

### Anhang 3: Zusammenstellung von Maßnahmen und Strategien zur Vermeidung bzw. Verminderung nachteiliger Bergbau-Auswirkungen auf Wasserkörper

#### Strategien zur Verminderung von Stoffeinträgen aus Grubenwässern in OWK (bzw. GWK)

\*) k. A.: keine Angabe

Quellen: Martin, M. et al. (2019) Möglichkeiten des Schadstoffrückhalts in unterirdischen Grubengebäuden des Erz- und Spatbergbaus. Vita-Min TP 1.2, Abschlussbericht, Steckbrief und Präsentation  
 Martin, M. et al. (2019) Analyse des anthropogen und natürlich bedingten Zutrittes von Eisen und Sulfat in bergbaubeeinflusste Fließgewässer. Vita-Min TP 1.1, Abschlussbericht und Steckbrief  
 Hildmann, C. et al. (2019) Reinigungsverfahren sowie wirtschaftliche Bewertung und Selektion der Best-Praxis-Verfahren gegen Acid-Mine-Drainage. Vita-Min TP 1.8, Abschlussbericht  
 Weber, A., Bilek, F. (2018) Recherche und Wirtschaftlichkeit (mikro-)biologischer Verfahren zur Reinigung von Bergbauwässern. Vita-Min TP 1.9, Abschlussbericht  
 Aubel, T. et al. (2020): Nutzung der Abprodukte aus Wasserreinigungsanlagen als Wertstoffe. Vita-Min TP2.1  
 Bilek, F. et al. (2020): Kompendium wirtschaftlicher und umweltgerechter Best-Praxis Lösungen für Bergbaufolgemanagement sowie aktiven Bergbau. Vita-Min TP 2.6, Abschlussbericht  
 Makhathini, T.P., Mulopo, J., Bakare, B.F. (2020): Possibilities for acid mine drainage co-treatment with other waste streams: A review. MWEN 39:13-26  
 Volkersdorfer, C. (2017): Reinigungsverfahren für Grubenwässer - Bewertung und Beschreibung von Verfahren. Okt. 2017, 254 S.  
 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.  
 INAP (2014): Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide). The International Network for Acid Prevention. Von <http://www.gardguide.com> abgerufen

In-situ Verfahren: vorrangig zur Minimierung diffuser Schadstoffeinträge	Praxisbeispiel	Weiterführende Literatur	Weiterführende Literatur
<b>Immobilisierung der Quelle:</b>			
- Grube als Reaktionsraum			
Durchflusssminderung durch schadstoffreiche Zonen	Erzgrube Schneeberg	Vita-Min TP 1.2	
Hoher Flutungswassereinstau zur Minderung von GW-Zufluss und Sauerstoffzutritt	Urangrube Ronneburg, Flutungsraum Freiberg	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.1 und 2.2	
Grubenwasser-Management mit Zuflussbegrenzung in Flutungsraum, hydraulische Separierung	Erzgrube Schneeberg (Markus-Semmier-Stolln), Uran-Zinngrube Pöhla (Tellerhäuser)	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.4, 2.1, 2.9	
Oxidative Stoffausfällung: Belüftung abfließendes Wasser im peripheren Flutungsraum	Uran-Zinngrube Pöhla (Hämmerlein), Zinngrube Ehrensriedersdorf	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.2, 2.7 und 2.8	
In-situ Behandlung Wasserteilstrom/Grubensee: Neutralisation/ Pufferung/ Fällung durch Zugabe (alkalischer) Fällungsmittel, ggf. FHM	Urangruben Ronneburg u. Königstein	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.5, 2.4 und 2.5	
Reduktive Schadstofffixierung: Senkung Redoxmilieu durch Reduktionsmittel wie Ethanol, Glycerin, Fe0, Eisenschrott u.a. in Flutungsraum	Uran-Zinngrube Pöhla, Urangrube Schlema-Alberoda, Königstein	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.6, 2.6 und 2.10	
In-situ Fällung (z.B. mit BaCl <sub>2</sub> , Ba(OH) <sub>2</sub> )	Urangrube Königstein: Bindung von Ra, U, SM an gefälltes Baryt	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 2.3	<a href="https://www.wismut.de/de/wismut-news.php?id=708&amp;year=2005&amp;back=suche.php%3Fq%3DBaryt%26w%3Dall%26index%3D0">https://www.wismut.de/de/wismut-news.php?id=708&amp;year=2005&amp;back=suche.php%3Fq%3DBaryt%26w%3Dall%26index%3D0</a>
In-situ Enteisung/ Entmanganung	k. A. (*)	Vita-Min TP 1.9; Vita-Min TP1.8; Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.2	Olthoff, R. (1986). Die Enteisung und Entmanganung von Grundwasser im Aquifer. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 63.
In-situ Reaktionsstrecke/ Barriere: Zugabe reaktiver Kalkstein oder Sorptionsmittel	k. A.	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.7	
In-situ Oxidation/ Sedimentation grubenexternes Wetland (z. B. Wasserkaskade, Kalksandfilter)	Urangrube Königstein, Erzgrube Zinnwald	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 1.3	
- Halde als Reaktionsraum			
Mischung pyrithaltiger Substrate mit alkalischem Material (z. B. Kalkstein, EHS) in/auf bergbaulich betroffenen Flächen und Grubenabfälle/ Halden	Aktiver Braunkohlebergbau: Rheinisches Revier, MIBRAG	Vita-Min TP 1.8	Wisotzky (2003), Wisotzky & Lenk (2006)
Einbringen von Reduktionsmitteln (abbaubare Organik) in/auf bergbaulich betroffenen Flächen und Grubenabfälle / Halden zur Schaffung reduzierender Bedingungen	k. A.	Vita-Min TP 1.8, TP 1.9	
Organische Abdeckung des Grubenbereichs, Rekultivierung von Halden	k. A.	k. A.	
<b>Unterbrechung von Transportpfaden:</b>			
- Einkapselung, Versiegelung	k. A.		
- permeable reaktive Barrieren/ Wände für Grund-/Grubenwasser	k. A.		
- Reaktionszonen für heterotrophe Sulfatreduktion	k. A.		
- Funnel & Gate-Technologien	k. A.	Vita-Min TP 1.9	

### Anhang 3: Zusammenstellung von Maßnahmen und Strategien zur Vermeidung bzw. Verminderung nachteiliger Bergbau-Auswirkungen auf Wasserkörper

Strategien zur Verminderung von Stoffeinträgen aus Grubenwässern in OWK (bzw. GWK)

\*) k. A.: keine Angabe

Ex-situ-Verfahren: geeignet für Punktquellen, on-site	Praxisbeispiele	Weiterführende Literatur	Weiterführende Literatur
Behandlung der Gruben-/Abwässer (zentral/dezentral): - <b>Naturnahe u/o weitgehend passive Behandlungsverfahren</b>			
Schwermetallentfernung mit passiven Systemen	Übersicht Praxisbeispiele mit Quellenverweis	Vita-Min TP 1.8, Tabelle 3-13	PIRAMID Consortium (2003)
Sedimentationsbecken zur Abscheidung bereits koagulierter Metalloide und Trübstoffe	GWRA Vetschau, GWRA Wüstenhain	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 07 (darin Literaturquellen)	
Oxischer Carbonatkanal (OLD) zur pH-Anhebung, Ausfällung von Oxiden/Hydroxiden mit Sorption & Kopräzipitation	OLD als Teil der passiven Behandlung der Hachener Teiche, NRW, Dtl	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 08 (darin Literaturquellen)	PIRAMID Consortium (2003) u.a.
Offenes Carbonatgerinne (OLC) zur pH-Anhebung, Ausfällung von Oxiden/Hydroxiden mit Sorption; Schönung	kein nationales Beispiel	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 09 (darin Literaturquellen)	PIRAMID Consortium (2003) u.a.
Mangan-Oxidationsbetten, Pyrolusit-Prozess-Reaktor zur autokatalytischen Abscheidung von Mangan (Biofilm)	kein nationales Beispiel	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 10 (darin Literaturquellen)	
Anoxischer Carbonatkanal (ALD) zur pH-Anhebung, Ausfällung von FeCO <sub>3</sub> und MnCO <sub>3</sub>	Lehesten, Thüringen - ALD mit Absetzbecken und aeroben Mini-Feuchtgebiet	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 11 (darin Literaturquellen)	
Geschlossenes Carbonatlösungssystem zur Zinkabscheidung (als ZnCO <sub>3</sub> ), alkalische Leach-beds	kein nationales Beispiel	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 13 (darin Literaturquellen)	
Vertikaldurchflussreaktor (VFR), Großoberflächen-filter zur Eisenabscheidung (SCOOFI-Reaktor: surface-catalyzed oxidation of ferrous ion)	kein nationales Beispiel	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 12 (darin Literaturquellen)	PIRAMID Consortium (2003) u.a.
Siderit-Calcit-Reaktor zur Abscheidung von Cd, As (nur für Fe-freie Grubenwässer)	kein nationales Beispiel	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 14 (darin Literaturquellen)	
Aerobe constructed wetlands: Ex-situ-Oxidation/ Adsorption/ Sedimentation in Wetland-Kaskade	Uran-Zinngrube Pöhla	Vita-Min TP 1.2	
Anaerobe constructed wetlands: Ex-situ-Reduktion/ Sedimentation / Einkapselung	RAPS (reducing and alkalinity producing systems)	Vita-Min TP 1.8, TP 1.9	
Mikrobiologische Behandlung (Bioreaktor für autotrophe / heterotrophe Sulfatreduktion)	Autotroph: Pilotanlage Burghammer Heterotroph: Funnel & gate am Skadodamm	Vita-Min TP 1.9 (S. 92 u.a.)	Wagner, S., Bilek, F. (2012) Long term performance of an AMD treatment bioreactor using chemolithoautotrophic sulfate reduction and ferrous iron precipitation under in situ groundwater conditions. Bioresource Technology 104, pp. 221–227
Simultanbehandlung mit kommunalem Abwasserstrom / Belebtschlamm	kein nationales Beispiel	Hughes, T.A., Gray, N.F. (2013) Co-treatment of acid mine drainage with municipal wastewater: performance evaluation. Environ Sci Pollut Res 20:7863-7877 Deng, D., Lin L.-S. (2016) Two-stage combined treatment of acid mine drainage and municipal wastewater. Water Sci Technol 67:1000-1007	Strosnider, W.H.J., Winfrey, B.K., Naim, R.W. (2011) Novel passive co-treatment of acid mine drainage and municipal wastewater. J Environ Qual 40:206-213
Simultanbehandlung mit kommunalem Abwasser/ Grauwasser in aeroben Wetlands	kein nationales Beispiel	Johnson, K.L., Younger, P.L. (2006) The co-treatment of sewage and mine waters in aerobic wetlands. Eng Geol 85:53-61	Younger, P.L., Hendersen, R. (2014) Synergistic wetland treatment of sewage and mine water: pollutant removal performance of the first full-scale system. Water Res 55:74-82

### Anhang 3: Zusammenstellung von Maßnahmen und Strategien zur Vermeidung bzw. Verminderung nachteiliger Bergbau-Auswirkungen auf Wasserkörper

Strategien zur Verminderung von Stoffeinträgen aus Grubenwässern in OWK (bzw. GWK)

\*) k. A.: keine Angabe

Ex-situ-Verfahren: geeignet für Punktquellen, on-site		Praxisbeispiele	Weiterführende Literatur	Weiterführende Literatur
<b>- Aktive technische Behandlungsverfahren</b>				
Klassisch	Klassische Grubenwasseraufbereitung: Entsäuerung mit oxidativer Metallabscheidung, Mitfällung/Sorption anderer Metall(oid)e optimiertes Dickschlammverfahren (HDS) mit Schlammrückführung in Anmischtank	AAF Königstein, WBA Pöhla (Endbericht TP 1.8, Tab. 4-7); für Braunkohlereviere etwa 10 größere Anlagen in Sachsen (Tab. 4-5) als HDHc-Reaktor am Dehnaer See erprobt	Vita-Min TP 1.1 und TP 1.8, Steckbriefe 01 und 02 (darin Literaturquellen) Vita-Min TP 1.8	<a href="https://www.wismut.de/de/nl-koenigstein_wasserbehandlung.php">https://www.wismut.de/de/nl-koenigstein_wasserbehandlung.php</a>
Fällung	Koagulation/Kopräzipitation mit EHS als Flockungs-/ Sorptionsmittel	Pilotanlage Tzschellin-Pöhla (Schwertmannit)	Rao, S.R., Gehr, R., Riendeau, M., Lu, D., Finch, J.A. (1992) Acid mine drainage as a coagulant. Miner Eng 5:1011-1020	
	Glaubersalz-Kristallisation: Neutralisation von H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -haltigem Wasser mit NaOH, Kühlkristallisation und Trocknung zu Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Gipsfällung zur Sulfatabtrennung (Vorreinigung)	selten bei Industrieabwasser eingesetzt k. A.	UIT GmbH, <a href="https://www.uit-gmbh.de/files_db/1542129339_7228__7.pdf">https://www.uit-gmbh.de/files_db/1542129339_7228__7.pdf</a> Vita-Min TP 1.8	
	Chem. Fällung mit BaS oder BaCO <sub>3</sub> zur Abscheidung von Ra, Sr <sup>2+</sup> und Sulfat mit BaSO <sub>4</sub> (Baryt)	Pilotanlage Königstein	Vita-Min TP 1.2, Steckbrief 2.3; Vita-Min TP 1.1	Kondash, A.J., Warner, N.R., Lahav, O., Vengosh, A. (2013) Radium and barium removal through blending hydraulic fracturing fluids with acid mine drainage. Environ Sci Technol 48:1334-1342
	Chem. Fällung von Sulfat und Mg durch Ca und Al als Ettringit: SAVMIN-, CESR-Prozess, Walhalla-Verfahren	Mintek's SAVMIN pilot plant test facility in Randfontein SA	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 03 (darin Literaturquellen)	MINTEK (2008, 2014); Janneck et al. (2012): Ettringite precipitation vs. nano-filtration for efficient sulphate removal from mine water. In: McCullough, Lund, Wyse (Eds.): IMWA Annual Conference 2012, 206 I-R
	Metallphosphat-Fällung (z.B. Fe)	k. A.	Vita-Min TP 1.1	
	Metallsulfid-Fällung (z.B. Fe) mit Na <sub>2</sub> S	k. A.	Vita-Min TP 1.1	Best-Practice-Verfahren zur Eisenabreicherung: Vita-Min TP 1.1, Tab. 25 (S. 77-79) und S. 217
	katalytische Enteisung z.B. mit Braunstein	k. A.	Vita-Min TP 1.1	
Membranverfahren	Nanofiltration: Abtrennung zweiwertiger Ionen durch Kristallisation und Fällung von Gips	k. A.	Vita-Min TP 1.8	Lipp, P., Baldauf, G. (2008): Stand der Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung in Deutschland. Energie Wasser Praxis 04/2008.
	Membrandruckfiltration, z.B. Nanofiltration: Abtrennung zweiwertiger Ionen mit Kristallisation und Fällung von Gips; Umkehrosmose (Sparro-Prozess)	k. A.	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 04 (darin Literaturquellen)	
	Membranelektrolyse-Verfahren (RODOSAN®)	Zeitweise Pilotanlage am Standort GWRA Rainitz	Vita-Min TP 1.8, Steckbrief 04 (darin Literaturquellen)	Friedrich, H.J., Zaruba, A., Meyer, S., Kappnik, R., Stolp, W., Benthous, F.C. (2007): Verfahren und kleintechnische Anlage zur Aufbereitung schwefelsaurer Grubenwässer (RODOSAN®-Verfahren). Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. Heft 31; 11. Dresdner Grundwasserforschungstage vom 18.-20.06.2007.
kombinierte Verfahren	HeSR-Technologie: Sulfatfällung mit MgO, anschl. Nanofiltration, Gipsfällung mit Ca(OH) <sub>2</sub> im Konzentrat	kein nationales Beispiel	UIT GmbH, <a href="https://www.uit-gmbh.de/files_db/1542129339_7228__7.pdf">https://www.uit-gmbh.de/files_db/1542129339_7228__7.pdf</a>	
Sorption/Ionen-austausch	nicht selektive Sorptionsverfahren	kein nationales Beispiel		
	selektive Sorptionsverfahren, Molekularsiebe	Oxoanionen (As, Sb, Cr, V, P) mit Schwertmannit oder Zeolithen	Vita-Min TP 1.8	Jannek et al. (2011), Burkhardt et al. (2016), PIRAMID Consortium (2003) u.a.
	selektive Ionenaustausch- & Sorptionsverfahren (U, As u. a.)	WBA Helmsdorf (WISMUT)	<a href="https://www.wismut.de/de/pressemitteilungen.php?id=1856&amp;year=2020&amp;back=suche.php%3Fq%3DRadium%26w%3Dall%26index%3D0">https://www.wismut.de/de/pressemitteilungen.php?id=1856&amp;year=2020&amp;back=suche.php%3Fq%3DRadium%26w%3Dall%26index%3D0</a>	
Mikrobiell	Biologische Fe(II)- und Sulfatentfernung (angepasstes Ferrobakterium)	k. A.	Vita-Min TP 1.1 (Tab. 25)	
	Simultanbehandlung von AMD m. kommunalem Abwasser/Grauwasser	kein nationales Beispiel		

#### Prospektiv (Vorschläge für neuen Bergbau):

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

#### Weiterführende Literatur

- Vita-Min TP 1.2
- Vita-Min TP 1.2
- Vita-Min TP 1.2
- Vita-Min TP 1.2
- Vita-Min TP 1.2
- Vita-Min TP 1.2