

2019

Steckbriefliche Zusammenfassung von  
Projektergebnissen im Rahmen des  
Projektes Vita-Min

## Reinigungsverfahren sowie wirtschaftliche Bewertung und Selektion der Best-Praxis- Verfahren gegen Acid-Mine- Drainage (Teilprojekt 1.8)



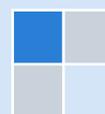
LANDESAMT FÜR UMWELT,  
LANDWIRTSCHAFT  
UND GEOLOGIE



Europäische Union. Europäischer  
Fonds für regionale Entwicklung.  
Evropská unie. Evropský fond pro  
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.  
Interreg VA / 2014–2020



## Einführung, Hintergrund und Zielstellung

Saure Grubenwässer (engl: Acid mine drainage AMD) stellen nach wie vor ein Problem in den sächsischen Bergbaurevieren dar. Hervorgerufen wird AMD durch die Verwitterung von Pyrit, Markasit oder Sphalerit aufgrund der Belüftung von Sedimenten in den Kippen des Braunkohlenbergbaus bzw. Halden des Erz- und Steinkohlenbergbaus sowie der Grundwasserabsenkung.

**Acid mine drainage, acid and metalliferous drainage (AMD) oder auch acid rock drainage (ARD):** sind saure Wässer mit hohen Gehalten an Metall-, Semimetall- und Sulfat-Ionen, die aus Erzlagerstätten, Kohlenlagerstätten, Bergwerken (Minen) und Bergbauhalden ausfließen, die Sulfidminerale, insbesondere Disulfide enthalten.

Unter anderem werden bei der Verwitterung von Pyrit sowohl Eisen- als auch Sulfat- und Wasserstoffionen freigesetzt. Einhergehend mit der Absenkung des pH-Wertes werden sonst stabil gebundene, z. T. toxische Metallionen mobilisiert. Von den Folgen sind Grund- und Oberflächengewässer gleichermaßen betroffen. Eisen(II)-, Sulfat- und die Metallionen werden mit dem Wasserfluss transportiert. Eisen wird in den Fließgewässern und Seen zunächst oxidiert, dann unter erneuter Entstehung von Säure zu Eisen(III)hydroxid hydrolysiert und als Schlamm sichtbar ausgefällt. Damit kommt es zur Trübung des Gewässers und Ablagerung von Eisenschlamm auf den Wasserpflanzen. Eisenschlämme wirken sich negativ auf die Besiedlung des Benthos aus (z. B. Krebse, Muscheln, Schnecken, Insekten). Für Fische ist vor allem die Bildung von Eisenoxiden in den Kiemen aus dem gelösten Eisen(II) gefährlich. Schwermetalleinträge in Gewässer haben in Abhängigkeit vom pH-Wert vielfältige Auswirkungen auf lebende Organismen, beispielsweise mit negativen Effekten auf das Vorkommen schwermetallsensitiver Arten. Zudem verursachen die sauren Wässer Korrosionsschäden an Bauwerken und Geräten und eine stark eingeschränkte Nutzung von sauren Tagebaurestseen.

Mit Hilfe einer umfangreichen und den Gegebenheiten angepassten Sanierung saurer Wässer kann die Umwelt vor den beschriebenen negativen Auswirkungen weitestgehend geschützt werden.

Ziel dieses Teilprojektes war es, aus der Vielzahl von Sanierungsverfahren die für die Herausforderungen in der Region geeignetsten Methoden herauszuarbeiten und wirtschaftlich zu betrachten. Hierbei ist das Augenmerk auf bereits national und international erfolgreich angewendete Verfahren gerichtet worden, aber auch neuere Forschungsansätze fanden Berücksichtigung.

## Methodik

Die Recherche und Bewertung von Reinigungsverfahren bei AMD basiert auf Ergebnissen der VODAMIN-Berichte (Teilprojekt 04, 09 und 14). Diese Verfahren, mit einem Anwendungsspektrum auf Tagebaurestseen, Fließgewässer und das Grundwasser, wurden mit der aktuellen internationalen Literatur auf Vollständigkeit und Aktualität abgeglichen und geprüft, ob weitere Verfahren zu berücksichtigen sind.

Im ersten Schritt werden die (nicht biologischen) Reinigungsverfahren zur Aufbereitung saurer Grubenwässer übersichtlich dargestellt, wobei auch die Differenzierung in aktive, passive und in-situ-Verfahren näher betrachtet wird. Zur Ermittlung des passenden Reinigungsverfahrens von Grubenwässern, Fließgewässern und Seewasser wurden, in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften, Entscheidungsbäume entwickelt. Die Reinigung von Bergbauwässern mittels (mikro-)biologischer Verfahren wurde in einer gesonderten Studie (Teilprojekt 1.9) im Projekt Vita Min betrachtet.

Außerdem wurden drei Modellgrundwässer definiert, die sich in ihren Ionenkonzentrationen an Eisen und Sulfat unterscheiden. Diese dienen als Berechnungsgrundlage zur Ermittlung von Investitions- und Verbrauchsmittelkosten für vier Verfahren, die unter sächsischen Bedingungen insbesondere bei hohen Eisen-/Sulfat-Frachten eingesetzt werden könnten.

Aufbauend auf der Literaturrecherche wurden alle Best-Praxis-Verfahren gegen AMD zusammen getragen und detailliert beschrieben. Daraus ist für jedes Verfahren ein Steckbrief erarbeitet worden, welcher beispielsweise Aussagen zu Einsatzgebiet, Rahmenbedingungen, Stand der Wissenschaft und Technik, technologischem Prinzip und Wirkungsweise, Wirkungsgrad und Dauer sowie zur Nachhaltigkeit des Sanierungserfolges, Wirtschaftlichkeit, Kosten, Genehmigungsfähigkeit ermöglicht und Fallbeispiele weltweit und in Sachsen benennt.

Ein zusammenfassender Vergleich und die Wirtschaftlichkeitsbewertung der Verfahren erfolgten in tabellarischer Form differenziert nach Anwendung für azidische sowie neutral bis alkalische Wässer. Zudem wurden speziell in Sachsen genutzte Verfahren herausgearbeitet und verfahrensspezifisch in Karten verortet.

Als gesondertes Kapitel im Bericht wurde die Behandlung von AMD in sächsischen Tagebaurestseen erörtert. Dazu wurde die Möglichkeit, die Seen natürlich versauern zu lassen der Anwendung verschiedener Reinigungsverfahren gegenüber gestellt.

Außerdem ist im Rahmen dieses Berichts eine Laborstudie zur Reaktionskinetik der Eisenoxidation durchgeführt worden, deren Ergebnisse für die Behandlung sehr saurer Wässer von Bedeutung sind.

Die Ergebnisse der recherchierten Reinigungsverfahren dieses Teilprojekts sowie weiterer Teilprojekte in Vita-Min sollen in einer Web-Anwendung der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Dazu wurde ein Umsetzungskonzept zur Integration der Reinigungsverfahren in die bestehende ATRIUM-Datenbank des LfULG, einhergehend mit der Modernisierung dieser, entwickelt.

## Ergebnisse und Diskussion

Weltweit sind zahlreiche Verfahren zur Aufbereitung der durch den Bergbau verunreinigten Wässer beschrieben (siehe Abbildung 1). In der Praxis wird davon jedoch nur ein geringer Teil eingesetzt. Beispielsweise kommen Neutralisationsverfahren von jeher zum Einsatz und werden für spezielle Einsatzgebiete angepasst und weiterentwickelt.

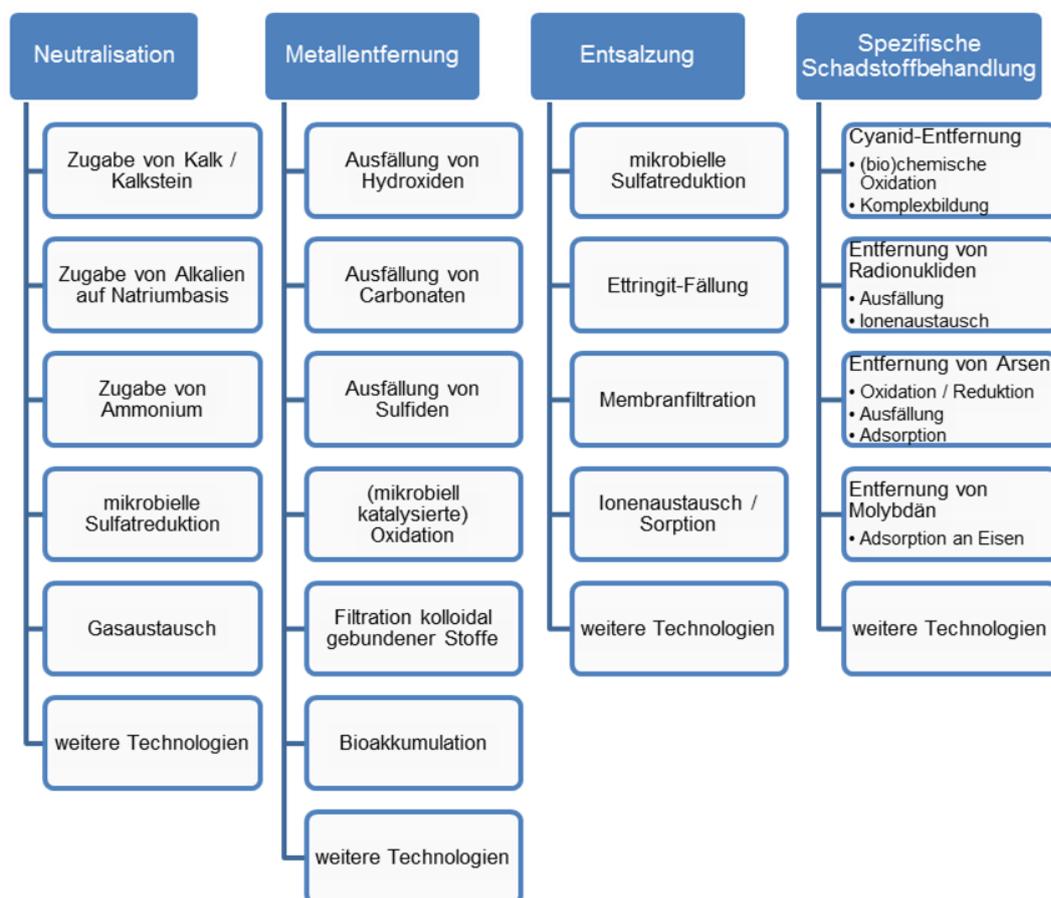


Abbildung 1: Kategorien der Aufbereitungstechnologien – Verfahrensauswahl (INAP, 2014)

Entsprechend den regionalen Besonderheiten werden an die Aufbereitung verschiedene Anforderungen gestellt. So sind z. B. in den Kohleregionen Südwestenglands nur geringe Volumenströme von wenigen m<sup>3</sup>/h zu behandeln, während im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier vor allem aktive Verfahren zur Behandlung großer Volumenströme im m<sup>3</sup>/s-Bereich zur Anwendung kommen.

## Reinigungsverfahren sowie wirtschaftliche Bewertung und Selektion der Best-Praxis-Verfahren gegen Acid-Mine-Drainage (Teilprojekt 1.8)

Mit betrachtet werden muss, inwieweit die Rückgewinnung von Wertstoffen bei der Grubenwasseraufbereitung eine Rolle spielt, wie z. B. die Nutzung von Eisenhydroxidschlamm. Insbesondere die Behandlung von Wässern stillgelegter erzgebirgischer Gruben des Erzbergbaus erfordert speziell angepasste Technologien, da diese Wässer durch ein breites Spektrum an Schwermetallen charakterisiert sind.

Grundsätzlich können die Reinigungsverfahren für Bergbauwässer in drei Kategorien eingeteilt werden – in aktive, passive und in-situ Verfahren.

Die Reinigungsleistung durch Nutzung passiver Verfahren allein, wird als unzureichend eingestuft. Durch Kombination mehrerer passiver Verfahren können zufriedenstellende Ergebnisse erbracht werden (Wieber & Streb, 2010). Auch eine Kombination mit aktiven Verfahren ist möglich.

Weltweit und in Deutschland kommen vorwiegend optimierte aktive Verfahren zum Einsatz, da diese hinsichtlich Größenordnung, Reinigungsfähigkeit, Effizienz und Kosten besser planbar sind. Ein Ranking der Verfahren über die rein wirtschaftliche Kosten-Nutzen-Rechnung ist kaum möglich, da immer Standortfaktoren eine übergeordnete Rolle bei der Verfahrensauswahl spielen. Deshalb wurde ein standörtlich bedingtes Ranking vorgenommen und zur Auswahl geeigneter Verfahren verschiedene Entscheidungsbaume entwickelt. Prinzipiell wird bei der Behandlung von AMD im ersten Schritt Alkalinität erzeugt, einhergehend mit der Neutralisation der Säure und dem Anstieg des pH-Wertes. Danach werden die Metalle abgeschieden. Bei sächsischen Grubenwässern besteht das Hauptziel der Metallabscheidung in der Umwandlung von Eisen(II) zu Eisen(III), um die Entfernung von Eisen als Eisenhydroxid ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) zu erleichtern.

**Aktive Behandlung** bedeutet im Zusammenhang mit Grubenwasserreinigung, dass für die Behandlung Energie, Chemikalien und eine kontinuierliche Überwachung des Reinigungsprozesses nötig sind (Wolkersdorfer, 2017).

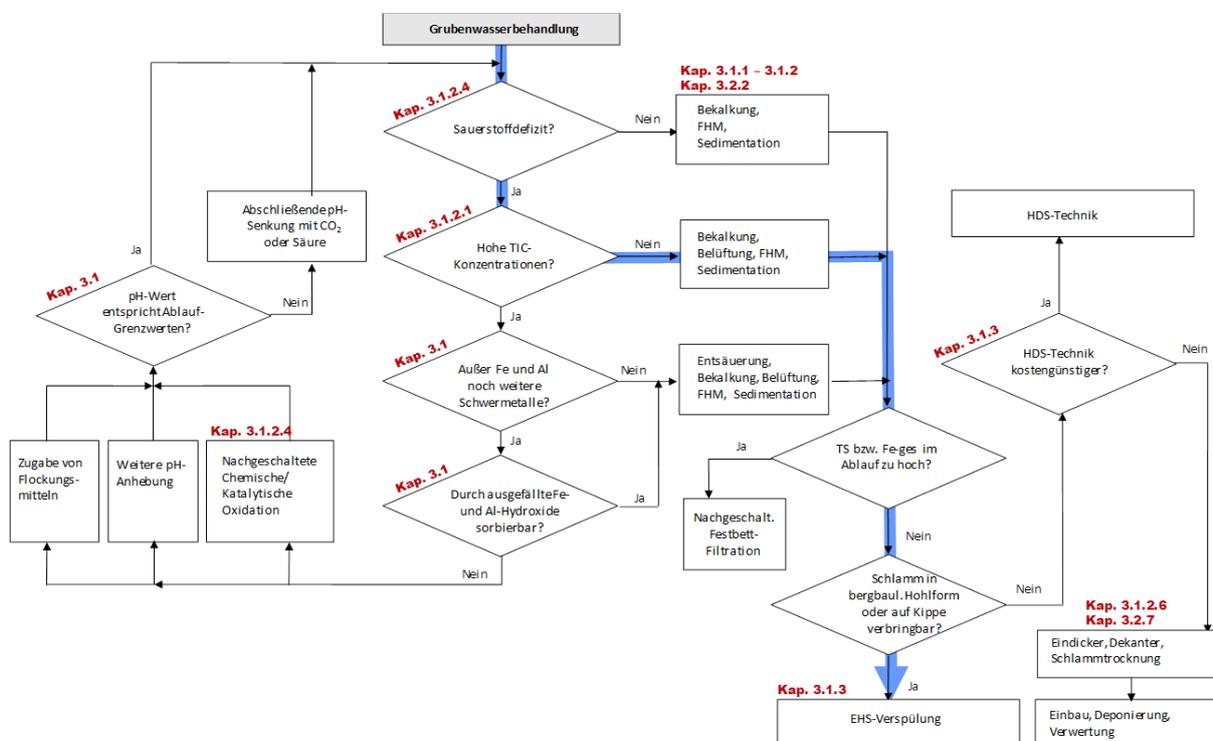
**Passive Behandlung** verwendet zur Verbesserung der Wasserqualität ausschließlich „natürliche“ Energie wie potentielle Energie (Höhenunterschied), Sonnenenergie (Wärme, Fotosynthese) oder biologische Energie (Bakterien) (Wolkersdorfer, 2017).

**In-situ Behandlung** ist ein technischer Eingriff, der verunreinigtes Wasser am Entstehungsort verhindert, vermindert oder reinigt (PIRAMID Consortium, 2003).

Es wurden Entscheidungsbäume für vier verschiedene Einsatzbereiche gegen AMD entwickelt:

- aktive Grubenwasserbehandlung
- passive Grubenwasserbehandlung
- Behandlung bergbaubeeinflusster Fließgewässer
- Behandlung bergbaubeeinflusster Seen

Als Beispiel ist der Entscheidungsbaum für die Auswahl eines Reinigungsverfahrens zur aktiven Behandlung von Grubenwässern in Abbildung 2 abgebildet, wobei die Rechtecke die einzelnen Behandlungskomponenten darstellen. Kapitelverweise (in rot) zur detaillierten Beschreibung der Verfahren im Bericht sind dem Entscheidungsbaum ebenso zu entnehmen. Je mehr Behandlungskomponenten die Aufbereitung durchläuft, desto kostenintensiver wird sie. Blau hervorgehoben ist die häufigste Vorgehensweise für die Braunkohlenbergbau geprägten Regionen Sachsens.



**Abbildung 2: Schema zur Auswahl einer möglichen Verfahrensweise zur aktiven Aufbereitung von Grubenwässern. Blau markiert ist die häufige Vorgehensweise für die Braunkohlenbergbau geprägten Regionen Sachsens.**

Anhand der drei definierten Modellwässer mit einem pH-Wert von 5,7, die sich in ihren Eisenkonzentrationen (112 mg/l; 224 mg/l; 336 mg/l) unterscheiden, erfolgten Kostenschätzungen für vier Reinigungsverfahren. Diese könnten unter sächsischen Bedingungen als Einzel- bzw. Stufenanlage eingesetzt werden und sind hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Aspekte ohne genauere Standortfestlegungen sinnvoll abschätzbar.

Die Berechnungsergebnisse sind daher als Richtwerte für die Verfahren anzusehen, die unter bestimmten Rahmenbedingungen ermittelt wurden:

1) Aktive Eisenabscheidung durch Neutralisation und Oxidation

- Volumenstrom: 1 m<sup>3</sup>/s
- Kosten je nach Modellwasser zwischen 0,13 und 0,17 €/m<sup>3</sup> bzw. inkl. Schlammdeponierung zwischen 0,19 und 0,33 €/m<sup>3</sup>

2) Passive Eisenabscheidung über Belüftung (Kaskade), OLC/OLD (Offenes Karbonatgerinne/Oxischer Karbonatkanal) und Sedimentationsbecken

- Volumenstrom: 10 l/s
- Kosten je nach Modellwasser zwischen 0,008 und 0,014 €/m<sup>3</sup> bzw. inkl. Schlammdeponierung zwischen 0,02 und 0,04 €/m<sup>3</sup>

3) Passive Eisenabscheidung über ALD (Anoxischer Karbonatkanal) und Sedimentationsbecken

- Volumenstrom: 10 l/s
- Kosten je nach Modellwasser zwischen 0,013 und 0,015 €/m<sup>3</sup> bzw. inkl. Schlammdeponierung zwischen 0,038 und 0,046 €/m<sup>3</sup>
- Eisen-Auslaufkonzentration nicht < 2 mg/l

4) Passive Eisenabscheidung über einen Vertikaldurchflussreaktor (Großoberflächenfilter)

- Volumenstrom: 10 l/min (sehr gering im Vgl. zu 1) - 3))
- Kosten je nach Modellwasser zwischen 0,013 und 0,015 €/m<sup>3</sup> bzw. inkl. Schlammdeponierung zwischen 0,038 und 0,046 €/m<sup>3</sup>
- Eisen-Auslaufkonzentration nicht < 2 mg/l

Derzeit werden in Sachsen vorwiegend Anlagen im Dünn- und Dickschlammverfahren zur Behandlung bergbaubeeinflusster Wässer genutzt, z. T. mit nachgeschalteter Filtration (z.B. AAF Königstein, WBA Pöhla). Diese Verfahren sind Stand der Technik und in der Lage die anfallenden großen Volumina erfolgreich zu behandeln. Beispiele für Behandlungsanlagen für Grubenwässer sind in einer Karte in Abbildung 3 verortet.

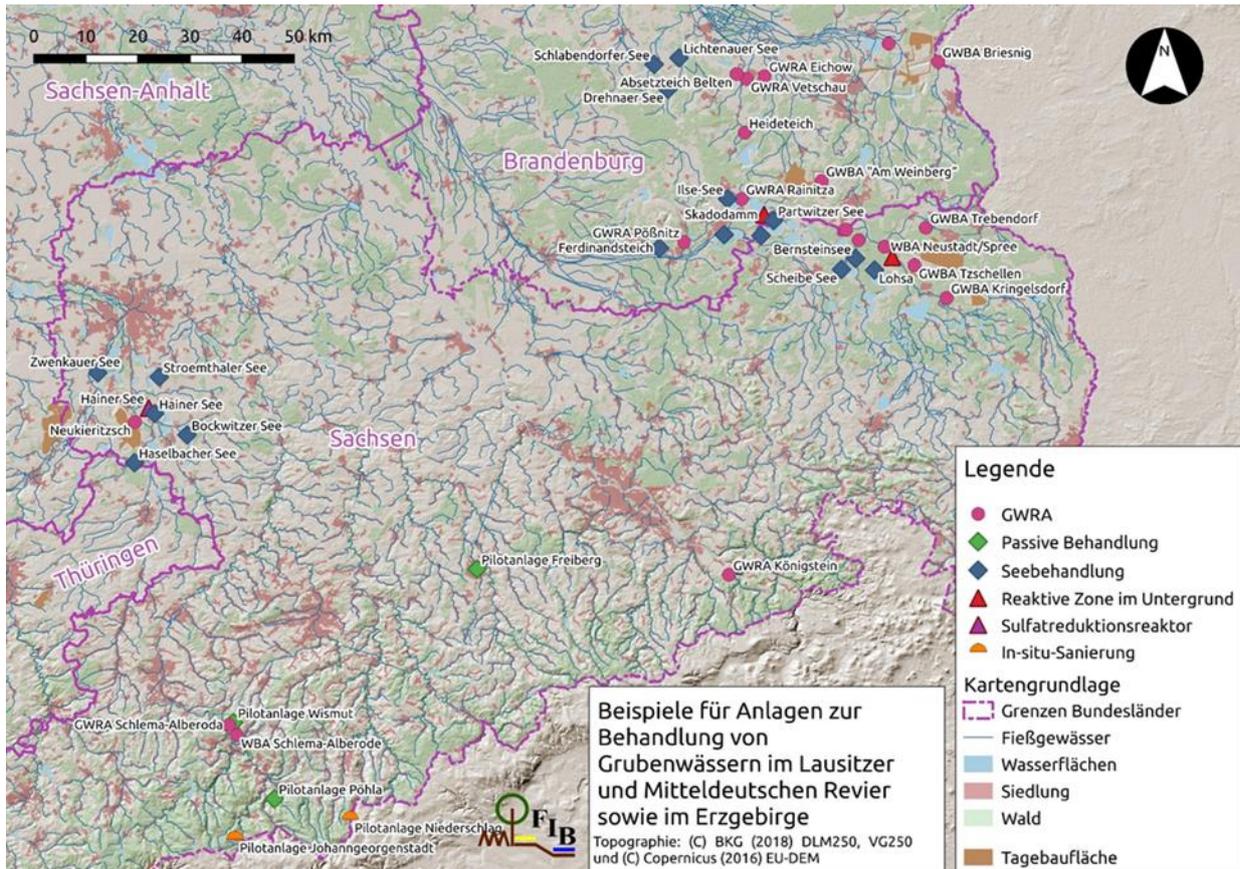
**Dünn- und Dickschlammverfahren** sind konventionelle, aktive Verfahren zur Grubenwasserreinigung mittels Neutralisation und Oxidation sowie anschließender Sedimentation. Das Dickschlammverfahren stellt eine verfahrenstechnische Optimierung dar, bei der es zur Teilrückführung des Schlammes ins Reaktionsbecken kommt, einhergehend mit der Weiternutzung des im Schlamm gebundenen nicht verbrauchten Neutralisationsmittels.

Zudem sind Ockerteiche bzw. Absetzbecken, ggf. mit Kalkzugabe für eine pH-Wert-Anhebung, geeignete Verfahren zur Verringerung der Eisenfrachten in kleinen Fließgewässern. Sie werden jedoch auch zum Absetzen der innerhalb einer Flusskläranlage ausgefallenen Stoffe neben dem eigentlichen Flusslauf installiert. Außerdem werden sie zur Optimierung des Dickschlammverfahrens oder der gestaffelten Neutralisation genutzt und stehen am Ende der Behandlungskette zur Abscheidung der im Reaktionsbecken entstandenen Feststoffe zur Verfügung.

Die Sanierung sächsischer Tagebauseen erfolgt durch die Zugabe von Neutralisationsmitteln und/oder CO<sub>2</sub> (zum Aufbau eines Hydrogencarbonatpuffers) mit jeweils standortangepassten Eintragstechnologien. Grundsätzlich angewendete Verfahren sind die In-Lake-Neutralisation per Behandlungsschiff oder als stationäre Anlage sowie die Auslaufbehandlung. Auch hier wird die Auswahl des geeigneten Verfahrens von den Standortbedingungen und den behördlichen Vorgaben bestimmt. Anhand von vier Beispielseen aus dem Lausitzer Braunkohlenrevier wurden die Behandlungskosten der Seeneutralisation mit denen der Auslaufbehandlung verglichen. Daraus ergab sich, dass sich die Kosten mit zunehmendem Anteil des zu behandelnden Auslaufvolumens gemessen am Gesamtseewasservolumen schnell positiv in Richtung In-Lake-Behandlung verschieben. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Kostenbetrachtung nur auf ein Jahr bezieht und beispielsweise die Investitionskosten nicht berücksichtigt wurden.

Für die passiven Methoden zur Metallentfernung stellen die hohen Eisenfrachten der bergbaubeeinflussten Wässer Sachsens das häufigste Ausschlusskriterium dar. Passive Verfahren sind außerdem für die Behandlung großer Volumenströme (> 10 l/s) kaum geeignet und daher aktuell in Sachsen nicht in Betrieb. Sie weisen jedoch besonders bei geringen Volumenströmen für die Behandlung schwermetall- oder arsenhaltiger Wässer besonders im Erzgebirge Einsatzpotential auf. Zeitweise waren Pilotanlagen im Einsatz. Im Sommer 2019 ist zudem eine Wetland-Grundwasser-Reinigungsanlage in Betrieb gegangen, die kontaminiertes Grundwasser einer ehemaligen Schwelerei aufbereitet (Schadstoffe wurden nicht genauer benannt).

# Reinigungsverfahren sowie wirtschaftliche Bewertung und Selektion der Best-Praxis-Verfahren gegen Acid-Mine-Drainage (Teilprojekt 1.8)



**Abbildung 3: Karte der Behandlungsanlagen des Lausitzer und Mitteldeutschen Braunkohlenreviers sowie des Erz- und Steinkohlenbergbaus**

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Teilprojekt wurde eine Vielzahl an Reinigungsverfahren gegen Acid-Mine-Drainage recherchiert, welche international angewendet bzw. erprobt werden. Diese wurden differenziert nach aktiven, passiven und In-situ Verfahren detailliert beschrieben. Nach Möglichkeit sind dabei die Vor- und Nachteile einzelner Anlagenelemente und ihr wirtschaftlicher Aufwand dargestellt. Als Übersicht werden alle Verfahren hinsichtlich Anwendungsspektrum, Voraussetzungen/Aufwand, Effizienz von Neutralisation und Stoffanreicherung sowie wirtschaftlichen Aspekten tabellarisch zusammengefasst. Die 14 relevantesten Reinigungsverfahren sind außerdem in Form von Verfahrenssteckbriefen dargestellt.

Ein Favorit unter den verschiedenen Behandlungsmöglichkeiten gegen AMD lässt sich nicht ableiten, da für einen bestimmten Standort nur jeweils ein Verfahren in Frage kommt. Bestenfalls ist eine Anpassung der Reinigungsstufen bzw. eine Optimierung bei technischen Detailfragen möglich. Das Einsatzpotential der einzelnen Behandlungsverfahren in den sächsischen Bergbauregionen ergibt sich in erster Linie auf Grundlage der Parameter Behandlungsvolumina und Eisenkonzentrationen. Auf Grundlage internationaler Datenrecherche sind jedoch

## Reinigungsverfahren sowie wirtschaftliche Bewertung und Selektion der Best-Praxis-Verfahren gegen Acid-Mine-Drainage (Teilprojekt 1.8)

---

Entscheidungsbäume zur Verfahrensauswahl für den sächsischen Raum entwickelt worden.

Auch bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnten für Behandlungskosten (in € pro zu behandelnden m<sup>3</sup> Grubenwasser) bestenfalls Richtwerte für vier in Sachsen anwendbare Verfahren geschätzt werden.

Die Studie zeigt auch, dass insbesondere aktive Verfahren zur Behandlung von AMD erfolgreich eingesetzt werden, es jedoch für die Nutzung passiver Reinigungsverfahren noch Verfahrensoptimierung hinsichtlich Effektivität notwendig wäre.

## Literatur

INAP. (2014). *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*. The International Network for Acid Prevention. Von <http://www.gardguide.com> abgerufen

PIRAMID Consortium. (2003). *Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters*. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID), University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne, UK.

Wieber, G., & Streb, C. (2010). *Geowärme Bad Ems - Minimierung des Schadstoffaustrages*. Institut für geothermisches Ressourcenmanagement; ITB - Institut für Innovation, Transfer und Beratung gemeinnützige GmbH. Bingen am Rhein: Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz.

Wolkersdorfer, C. (2017). *Reinigungsverfahren für Grubenwässer - Bewertung und Beschreibung von Verfahren*. South African Research Chair for Acid Mine Drainage Treatment, Tshwane University of Technology, Pretoria, SA; Finnish Distinguished Professor for Mine Water Management, Lappeenranta University of Technology, Mikkeli, Finnland.



# Impressum

## Herausgabe:

Dieser Steckbrief wurde im Rahmen des Projekts Vita-Min erstellt. Das Projekt Vita-Min wurde aus Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung im Kooperationsprogramms SN-CZ 2014-2020 finanziert. Die Projektpartner sind das sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Leadpartner), die Stadtverwaltung Oelsnitz/Erzgeb. und die Verwaltungsbehörde des Bezirks Ústecký kraj.

Alle Teilprojekte des LfULG tragen zum Leitprojekt „Für saubere Gewässer in Sachsen“ bei.

Für Fragen und weitere Informationen zu diesem Teilprojekt kontaktieren Sie:

### **Ansprechpartner**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Ansprechpartner: Frau Kathleen Lünich

Telefon: + 49 351 88928 4420

E-Mail: [Kathleen.Luenich@smul.sachsen.de](mailto:Kathleen.Luenich@smul.sachsen.de)

## Bearbeitung:

Die Ergebnisse dieses Teilprojekts wurden im Rahmen einer Vergabe vom LfULG durch die Firmen FIB Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V.; GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden; VisDat geodatentechnologie GmbH erarbeitet.

## Titelfoto:

LfULG (2019): Vincenzgraben (Oßling) im Lausitzer Braunkohlerevier (mittlere Messwerte 2018: pH-Wert 3,2; Eisen 18,8 mg/l; Sulfat 905 mg/l)

## Redaktionsschluss:

20.12.2019

**Weitere Informationen finden Sie unter**  
**[www.vitamin-projekt.eu](http://www.vitamin-projekt.eu)**