

MindMontan

Verminderung von Gewässerbelastungen in der Montanregion Erzgebirge/ Krušnohoří am Beispiel der Spülhalde Hammerberg, Freiberg

Eberhard Janneck¹, Sarvenaz Mogdahan¹, Dennis Oßmann²,
Michel Oelschlägel², Mirko Martin¹, Jana Pinka¹, Sabrina Hedrich²

Auswirkungen des Bergbaus auf den Wasserhaushalt

In der Montanregion Erzgebirge und angrenzenden Gebieten gibt es zahlreiche stillgelegte Bergwerke und mehrere Tausend Bergbauhalden, von denen die größten knapp 100 Halden einen erheblichen Einfluss auf den Wasserpfad ausüben. Obwohl bereits große Gebiete des Uranbergbaus saniert wurden, dauern die Auswirkungen des Altbergbaus auf dem Wasserpfad über viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte an, z. B. durch Kontaminationen mit Arsen (As), Cadmium (Cd), Nickel (Ni), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Uran (U) und anderen potenziell toxischen Elementen. Eine effiziente Lösung für diese Problematik ist schwierig, weil eine aktive technische Behandlung von Bergbauwässern nur an wenigen Standorten mit hohen Schadstofffrachten ökonomisch überhaupt leistbar ist. An vielen Stellen treten aber relativ kleine Wasserströme aus Altbergbauliegenschaften aus, die bisher nicht behandelt werden können und in der Summe die Gewässer erheblich belasten, so dass in vielen Oberflächenwasserkörpern die Erreichung eines guten chemischen und ökologischen Zustands entsprechend EU-Wasserrahmenrichtlinie nicht möglich ist.

Die geschilderte Problematik ist typisch für Bergbauregionen weltweit. Daher wurden bereits seit den 1980er Jahren besonders in den USA und Kanada sogenannte passive Behandlungssysteme entwickelt, die in der Lage sind, kleine bis mittlere Abflüsse aus Halden und Altbergwerken weitgehend ohne den Eintrag von Fremdenergie zu behandeln. In passiven Behandlungssystemen erfolgt eine sequentielle Abtrennung von Metallen und/oder Säure aus dem Wasser unter Nutzung eines vorhandenen hydraulischen Gefälles und natürlichen physikalischen, ökologischen, mikrobiologischen und geochemischen Reaktionen.

Das Ziel passiver Wasserbehandlungsverfahren ist es, die natürlichen Reinigungsprozesse so zu verbessern, dass sie in einem eng begrenzten Behandlungssystem ablaufen und die Schadstoffe nicht

die natürlichen Wasserkörper erreichen.

In einem Übersichtsartikel bezeichnen die Pioniere der frühen Entwicklung von passiven Systemen zur Behandlung von Bergbauwässern [1] diese als die kostengünstige Alternative zur Nichtbehandlung vieler stillgelegter Minenstandorte.

Der Neubau von naturnah gestalteten passiven Systemen zur Behandlung von belasteten Bergbauwässern erfordert fundierte interdisziplinäre Kenntnisse in Geochemie, Hydrochemie, Mikrobiologie, Hydraulik und Botanik. Standortsspezifische Pilotversuche sind deshalb für eine erfolgreiche Projektentwicklung unverzichtbar.

Ein Beispiel für eine sehr erfolgreiche Integration eines passiven Behandlungssystems ist die Umgestaltung eines alten Steinkohlebergbaugebiets zu einem botanischen Garten in Pittsburgh/Pennsylvania [2]. Hier wird das austretende Wasser mit Aluminium (Al) und einer Kalksteindrainage behandelt, um anschließend den sogenannten Lotus-Teich im Japanischen Garten zu speisen. Das sich in der Drainage ansammelnde Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) wird diskontinuierlich ausgespült und in einem tiefer gelegenen Becken aufgefangen sowie von Zeit zu Zeit entsorgt.

In Europa sind derartige Systeme in weit aus geringerer Anzahl vorhanden, wobei Großbritannien jedoch eine Vorreiterrolle einnimmt [3]. Die in Deutschland bekannten Systeme zur passiven Behandlung bergbaulich beeinflusster Wässer wurden mit Stand von 2001 durch Wolkersdorfer & Younger [4] zusammengestellt.

In diesem Artikel möchten wir die Etablierung einer innovativen, passiven Anlage zur Behandlung von Sickerwässern der Hammerberghalde in Freiberg vorstellen, die sowohl chemische als auch biologische Stufen kombiniert.

Standort Hammerberghalde

Der Hammerberg befindet sich am östlichen Stadtrand von Freiberg (Abb. 1). Hier wurde 1964 eine Spülhalde zur Ablagerung von Flotationsrückständen angelegt und bis 1969 betrieben. In dieser industriellen Absetzanlage befinden sich ca. 330.000 m³ feinsandige Schlämme mit einer Mächtigkeit von 20-25 m, die in dem kleinen Taleinschnitt hinter einem aus Grobbergematerial errichteten Damm eingespült wurden. Hauptschadstoffe in den Spülschlämmen sind die Elemente As, Blei (Pb), Cd, Cu und Zn.

An der Basis des Spülbeckens befinden sich großflächig Gehängelehm und



Abb. 1: Luftbild der Spülhalde Davidschacht und Hammerberg am östlichen Rand der Stadt Freiberg (Foto: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH)

Gneiszersatz. Im Beckentiefsten, dem ursprünglichen Taleinschnitt folgend, wurde eine doppelsträngige Dränageleitung eingebaut, die zur Fassung und Ableitung der Sickerwässer dient. Die anfallenden Sickerwässer weisen auch mehr als 50 Jahre nach Stilllegung der Spülhalde noch erhebliche Belastungen durch niedrige pH-Werte, hohe Sulfatkonzentrationen und starke Kontamination durch die Metalle Al, Zn, Cd, Mangan (Mn) sowie in geringerem Ausmaß durch Ni und Cu auf (Tab. 1).

Das Sanierungskonzept der Hammerberghalde sieht eine mehrschichtige Abdeckung u. a. mit bindigen Erdstoffen vor, um den Zutritt von Niederschlagswasser und Luft weitgehend zu minimieren. Dadurch wird zukünftig die Menge des Sickerwassers reduziert und die Verwitterungsprozesse im Inneren der Halde werden verlangsamt. Es ist zu erwarten, dass die Belastung des Sickerwassers mit Schadstoffen zurückgehen wird. Dem damaligen Stand der Technik entsprechend ist die industrielle Absetzanlage mit keiner Basisdichtung ausgestattet. Deshalb kann auch nach der Abdeckung von den Hängen seitlich Wasser in die Deponie eindringen und belastetes Sickerwasser produzieren, wenn auch in geringerer Menge als bisher. Daher ist über einen sehr langen Zeitraum (viele Jahrzehnte) eine Restbelastung im Sickerwasser zu erwarten. Hieraus resultiert die Notwendigkeit zu prüfen, ob und mit welchen Methoden eine Behandlung des Sickerwassers durchgeführt werden kann, um die Freiburger Mulde langfristig vor dem Eintrag der o. g. toxischen Metalle zu schützen.

Prinzip der Pilotanlage

Die Anlage zur Behandlung des Sickerwassers ist modular aufgebaut, um verschiedene Schadstoffe selektiv in mehreren Behandlungsstufen abzutrennen:

Zunächst wird das kontaminierte Sickerwasser aus dem Kontrollschacht in kleine Vorratsbecken (Speicher-IBC) gepumpt, um von dort im freien Gefälle durch die kaskadenförmig aufgebaute Behandlungsanlage zu fließen (Abb. 2). Die für das Pumpen erforderliche Elektroenergie wird durch eine kleine PV-Anlage (gesponsort von der Fa. Meyer Burger Industries GmbH) mit Batteriespeicher zur Verfügung gestellt.

In der ersten Behandlungsstufe wird der pH-Wert des sauren Wassers auf Werte zwischen 6,5 und 7,0 angehoben. In diesem pH-Wertbereich fällt das im Sicker-

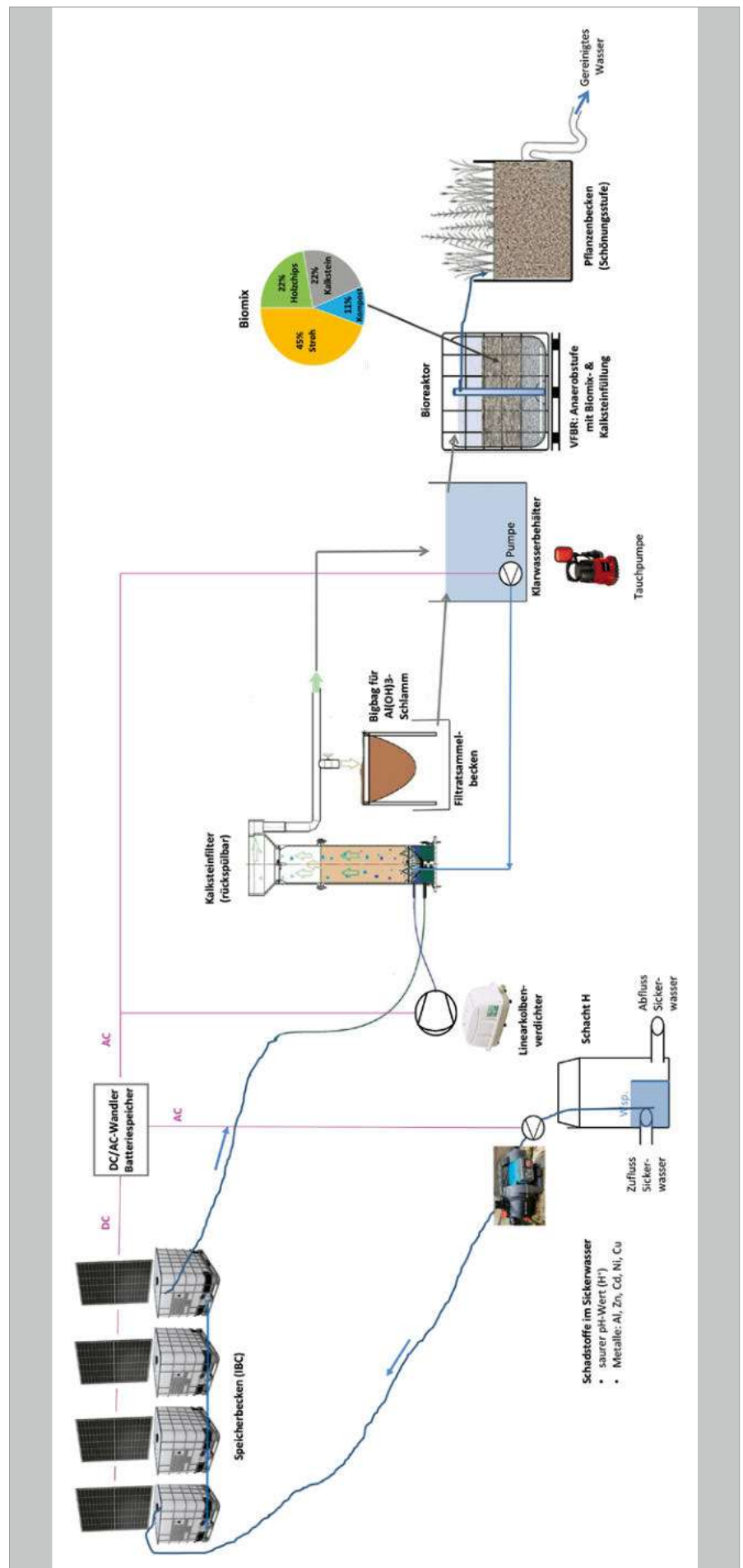


Abb. 2: Schema der Pilotanlage am Hammerberg

Tab. 1: Minimum und Maximum von ausgewählten Parametern im Sickerwasser der Messstelle 3119 (OBF31511), Messungen zwischen Februar 2019 und August 2023 (Datenquelle: LfULG: Daten aus der Gewässerüberwachung des Freistaates Sachsen, GEOS: Messwerte G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft)

Element	Einheit	Min	Max
Al	µg/l	54	54
Cd	µg/l	160	160
Cu	µg/l	19	19
Mn	µg/l	5.800	5.800
Ni	µg/l	70	70
Zn	µg/l	19.000	19.000
pH-Wert		5,10	5,10
Sulfat	mg/l	1.100	1.100

wasser gelöste Aluminium als $\text{Al}(\text{OH})_3$ aus (Abb. 3). Für die Anhebung des pH-Wertes wird ein spezieller Kalkstein (CaCO_3 , Travertin) verwendet, der sich in einer Filtersäule befindet. Das sich im Laufe der Zeit im Travertinfilter ansammelnde $\text{Al}(\text{OH})_3$ wird mit Hilfe von Druckluft und Wasser aus dem Filter herausgespült und in einem Filtersack (Bigbag) aufgefangen.

Das Wasser fließt dann über einen Zwischenspeicher (Klarwasserbehälter) in den vertikal durchströmten Bioreaktor (VFBR). Hier befindet sich eine Mischung aus Kalkstein, Holzchips, Stroh und Kompost, welche als „Biomix“ bezeichnet wird. In dieser Mischung wachsen Sulfat-reduzierende Bakterien, die aus dem Sulfat (SO_4^{2-}) des Sickerwassers Hydrogensulfid (HS^-) produzieren mit dessen Hilfe die enthaltenen Metalle Zn, Cd, Cu und Ni als Metallsulfide (z. B. Zinksulfid ZnS) ausgefällt und im Biomix zurückgehalten werden (Abb. 3).

Als letzte Stufe muss das zu behandelnde Wasser ein Pflanzenbecken passieren. Hierin soll eine Feinreinigung des Wassers durch Filtration und ein Abbau von aus dem VFBR eventuell ausgeschwemmter gelöster organischer Stoffe erfolgen. Abb. 4 zeigt den Aufbau der gesamten

Pilotanlage am Hammerberg.
Die Anlage ist für einen Wasserdurchsatz von 20-50 l/h ausgelegt und wird im Projekt MindMontan unter verschiedenen Belastungszuständen getestet.
Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte im Juli 2024. Danach war ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb bis zur Frostperiode Anfang November 2024 möglich. Da die Anlage aus Kostengründen nicht für den Winterbetrieb konzipiert worden war, musste der Anlagenbetrieb bis zum Frühjahr 2025 unterbrochen werden. Mitte April 2025 wurde die Anlage für eine neue Versuchsperiode wieder in Betrieb genommen.

Ergebnisse der Wasserbehandlung in der Pilotanlage

In den Abb. 5 bis 7 sind die Ergebnisse der Wasserbehandlung an Hand der durchgeführten Analysen der Wasserqualität

in den einzelnen Behandlungsstufen dargestellt.

In der ersten Behandlungsperiode im Jahr 2024 war die Belastung des Sickerwassers (Schacht H) deutlich höher als im Zeitraum ab Juni 2025. Das gilt besonders für Al (Abb. 5), aber auch für andere Metalle, von denen die Werte für Zn und Cd in den Abb. 6 und 7 dargestellt sind.

Abb. 5 zeigt, dass bereits in den Speicherbecken eine deutliche Reduzierung des **Aluminium**gehalts im Sickerwasser stattfindet. Hierfür sind zwei Prozesse verantwortlich:

(1) Das Ausgasen von im Wasser gelöstem Kohlendioxid (CO_2). Dies führt zum Anstieg des pH-Wertes und damit zur teilweisen Ausfällung des gelösten Al^{3+} .

(2) Das Absetzen von Hydroxidschlamm, der entweder bereits aus dem Sickerwasserschacht mit hochgepumpt wurde, oder der nachträglich im Speicherbecken durch die pH-Wert-Erhöhung ausgefallen ist. Das restliche gelöste Al wird im Travertinfilter (TV) ausgefällt und dort zurückgehalten. Allerdings gibt es einige wenige Versuchsphasen, bei denen ein höherer Al-Gehalt aus dem Filter getragen wird als ursprünglich im Sickerwasser vorhanden war. Dies hängt damit zusammen, dass der Travertin sehr feinkörnige Tonminerale enthält, die in der Einfahrphase des Filters ausgeschwemmt werden und damit den Analysenwert für Al erhöhen. Die Tonminerale werden in den nächsten Stufen VFBR und Pflanzenbecken (Wetland) zurückgehalten.

Abb. 6 zeigt die Konzentrationen für **Zink** im Sickerwasserschacht und im Ablauf

Neutralisation:
 $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$
Ausfällung von Aluminiumhydroxid:
 $\text{Al}^{3+} + 3 \text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3\downarrow$

Sulfatreduktion:
 $\text{SO}_4^{2-} + 2\text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HS}^- + 2\text{HCO}_3^-$
Ausfällung der Metalle (Zn, Cd, Cu, Ni):
 $\text{Zn}^{2+} + \text{HS}^- \rightarrow \text{ZnS}\downarrow + \text{H}^+$

Abb. 3: Vereinfachte Darstellung der Reaktionen im Kalksteinfilter und im Vertical Flow Bioreaktor (VFBR)

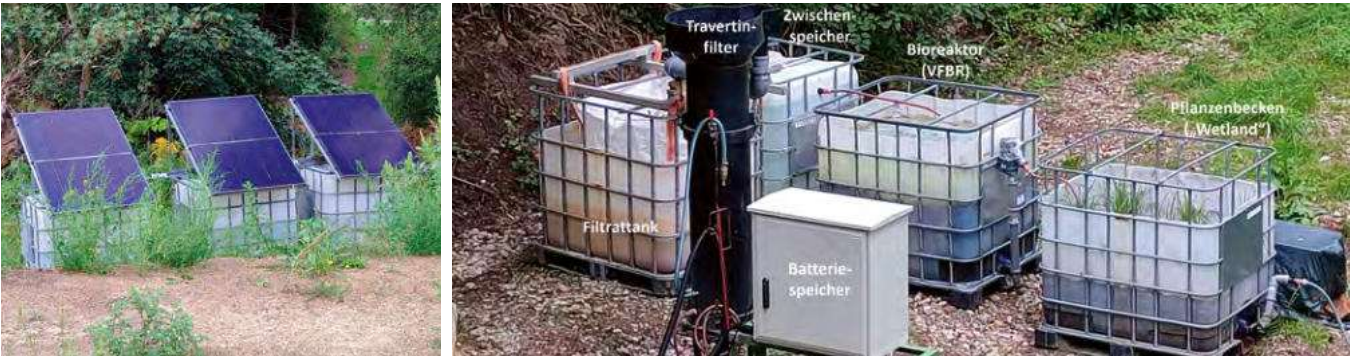


Abb. 4: Aufbau der Pilotanlage: PV-Module und Speicher-IBC (links) sowie Verfahrensstufen Travertinfilter, Zwischenspeicher, Vertical Flow Bioreaktor (VFBR) und Pflanzenbecken (rechts) (Fotos: E. Janneck)

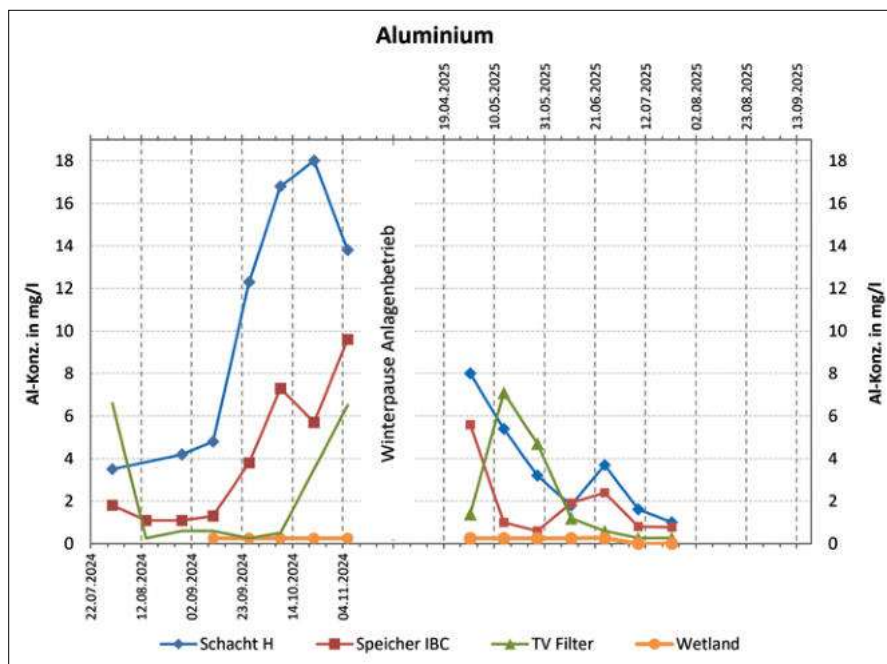


Abb. 5: Al-Konzentrationen im Zulauf der Pilotanlage (Schacht H) und im Ablauf der einzelnen Verfahrensstufen

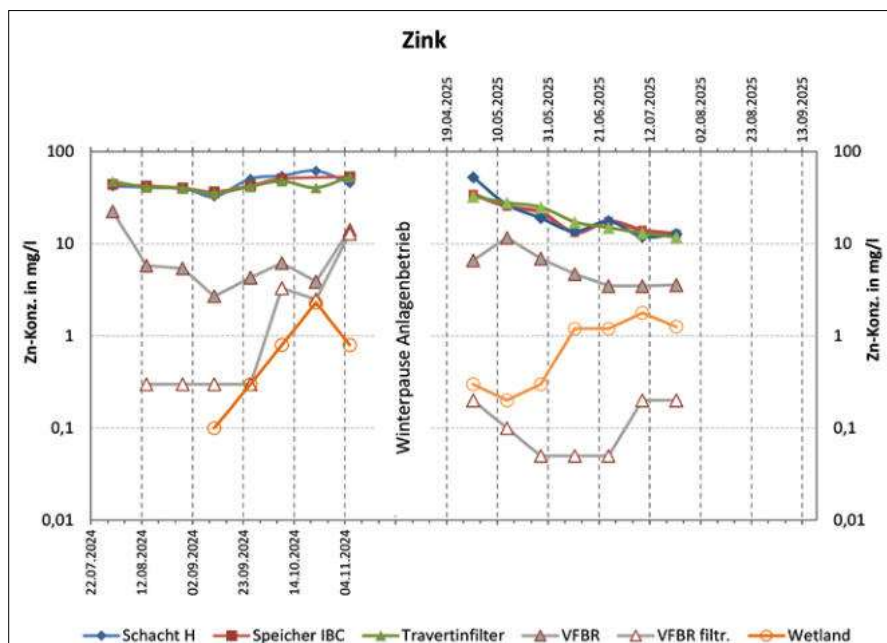


Abb. 6: Zn-Konzentrationen im Zulauf der Pilotanlage (Schacht H) und im Ablauf der einzelnen Verfahrensstufen

der einzelnen Behandlungsstufen. Zur besseren Sichtbarkeit der niedrigen Zn-Konzentrationen in Behandlungsstufen VFBR und Wetland wurde die logarithmische Darstellung der Messwerte gewählt.

In den ersten beiden Stufen (Speicher IBC und TV Filter) erfolgt beim Zn keine Veränderung der Konzentration. Erst im Bioreaktor sinken die Zn-Konzentrationen erwartungsgemäß stark ab, weil die Ausfällung von schwer löslichem ZnS erfolgt (Abb. 3). Es fällt jedoch auf, dass die Werte für Zn-gelöst (filtrierte Probe) noch einmal eine Zehnerpotenz niedriger sind als für Zn-gesamt (unfiltrierte Probe). Dies liegt daran, dass sich bei der Fällung von ZnS

extrem kleine (fast kolloidale) Kristallkeime bilden, die teilweise aus dem Bioreaktor ausgetragen werden, und die im Gegensatz zum $\text{Al}(\text{OH})_3$ keine Flocken bilden und nicht sedimentieren. Im anschließenden Pflanzenbecken wird ein Großteil dieser feinsten Kristallkeime zurückgehalten. Die Effizienz der Rückhaltung hängt aber von den Betriebsbedingungen des Pflanzenbeckens ab.

Ein anderer sich auf die Zn-Abtrennung negativ auswirkender Effekt muss bei der Interpretation der Daten in Abb. 6 berücksichtigt werden. Es fällt auf, dass am Ende der ersten Versuchsperiode (November 2024) die Zn-Abtrennung im VFBR

deutlich schlechter wird. Dies hängt mit der sinkenden Wassertemperatur ($< 5^\circ\text{C}$) zusammen, welche zu einer Verlangsamung der Sulfatreduktion führt. Folglich steht damit weniger HS^- zur Bildung von ZnS zur Verfügung.

Abb. 7 zeigt die Konzentrationen für **Cadmium** im Sickerwasserschacht und im Ablauf der einzelnen Behandlungsstufen. Die Abtrennung von Cd aus dem Sickerwasser ist im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) besonders wichtig, weil Cadmium und seine Verbindungen als „prioritäre gefährliche Stoffe“ eingestuft sind. Die Gründe dafür sind: Cd ist hochgiftig für Wasserorganismen, es kann sich in Nahrungsketten anreichern (Bioakkumulation) und es ist wie die anderen Metalle auch biologisch nicht abbaubar.

Ähnlich wie beim Zn erfolgt in den ersten beiden Stufen der Pilotanlage keine wesentliche Veränderung der Cd-Konzentration. Im Ablauf des VFBR wurden dann nur noch Cd-Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Das bedeutet, dass die Cd-Konzentrationen mit Sicherheit kleiner sind als $0,01 \text{ mg/l}$. Durch Verbesserung der Bestimmungsgrenze wurden bei den letzten Versuchen (ab Juli 2025) sogar Werte $< 0,001 \text{ mg/l}$ nachgewiesen.

Zusammenfassung und Ausblick

In Tab. 2 sind die durchschnittlichen Werte der Metallabtrennung in der Pilotanlage (Verhältnis Ablauf/Zulauf) für die erste Versuchsperiode (2024) zusammengefasst. Diese Werte sind vielversprechend und zeigen, dass eine Abtrennung der im Sickerwasser der Hammerberghalde enthaltenen Metalle durch ein mehrstufiges passives Wasserbehandlungsverfahren möglich ist. Als eine für das Scale-up wichtige Leistungskennziffer wurde eine Abtrennleistung für Zn von $17,4 \text{ g Zn pro Kubikmeter Biomix und Tag}$ ermittelt.

Die Ergebnisse bilden eine solide Grundlage für das Scale-up des Verfahrens und für die Anwendung ähnlicher passiver Verfahrenskombinationen an anderen Orten des Altbergbaus im Erzgebirge.

Das Projektteam MindMontan (TU Bergakademie Freiberg, Fa. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Förderverein MindMontanregion Erzgebirge e. V.) arbeitet in enger Kooperation mit den Fachbehörden des Freistaats Sachsen sowie den regionalen und örtlichen Vollzugsorganen an der weiteren Entwicklung dieser Verfahren und deren breiten Anwendung an

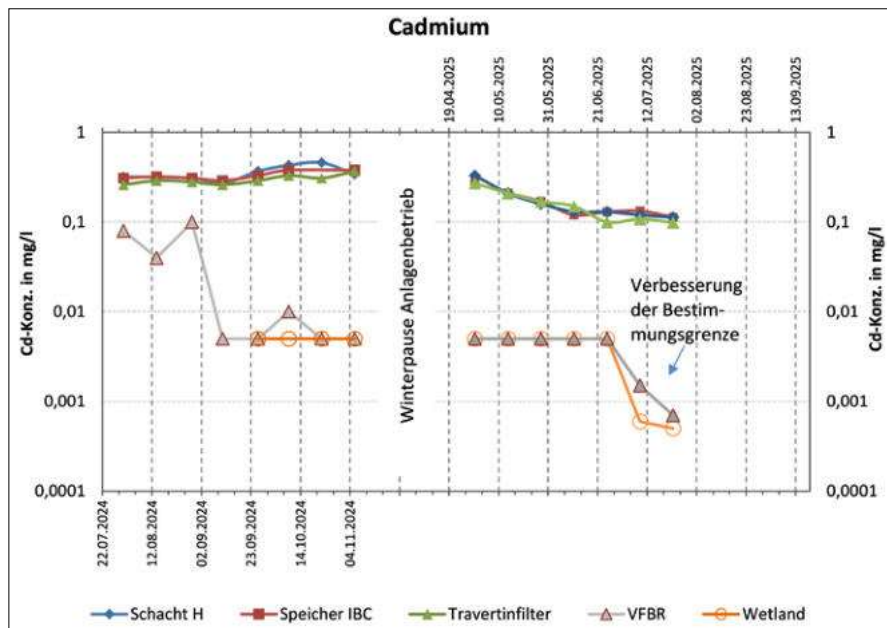


Abb. 7: Cd-Konzentrationen im Zulauf der Pilotanlage (Schacht H) und im Ablauf der einzelnen Verfahrensstufen

Altbergbaustandorten im Erzgebirge und weltweit.

Unser ausdrücklicher Dank geht an die SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH und den

Geschäftsführer Heiko Schwarz sowie die Projektleiterin Sabine Meißner für die umfangreiche Hilfe während der Projektarbeit.

Tab. 2: Durchschnittliche Werte der Metallabtrennung in der Pilotanlage am Hammerberg

Element	Schacht H	Pflanzenbecken	Behandlungseffizienz (Metallabtrennung)
	mg/l	mg/l	%
Al	10,5	0,25	98
Cd	0,36	0,005	99
Cu	0,60	0,030	95
Ni	0,12	0,025	79
Zn	46,8	0,86	98

Referenzen:

- [1] B. Kleinmann, J. Skousen, T. Wildeman, B. Hedin, B. Nairn J. Gusek (2021): The Early Development of Passive Treatment Systems for Mining-Influenced Water: A North American Perspective. *Mine Water and the Environment* (2021) 40:818–830, <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00817-8>
- [2] Hedin, B.: AMD Treatment and AML Reclamation at the Pittsburgh Botanic Garden, Firmenprospekt Hedin Environmental, 195 Castle Shannon Blvd. Pittsburgh
- [3] The Water and Abandoned Metal Mines programme. <https://www.gov.uk/government/collections/metal-mine-water-treatment> [Zugriff: 2025-08-11]
- [4] Wolkersdorfer, Chr.; Younger, P. L. (2002): Passive Grubenwassereinigung als Alternative zu aktiven Systemen. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 2/ 2002, S. 67-77

1 G.E.O.S. Ingenieur Gesellschaft mbh, Schwarze Kiefern, 09633 Halsbrücke

2 TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften, Lessingstr. 45, 09599 Freiberg, Kontakt: Sabrina.Hedrich@bio.tu-freiberg.de

Der ungeahnte Beitrag, den Glas zum Umgang mit Reststoffen leisten kann

Stephan A. H. Sander, Sindy Fuhrmann

Rohstoffe und Reststoffe – ein Problem der Zukunft?

2015 definierten die Vereinten Nationen (UN) 17 Ziele, die für alle Länder dieser Erde eine nachhaltige Entwicklung auf ökonomischer, ökologischer und sozialer Ebene sicherstellen sollen¹. Darunter finden sich Ziele, wie die Sicherstellung menschenwürdiger Arbeit und nachhaltigem Wirtschaftswachstum (#9), nachhaltiger Konsum und Produktion (#12) sowie Maß-

¹ A/RES/70/1 - Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development; <https://docs.un.org/en/A/RES/70/170/1>

nahmen zum Klimaschutz (#13) als auch zum Schutz von Leben im Wasser (#14) und an Land (#15). Aktuell scheint die Realität davon an vielen Stellen noch weit weg zu sein, begleiten uns doch ständig Nachrichten vom umweltschädlichen Abbau von Ressourcen, Produktdesigns, bei denen Nachhaltigkeit oft nur eine untergeordnete Rolle spielen oder gar vermieden wird (Stichwort „geplante Obsoleszenz“), und die ständig wachsenden Mengen an Rest- und Abfallstoffen aus der Produktion bzw. Produkten nach Ende ihrer Nutzungsdauer.

Offensichtlich ist die Frage: Wohin mit all den Reststoffen? Alles, was heutzutage nicht recycelt wird oder werden kann, wird entweder direkt deponiert oder einer thermischen Verwertung zugeführt – d. h. zur Energiegewinnung verbrannt, um zumindest die im brennbaren Material gespeicherte Energie nutzen zu können. Die zurückbleibende Asche wird ebenfalls deponiert und mit ihr, bzw. mit dem Deponiematerial, landen wertvolle, für unsere Technologie wichtigen Metalle ebenfalls auf der Deponie und werden der Materialwirtschaft entzogen („vergraben“).