche entfernt und mit dem oberen Teich auf die Höhe des unteren Teichs angeglichen werden. Daraufhin erfolgt der Rückbau des Zwischendamms gleichzeitig mit dem Rückbau der abgelagerten Tailings, da er zumeist auch aus Bergematerial besteht

1 QUELLE: GGU, im Auftrag der Bergbau Goslar GmbH (Schmidt & Stoewahse, 2003)

und nicht zur Gesamtsicherheit der Anlage beiträgt. Da Austräge der Tailings in die Dammmaterialien zu erwarten sind, und teils Tailings verbaut worden sein könnten, muss mit einer Deponierung des Materials gerechnet werden. Um eine Zwischenlagerung auf dem Gelände vorzubeugen ist eine frühe Probengewinnung des Dammmaterials im Programm der Baugrunduntersuchung mit aufzunehmen.

In Anschluss des Rückbaus muss eine umfangreiche Sanierung des Geländes erfolgen um in den Untergrund ausgetragene Schadstoffe zu behandeln. Hierfür wird ein Nachsorgekonzept angestrebt, welches nach dem Rückbau und der Überprüfung des Kontaminationsumfangs konkretisiert werden kann. Ein Nachsorgekonzept beinhaltet auch die Nachnutzung der Geländeflächen, wie z.B. die Errichtung eines Hochwasserschutzdamms.

Für die genaue Ausarbeitung einer technischen Gesamtkonzeptionierung mit konkreter Ablaufreihenfolgeplanung und Begleitmaßnahmen sind Planungs- und Ingenieurbüros heranzuziehen. Ergebnisse des im Rahmen des Projektes erstellten und weiterzuentwickelnden Leitfadens können im Rahmenbetriebsplan, im Planfeststellungsverfahren und für die Umweltverträglichkeitsprüfung berücksichtigt werden. Weitere zu berücksichtigende Aspekte sind eine Kampfmittelsondierung, eine Überwachung der Gesamtkonstruktion mit Messtechnik, der Naturschutz und die Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Recherchen zur Ermittlung der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Umsetzung eines Rückbaus eines Bergeteiches ergaben sich vor allem aus den Arbeiten, die im Rahmen des REWITA-Projektes durchgeführt wurden. Es wurden alle Rechtsvorschriften, die für ein Projekt dieser Art gelten, untersucht und auf ihre Gültigkeit hin überprüft und in einer Art Rechtskataster dokumentiert. Die Gesetzgebung, die zur Anwendung in einem Bergeteich-Rückbau kommt, bezieht sich auf die Rechtsbereiche Bergrecht, Bodenschutzrecht, Wasserrecht, Immissionsschutzrecht, Abfallrecht, Arbeitsschutzrecht, Gefahrstoffrecht, Fahrgutrecht, Sprengstoffrecht, Naturschutzrecht sowie Bau- und Planungsrecht.

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Im REWITA-Projekt wurde eine grundsätzliche Kostenplanung für die Gewinnung der Schlämme aus Bergeteichen mit Rücksicht auf die Standsicherheit, eine mögliche Kontamination und die Nutzung als Rückhaltebecken für Grubenwässer beschrieben. Hierfür wurde das gesamte Abbauprojekt in fünf unterschiedliche Kostengruppen eingeteilt umso eine systematische Erfassung der anfallenden Kosten zu gewährleisten (Abbildung 10). Hierzu zählen die Vorleistungen, die Abbau- und Sanierungsplanung, der Abbau und die Sanierung, die Folgeleistungen und die anfallenden Projektnebenkosten.

Auf dieser Basis kann eine grobe wirtschaftlichen Gesamtkonzeptionierung erfolgen, die alle Kostenbereiche beschreibt, die bei Umsetzung eines solchen Projekts anfallen würden.

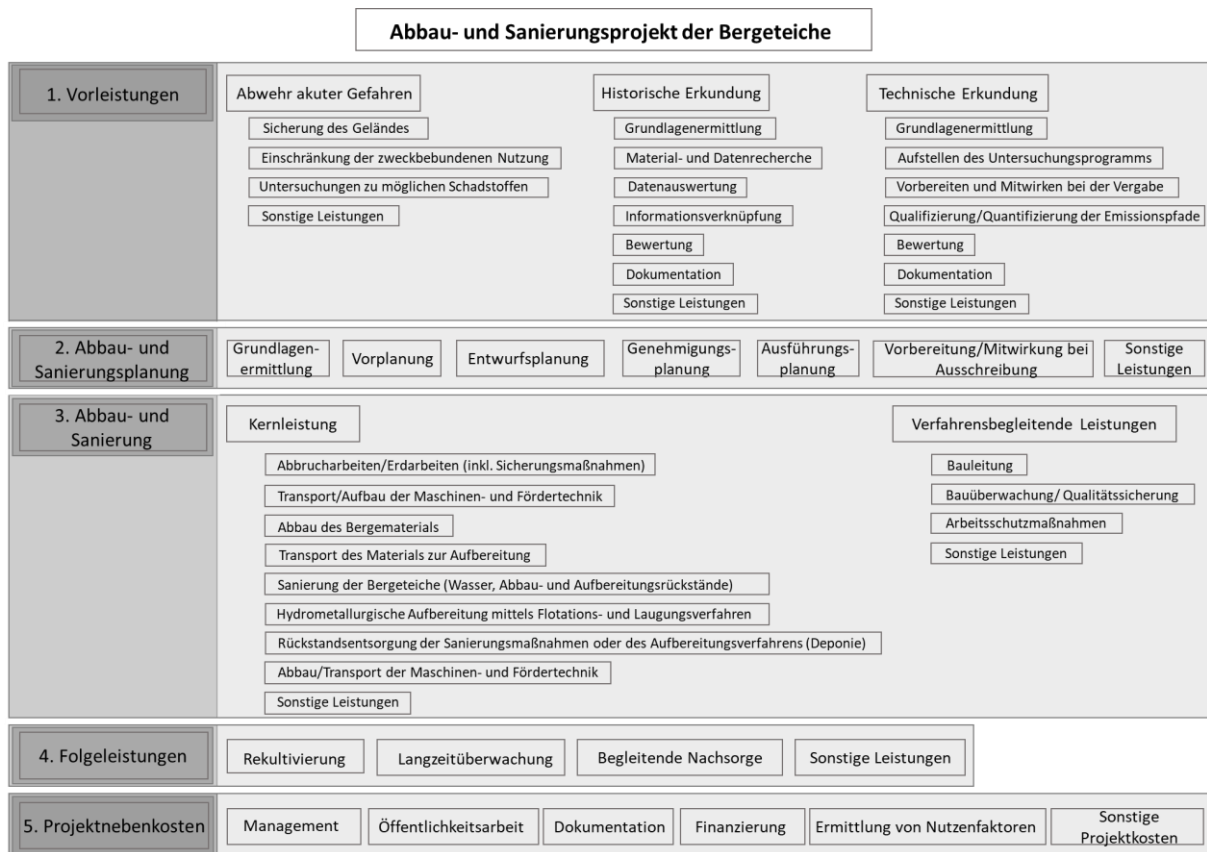


Abbildung 10 Kostengliederung des Abbau- und Sanierungsprojektes der Bergeteiche in unterschiedliche Kosten- und -ebenen (modifiziert nach Lemser & Tillmann, 1997)

Beim REMINTA-Behandlungskonzept wird das Material mit einem Saugbagger abgesaugt und durch Rohre bis zur Aufbereitungsanlage gepumpt. Bei der Aufbereitung werden unter Verwendung verschalteter Flotationssegmente und anschließenden Laugungsstufen mit unterschiedlichen Säuren und anderen Agenzien zuerst die sulfidischen Metallphasen, welche die wirtschaftsstrategischen Rohstoffe enthalten (Blei, Cobalt, Kupfer, Zink u.a.) und danach Baryt abgetrennt und weiterbehandelt. Nach diesen Prozessen bleibt eine mineralische Fraktion übrig, die einer Abreinigungslaugung mit anschließender Neutralisation und Entwässerung unterzogen wird. Zum Schluss erfolgt die Verwertung der abgereinigten Mineralikfraktion in einem Zement- oder Ziegelwerk.

AP4 DIGITALISIERUNG, GESCHÄFTSMODELLE, ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG UND GESELLSCHAFLICHE ERWARTUNG IM HINBLICK AUF TRANSFER

Ziel der Arbeiten im Arbeitspaket 4 waren die technische, wirtschaftliche, ökologische und soziale Bewertung und eine darauf basierende Rückkopplung zum Prozess, Betriebs- und Verwertungskonzept.

Das gesamte entwickelte Prozesskonzept, von der Förderung des Materials im Bollrich bis hin zur Verwertung der gereinigten Mineralikfraktion, wurde einer ökologische Bewertung unterzogen. Als möglicher Einsatz für die Mineralik wurden die Zement- und Grobkeramik (Ziegel) Industrie in Betracht gezogen. Darüber hinaus wurden auch die Potentiale im Zusammenhang mit der Gewinnung der im Bergeteichmaterial enthaltenen wirtschaftsstrategischen Rohstoffe einbezogen. Als funktionelle Einheit wurde die Behandlung von 1.000 Tonnen Teichmaterial angenommen. Für die Modellierung und Kalkulation wurde

das Programm Umberto 11 verwendet, für das die Ecoinvent-Datenbank herangezogen wurde. Als Bewertungsmethode wurde die ReCiPe-Methode verwendet.

Die Umweltauswirkungen, die aus der Aufbereitung des Bergeteichmaterials durch das REMINTA-Behandlungskonzeptes resultieren, sind als relevant zu bezeichnen.

Die verschiedenen Phasen des Behandlungskonzepts zeigen signifikante Unterschiede in ihren Umweltbelastungen. Beispielsweise weisen die Phasen Bio-Laugung und chemische Laugung im Vergleich zu den anderen Phasen durchgängig viel höhere Werte in mehreren Indikatoren auf, was darauf schließen lässt, dass diese Prozessstufen entscheidend zur Gesamtemission und zu den Umweltauswirkungen des gesamten Behandlungskonzepts beitragen. Diese Prozessstufen sind energieintensiv (besonders die biologische Laugung) und erfordern den Einsatz zahlreicher chemischer Substanzen (chemische Laugung), die die Umwelt durch Emissionen und Rückstände belasten.

Die Sulfid-Flotation weist in mehreren Indikatoren höhere Werte als die Baryt-Flotation auf. Insbesondere die ökotoxischen und humantoxischen Belastungen sind in der Sulfid-Flotation stärker ausgeprägt, was durch den Einsatz von Sulfhydrilsammlern zurückzuführen ist, die gegenüber den in der Baryt-Flotation verwendeten Reagenzien entsprechend kritischer sind. Gleichwohl wurden neuere, weniger kritische neue Sammler erfolgreich getestet. Die Baryt-Flotation zeigt im Vergleich moderate Umweltbelastungen und könnte in Bezug auf ihre Umweltauswirkungen als weniger kritisch angesehen werden.

Die Phasen Abbau, Transport, Lagerung, Waschen und Entwässerung weisen im Vergleich zu den intensiveren Aufbereitungsphasen, wie der Flotation und der biologischen und chemischen Laugung geringere Umweltbelastungen auf.

Die Abwasserbehandlung ist eine entscheidende Phase im Behandlungskonzept, da hier potenziell schadstoffbelastetes Wasser aus den vorangegangenen Prozessen gereinigt und aufbereitet wird, bevor es entweder zurück in die Umwelt oder in den weiteren Kreislauf gelangt. Diese Phase weist in mehreren Umweltindikatoren hohe Werte auf. Entsprechende Untersuchungen hierzu wurden bereits im Projekt REWITA durchgeführt.

Die Verwertung der gewonnenen Konzentrate trägt dagegen zu einer erheblichen Umweltentlastung bei. Die eingesparten Aufwendungen für alternative Primärrohstoffförderung und –aufbereitung lassen sich entsprechend gegenrechnen.

Einen Überblick über die relativen Beiträge der einzelnen Prozessstufen im Hinblick auf die Mineralikfraktion bezüglich der verschiedenen Umweltindikatoren liefert Abbildung 11. Die verschiedenen Farben der Balkenabschnitte repräsentieren die Umweltbelastungen bzw. Gutschriften der jeweiligen betrachteten Prozesse und deren prozentualen Beitrag zu jedem Umweltindikator. Es ist zu beachten, dass in der Abbildung jeder Umweltindikator aus zwei Balken besteht, wobei einer die Ergebnisse unter Berücksichtigung des Verwertungspfads Zement und der andere des Verwertungspfads Grobkeramik (Ziegel) darstellt.

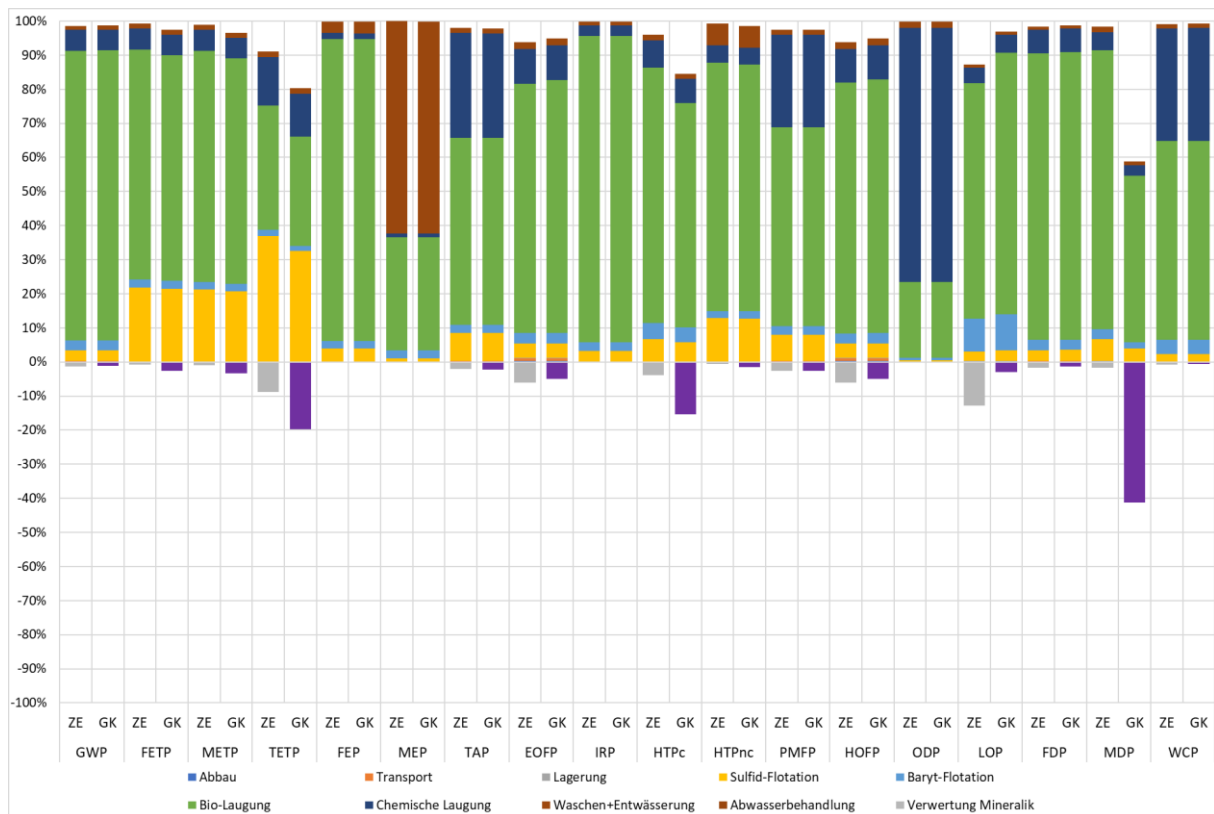


Abbildung 11: Überblick der prozentualen Verteilung der gesamte Umweltauswirkungen des REMINTA-Behandlungskonzeptes mit Differenzierung der verschiedenen betrachteten Phasen für alle Umweltindikatoren, jeweils für den Zement- (ZE) und Grobkeramik- (GK) Einsatz

Darüber hinaus wurde eine Sensitivitätsanalyse auf die Berechnung der Gutschriften für die in den Konzentraten bzw. Lösungen enthaltenen wirtschaftsstrategischen Rohstoffe, die in jeder Stufe der Aufbereitung abgetrennt werden, durchgeführt. Es wurden drei Szenarien durchgerechnet, um zu prüfen, inwieweit die Gutschriften in Zusammenhang mit den gewonnenen wirtschaftsstrategischen Rohstoffe die Umweltauswirkungen des gesamten REMINTA-Behandlungskonzeptes beeinflussen können.

Zunächst wurde ein Szenario gewählt, in dem keine Gutschrift im Zusammenhang mit der Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe bei der Berechnung der gesamten Umweltauswirkungen berücksichtigt wurde. In einem zweiten Szenario wurde die Qualität der enthaltenen wirtschaftsstrategischen Rohstoffe mit 50 % derjenigen aus einer Primärrohstoffgewinnung angesetzt. In diesem Fall wurden 50 % der Gutschrift für die Berechnung der gesamten Umweltauswirkungen angerechnet. Schließlich wurde in einem Szenario davon ausgegangen, dass die Qualität der enthaltenen wirtschaftsstrategischen Rohstoffe jenen aus der Primärrohstoffproduktion entspricht und daher 100 % der Gutschrift für die Berechnung der gesamten Umweltauswirkungen des REMINTA-Behandlungskonzeptes berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Gutschriften in Zusammenhang mit der Qualität der enthaltenen wirtschaftsstrategischen Rohstoffe entscheidend dazu beitragen, die Gesamtumweltbelastung des Behandlungskonzeptes zu reduzieren. In sechs der Umweltindikatoren für das „Szenario mit 100 % Gutschrift“ ist die Reduktion so groß, dass die Umweltbelastungen ein negatives Vorzeichen haben, was bedeutet, dass insgesamt Emissionen eingespart werden. Für das „Szenario 50 % Gutschrift“ tritt dies immer noch bei vier Umweltindikatoren ein. Indem aufbereitete Materialien in den Kreislauf zurückgeführt werden, können erhebliche Einsparungen bei Rohstoffen, Energie und Wasser erzielt werden. Die Ergebnisse

unterstreichen die Wichtigkeit, Verwertungsmöglichkeiten für sekundäre Rohstoffe zu maximieren und die Materialeffizienz in der Produktion zu fördern.

Die Ergebnisse dieser Ökobilanz zeigen, dass die Behandlung von Tailings zwar mit Umweltbelastungen verbunden ist, dass das Potenzial in Bezug auf die Verwertung der Mineralikfraktion sowie des Baryts und der wirtschaftsstrategischen Rohstoffe, die in den Bergeteichen enthalten sind, aber enorm ist. Durch die Identifizierung von Hotspots mit hohem negativen sowie positiven Potentialen und die Bewertung der Umweltauswirkungen können gezielte Maßnahmen zur Optimierung der Prozesse hinsichtlich der Minimierung des ökologischen Fußabdrucks ergriffen werden. Dies könnte beispielsweise durch den Einsatz erneuerbarer Energie erreicht werden. Wie bereits im REWITA-Projekt beobachtet wurde, wo sowohl die Verwendung von Diesel als auch des deutschen Strommixes als Energiequelle berücksichtigt wurden, war für einige Indikatoren die Nutzung von Diesel als Energiequelle vorteilhafter, während in anderen Fällen die Nutzung des Strommixes bessere Ergebnisse zeigte. Die hohen Werte für verschiedene Wirkungsindikatoren in der Strommix-Konfiguration war hauptsächlich auf den Stromerzeugungsanteil basierend auf Steinkohle und Braunkohle zurückzuführen, die immer noch einen hohen Anteil am deutschen Strommix haben. Allerdings sind die Umweltauswirkungen durch den Stromverbrauch bei der in Deutschland voranschreitenden Umstellung der Stromproduktion auf erneuerbaren Quellen in Zukunft anders zu bewerten. Die Erhöhung des Anteils an recyceltem Wasser bei der Aufbereitungsprozesse könnte ein weiteren Beitrag zur Reduzierung der Umweltauswirkungen leisten.

Die Flotationsprozesse sind die zentralen Säulen des Behandlungskonzeptes und gleichzeitig die Stelle an der sinnvollerweise Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Zum einen sind sie mit hohen Umweltbelastungen verbunden und zum anderen sind es die Prozesse, durch die die Konzentrate gewonnen werden, in dem die wirtschaftsstrategischen Rohstoffe enthalten sind. Bei großtechnischen Flotationsverfahren, die aus mehreren Stufen bestehen, ergeben sich Skaleneffekte, die den Wasser-, Strom- und Chemikalienverbrauch und die damit verbundenen Umweltauswirkungen verringern könnten. Dies dürfte auch für die biologische und die chemische Laugung gelten.

Durch die Optimierung der Flotations- und Laugungsprozesse würde eine sauberere Mineralik erzielt, bei der der Gehalt an Schadstoffen unter den zulässigen Werten für den jeweiligen Einsatzzweck liegt.

Die durchgeführten Ökobilanzierungen unterliegen bestimmten Limitationen. So wurden nicht alle relevanten Umweltauswirkungen berücksichtigt, etwa jene der Umweltentlastung durch Sanierung. Eine kontinuierliche Verbesserung des Gesamtkonzepts unter kontinuierlicher Analyse der Ökobilanzergebnisse ist von großer Bedeutung für einen nachhaltigen Umgang mit den Bergeteichmaterialien.

AP5 ERSTELLUNG EINES LEITFADENS ZUM UMGANG MIT BERGETEICHEN UND VERWERTUNG VON BERGETEICHMATERIALIEN

Zusammen mit den Partnern wurde Konzept und Aufbau eines Leitfadens zum Umgang mit Bergeteichen und der Verwertung von Bergeteichmaterialien mit den Partnern erstellt.

Der Leitfaden besteht aus einem allgemeinen Teil, der grundsätzliche Hinweise zum Vorgehen der vorbereitenden Maßnahmen zum Rückbau eines (alten) Bergeteiches und der Aufbereitung und Verwertung von dessen Inhalten bietet. Dies umfasst neben den technischen auch ökologische, ökonomische und soziale Aspekte. Der zweite Teil stellt die Ergebnisse der Projekte REWITA und REMINTA im Kontext des Leitfadens erster Teil dar.

Da sich gegen Ende des Projektes abzeichnete, dass ein Folgeprojekt im Bereich des Up-scalings und der Betrachtung der Logistik entlang der Behandlungs- und Verwertungskette auf den Weg gebracht werden kann, wurde der Leitfaden im aktuellen Stadium als Zwischenversion gestaltet, die im Rahmen von Folgearbeiten in weiteren Projekten ergänzt werden soll.

AP 6 ANALYTIK

Analyseverfahren, welche sich für Tailings als geeignet erwiesen haben, wurden an der Mineralikfraktion angewendet.

Neben der Untersuchung des Einsatzes der aufbereiteten feinen Mineralik als Baustoff wurden die bodenmechanischen Eigenschaften für eine allgemeine Einschätzung und zum Vergleich mit ähnlichen und zukünftigen Projekten gewonnen.

Die Korngrößenverteilung der Mineralikfraktion wird in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** den Tailings aus dem Bollrich gegenübergestellt. Es ist zu sehen, dass vor allem die weniger feinen Partikel während der Aufbereitung in den Sulfid- und Barytkonzentraten gewonnen werden können. Die Mineralikfraktion ist daher feiner als die Aufgabe und hat ein enggestuftes Körnungsband, d.h. die meisten Partikel liegen zwischen 0,003 und 0,01 mm.

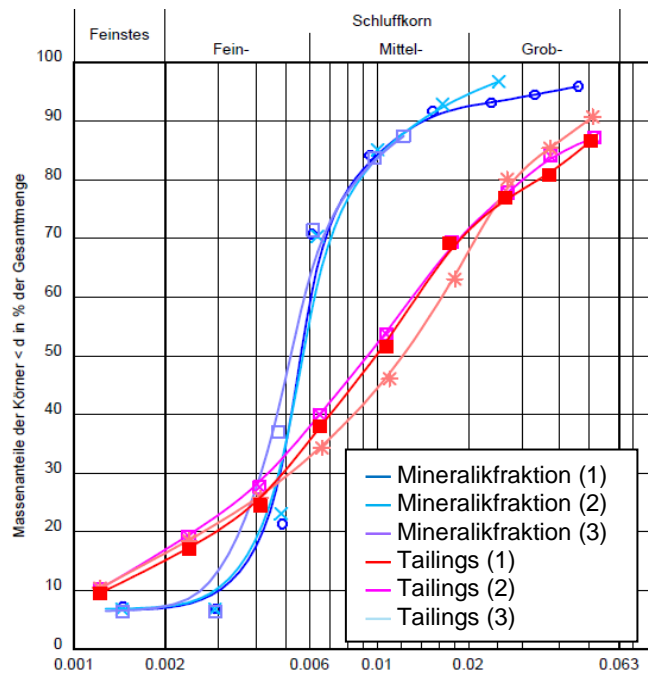


Abbildung 12 Korngrößenverteilung der Tailings und der Mineralikfraktion

Die Mineralikfraktion weist nach Laugung und Entwässerung einen Wassergehalt von ca. 50% auf, wenn konventionelle Entwässerungsvorrichtungen genutzt werden (Flockung, Eindickung und Filtration). Entscheidend für den anzustrebenden Feuchtegehalt für nachfolgenden Umschlag, Transport und Einsatz ist das jeweils optimale Handling unter Vermeidung von Verstaubung, einer guten Förderfähigkeit und den Einsatzbedingungen. Ableitbar aus analogen industriellen Prozessen kann es sinnvoll sein, vor dem Transport per Schiene nicht zu stark zu entwässern, den letzten Trocknungsschritt dann aber am Einsatzstandort vorzunehmen.

Wie die Tailings ist die Mineralikfraktion ein anthropogen hergestelltes Material und kann entsprechend auch mit bodenmechanischen Methoden, die für natürliche Böden ausgelegt sind, beurteilt werden, wenngleich im Laufe der Untersuchungen klar wurde, dass die präferierten Absatzkanäle die Zement- und Grobkeramikproduktion sind. Im Folgenden werden die Ergebnisse zu bodenmechanischen Parametern aus Laboruntersuchungen des Institute of Geo-Engineering (IGE) der TU Clausthal in 3 dargestellt.

Parameter	Wert	Wassergehalt w	Bemerkung
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,27 – 1,37	0 %	
Kornrohichte ρ_s [g/cm ³]	3,11 – 3,13	0 %	
Porenanteil n	55 – 59%	42 – 45 %	
Sättigung S_r	96 – 100%	96 – 100%	
Porosität e	1,27 – 1,46 [-]	42 – 45 %	
Konsistenzzahl I_c	0,15 – 0,19	40 %	
Plastizitätsbereich $I_P = W_p - W_L$	17 – 19	$W_p = 24 - 26\%$; $W_L = 42 - 44\%$	
Reibungswinkel φ	31 – 37°	30 – 34 %	Rahmenscherversuch mit 25 – 100 kN/m ² Auflast, 1,5 – 1,6 g/cm ³ Trocken- dichte
Kohäsion c	11 – 20 kN/m ²		
Durchlässigkeit k_f	$1,8 \cdot 10^{-10} - 8,7 \cdot 10^{-10}$ m/s		
Proctordichte $\rho_{proc(100\%)}$	1,6 – 1,7 g/cm ³	25 – 29% ($W_{proc(100\%)}$)	

Tabelle 3 Bodenmechanische Kennwerte der Mineralikfraktion

AP7 PROJEKTLEITUNG

Im Rahmen der Projektleitung wurde die Kommunikation innerhalb des Konsortiums organisiert. Es wurden im 4-wöchentlichen Rhythmus ein Jour Fixe per Videokonferenz durchgeführt. Im Schnitt wurde jedes halbe Jahr ein physisches Treffen bei unterschiedlichen Partnern durchgeführt. Dies wurde während der Corona-Zeit unterbrochen bzw. auf online-Formate umgestellt.

Außerhalb des Projektes wurde dieses inner- und außerhalb der Fördermaßnahme repräsentiert.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es gab keine nennenswerten Abweichungen vom beantragten Mittelbedarf.

3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts REMINTA erzielten Ergebnisse sind vielversprechend und bieten erheblichen Nutzen sowie vielfältige Verwertungsmöglichkeiten für die Zukunft. Die entwickelten Methoden und Prozesse zur Gewinnung einer verwertbaren Mineralik aus Bergeteichmaterial des Bergwerkes Rammelsberg öffnen Absatzwege für weitere Anteile und in Kombination mit den bereits im Projekt REWITA entwickelten Ansätzen zur Rückgewinnung der Metallfraktionen und des Schwerspats die Möglichkeit, bis zu 80 % der Masse einer Verwertung zuzuführen. Zusätzlich wurden Erkenntnisse über die geotechnischen Eigenschaften von Bergeteichmaterial und Tailings gewonnen. Ökologische, ökonomische und rechtliche Randbedingungen wurden ermittelt. Auf diese Weise wurde ein Set an Erkenntnissen gewonnen, das zum einen eine Basis für eine nächste Stufe der Entwicklung hin zu einer industriellen Umsetzung liefert, in der Scale up und Logistik beleuchtet werden sollten. Zum anderen können die gewonnenen Erkenntnisse für die Beurteilung und Entwicklung anderer Bergeteichprojekte genutzt werden. Dies erfolgte bereits im Rahmen eines Europäischen Projektes (Projekt „SULTAN“, durchgeführt im Rahmen eines MSCN-Programms), wo es wertvolle Ansätze etwa für die Wiederaufnahme eines Bergeteichs in Portugal lieferte.

4. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Im Projektzeitraum wurden bereits eigene Erkenntnisse in weitere Projekte und Entwicklungen -etwa auf Europäischer Ebene oder in Brasilien- eingebracht. Das Netzwerk der internationalen Akteure im Bereich Tailingsrecycling, dem auch die TU Clausthal durch die Arbeiten in REWITA und REMINTA angehört, wurde ausgebaut. Informationen von Seiten Dritter wurden aufgenommen und in der Projektentwicklung von REMINTA berücksichtigt. Forschungs- bzw. Entwicklungsergebnisse von dritter Seite, die das Projekt REMINTA überflüssig gemacht hätten, sind nicht bekannt. Ganz im Gegenteil avancierte die TU Clausthal durch die Projekte REWITA und REMINTA zu international gefragten Ansprechpartnern. Eine Notwendigkeit, Ansätze oder Ziele des Vorhabens zu ändern, ergab sich daher nicht. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

5. Veröffentlichungen

Im Laufe des Projektes wurden an der TU Clausthal 2 Promotionen in den Bereichen Flotation und Laugung abgeschlossen, eine weitere im Bereich Geotechnik steht kurz vor dem Abschluss.

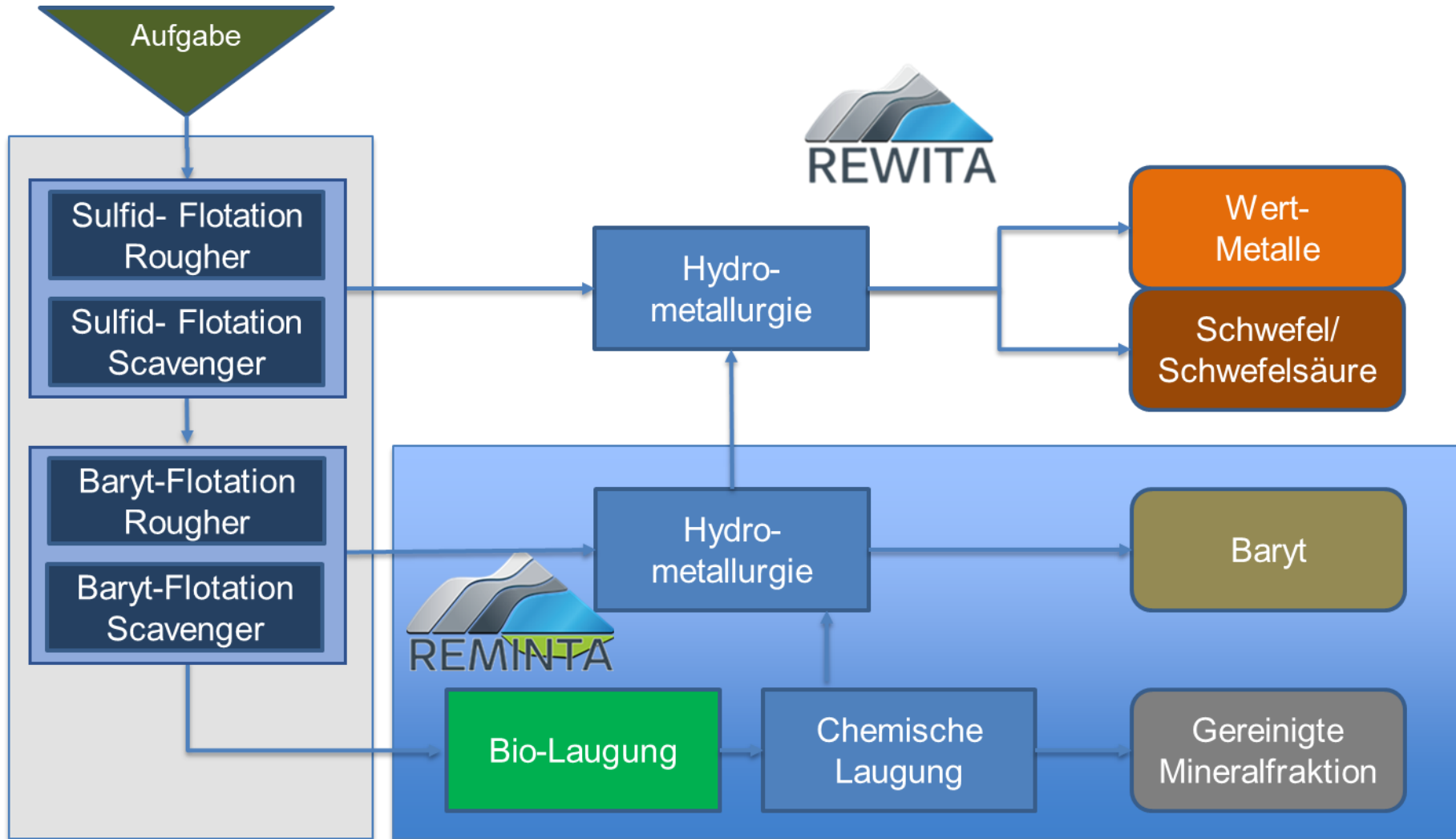
Eine Reihe an Publikationen, die sich wesentlich auf die Ergebnisse des Projektes REMINTA stützen, erfolgten.

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ	Konferenz/Tagung	Datum
1	Braga de Carvalho, A; Ludovici, F.; Goldmann, D.; Silva, A. C.; Liimatainen, H	<i>Silylated Thiol-Containing Cellulose Nanofibers as a Bio-Based Flocculation Agent for Ultrafine Mineral Particles of Chalcopyrite and Pyrite</i>	Veröffentlichung	<i>Journal of Sustainable Metallurgy</i> DOI: https://doi.org/10.1007/s40831-021-00439-y	21 September 2021
2	Schueler, T. A.; de Aguiar, P. F.; Vera, Y. M.; Goldmann, D	<i>Leaching of Cu, Zn, and Pb from Sulfidic Tailings Under the Use of Sulfuric Acid and Chloride Solutions.</i>	Veröffentlichung	<i>Journal of Sustainable Metallurgy</i> , 7, 1532-1536; DOI: https://doi.org/10.1007/s40831-021-00446-z	25 Oktober 2021
3	Ana Luiza Coelho Braga de Carvalho	Investigations on the reprocessing of fine particles from sulfidic tailings through flotation	Dissertation		14.08. 2023
4	ALCB de Carvalho, VA de Carvalho, R Blannin, AG Escobar, M Frenzel, et al	A study on the desulfurization of sulfidic mine tailings for the production of a sulfur-poor residue	Veröffentlichung	Minerals Engineering 202, 108285	August 2023
5	T. A. Schueler, A.Schippers, D. Goldmann	Bioleaching for metals removal from mine tailings flotation fractions	Veröffentlichung	Hydrometallurgy Volume 225, April 2024, 106286	20.02.2024
6	Tamara Azevedo Schueler	Hydrometallurgical approaches for the extraction of base metals from mine tailings	Dissertation		27.02.2024
7	Luka Nils Mettke; Tamara A. Schueler; Franziska Crutziger; Kai Rasenack; Bengi Yagmurlu; Daniel Goldmann	Leaching of mine tailings flotation fractions using inorganic and organic acids for metals extraction	Veröffentlichung		eingereicht
8	Tina Waldow		Dissertation		Q3 2025

Zusätzlich gab es einige weitere Veröffentlichungen, die im Bereich des Tailingsrecyclings breitbandiger aufgestellt sind und Ergebnisse aus dem Projekt REMINTA darstellen.

Anhänge

Anhang 1: Schematische Darstellung des Aufbereitungsprozesses



Anhang 2: Ergebnistabelle Großversuch

Die dargestellten Werte zeichnen den Weg der Mineralikfraktion nach und sind somit jeweils die Ergebnisse der chemischen Analytik für die Rückstände der Flotationsstufen, bzw. den Laugerückständen

	Ag	Al	As	Ba	Ca	Cd	Co	Cu	Cr	Fe	Hg	K	Mg	Mn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ausgangsmaterial	29,16	37.646,81	840,28	125.522,70	39.738,28	30,53	193,73	1.278,30	65,03	121.581,89	7	14.386,33		12.801,64
Flotation Sulfide	<10	45.282,65	135,09	143.235,92	50.201,53	<10	33,35	314,89	78,54	49.442,00	1	15.260,51		15.655,87
Flotation Baryt	<10	56.000,00	112,00	113.500,00	54.000,00	7,00	28,00	379,00	106,00	52.200,00	1,00	22.500,00	22.200,00	18.100,00
Biol. Laugung		55.940,12	111,46	114.071,86	56.743,14	<5	30,65	84,31	290,20	49.070,59	1,04	16.958,82	24.178,43	17.393,14
Chemische Laugung		54.759,49	9,60	132.658,23	54.656,07	<5	<5	71,29	77,07	13.579,96	1,35	19.185,93	5.145,47	140,66
	Na	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te	Ti	Tl	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ausgangsmaterial	1.161,50	30,45		14.071,52	12,59			83.184,21				74		13.724,91
Flotation Sulfide	757,85	23,92		7.473,33	4,90			110.840,00				14		4.768,25
Flotation Baryt	2.000,00	26,00	475,00	5.300,00	2,24	119,00	<10	115.000,00	59,00	<10	2.400,00	30,00	121,00	4.400,00
Biol. Laugung	3.849,02	24,51	389,33	4.754,90		80,09	<2	130.610,78	73,97	<2	2.730,54	15	116,55	3.902,94
Chemische Laugung	874,40	13,49	68,80	5.580,92		39,27	<2	142.601,27	96,99	<2	3.145,57	13	120,62	457,61