

# MÖGLICHKEITEN DES SCHADSTOFFRÜCKHALTS IN UNTERIRDISCHEN GRUBENGEBÄUDEN DES ERZ- UND SPATBERGBAUS

Mirko Martin<sup>1</sup>, Eberhard Janneck<sup>1</sup>, Michael Paul<sup>2</sup>, Jürgen Meyer<sup>2</sup>, Ulf Jenk<sup>2</sup>, Delf Baacke<sup>2</sup>

**Kurzfassung:** Der Chemismus von Oberflächenwasserkörpern kann in von Bergbau betroffenen Regionen stark durch Austräge von Grubenwässern beeinflusst sein. Eine aktive Reinigung der Bergbauwässer nach Austritt aus den Bergwerken stellt sich oft als sehr kostspielige und langfristige Maßnahme dar und ist in Revieren mit seit Längerem auflässigem Bergbau technisch schwierig umzusetzen. In einer im Rahmen des EU-Projektes „Vita-Min“ erarbeiteten Studie wurden verfahrenstechnische Möglichkeiten betrachtet, die in der Lage sind, Schadstoffe bereits im Grubengebäude zurückzuhalten oder im Transferbereich Grube-Tagesoberfläche abzuscheiden. Dazu erfolgte eine Recherche zum Stand der Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet unter Einbeziehung der langjährigen Erfahrungen der Wismut GmbH bei der Bergbausanierung. Anhand einer Auswertung chemischer Daten wichtiger Bergbauwässer in Sachsen wurden einerseits die relevanten chemischen Elemente, andererseits die wichtigsten Quellen für Schadstoffausträge abgeleitet. Verfahrensoptionen wie In-situ-Quellimmobilisierung, Oxidation/Sedimentation im Transferbereich, Grubenwasserbewirtschaftung, In-situ-Neutralisation-Fällung-Sedimentation und reduktive Prozesse einschließlich Sulfidfällung werden charakterisiert. Umsetzungsmöglichkeiten von In Situ-Maßnahmen werden am Beispiel der Buntmetallerz-Grube Freiberg verdeutlicht. Abschließend werden mögliche In-Situ-Maßnahmen diskutiert, welche für künftige Bergbauprojekte in Sachsen potentiell relevant sind.

**Abstract:** The water quality of surface water bodies in mining regions can be significantly impacted by mine water discharges. Active treatment of mine water discharges from abandoned mines is cost-intensive, technically difficult and comes as a long-term obligation. These concerns led to ideas for contaminant retention underground. In a study conducted in the course of the EU research project “Vita-Min” options for contaminant retention inside mine workings or in the transfer area between mine and surface were investigated. The approach was based on a literature study on the state-of-the-art in this field taking into account the long-standing experience of Wismut GmbH in the field of mine remediation. The analysis of chemical mine water data from regions with abandoned mining in Saxony led to the derivation of the most relevant chemical elements of concern as well as of the most significant pollutant sources. Technologies like in-situ-immobilization, oxidation-precipitation-sedimentation in the transfer area, optimization of mine water management, In-situ-neutralisation-precipitation-sedimentation and reductive processes including sulphide precipitation are characterized. A potential implementation of in-situ retention options are discussed for the case of the abandoned Freiberg non-ferrous metal mine. Finally, measures for in-situ mine water treatment relevant for future mining projects in Saxony will be discussed.

## Einleitung und Hintergrund

Der Untertagebergbau auf Erze und Spate führt zwangsläufig zu markanten Störungen der geohydrochemischen Gleichgewichtszustände in den abgebauten Lagerstätten und deren geologischem bzw. hydrogeologischem Umfeld. Es treten bergbaubedingte Stofffreisetzungen und -emissionen auf infolge der Entwässerung, Auflockerung, Belüftung und Auswaschung mobilisierbarer Bestandteile der erzführenden Gesteine unter Freisetzung umweltrelevanter Stoffe. Die Grundwasserneubildung führt zu Zuflüssen von Oberflächenwässern und damit zur Bildung von Grubenwässern. Die Abführung dieser Wässer war Voraussetzung für den Bergbau, so dass vielfach Entwässerungstollen angelegt wurden.

---

1 G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke

2 Wismut GmbH, Chemnitz

Nach Einstellung des Erz- und Spatbergbaus verbleiben umfangreiche untertägige Hohlräume mit Lockermassen und Grubenschlämmen. Der Austrag erfolgt dabei in nahezu allen stillgelegten sächsischen Bergbaurevieren weiterhin überwiegend über Wasserlösestollen als maßgebliche Elemente untertägiger Entwässerungssysteme. Die wichtigsten Entwässerungstollen haben nach ihrem zum Teil jahrhundertelangen Fortbestehen weiterhin die Funktion unterirdischer Drainagesysteme für die Grubenwässer. Die Gebirgsauflockerung, Belüftung und Auswaschung mobilisierbarer Bestandteile der erzführenden Gesteine führt häufig zu beträchtlichen Schadstoffgehalten der Stollnwässer, die in die Vorfluter gelangen.

Die einfachste Möglichkeit zur Vermeidung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer, ein Verschluss der Wasserlösestollen, ist nicht zielführend. Die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet eines Stollens führt dann zu einem Aufstau der Grubenwässer und in der Folge zu unkontrollierten und diffusen Wasseraustritten mit nachfolgenden Bergschäden. Die Erhaltung der geordneten Wasserableitungsfunktion von Stollen ist daher zwingend erforderlich.

Der Chemismus von Wasserkörpern kann in von Bergbau betroffenen Regionen stark durch Austräge von Grubenwässern beeinflusst sein. Studien in der Vergangenheit zeigten, dass die Wasserlösestollen im Erzgebirge wesentlich zum Eintrag zahlreicher Schadstoffe (vor allem Schwermetalle und Arsen) in die Oberflächengewässer beitragen.

Die Grubenwässer der ehemaligen großen Uranbergwerke in Zuständigkeit der Wismut GmbH im Raum Sachsen-Thüringen werden nach Stand der Technik gereinigt. Daneben existiert jedoch eine Vielzahl anderer Bergbauwässer, so z.B. der früheren Buntmetall- sowie Fluss- und Schwerspatgruben, bei denen keine Wasserbehandlung erfolgt. Eine Reinigung von Grubenwässern stellt sich oft als sehr kostspielige und langfristige Maßnahme dar. Hauptprobleme sind dabei der Platzbedarf entsprechender Anlagen, der verfahrenstechnische Aufwand, die geordnete Entsorgung kontaminierter Behandlungsrückstände und die Notwendigkeit der Behandlung großer Wassermengen bei langsam sinkenden Schadstoffkonzentrationen. Oftmals ist eine aktive Wasserbehandlung unter diesen Randbedingungen unverhältnismäßig. Dies führt zu der Überlegung, die Schadstoffe möglichst bereits im Grubengebäude nachhaltig zurückzuhalten.

Das EU-Projekt „Vita-Min“ ist ein Verbundprojekt im sächsisch-tschechischen Kooperationsprogramm zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit, das durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert wird. Das Projekt wird vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Leadpartner), der Stadtverwaltung Oelsnitz/Erzgebirge und dem tschechischen Bezirk Ústecký umgesetzt. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Studie zu verfahrenstechnischen Möglichkeiten, die in der Lage sind, Schadstoffe bereits im Grubengebäude zurückzuhalten, erarbeitet. Ziel der Studie war es, die Auswirkungen der Wasserlösestollen auf den Schadstofftransport in der Mulde/Elbe sowie die Wirkung von Rückhaltemaßnahmen und die Prognose der regionalen und überregionalen Auswirkungen auf den Zustand der Gewässer abzuschätzen. Dabei wurden technisch realisierbare und verhältnismäßige Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstoffausträgen aus unterirdischen Grubengebäuden geprüft, die eine Verbesserung der Gewässerqualität in der Mulde und damit in der Elbe bewirken können.

## Elementspektrum

### Beurteilungswerte

Die Konzipierung von In situ-Schadstoffrückhaltmaßnahmen erfordert eine Konzentration auf relevante Schadstoffe. Dazu wurden in einem ersten Schritt Beurteilungswerte für Elementkonzentrationen in Wässern recherchiert und später im Vergleich mit Analysendaten zur Einschätzung der Relevanz der Elemente verwendet.

In Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind bundeseinheitliche Qualitätsnormen für folgende Elemente festgesetzt worden (WRRL 2000, ständige Fortschreibung: WRRL 2006, WRRL 2008, WRRL 2009, WRRL 2013, WRRL 2014, i.V.m. Anlage 9 Nr. 3.3 Verordnung zum Schutz von Oberflächengewässern - OGewV vom 20. Juni 2016; BGBl. S. 1373):

- zur Beurteilung des chemischen Zustands: Cadmium, Blei, Quecksilber, Nickel
- zur Beurteilung des ökologischen Zustands bzw. des ökologischen Potenzials: Arsen, Chrom, Kupfer, Zink, Selen, Silber, Thallium.

Zusätzliche Beurteilungswerte ergeben sich aus anderen gesetzlichen Vorgaben (z.B. Trinkwasserverordnung) sowie weiteren Literaturquellen (Matthes 1990, Nendza 2003) für folgende Elemente:

- Sulfat, Aluminium, Bor, Barium, Beryllium, Cobalt, Eisen, Lithium, Molybdän, Uran.

## Elementspektrum sächsischer Grubenwässer

Das reale Spektrum der in den Grubenwässern vorhandenen Elemente lässt sich anhand von chemisch-analytischen Untersuchungen ableiten. Grubenwässer sind in Sachsen vor allem in Form der Stollenwässer für die Untersuchung zugänglich, die über die Wasserlösestolln ab- und den Oberflächengewässern zugeführt werden. Solche Wässer waren in der Vergangenheit verschiedentlich Gegenstand hydrochemischer Untersuchungen und sind auch gegenwärtig Bestandteil des von der BfUL durchgeführten Programmes zur Erfassung der Gewässergüte. Im vorliegenden Datenbestand konnten Datensätze von 39 Stollnwässern recherchiert werden, aus denen die Gütedaten extrahiert und statistisch ausgewertet wurden. Dabei wurde zum einen die Anzahl von Überschreitungen bei dem jeweiligen Parameter bewertet, zum anderen die Höhe der maximalen Überschreitung.

Tab. 1 Spektrum der für In-situ-Rückhaltemaßnahmen relevanten Parameter

Buntmetallbergbau: Silber, Blei, Zink	Buntmetallbergbau: Zinn, Wolfram	Uranbergbau	Spätbergbau: Fluorit, Baryt
pH	Arsen	pH	Fluorid
Arsen	Cadmium	Arsen	Cadmium
Blei	Nickel	Cadmium	Zink
Cadmium	Kupfer	Nickel	Nickel
Zink	Zink	Kupfer	Arsen
Eisen	Eisen	Zink	Kupfer
Aluminium	Beryllium	Eisen	Barium
Quecksilber	Bor	Selen	Uran
Kupfer	Molybdän	Uran	
Nickel	Uran	Silber	
Silber	Fluorid		
Thallium			
Uran			
Fluorid			
Silber			

Erwartungsgemäß zeigte sich bei Cadmium in 95 % der Stollnwässer eine Überschreitung der Umweltqualitätsnorm, bei Ni lag der Wert bei 64 %. Bei den selteneren Elementen Selen und Thallium lagen Überschreitungen bei 10 bzw. 18 % der Wässer vor. Erhöhte Überschreitungs-raten fanden sich bei Be (75 %), Cu (59 %) und Zn (92 %). Aus diesen Betrachtungen wurde das Spektrum relevanter Elemente in den sächsischen Grubenwässern abgeleitet und in Tab. 1 dargestellt.

Anhand der Überschreitungs-raten und der Faktoren der maximalen Überschreitung lassen sich Reihungen der Parameter ableiten, welche ein Maß für die Relevanz der Parameter bzw. Elemente darstellen (vgl. Abb. 1).

Reihung Überschreitungsrates innerhalb der 39 Stollnwässer																		
B	Li	Fe	Pb	Mo	SO4	Se	Tl	Al	Ba	As	U	Co	Cu	Ni	Be	Zn	Cd	
0	0	2,6	5,1	7,7	7,7	10,3	17,9	23,1	25,6	36	41	43,6	59	64,1	74,4	92,3	94,9	%
Reihung der maximalen Überschreitung (Faktor)																		
Li	B	SO4	Tl	Fe	Pb	Ba	Se	Mo	Al	As	U	Ni	Co	Cu	Be	Zn	Cd	
0,24	0,97	1,4	2	2,3	3,9	6,8	10	12,4	19	29	43,5	52,5	63,3	67,5	78	1143	1875	-fach

Abb. 1 Reihung wesentlicher Parameter der 39 betrachteten sächsischen Stollnwässer nach Überschreitungsrates und maximaler Überschreitung

## Relevante Bergbaureviere

Neben den Grubenwässern des Freiburger Reviers zeigten die der Bergbaureviere Schneeberg, Johanngeorgenstadt, Ehrenfriedersdorf, Marienberg und Zinnwald die größte Relevanz mit signifikanten Stoffausträgen.

## Verfahrensoptionen

### Fallstudien der Wismut GmbH

An den Grubenstandorten der Wismut GmbH wurde eine Anzahl Fallstudien zum In-situ-Schadstoffrückhalt auf verschiedenen Maßstabsebenen durchgeführt und bewertet. Ein Schwerpunkt war dabei die Grube Königstein. Einen Überblick gibt Tab. 2.

Tab. 2 Fallstudien der Wismut GmbH zum In-situ-Schadstoffrückhalt

Maßnahme	Beschreibung; Anwendungsort
Grubenwasser-Management	Verminderung des Schadstoffaustrages aus dem Flutungsraum durch Reduzierung des GW-Durchflusses; Bergmännische Ertüchtigung Marks-Semmler-Stollen; Grube Schneeberg
In-situ-Quellimmobilisierung; hoher Flutungswassereinstau	Hoher Flutungswassereinstau zur Minimierung der oxidativ getragenen Stoffnachlieferung und zur Minimierung der Grubenwassermenge; Grube Ronneburg
In Situ-Fällung	Gesteuerte Barytfällung im Porenraum des Sandsteins von Laugungsblöcken; Grube Königstein
In-situ-Neutralisation/Fällung mittels Kalkmilch	In-situ-Behandlung eines hochbelasteten, stark sauren, eisenhaltigen Teilstromes durch Neutralisation und Fällung mittels Kalkmilch; Grube Ronneburg
In-situ-Neutralisation/Pufferung	Eintrag von Pufferfluidlösungen in den Grubenhohlraum; Grube Königstein (Jenk et al. 2014)
In-situ-Zementation	Eiseneinlagerungen in einer Grundsohle zur Beeinflussung chemisch-physikalischer Parameter des zugeführten Flutungsmediums; Grube Königstein
In-situ-Oxidation	In-situ-Abtrennung von Eisen und Arsen durch Oxidation von sauerstofffreiem Flutungswasser im Rahmen des grubeninternen Wasser- und Bewetterungsmanagements; Grube Pöhla, Teilfeld Hämmerlein
In-situ-Reduktion	Natürliche In Situ-Abtrennung von Uran, Mangan, Nitrat, Sulfat durch Reduktion von Flutungswasser im Rahmen des grubeninternen Wasser- und Bewetterungsmanagements; Grube Pöhla, Teilfeld Tellerhäuser
In-situ-Reduktion	In-situ-Abtrennung von Uran durch Reduktion von Flutungswasser sowie Anreicherung von mobilem Eisen im Flutungswasser mit Eisenpulver im Schacht 371; Grube Schlema-Alberoda

## Grundlagen der Verfahrensoptionen

Den Verfahrensoptionen zum In-situ-Schadstoffrückhalt liegen hauptsächlich folgende chemische Prozesse zugrunde:

- Neutralisation/Fällung, z.B. Fällung von Schwermetallen mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Oxidation, z. B.  $\text{As}(\text{III}) \rightarrow \text{As}(\text{V})$ ,  $\text{Fe}(\text{II}) \rightarrow \text{Fe}(\text{III})$
- Sedimentation, z.B. Nutzung von Flutungsräumen
- Reduktion, chemische Reduktionsmittel, z.B.  $\text{Fe}(0)$
- Reduktion, biologische Reduktionsprozesse, z.B. mikrobiologische Sulfatreduktion, Kombination mit Sulfidfällung
- Adsorption, z.B. As an  $\text{Fe}(\text{III})$ -Verbindungen, Schwermetalle an  $\text{CaCO}_3$

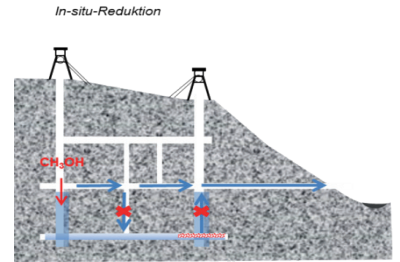
Hinsichtlich des Ortes des Eingriffs der In-situ-Rückhaltmaßnahmen lässt sich folgende Einteilung vornehmen:

### Eingriff in den Flutungsraum

- Modifizierung Grubenwassermanagement
- Modifizierung Flutungsmanagement
- Reduktive Schadstofffixierung im zentralen Flutungsraum
- Schadstofffixierung durch Fällung/Neutralisierung im zentralen Flutungsraum
- Hoher Grubenwassereinstau zwecks Luftabschluss

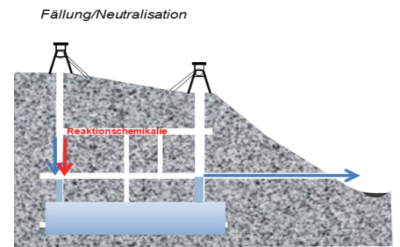
### In-situ-Reduktion

- In-situ-Abtrennung von Schadstoffen durch Reduktion bei Separierung Flutungsraum; Reduzierung Grundwasserzufluss bzw. Sauerstoffeintrag
- Ggf. zusätzliche Einleitung anorganischer oder organischer Reduktionsmittel (z. B. Eisen, Alkohole) in Flutungsraum
- potentiell abtrennbar: Redoxsensitive Schadstoffe, insbesondere Uran, Eisen, Mangan, Nitrat, Sulfat



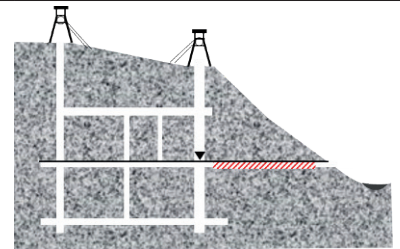
### In-situ-Neutralisation/Fällung

- In-situ-Behandlung eines kontaminierten Wasserteilstromes durch Fällung bzw. ggf. Neutralisation
- Zugabe eines Fällungsmittels zur Bildung schwer löslicher Schadstoffverbindungen; ggf. kombinierte Zugabe von Neutralisations- bzw. Flockungsmitteln
- Anstrom mit Schadstoffbelastung, untertägiger Sedimentationsraum mit deutlicher Querschnittsaufweitung, definierter Über- bzw. Ablauf
- potentiell abtrennbar: Hydrolyse-sensitive Metallionen, z.B. Zink, Cadmium, Aluminium, Eisen



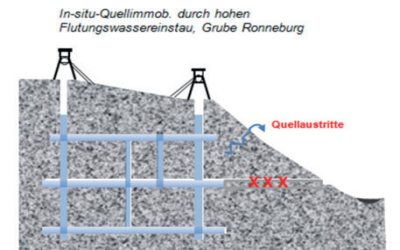
### Reaktionsstrecke/Barriere

- In-situ-Abtrennung durch chemische Reaktionen im Stolln bzw. einer Strecke
- Wasserströmung in Stollnumbruch oder Seitenstrecke, Einbringen von reaktivem Material, beidseitiger Abschluss mit Dämmen
- potentiell abtrennbar: Metallionen, z.B. Zink, Cadmium, Aluminium, Eisen



### In-situ-Quellimmobilisierung durch hohen

- Flutungswassereinstau
- Minimierung der Stoffnachlieferung aus Flutungsraum durch Reduzierung der Oxidationszone und langfristig partielle Reduktion der Grubenwasserinhaltsstoffe
- Flutung des Grubengebäudes bis zum natürlichen Überlaufniveau (ohne Abflussstollen oder Pumpschacht) potentiell abtrennbar: nahezu alle relevanten Elemente, da Oxidation/ Lösung verhindert wird



### Oxidation/Sedimentation (Transferbereich)

- In-situ-Abtrennung von Schadstoffen durch Oxidation von sauerstoffreichem Flutungswasser
- grubeninterner Wasserabfluss über belüfteten Stollen oder grubeninterne separate Wasserteilströme zwecks Vermischung
- potentiell abtrennbar: Redoxsensitive Schadstoffe, insbesondere Eisen und Arsen

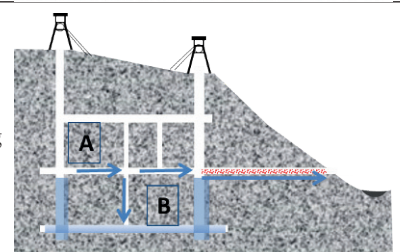


Abb. 2 Verfahrensansätze zum In-situ-Rückhalt von Schadstoffen im Erz- und Spatbergbau (Auswahl)



### Eingriff in den Transferbereich Grube-Tagesoberfläche

- am Abfluss der Grubenwässer (z.B. Wasserlösungsstollen) besteht wegen der verhältnismäßig besseren Zugänglichkeit die prinzipielle Chance der Beschaffenheitsbeeinflussung und Schadstoffrückhaltung unter Tage
- Alternativ ist Sauerstoffzufuhr über zufließende Grundwässer möglich
- Möglichkeit der In-situ-Fällung und Schlammsedimentation im abströmenden Flutungswasser ohne weitere verfahrenstechnische Aufwendungen

In Abb. 2 werden wesentliche Optionen zum In-situ-Schadstoffrückhalt näher charakterisiert.

## Anwendungsmöglichkeiten - Freiburger Revier

Der Grubenwasseraustrag aus dem Freiburger Bergrevier erfolgt in der Hauptsache auf zwei Grubenniveaus:

- oberes Niveau über den Verträgeliche Gesellschaft Stolln (VGS), den Hauptstollnumbruch (HU) und Erzbahnstollen (EBS)
- tiefes Niveau über den Rothschönberger Stolln (RSS), gemeinsam mit tiefen Niveaus der Reviere Brand-Erbisdorf und Halsbrücke

Die Freiburger Mulde weist an der Messstelle Obergruna vor allem bei Cd eine deutliche Überschreitung der Umweltqualitätsnorm auf. Im Sediment treten hohe Überschreitungen bei As (11,5fach) und Zn (8-fach) auf. Die Stollnwässer (v. a. VGS und HU) weisen hohe Konzentrationen von Pb, Cd, Ni und Se auf. Dies spiegelt sich in den Frachten und in den Anteilen der Stollnwässer an der Fracht der Freiburger Mulde wider. Hohe Frachtanteile > 30 % zeigen die Stollnwässer bei Al, Be, Cd, Co, Cu, Ni, Se, U und Zn.

Durch entsprechende Maßnahmen an den Stollnwässern besteht also die Möglichkeit, insbesondere bei Cd, Se, U und Zn eine deutliche Verbesserung der Wasserqualität der Freiburger Mulde zu erreichen.

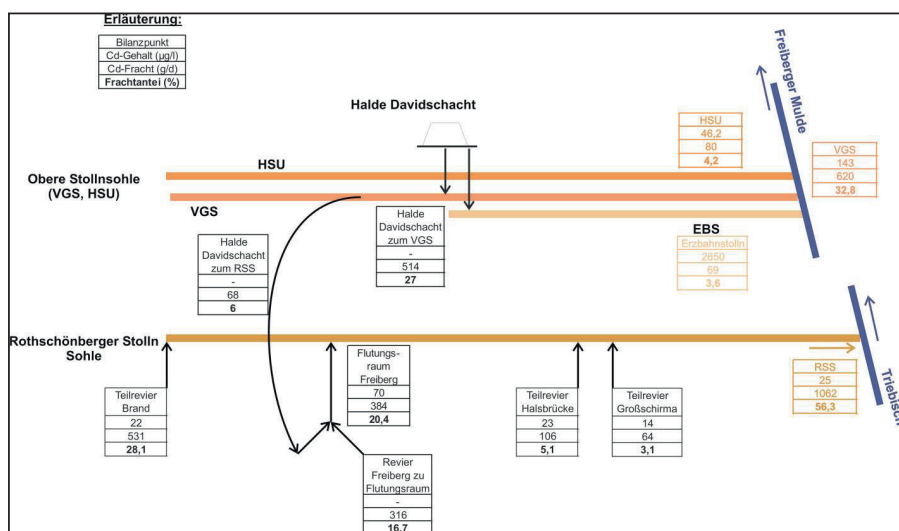


Abb. 3 Modell der Cd-Austräge des Freiburger Bergbaureviers mit oberer (VGS, HSU, EBS) und tiefer Stollnsohle (RSS) (aus Martin et al. 2016)

Abb. 3 zeigt ein konzeptionelles Modell der Cd-Austräge des Freiburger Bergbaureviers in oberer (VGS, HSU, EBS) und tiefer Stollnsohle (RSS). Etwa 1/3 der Cd-Austräge erfolgen über den VGS in die Freiburger Mulde. Zusammen mit den anderen Stolln (HSU, EBS) beträgt der Beitrag des oberen Grubenniveaus ca. 40 %. Die größten Cd-Austräge erfolgen mit 53 % hingegen über den Rothschnöberger Stolln. Dies belegt dessen große Bedeutung als Stoffquelle im Einzugsgebiet der Elbe.

Betrachtungen zur Anwendung von In-situ-Verfahren wie Oxidation/Sedimentation (Transferbereich), Grubenwasser-Management, In-situ-Reduktion sowie Reaktionsstrecke/Barriere im Bereich des VGS haben sich zum einen wegen technischer Probleme, zum anderen wegen der hohen Mineralisierung des Stollnwassers als nicht machbar bzw. nicht geeignet erwiesen.

Als einziges machbar erscheinendes In-situ-Rückhalteverfahren verbleibt die untertägige Neutralisation/Fällung. Die Neutralisation von sauren Grubenwässern ist mit Stoffausfällungen verbunden. Daher werden entsprechende Sedimentationsräume für die anfallenden Schlämme benötigt, die nur in dem ca. 130 m unter dem VGS liegenden, vom modernen Bergbau (20. Jh.) geprägten Flutungsraum des Freiburger Reviers vorhanden sind.

Ein Großteil der Wässer des Teilreviers Grube Freiberg versinkt zunächst in den Flutungsraum und strömt unterhalb der Rothschnöberger Stollnsohle zum Schacht Reiche Zeche, dessen Füllort den niedrigsten hydraulischen Zwangspunkt bildet. Dort steigen sie auf und fließen in den Stolln über.

Ansatzpunkte für die Zugabe von Stoffen zur In-situ-Behandlung des Grubenwassers unter Einbeziehung der Wässer des VGS existieren an mehreren Stellen:

- Davidschacht über VGS-Sohle
- Davidschacht über Bohrung
- Turmhofschacht

Für eine erste Bewertung der Wirksamkeit einer In-situ-Neutralisation/Fällung wurden die Prozesse mittels PhreeqC modelliert. Dabei wurden vier Fällmittel betrachtet:  $\text{Ca(OH)}_2$  und NaOH in zwei Konzentrationen, jeweils in Mischung mit  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Letzteres diente dazu, die Fällung des Cadmiums zu verbessern. In Kopplung mit makrochemischem Fällprozess, z. B.  $\text{Fe(OH)}_3$ -Fällung.

Tab. 3 Modellierungsergebnisse der Cd-Konzentration für Flutungswasser Teilrevier Freiberg bei einer in situ-Sanierung

$\text{Ca(OH)}_2$ -Zusatz (mg/L)	NaOH-Zusatz (mg/L)	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ -Zusatz (mg/L)	resultierender pH	resultierende Cd-Konzentration ( $\mu\text{g/L}$ )
Flutungswasser			7,00	70
74	-	106	9,95	2,5
37	-	53	9,23	4,9
-	120	318	10,76	4
-	40	53	9,25	4,7

Es zeigt sich, dass Cd-Restkonzentrationen von 2-5  $\mu\text{g/L}$  bei einer Abreicherung auf ca. 1/30 der Ausgangskonzentration erreicht werden können. Dabei scheinen bereits relativ geringe Zugabemengen hinreichend zu sein.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um modellierte „ideale“ Fälle handelt. Die real erforderlichen Zugabemengen und resultierenden Restkonzentrationen müssen experimentell ermittelt werden (Labor- und Pilotversuche).



Aufgrund der für die Cd-Abtrennung erforderlichen hohen pH-Werte weisen die resultierenden Wässer ebenfalls erhöhte pH-Werte im Bereich 9 - 11 auf. Dies macht eine Nachjustierung erforderlich, was durch Zugabe geringer Säuremengen (z.B.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) oder ggf. durch Mischen mit gering mineralisierten sauren Wässern erreicht werden kann. Dies kann z.B. auf der weiteren Fließstrecke im Rothschnöberger Stolln erfolgen.

## Ausblick: Der neue Bergbau in Sachsen

In Sachsen gibt es eine Reihe von Projekten zur Wiederaufnahme des Erz- und Spatbergbaus (Tab. 4). Von diesen ist bisher die Flußspatgrube Niederschlag in Produktion gegangen.

Tab. 4 Neue Bergbauprojekte in Sachsen

Rohstoff	Lagerstättentyp	Bergbauprojekt
Lithium, Zinn	Greisenkörper	Zinnwald, Sadisdorf
Zinn, Wolfram, Eisen, Zink, Indium	Skarnlagerstätten	Pöhl-Globenstein, Pöhl-Tellerhäuser, Breitenbrunn, Geyer
Fluorit/Baryt	Ganglagerstätten	Schönbrunn-Bösenbrunn

Als Maßnahmen zur prospektiven Reduzierung von Schadstoffausträgen während des Bergbaus werden empfohlen:

- Optimierung des Grubenwassermanagements (Abschirmung)
- Optimierung der Grubengeometrie (Segmentierung)
- Reduzierung der Gebirgsauflockerung
- Maximierung untertägige Lockermasseneinlagerung (Eigenversatz)
- Hermetisierung der Versatzbereiche
- In-situ-Behandlung belasteter Grubenwässer

Eine vertikale und horizontale Grubensegmentierung einschließlich einer untertägigen Einlagerung schadstoffhaltiger Lockermassen und Grubenschlämme in hydraulisch hermetisierbaren Grubenteilen (Eigenversatz) begünstigt die Reduzierung der Schadstoffemission über den Waserpfad, zumal wenn in der Grube eine hydraulische Abschirmung bzw. Zulaufregulierung realisiert werden kann. Bergbautechnisch unvermeidliche Kontaminationen von Grundwasser-Restzuläufen bzw. Betriebswässern können einer untertägigen Behandlung unterzogen werden (z.B. Vorbehandlung/Feststoffsedimentation).

Die Voraussetzungen für eine möglichst umfassende untertägige Lockermasseneinlagerung dürften mit dem Vererzungsgrad in Relation zum bergmännischen Abbauumfang steigen. Die Auflockerung wenig bauwürdiger Armvererzungen sollte auf das technologisch notwendige Maß beschränkt bleiben. Eine untertägige Erzvorsortierung erscheint in diesem Sinne vorteilhaft. Mit der bevorzugten untertägigen Einlagerung schadstoffhaltiger Lockermassen bliebe die übertägige Aufhaldung auf eher wenig belastete Massen der Ausrichtungsgrubenbaue (Schächte, Stollen, Horizontalauffahrungen des Grubengebäudes) beschränkt, was dortige Schadstoffemissionen bzw. Sanierungsmaßnahmen begrenzt.

Nach Einstellung des Bergbaus sollte im Zuge einer planmäßigen Grubenverwahrung die hydraulische Hermetisierung schadstoffbelasteter Grubenteile, insbesondere der versetzten Abbaubereiche, vervollständigt bzw. aktiviert werden. Dabei muss die nachfolgende Flutung ermöglicht werden (Abdämmungen mit hydrostatischem Druckausgleich). Dadurch wird eine permanente Durchströmung dieser gefluteten Grubenbereiche eingeschränkt. Unter Berücksichtigung dessen

sollte eine möglichst vollständige Flutung des Grubenbereiches realisiert werden, um bergbaubedingte Oxidationsreaktionen des Grubeninventars zu vermindern.

In Fortsetzung des Wassermonitorings während des Grubenbetriebes ist die Flutung hydrologisch und hydrochemisch zu überwachen (Monitoring). Bereits mit der Erkundung über den Grubenbetrieb bis hin zur Grubenverwahrung sind Erkenntnisse zum stofflichen Systemverhalten zu erarbeiten, auszuwerten und im Sinne einer Mengen- und Beschaffenheitsprognose zu interpretieren, als fachliche Handlungsgrundlage für zweckmäßige Kompensationsmaßnahmen.

Dies trifft insbesondere auch auf die Durchführung von In-situ-Maßnahmen zur Flutungswasserbehandlung zu. Deren Durchführung ist vom chemischen Milieu des kontaminierten Flutungswassers abhängig zu machen und muss der nachhaltigen Einstellung stabiler Gleichgewichtsbedingungen mit geringen Restemissionen in bzw. aus der gefluteten Grube dienen.

## Literatur

- Jenk, U.; Zimmermann, U.; Uhlig, U.; Schöpke, R.; Paul, M. (2014): In Situ Mine Water Treatment: Field Experiment at the Flooded Königstein Uranium Mine (Germany).- *Mine Water Environ* 33, 39–47.
- Martin, M.; Aubel, T.; Sennewald, R.; Janneck, E. (2016): Weiterführende Untersuchungen zum Rothschnöberger Stolln.- G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke (AG: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaats Sachsen).
- Matthes, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2.- Verlag Gebr. Bornträger, Berlin und Stuttgart
- Nendza, M. (2003): Entwicklung von Umweltsqualitätsnormen zum Schutz aquatischer Biota in Oberflächengewässern.- Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, (UBA/F+E-Vorhaben FKZ 202 24 276).
- Sennewald, R.; Martin, M. (2014): Untersuchungen zum Grund- und Oberflächenwasser im Grenzraum Zinnwald/Cinovec (Ziel 3-Projekt VODAMIN –Teilprojekte P 03/P 06/P 12/P 17).- G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH. (AG: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaats Sachsen).