

Grubenwasserreinigung

Beschreibung und Bewertung von Verfahren



Christian WOLKERSDORFER

Grubenwasserreinigung – Beschreibung und Bewertung von Verfahren

Prof. Dr. habil. rer. nat. Christian WOLKERSDORFER
South African Research Chair for Acid Mine Drainage Treatment
Tshwane University of Technology
0001 Pretoria
Südafrika

Finnish Distinguished Professor for Mine Water Management
Lappeenranta University of Technology
Laboratory of Green Chemistry
Sammonkatu 12
50130 Mikkeli
Finnland



September 2013 | Januar 2014 | September 2016 | Oktober 2017 | Juni 2019

Dieses Buch widme ich meinem im April 2018 leider zu früh verstorbenen Freund Prof. Dr. Paul Younger

*Nur jene, die riskieren, zu weit zu gehen, können
möglicherweise herausfinden, wie weit man
gehen kann.*

THOMAS STEARNS ELIOT

Den hab ich lieb, der Unmögliches begehrt.

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

Faust II

*„Aber ich mag nicht zu tollen Leuten gehen,“
bemerkte Alice.*

*„Oh, das kannst du nicht ändern,“ sagte die
Katze: „wir sind alle toll hier. Ich bin toll. Du bist
toll.“*

*„Woher weißt du, daß ich toll bin?“ fragte Alice.
„Du mußt es sein,“ sagte die Katze, „sonst wärest
du nicht hergekommen.“*

LEWIS CARROLL

Alice's Abenteuer im Wunderland

*Hier bin ich mir bewusst, weit hinter dem
Möglichen zurückgeblieben zu sein. Einfach
darum, weil meine Kraft zur Bewältigung der
Aufgabe zu gering ist. Mögen andere kommen
und es besser machen.*

LUDWIG WITTGENSTEIN

Tractatus Logico-Philosophicus

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung Abstract Shrnutí	23
0.1	Deutsche Zusammenfassung	23
0.2	English Abstract (Short version)	24
0.3	Česká Resumé (Shrnutí)	25
1	Vorwort	26
2	Danksagung	30
3	Einleitung.....	32
3.1	Glosse – oder Erfahrungen nach über sieben Jahren Recherche.....	32
3.2	Begriffsklärungen.....	37
3.2.1	Probleme bei der Definition von Begriffen	37
3.2.2	Aktive Grubenwasserreinigung	40
3.2.3	Basenkapazität (k_B ; Acidität; Azidität; m-Wert)	40
3.2.4	Bergwerk.....	42
3.2.5	Bioreaktor.....	43
3.2.6	Circular Economy	43
3.2.7	Entwässerungsstollen, Erbstollen, Wasserlösungsstollen	43
3.2.8	<i>First Flush (Erstspülung)</i>	44
3.2.9	Grubenflutung.....	47
3.2.10	Grubenwasser (Schachtwasser, Stollenwasser)	47
3.2.11	Konstruiertes Feuchtgebiet.....	49
3.2.12	Koagulation und Flockung	49
3.2.13	Netto-acidisches oder netto-alkalisches Grubenwasser	49
3.2.14	Passive Grubenwasserreinigung.....	50
3.2.15	Pflanzenkläranlage.....	51
3.2.16	Phytoremediation (Phytosanierung)	51
3.2.17	pH-Wert.....	51
3.2.18	Säurekapazität (k_S ; Alkalität; Alkalinität; p-Wert).....	52
3.2.19	Sauerwasser.....	52
3.2.20	Sorption, Adsorption, Kopräzipitation, Oberflächenkomplexierung und andere derartige Reaktionen.....	53
3.2.21	Schwermetall.....	55
3.2.22	Unedles Metall.....	55
3.3	Entstehung von Grubenwasser und Puffermechanismen.....	55
3.4	Klassifikationen und Klassifizierung von Grubenwasser	61
4	Voruntersuchungen.....	66
4.1	Einleitende Hinweise.....	66
4.2	Probenahme von Grubenwasser.....	71
4.2.1	Checklisten und Hinweise	71
4.2.2	Hinweis zum Arbeitsschutz.....	73
4.2.3	Verfahren der Probenahme.....	74
4.2.4	Qualitätskontrolle.....	78
4.2.5	Messgeräte und Probenahme	80
4.2.6	Bezeichnung der Proben.....	81
4.2.7	Gelöste und gesamte Konzentrationen.....	82
4.2.8	Dokumentation.....	84

4.3	Essentielle Vor-Ort-Parameter	86
4.3.1	Einleitender Hinweis.....	86
4.3.2	Elektrische Leitfähigkeit.....	87
4.3.3	Basenkapazität (k_B ; Acidität)	90
4.3.4	Säurekapazität (k_S ; Alkalität; Alkalinität).....	91
4.3.5	Durchfluss und Frachten	91
4.3.6	pH-Wert.....	98
4.3.7	Eisenkonzentration.....	100
4.3.8	Mangankonzentration.....	101
4.3.9	Aluminiumkonzentration.....	102
4.3.10	Redoxspannung (E_h).....	102
4.3.11	Sauerstoffsättigung.....	104
4.4	Wasseranalytik.....	105
4.5	Untersuchungen zur Kalkzugabe oder Säulenversuche.....	105
4.6	Aktive oder passive Grubenwasserreinigung?.....	107
4.7	Die endlose Grubenwasserreinigung.....	109
4.8	Pourbaix-Diagramme (Stabilitätsdiagramme, Prädominanzdiagramme)	110
5	Aktive Methoden zur Behandlung von Grubenwasser	112
5.1	Einleitung.....	112
5.2	Neutralisationsverfahren.....	113
5.2.1	Prinzipien und geschichtliche Entwicklung.....	113
5.2.2	Dünnschlammverfahren (LDS)	122
5.2.3	Dickschlammverfahren (HDS)	125
5.2.4	In der Schachtel lebt sich's leichter	127
5.3	Elektrochemische Verfahren	129
5.3.1	Elektrokoagulation.....	129
5.3.2	Elektrosorption (Kondensatorische Deionisierung)	132
5.3.3	Elektrodialyse/Membranelektrolyse	133
5.4	Membranverfahren	134
5.4.1	Einleitung.....	134
5.4.2	Mikrofiltration	138
5.4.3	Ultrafiltration	138
5.4.4	Nanofiltration.....	138
5.4.5	Umkehrosmose (reverse osmosis, RO).....	140
5.4.6	Vorwärtsosmose (forward osmosis, FO).....	142
5.4.7	SPARRO-Prozess (slurry precipitation and recycle reverse osmosis)	142
5.5	Fällungsverfahren für seltenere Schadstoffe.....	144
5.6	Ettringit-Ausfällung.....	145
5.6.1	SAVMIN™-Verfahren	145
5.6.2	Andere Verfahren	147
5.7	Schwertmannit-Verfahren.....	147
5.8	Bioreaktoren (Fermenter).....	148
5.9	Ionenaustauscher	150
5.10	Sorption.....	153
5.11	Erweiterte Oxidation	155
5.12	Flotations-Flüssig-Flüssig-Extrahierung (F-LLX: Flotation Liquid-Liquid Extraction; VEP: Vale Extraction Process; Hydro Flex Technology).....	156
5.13	Eutektische Gefrierkristallisation.....	158
6	Passive Methoden zur Behandlung von Grubenwasser	161

6.1	Hinweis.....	161
6.2	Was ist passive Grubenwasserreinigung?.....	164
6.3	Carbonatkanäle und -gerinne.....	167
6.3.1	Einteilung der Kanäle und Gerinne	167
6.3.2	Anoxischer Carbonatkanal (<i>anoxic limestone drain, ALD</i>).....	167
6.3.3	Oxischer Carbonatkanal (<i>oxic limestone drain, OLD</i>).....	170
6.3.4	Offene Carbonatgerinne (<i>open limestone channel, OLC</i>)	170
6.4	Konstruierte Feuchtgebiete	172
6.4.1	Zum Geleit (ich wollte das schon immer einmal schreiben).....	172
6.4.2	Aerobes konstruiertes Feuchtgebiet (<i>aerobic wetland, reed bed</i>).....	173
6.4.3	Anaerobes konstruiertes Feuchtgebiet (<i>anaerobic wetland, compost wetland</i>) 175	
6.5	Reduzierende Alkalinitätssysteme (reducing and alkalinity producing systems: RAPS; successive alkalinity producing systems: SAPS; sulfate reducing bioreactor, Vertical Flow Wetlands).....	178
6.6	Absetzbecken (<i>settlement lagoon</i>)	181
6.7	Permeable reaktive Wände (Durchströmte Reinigungswände).....	183
6.8	Vertikaldurchflussreaktor (<i>vertical flow reactor, VFR</i>).....	185
6.9	Passive Oxidationssysteme (Kaskaden, TROMPE).....	187
6.10	ARUM-Prozess (<i>Acid Reduction Using Microbiology: Mikrobielle Säureerniedrigung</i>).....	192
7	Alternative Methoden zum Management von Grubenwasser	194
7.1	Gedanken über alternative Methoden und deren Anwendung im deutschen Sprachraum	194
7.2	Natürliche und Kontrollierte natürliche Selbstreinigung.....	197
7.2.1	Natürliche Selbstreinigung	197
7.2.2	Kontrollierte natürliche Selbstreinigung.....	198
7.3	Änderung der Abbaumethoden.....	201
7.4	Biometallurgie, Geobiotechnologie, Biomimetik oder Agrobau.....	202
8	<i>In-situ</i> - und Vor-Ort-Sanierungsmaßnahmen	204
8.1	Vorbemerkung.....	204
8.2	In-Lake Verfahren	204
8.2.1	Einleitung.....	204
8.2.2	<i>In-lake</i> -Kalkung	204
8.2.3	„Enclosures“ (Umfassungen)	204
8.2.4	Elektrochemische und elektrobiologische Behandlung	206
8.3	Chemische Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung.....	207
8.3.1	Behandlung von sauren Seen.....	207
8.3.2	Chemische Vor-Ort-Maßnahmen	211
8.4	Rückspülung von Schlämmen, Reststoffen oder Kalkmilch	211
8.5	Sanierung verunreinigter Fließgewässer.....	214
8.6	<i>In-situ</i> -Sanierung von uranhaltigen Gruben- und Sickerwässern.....	215
8.7	Mischung pyrithaltiger Substrate mit alkalischem Material.....	217
8.8	Verschluss von Entwässerungs- und Bergwerksstollen	219
9	Restnutzung der Sanierungsobjekte oder Aufbereitungsrückstände	223
9.1	Nutzung der Sanierungsobjekte.....	223
9.2	Aufbereitungsrückstände als Wertstoffe (<i>circular economy</i>).....	228

10	Finis.....	236
11	Begriffserklärung/Glossarium/Abkürzungen.....	237
11.1	Einleitende Hinweise.....	237
11.2	Begriffe	237
11.3	Abkürzungsverzeichnis	239
11.3.1	Formelzeichen.....	239
11.3.2	Akronyme und Abkürzungen.....	240
12	Literatur	244

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kleinbergbau auf Gold in Panompa bei Phichin in Thailand. Zwei Arbeiter installieren eine Pumpe zum Sumpfen ihres Abbaues © REUTERS/Damir Sagolj.....	28
Abbildung 2: Flussdiagramm für das „Internet of Mine Water“ (aus Wolkersdorfer 2013)..	36
Abbildung 3: Begriffe und pH-Werte, die im Zusammenhang mit Säuren- und Basenkapazität (k_s , k_b) bei Grubenwässern international und national üblicherweise verwendet werden. Die drei gewellten Symbole stellen jeweils ein Grubenwasser dar, dessen k_b - und k_s -Wert mittels Base (NaOH) oder Säure (HCl, H ₂ SO ₄) bestimmt wird. Der Umkehrpunkt im sauren Bereich kann sich je nach Mineralisation zwischen 3,7 und 5,1 bewegen, wohingegen der im basischen Bereich je nach Vorschrift entweder 8,2 oder 8,3 beträgt. Die Angabe der Konzentration soll in mmol L ⁻¹ und nicht wie oftmals in mg L ⁻¹ CaCO ₃ erfolgen. Nur noch historisch relevant sind der p- und m-Wert, dessen Bezeichnung vom Umkehrpunkt des Phenolphthaleins und Methylrots abgeleitet ist.....	42
Abbildung 4: Charakteristisches Szenario der Erstspülung am Beispiel des Rothschnberger Stollens in Sachsen (verändert aus Wolkersdorfer 2008). Einstellung des Bergbaus im Jahr 1969 (Jobst et al. 1994).....	45
Abbildung 5: Erstspülung am Buttonwood Stollen, einem der Hauptaustritte von Grubenwasser im Wyoming Becken von Ost Pennsylvanien, USA (verändert nach Ladwig et al. 1984, und ergänzt mit Daten der USGS Wasserdatenbank. Für die Zeit nach 1980 lagen nur vier Einzelmessung vor, sodass sich keine Minimal- und Maximalflächen darstellen ließen; aus Wolkersdorfer 2008).....	46
Abbildung 6: Schematische Darstellung der abiotischen Pyrit- und Markasitoxidation (basierend auf Informationen in Kester et al. 1975; Singer und Stumm 1970; Stumm und Morgan 1996), nach einer Idee von Banks (2004).....	56
Abbildung 7: Tropfen sauren Grubenwassers mit pH 2 an der Firste eines Stollens im Besucherbergwerk Grube Glasebach in Straßberg/Harz. 2. Sohle, Bereich des Pyritganges. Bildbreite ca. 20 cm.	57
Abbildung 8: Rot gefärbtes Wasser in einem Teilbereich des Rio Tinto in Spanien (Foto: Marta Sostre).....	59
Abbildung 9: Ficklin-Diagramm mit Grubenwässern aus Colorado/USA (verändert aus Ficklin et al. 1992). Flächig hinterlegt sind <i>alle</i> von Ficklin im Umfeld von Bergwerken untersuchten Wässer.....	62
Abbildung 10: Erweitertes Younger-Rees-Diagramm (Rees et al. 2002; Younger 1995, S. S106, 2007, S. 98). I: saure Lösungswässer von Halden, Absetzteichen und oberflächennahen Abbauen in pyrithaltigen Gesteinen oder Sedimenten mit Luftkontakt; II: überwiegend frische, oberflächennahe eisenhaltige Grubenwässer; III: neutralisierte, ehemals saure Grubenwässer; IV: saline Grubenwässer, zumeist aus Tiefbohrungen; V: Bereich, in dem nur wenige Grubenwässer zu finden sind.....	63
Abbildung 11: Mögliche Entwicklung der Grubenwasserqualität in einem Bergwerk, in dem die Pyritkonzentration die der Carbonate übersteigt. Der zweite pH-Wert-Anstieg ist auf unterschiedliche Pufferprozesse zurückzuführen und die Tatsache, dass der Pyrit weitgehend verwittert ist (verändert nach Younger et al. 2002).....	68
Abbildung 12: Probenahmeabfälle eines weniger umweltbewussten Kollegen (Kap-Breton-Insel, Neuschottland, Kanada – aber nicht nur dort vorzufinden).....	72
Abbildung 13: Partikel im Wasser und Filtertechniken. Eingezeichnet die Grenzen von 0,02-, 0,20- und 0,45-µm-Membranfiltern (nach Ranville und Schmiermund 1999, S. 185; ergänzt und verändert nach Stumm und Morgan 1996, S. 821).....	77
Abbildung 14: Erniedrigung der elektrischen Leitfähigkeit durch Verockerung und Biofouling an einer Online-Sonde. Im Verlauf von neun Wochen vermindert sich die elektrische Leitfähigkeit um 0,7 mS cm ⁻¹ . Zum Vergleich die anfänglichen Einzelmessungen	

mit einem Handmessgerät. Eine Auswertung der Messung im Rahmen eines Salztracertests war nicht möglich.....	80
Abbildung 15: Formen, in denen Metallspezies vorkommen, am Beispiel von Kupferspezies (verändert nach Stumm und Morgan 1996).....	83
Abbildung 16: Paul Younger† bei der Vor-Ort-Bestimmung von Eisenkonzentrationen (August 2000).....	86
Abbildung 17: Ergebnis einer chemisch-thermodynamischen Berechnung mit PHREEQC (PHREEQC 3.5.0-1400). Berechnungsergebnis der elektrischen Leitfähigkeit hier farblich hervorgehoben.	88
Abbildung 18: Durchflussmessung mit einem akustisch-digitalen Strömungsmessgerät in einem durch Grubenwasser beeinflussten Bach (Kap-Breton-Insel, Neuschottland, Kanada). Der Bearbeiter steht korrekt abstromig des Messgeräts und hält das Gerät weit weg vom Körper, um den Durchfluss möglichst nicht zu beeinträchtigen.	92
Abbildung 19: Falsch installiertes Messwehr an der ehemaligen IMPI Pilotanlage Middleburg in der Provinz Gauteng, Südafrika. An der Wehrplatte fehlt die abgeschrägte, wasserseitige Abrisskante.	93
Abbildung 20: Falsch konstruiertes Dreieckswehr für einen Grubenwasseraustritt des 1 B Mine Pools auf der Kap-Breton-Insel, Neuschottland, Kanada. Die Wehrplatte ist zu dick (2 cm), besteht aus nicht rostfreiem Material und es fehlt die abgeschrägte, wasserseitige Abrisskante. Das Messwehr war über einen Zeitraum von ca. 1 Jahr im Einsatz, um Durchflüsse mit „hoher Genauigkeit“ zu messen.	94
Abbildung 21: Kalibrierter Durchfluss an einem Messwehr des Bergwerks Metsämonttu, Finnland und Vergleich mit dem Durchfluss aus der Kindsvater-Shen Gleichung.	94
Abbildung 22: Durchflussmessungen in einem offenen Gerinne mittels 4-Lamellen-3-Punkt-Methode und präferentiell durchfluss in der rechten unteren Ecke (in Fließrichtung gesehen; die Abbildung ist ein Schnitt gegen die Fließrichtung; Geschwindigkeit in m s^{-1}). Die Ein-Punkt-Lamellenmethode in der Mitte des Gerinnes lieferte um 20 % zu niedrige Messwerte gegenüber der Salzverdünnungsmethode. Der Wasserstand im Gerinne betrug am Stichtag 15 cm (Gernrode/Harz; Auslauf Hagenbachtalstollen, 2003-10-15).....	97
Abbildung 23: Fotometrische Vor-Ort-Analyse von Gesamteisen und Fe^{2+}	101
Abbildung 24: Aluminiumkonzentrationen in sequentiell gefiltertem Grubenwasser aus dem 1 B Mine Pool. Von den $970 \pm 184 \mu\text{g L}^{-1}$ Al, die mit einem $0,45 \mu\text{m}$ Filter gefiltert wurden, liegen noch $750 \pm 148 \mu\text{g L}^{-1}$ kolloidal gebunden vor (Bohrloch B183, Kap-Breton-Insel, Kanada).....	102
Abbildung 25: Kalkungs- und Kompostversuche mit saurem Grubenwasser (100 L Tank, ca. 5 kg Kalkstein oder Mist). Ein stabiler pH-Wert von 7 wird bereits nach 2–8 Stunden erreicht, da ein Großteil der Acidität vom CO_2 im Grubenwasser stammt. Kinetisch: Wasser wurde regelmäßig gerührt; statisch: Wasser wurde nicht gerührt. Fehler der pH-Wert-Messung 0,01.....	106
Abbildung 26: Abhängigkeit der Investitionskosten einer aktiven Grubenwasserreinigungsanlage von der aufzubereitenden Menge an Grubenwasser (nach Morin und Hutt 2006).	107
Abbildung 27: Graphische Entscheidungshilfe für und wider aktiver oder passiver Wasserreinigung. Die Grenzen zwischen den Verfahren müssen als unscharf betrachtet werden. Auf der Ordinate gibt es einen oberen Bereich mit geringer kontaminiertem Grubenwasser (geringere Konzentration an Eisen, niedrigere Basenkapazität und Durchfluss) und einen unteren mit höher kontaminiertem Grubenwasser. k_B in mmol L^{-1} , Fe und Zn in mg L^{-1} (ERMITE Consortium et al. 2004; Younger 2002b).	108
Abbildung 28: Klassifikation von Grubenwässern aus unterschiedlichen Uranbergwerken auf Basis von Quotienten aus U, As und Ca. Blaue Quadrate sind Sicker- und Infiltrationswässer, orange Kreise Grubenwässer des Uranbergwerks A. Die Rauten zeigen zum Vergleich Grubenwässer zweier anderer Uranbergwerke B und C.....	110

Abbildung 29: Skatterdiagramm der Uran- und Arsenmassenkonzentrationen im Uranbergwerk A. Grün eingezeichnet die Einleitgrenzwerte und Überwachungswerte der Grubenwasserreinigungsanlage. Das blau hinterlegte Feld entspricht den Uran- und Arsenmassenkonzentrationen der Sicker- und Infiltrationswässer auf Basis der statistischen Auswertung in Abbildung 28. Anfänglich war der Grenzwert für Arsen $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. Durch die Anhebung des Grenzwerts werden weniger Infiltrations- und Sickerwässer gereinigt..... 110

Abbildung 30: Prinzipdarstellung der Entwicklung des Grubenwassers aus der festen, immunen Phase zur gelösten, korrodierten Spezies und der unlöslichen, passivierten Phase nach der Grubenwasserreinigung. Darstellung im Pourbaix-Diagramm (ergänzt und verändert nach Pourbaix 1966, S. 314ff; Pourbaix 1973, S. 19)..... 111

Abbildung 31: Flussdiagramm für die wichtigsten, hauptsächlich aktiven Grubenwasserreinigungsmethoden (verändert und ergänzt nach Jacobs und Pulles 2007; Younger et al. 2002). ^{1,2}unterschiedliche Entscheidungswege. 112

Abbildung 32: Pumpen für die Chemikalienzufuhr in einer aktiven Grubenwasserreinigungsanlage (Straßberg/Harz)..... 113

Abbildung 33: pH-Wert-abhängige Löslichkeit von Metallhydroxiden (verändert und ergänzt nach Cravotta 2008, Originaldaten erhalten von Charles A. Cravotta III, pers. Komm. 2013). 120

Abbildung 34: pH-Wert-abhängige Oxidationsrate von Fe(II); verändert nach Singer und Stumm (1969) mit Daten aus Stumm und Lee (1961)..... 120

Abbildung 35: Beispiele für pH-Wert-abhängige Sorption von Metallkationen an Eisenhydroxide. $[\text{Fe}_{\text{tot}}] = 10^{-3} \text{ mol}$, $[\text{Me}] = 5 \times 10^{-7} \text{ mol}$; $I = 0,1 \text{ mol NaNO}_3$ (nach Dzombak und Morel 1990; Stumm und Morgan 1996, S. 543)..... 121

Abbildung 36: Prinzip der konventionellen Grubenwasserreinigung (Dünnschlammverfahren). „Kalkhydrat“ steht hier stellvertretend für jedes beliebige verwendbare alkalische Material..... 123

Abbildung 37: Belüftung von Grubenwasser in einer Dünnschlammanlage (Grubenwasserreinigungsanlage „Schwarze Pumpe“, Lausitz)..... 124

Abbildung 38: Durch Filterpressen entwässerter Schlamm (Sauerwasserreinigungsanlage Flughafen Halifax, Neuschottland, Kanada; Bildbreite ca. 1 m). 124

Abbildung 39: Prinzip des klassischen Dickschlammverfahrens mit teilweiser Rückführung des Schlammes. „Kalkhydrat“ steht hier stellvertretend für jedes beliebige verwendbare alkalische Material..... 125

Abbildung 40: Schlammstammeltank der ehemaligen aktiven Grubenwasserreinigungsanlage Horden (County Durham, England)..... 126

Abbildung 41: Schematischer Aufbau der von SansOx Oy vertriebenen OxTube (verändert aus Firmenprospekt). 128

Abbildung 42: Prinzip der Elektrokoagulation (verändert nach Vepsäläinen 2012)..... 129

Abbildung 43: Mögliche Anordnungen von Elektroden in der Elektrokoagulation (nach Liu et al. 2010). Blaue Pfeile zeichnen den Fluss des Wassers nach..... 130

Abbildung 44: Elektrokoagulation von Grubenwasser im Labormaßstab. Links: Rohwasser, rechts: Grubenwasser nach der Elektrokoagulation. In der Realität haben diese Anlagen mindestens die Größe von Gartenhäusern. 131

Abbildung 45: Blockdiagramm der Grubenwasserreinigungsanlage mit Elektrokoagulation am Kohlenbergwerk *Глубокая* (Глубокая) bei Donezk (Донецьк) im ukrainischen Donezbecken (verändert aus Kalayev et al. 2006, FR: Filterrückstand, AR: Abdampfrückstand ohne Filterrückstand)..... 132

Abbildung 46: Trenngrenzen unterschiedlicher Membranfilter und Auswahl der zurückgehaltenen Stoffe. Abstand der Membranen in der Grafik entspricht der logarithmischen Porenweite. Rückhaltung von Stoffen basierend auf Schäfer et al. (2006, S. 2). 135

Abbildung 47: Anzahl der Publikationen über Wasserreinigung mit Membrantechnologie zwischen 1990 und 2016. Auf der rechten Achse die Anzahl derer, die grubenwasserrelevant sind (Quelle Clarivate Analytics' „Science Citation Index Expanded“).....	136
Abbildung 48: Ultrafiltrationseinheit der Grubenwasserreinigungsanlage eMalaheni in der Provinz Gauteng/Südafrika.....	139
Abbildung 49: Vereinfachtes Prinzip der Osmose (Vorwärtsosmose) und Umkehrosmose. Bei der Osmose „wandern“ Ionen durch eine semipermeable Membran entlang eines Konzentrationsgradienten und erhöhen damit den Druck auf der Seite des Konzentrats. Bei der Umkehrosmose hingegen wird auf der Seite des Konzentrats Druck ausgeübt und die Wasserionen diffundieren („wandern“) durch die Membran auf die Seite der geringeren Konzentration.	140
Abbildung 50: Umkehrosmoseeinheit der Grubenwasserreinigungsanlage eMalaheni in der Provinz Gauteng/Südafrika (vgl. Abbildung 109).	141
Abbildung 52: Ablaufdiagramm für den Sparro-Prozess (verändert nach Juby und Schutte 2000; Juby et al. 1996).	142
Abbildung 51: Schema der Vorwärtsosmose (verändert nach Cath et al. 2006; nach der Idee von Weichgrebe et al. 2014).	143
Abbildung 53: Derzeitiges Verfahrensbild der Grubenwasserreinigungsanlage Schlemma-Alberoda einschließlich der Rückständeentsorgung (nach Bild 3.4.2.1-23 in Badstübner et al. 2010).	144
Abbildung 54: Stabilitätsdiagramm von Ettringit im System $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SO}_3/\text{H}_2\text{O}$; in die in der Grafik nicht sichtbare $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ -Ebene projiziert, $\{\text{Al}(\text{OH})_4^-\} = 0$ (verändert nach Hampson und Bailey 1982, Fig. 1; optimaler pH-Wert-Bereich von 11,6–12,0 ergänzt nach Smit 1999).	145
Abbildung 55: SAVMIN™-Pilotanlage am Mogale Goldbergwerk der Western Utilities Corporation in Südafrika (aus Roger Paul: „Presentation to the Parliamentary Committee on Water and Environmental Affairs“ – 2011-09-07 and 2011-09-08).....	147
Abbildung 56: Schwertmannit auf Aufwuchselementen (links, Bildbreite ca. 2 m) und mikrobiell hergestellter Schwertmannit (rechts, Bildbreite etwa 15 cm; Fotos: Eberhard Janneck).....	148
Abbildung 57: Verwendete und empfohlene pH-Werte für die selektive Fällung von Metallen und Arsen als Sulfide; nach Kaksonen und Şahinkaya (2012) mit Daten von Govind et al. (1997); Hammack et al. (1994a); Kaksonen und Puhakka (2007); Tabak et al. (2003).....	149
Abbildung 58: Verschiedene Kunstharze für Ionenaustauscher (LANXESS Deutschland GmbH).	151
Abbildung 59: Industrieller Ionenaustauscher zur Abwasserbehandlung aus der Kupferelektrolyse in den Montanwerken Brixlegg/Tirol.....	151
Abbildung 60: Anzahl der Publikationen über Wasserreinigung mit Sorbenten zwischen 1990 und 2016. Auf der rechten Achse die Anzahl derer, die grubenwasserrelevant sind (Quelle Clarivate Analytics' „Science Citation Index Expanded“).....	154
Abbildung 61: Vergleich der Sulfatentfernung zwischen F-LLX und anderen Reinigungsverfahren (nach Monzyk et al. 2010).	157
Abbildung 62: Ehemalige Wasserreinigungsanlage zur eutektischen Gefrierkristallisation auf dem Soshanguve Campus der Technischen Universität Pretoria (Tshwane University of Technology; HybridICE-Verfahren).	159
Abbildung 63: Proxa Gefrierkristallisation am Tagebau der New Vaal Colliery der Anglo American Coal in Südafrika (Foto: Jochen Wolkersdorfer).	160
Abbildung 64: Teil der passiven Grubenwasserreinigungsanlage für die Abraumhalde an der Zeche Enos (Pike County, Indiana, USA). Die Funktionsweise des aeroben konstruierten Feuchtgebiets ist in Behum et al. (2008) beschrieben. Das Fotocomposite zeigt das „Canal Aerobic Wetland“ im insgesamt 6,5 ha großen konstruierten Enos Ost Feuchtgebiet.	162

Abbildung 65: Flussdiagramm für passive Grubenwasserreinigungsverfahren (verändert nach Hedin et al. 1994a; Skousen et al. 1998; 2000).....	165
Abbildung 66: Absetz- und Makrophytenbecken sowie – heute nicht mehr notwendiges – Aktivkohlefilterbett und aerobes Feuchtgebiet am Uranbergwerk Urgeiriça (Portugal). Das Grubenwasser ($Q \approx 90 \text{ L/min}$) fließt von rechts nach links und der pH-Wert wird im Mittel von etwa 6 auf 8 angehoben. Im System werden Eisen, Uran und Radium zurückgehalten.....	166
Abbildung 67: Anoxischer Carbonatkanal während der Konstruktionsphase (Foto: Jeff Skousen). Im offenen Kanal befindet sich der Liner, der am hinteren Ende bereits mit Kalkstein gefüllt ist.....	168
Abbildung 68: Offenes Carbonatgerinne mit Eisenhydroxidausfällungen am Grubenwasseraustritt des ehemaligen Kohlenbergwerks Dominion № 11 auf der Kap-Breton-Insel, Neuschottland, Canada.....	171
Abbildung 69: Ehemaliger offener Carbonatkanal an der Mina de Campanema/Minas Gerais in Brasilien. Die Verockerung der Kalksteine ist deutlich zu sehen.....	172
Abbildung 70: Zulauf (links) und Ablauf (rechts) des aeroben konstruierten Feuchtgebiets Neville Street (Kap-Breton-Insel, Neuschottland, Kanada). Das Wasser fließt verockert und metallreich in das konstruierte Feuchtgebiet (links) und verlässt es kristallklar und mit deutlich verminderter Metallfracht wieder (rechts).....	173
Abbildung 71: Darstellung des Gesamtprozesses zur Sulfatreduktion und Bildung von Monosulfiden und Pyrit in Sedimenten (verändert nach Berner 1972).....	176
Abbildung 72: Probenahmestellen der Tabelle 26 in dem konstruierten anaeroben Feuchtgebiet Westmoreland County, Pennsylvanien, USA (nach Hedin et al. 1988).....	177
Abbildung 73: Erstes europäisches anaerobes konstruiertes Feuchtgebiet Quaking Houses (County Durham, England, Vereinigtes Königreich). Pflanzenbewuchs fehlt, da der Schlamm nach 10 Jahren Betriebszeit ausgetauscht worden war.....	178
Abbildung 74: Durch Gasaufstieg hervorgerufene Kanäle auf der Oberfläche des organischen Substrats im RAPS Bowden Close, Landkreis Durham, England. Durchmesser der Kanäle im Zentimeterbereich; Bildbreite in der Mitte etwa 3 m.....	179
Abbildung 75: Lageplan des RAPS Bowden Close, Landkreis Durham, England (verändert aus Wolkersdorfer et al. 2016).....	180
Abbildung 76: RAPS II am Standort Bowden Close, Landkreis Durham, England, Blickrichtung Westen. Auf dem Substrat aus Kalkstein und Pferdemit wachsen durch Sukzession typische Feuchtgebietspflanzen. Außerhalb des Bildes rechts sind das RAPS I und links das konstruierte Feuchtgebiet.....	180
Abbildung 77: Absetzteich an der ehemaligen Grubenwasserreinigungsanlage Straßberg/Harz. Die Grünfärbung wird durch suspendierten Kalkstein hervorgerufen.....	181
Abbildung 78: Absetzbecken der passiven Grubenwasserreinigungsanlage Neville Street, Neuschottland, Kanada vor und nach der Installation von Leitfolien. Details in Wolkersdorfer (2011).....	182
Abbildung 79: Schema des Absetzvorganges in einem einfachen Absetzbecken (verändert nach Crittenden et al. 2012).....	183
Abbildung 80: Sanierungsoptionen von Kontaminationen des Grundwassers. a) unbehandelte Kontamination, b) Reaktive Wand, c) Abpumpen und Reinigen: "pump-and-treat", d) Trichter-und-Tor-System: "funnel-and-gate" (nach Starr und Cherry 1994).....	184
Abbildung 81: Prinzipbild eines Vertikaldurchflussreaktors (verändert nach Florence et al. 2016). Stollentroll von Walter Moers (1999), Die 13 ½ Leben des Käpt'n Blaubär © Penguin Verlag, München, in der Verlagsgruppe Random House GmbH.....	185
Abbildung 82: Containerisierter Vertikaldurchflussreaktor (VFR) am finnischen Polymetallbergwerk Metsämonttu mit Belüftung des Grubenwassers. Der Auslauf des Reaktors mit Messwehr für den Durchfluss befindet sich am hinteren Ende des 20" Containers. Wasservolumen 24 m^3	187

Abbildung 82: Ergebnisse zweier Belüftungsexperimente von Grubenwasser aus Finnland und Südafrika. Das Grubenwasser in Kotalahti hat ausreichende Pufferkapazität, um die sich bildenden Protonen der Eisenhydrolyse zu puffern, was dem Grubenwasser aus Südafrika fehlt, sodass der pH-Wert sinkt.	188
Abbildung 83: Oxidationskaskade des Ventilatorstollens an der Leitzach, Oberbayern. Durchfluss etwa $2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. Breite des Kanals etwa 1 m. Zwischenzeitlich völlig umgebaut. ...	189
Abbildung 84: Oxidationskaskade der passiven Grubenwasserreinigungsanlage Neville Street, Neuschottland, Kanada während eines Tracertests mit Uranin. Durchfluss etwa $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Höhe der einzelnen Kaskadenstufen etwa 0,6 m.	190
Abbildung 85: Fünf unterschiedliche Stufen- und Kaskadentypen (verändert nach Geroni 2011, Abb. 4-5).	190
Abbildung 86: OxTube im 45° -Winkel Einbau am Vertikaldurchflussreaktor Metsämonttu. Die Sauerstoffsättigung im Grubenwasser kann dadurch von etwa 40% auf 60% angehoben werden.	191
Abbildung 87: Makrophytenbecken eines ARUM-Systems am ehemaligen Uranbergwerk Cunha Baixa (Portugal). Im System werden Eisen, Uran und Radium zurückgehalten.	193
Abbildung 88: Natürliche Selbstreinigung am Beispiel eines Grubenwasseraustritts in Bayern (Phillipstollen an der Leitzach). Links: Austritt aus dem verbrochenen Stollenmundloch; Mitte: nach einem Fließweg von 5 m, Rechts: nach einem Fließweg von 20 m. Schon kurz nach dem Zulauf in die Vorflut Leitzach lässt sich visuell kein Eisen mehr feststellen, da dieses fast vollständig als Eisenoxihydrat ausgefallen ist.	195
Abbildung 89: William Simon (links mit Gehstock), Koordinator der <i>Animas River Stakeholders Group</i> (Colorado, USA), erklärt interessierten Fachkollegen die Arbeit einer Gruppe Freiwilliger bei der Sanierung von Gewässern, die durch Sauerwässer aus dem ehemaligen Goldbergbau kontaminiert sind.	196
Abbildung 90: Entscheidungsbaum für kontrollierte natürliche Selbstreinigung (nach ERMITE Consortium et al. 2004).	200
Abbildung 91: Links: Auffanggraben der kupferhaltigen Lösung aus der Haldenlaugung; rechts: Vorbereitung einer Halde zur mikrobiologisch unterstützten sauren Laugung kupferreicher Erze (Kupferbergwerk ‚El Salvador‘ der ‚Corporación Nacional del Cobre de Chile‘ – Codelco).	203
Abbildung 92: Haldenlaugung am finnischen Nickelbergwerk Terrafame (ehemals Talvivaara).	203
Abbildung 93: Umfassungen („Makrokosmen“) unterschiedlicher Größe im Restsee 111 (Foto: Peter Radke, LMBV).	205
Abbildung 94: Ausgewählte, für den Elektronentransport in Zellen relevante Mechanismen. Unten rechts die im Substrat oder der Mineraloberfläche ablaufenden Redoxreaktionen (aus El-Naggar und Finkel 2013). © Thom Graves.	206
Abbildung 95: Prinzip der elektrobiochemischen Wasserbehandlung (verändert nach Firmenprospekt Inotec Inc., Salt Lake City, USA).	207
Abbildung 96: Einspülen von gelöschtem Kalk in den Scheibensee im November 2010 über Schlauchleitungen und eine landgestützte Zugabestation (Bildbreite etwa 500 m; Foto: Peter Radke, LMBV).	210
Abbildung 97: Diffuser Austritt von bergbaubeeinflusstem Grundwasser (Grubenwasser). Links: Cadeganbach (Kap-Breton-Insel, Neuschottland, Kanada; Bildbreite ca. 1 Meter); rechts: Gessenbach (Gessental bei Ronneburg, Thüringen; Bildbreite ca. 2 Meter).	215
Abbildung 98: Mischung von Abraum und „Kalk“ um die Säurebildung in den Kippen zu unterbinden (verändert aus Huisamen 2017; nach Wisotzky 2003).	218
Abbildung 99: Teilverdämmung eines Entwässerungstollens (nach Foreman 1971).	220
Abbildung 100: Beispiel eines unterirdischen Damms (nach Lang 1999).	220

Abbildung 101: Beispiele von verdämmten Entwässerungsstollen (nach Halliburton Company 1970; Scott und Hays 1975).....	220
Abbildung 102: Mit Gitter verschlossener „Königl. Verträglicher Gesellschaft Stolln“ am Roten Graben bei Freiberg/Sachsen aus dem 19. Jahrhundert.....	221
Abbildung 103: Biosphärenprojekt „Eden“ in einem ehemaligen Kaolintagebau in Cornwall/Vereinigtes Königreich (Foto: Jürgen Matern; Wikimedia Commons, CC-BY-3.0.).....	223
Abbildung 104: Das im November 2018 eröffnete Hotel InterContinental Shimao Shanghai Wonderland (Foto: InterContinental Hotels & Resorts). Architekten: JADE + QA –JADE + Quarry Associates, ECADI – East China Architectural Design & Research Institute und Atkins.	224
Abbildung 105: Premier Coal Flusskrebsaufzucht in Westaustralien. Links: Aufzuchtbecken; rechts: Flusskrebs (<i>Cherax tenuimanus</i>).	225
Abbildung 106: Hinweisschild im Bereich der geothermalen Hauptbohrungen in die abgesoffenen Kohlenbergwerke von Springhill/Neuschottland, Kanada.....	226
Abbildung 107: Ablauf der Grubenwasseraufbereitung in der Anlage in Dębieńsko/Polen (nach Ericsson und Hallmans 1996).	230
Abbildung 108: Halden mit Ocker aus einer passiven Grubenwasserreinigung nach dem Entwässern und Trocknen (links) und getrockneter sowie gebrannter Ocker (rechts; Fotos: Bob Hedin).....	231
Abbildung 109: Grubenwasseraufbereitungsanlage eMalaheni. Von links oben nach rechts unten: Vorreinigung (im Hintergrund links das Laugenbecken und rechts die Kohlenmine); Umkehrosmose; Gebäude aus Gips; in der Anlage hergestelltes Mineralwasser (Provinz Gauteng/Südafrika).....	233
Abbildung 110: Prinzip der Grubenwasserreinigungsanlagen eMalaheni und Kromdraai in der Provinz Gauteng/Südafrika (nach Karakatsanis und Cogho 2010).	234

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitschriften und Online-Quellen, die negative oder nicht erfolgreiche Ergebnisse von Experimenten publizieren.....	34
Tabelle 2: SI-Einheitenvorsätze (Präfixe). Bitte beachten Sie, dass das Präfix erst ab 10^6 (mega) GROSS geschrieben wird; alle anderen sind klein – also: kg, nicht Kg (Bureau International des Poids et Mesures 2006, S. 121), denn K steht für die Einheit Kelvin.....	40
Tabelle 3: Definition von Begriffen im Zusammenhang mit Oberflächen- und Fällungsreaktionen sowie ausgewählte Literatur. Die Begriffe Oberflächen- und Matrixsorption werden von Merkel und Planer-Friedrich (2002) verwendet.....	54
Tabelle 4: Prognose der maximalen Eisenkonzentrationen im Grubenwasser aus neu gefluteten britischen Tiefbauen in Abhängigkeit von der Gesamtschwefelkonzentration der abgebauten Flöze (Younger 2002a) und Vergleich mit gemessenen Werten aus Mpumalanga, Südafrika (pers. Mitt. Altus Huisamen).....	57
Tabelle 5: Klassierung von Grubenwasser basierend auf dem Vorschlag der „Federal Water Pollution Control Administration“ (Hill 1968; Scott und Hays 1975); Einheiten in mg L^{-1} ; pH ohne Einheit und Acidität in $\text{mg L}^{-1} \text{CaCO}_3$ -Äquivalenten.	64
Tabelle 6: Visuelle pH-Meter-Skala. Farbangaben basieren auf der Munsell-Skala (nach Younger 2010).....	65
Tabelle 7: Reinigungstechnologien für Grubenwasser in Abhängigkeit vom zu behandelnden Parameter, die als BAT/BATEA angesehen werden können (Hatch 2014; Pouw et al. 2015). Passive Technologien erhalten bei MEND-Berichten tendenziell schlechtere Beurteilungen, da die MEND-Methoden oftmals auf aktiven Bergbau abzielen. ■■■■■ Zielparameter der Methode, ■■■■■ wird bei der Methode mitentfernt.....	67
Tabelle 8: Auswahl numerischer, chemisch-thermodynamischer Modelle, sortiert nach Aktualität der Version. Der Funktionsumfang der einzelnen Modelle und deren Handhabung sowie Lizenzart unterscheiden sich teilweise erheblich. Details finden sich auf den angegebenen Internetseiten (aktuell 2019-07-03).....	70
Tabelle 9: Vor-Ort-Parameter im Rehbach an der ehemaligen passiven Grubenwasserreinigungsanlage Lehesten im Mai 2008. el. Leitfähigkeit: elektrische Leitfähigkeit; ALD: anoxic limestone drain (Anoxischer Carbonatkanal).	71
Tabelle 10: Empfohlene Wassermengen und Vorbehandlungen für die standardisierte Grubenwasserprobenahme.....	75
Tabelle 11: Empfohlener Analysenumfang für verschiedene Arten von Grubenwasseruntersuchungen; fettgedruckte Parameter sind vor Ort zu bestimmen; bei kursiven Parametern sollten sowohl Gesamtkonzentrationen als auch die einzelner Spezies bestimmt werden; zusätzlich Parameter sollten je nach geologischen Verhältnissen oder vermuteter Geschichte des Bergwerks analysiert werden; el. Leitfähigkeit: elektrische Leitfähigkeit (verändert aus ERMITE Consortium et al. 2004, S. S49).....	78
Tabelle 12: Ausdrücke, die bei der Analyse in Grubenwasser verwendet werden sollten, am Beispiel des Eisens. Diese Bezeichnungen sollten analog für andere Inhaltsstoffe verwendet werden. Zusätzlich sind die Filtergröße (z.B. $0,02 \mu\text{m}$; $0,2 \mu\text{m}$; $0,45 \mu\text{m}$) und das Filtermaterial anzugeben.....	83
Tabelle 13: Unerlässliche Parameter, die bei der Probenahme von Grubenwasser erfasst werden sollten. Details in Kapitel 4.3 und Tabelle 11.....	86
Tabelle 14: Berechnung von Mittelwerten des pH-Werts. Nicht 3,63, sondern 3,41 ist der korrekte Mittelwert des pH (Messwerte eines Grubenwassers bei Carolina in der Provinz Mpumalanga/Südafrika).....	100
Tabelle 15: Koeffizienten für die Berechnung der Redoxspannung nach Gleichung 10. Weitere Koeffizienten finden Sie auf www.Wolkersdorfer.info/redox	103

Tabelle 16: Zusammenstellung von Reinigungsprozessen zur Neutralisierung von Grubenwasser.....	115
Tabelle 17: Charakteristika von Dünn- und Dickschlamm aus sieben Wasserreinigungsanlagen, die das Neutralisationsverfahren nutzen (zusammengestellt aus Aubé und Zinck 1999, S. 265).....	116
Tabelle 18: Ausgewählte alkalische Materialien, die sich zur Neutralisation von Grubenwasser eignen (verändert und ergänzt nach Coulton et al. 2003b; MEND 2000; Skousen et al. 1988; Skousen et al. 2000). t Acidität: CaCO ₃ -Äquivalente. aquaC (Kalka 2018) ist in der Lage, 18 verschiedene alkalisch wirkende Materialien numerisch zu simulieren. Diese Tabelle wird von verschiedenen Autoren verwendet, ohne eine exakte Quelle anzugeben.....	117
Tabelle 19: Oftmals verwendete Flockungsmittel oder Flockungshilfsmittel nach ^a Skousen et al. (1998) und ^b Fu und Wang (2011).	118
Tabelle 20: Notwendige Alkalimenge, um den pH-Wert des Grubenwassers der Zeche Horden (County Durham, England) auf 8 bis 8,5 anzuheben (aus Croxford et al. 2004, Tabelle 4). Zwischenzeitlich wurde die Anlage durch eine passive Wasserreinigung ersetzt (Davies et al. 2012).....	122
Tabelle 21: Zusammenstellung von minimalen pH-Werten, die nötig sind, um Metalle aus dem Grubenwasser ausfallen zu lassen und um Konzentrationen von unter 1 mg L ⁻¹ zu erreichen (ohne Berücksichtigung von Sorption oder Kopräzipitation). Diese Tabelle wird in den verschiedensten Publikationen wiederholt, ohne die ursprüngliche Quelle aus dem Jahr 1973 zu nennen (z.B. Brown et al. 2002; Jacobs und Pulles 2007; Skelly and Loy und Penn Environmental Consultants 1973, S. 269). Im übrigen weisen die Originalautoren darauf hin, dass die Ergebnisse auf lediglich einer Studie beruhen.....	123
Tabelle 22: Ausgewählte charakteristische Eigenschaften von Membranverfahren sowie der Elektrodialyse (aus den im Text genannten Quellen zusammengestellt). Die Arbeitsdrücke und Porenweiten variieren je nach Autor. Bei der Umkehrosiose werden bis zu 8 MPa angegeben.....	135
Tabelle 23: Liste an Ionen, die Gitterplätze im Ettringit (Ca ₆ Al ₂ [(OH) ₁₂ [(SO ₄) ₃]·26 H ₂ O) diadoch ersetzen können (aus Gougar et al. 1996, Tabelle 3).....	145
Tabelle 24: Klassierung von passiven und natürlichen Verfahren zur Behandlung von Grubenwasser.....	161
Tabelle 25: Empirische Reinigungsraten R_A von aeroben („alkalisch“) und anaeroben („acidisch“) konstruierten Feuchtgebieten die zur Flächenberechnung von konstruierten Feuchtgebieten verwendet werden müssen (Hedin et al. 1994a). Die Acidität ist in der Einheit g CaCO ₃ -Äquivalent angegeben ($C_{azi-eq} [g L^{-1}] = 50,04 \cdot k_B [mol L^{-1}]$). Bei der Wasserklassierung handelt es sich um die in Kapitel 3.2.12 erläuterte Klassifikation.....	175
Tabelle 26: Chemismus des Grubenwassers im Verlauf eines konstruierten anaeroben Feuchtgebiets im Westmoreland County, Pennsylvanien, USA (Hedin et al. 1988) bei der Probenahme am 1987-10-07 (Probenahmestellen in Abbildung 72).....	177
Tabelle 27: Ausgewählte Leitparameter der Sächsischen Stollendatenbank (aktualisiert bis 2009). n : Anzahl, \bar{x} : Mittelwert. Anzahl bezieht sich auf alle Einzelanalysen des Parameters, nicht auf die Anzahl der Probenahmestellen.....	197
Tabelle 28: Auswahl von sauren Seen, deren Wasserqualität durch die Zugabe von Chemikalien verändert wurde (verändert und ergänzt aus Geller et al. 2013).	208
Tabelle 29: Kostenvergleich einer passiven Grubenwasserreinigungsanlage mit Vermarktung durch Eisenoxidgewinnung und einer konventionellen Dünnschlammanlage (nach pers. Komm. Bob Hedin 2008). *Endlagerkosten, wenn der Schlamm nicht vermarktbar sein sollte.....	231

Rechtlicher Hinweis Ein Großteil der genannten Verfahren zur Grubenwasserreinigung ist patentrechtlich geschützt. Aus dem Fehlen eines Hinweises auf das Patent sollte nicht geschlossen werden, dass sich das Verfahren von jedermann frei verwenden ließe. Dies gilt auch für eingetragene Markennamen, die nicht in jedem Fall gekennzeichnet sind. Im Zweifelsfalle sollten die internationale Datenbank des Europäischen Patentamts, die Internetsuchseiten von Google Patents oder gegebenenfalls ein Patentanwalt (in der Regel die teuerste Variante) zu Rate gezogen werden. Weiterhin fühlt sich der Autor nicht dafür verantwortlich, wenn eine Anlage nicht funktioniert, obwohl sie auf der Basis der Informationen in diesem Buch errichtet wurde. Es obliegt jedem Entwickler einer Grubenwasserreinigungsanlage, zusätzlich die angeführte Literatur oder einen Experten zu befragen. Sollte eine Anlage, die in diesem Buch erwähnt ist, hingegen einwandfrei funktionieren, nehme ich die Lorbeeren dafür gerne entgegen.

Firmennamen Jegliche Verwendung von Handels-, Firmen- oder Produktnamen ist nur für beschreibende Zwecke und impliziert nicht meine oder die Billigung des Herausgebers. Ich unterhalte zu keiner der aufgeführten Firmen wirtschaftliche Beziehungen oder habe irgendwelche Produkte oder Leistungen kostenfrei erhalten, um sie speziell hier vorzustellen.

Hinweis zum Gender-Mainstream Ich habe auf eine durchgängige Nennung der weiblichen und männlichen Form verzichtet, um den Text für meine LeserInnen leichter lesbar zu machen. Selbstverständlich beziehen sich sämtliche Beispiele, Erläuterungen oder Fehlerpotentiale in der Regel auf alle drei Geschlechter.

Texte und Abbildungen aus früheren Publikationen In wenigen Fällen habe ich Sätze oder Abbildungen aus meinen früheren Publikationen entnommen, ohne diese im Einzelnen zu kennzeichnen. Wo immer es sprachlich möglich war, habe ich die Texte aber deutlich umgearbeitet. Alle diese Publikationen sind im Literaturverzeichnis aufgeführt. Der Text dieser Publikation basiert auf einem Gutachten für das LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) in Dresden/Sachsen. Seiner Publikation wurde mit Az.: 46(13)-4331/142/27, B 559 im Mai 2014 zugestimmt.

0 Zusammenfassung | Abstract | Shrnutí

0.1 Deutsche Zusammenfassung

Ziel dieser Publikation ist es, auf eine Reihe von Verfahrensweisen zur Beurteilung von Grubenwasser einzugehen. Es werden die derzeit bekannten Methoden und Systeme zur Reinigung von Grubenwasser vorgestellt. Zunächst wird in einem Überblick dargelegt, was Grubenwasser ist, wie es klassifiziert werden kann und wie eine korrekte Probenahme zu erfolgen hat. Danach folgt eine Zusammenstellung der bekannten Methoden zur Reinigung von Grubenwasser, basierend auf der international üblichen Einteilung in aktive und passive Verfahren, (kontrollierte) natürliche Selbstreinigung sowie *In-situ*-Maßnahmen. Am Ende findet sich eine Darstellung von alternativen Nutzungsmöglichkeiten für aufgelassene Bergwerke, die auf das Grubenwasser abzielt. Eingestreute, glossenartige Beiträge beleuchten mögliche Fallstricke der Probenahme oder des Managements.

Dazu wurden etwa 3.000 Publikationen zum Thema Grubenwasserreinigung sorgfältig studiert und darauf basierend eine Zusammenstellung aller wichtigen, derzeit bekannten Verfahren gegeben. Ein umfassendes Literaturverzeichnis mit über 900 Einträgen erlaubt es dem Leser, weitergehende Informationen einzuholen. Da der Zugang zu Literatur individuell verschieden ist, gibt es zu jedem Verfahren stets mehrere Zitate, sodass in jedem Fall wenigstens eine Publikation zum Nachlesen gefunden werden sollte.

Bislang ist es nur eingeschränkt möglich, anhand der Wasseranalyse eine exakte Bemessung des Reinigungssystems zu planen. Daher sind vor einer Vollinstallation oftmals Laborversuche und Pilotanlagen notwendig, um die optimale Anlagenkonfiguration zu ermitteln. Künftige Forschungen und Entwicklungen sollten daher auf ein optimiertes Prozessverständnis abzielen, um dem Ziel einer integrierten Grubenwasserreinigung näher zu kommen. Dazu könnte auch das „Internet of Mine Water“ beitragen (siehe weiter unten), in dem alle relevanten Komponenten des Grubenwassermanagements zusammengefasst sind.

Zur Planung einer Grubenwasserreinigungsanlage ist eine zuverlässige und korrekte Probenahme mit Volumenströmen und Vor-Ort-Parametern unerlässlich. Obwohl es keine allgemein anerkannte Verfahrensweise gibt, haben sich Firmenstandards eingespielt, die weitgehend auf nationalen oder internationalen Standards beruhen. Einige Parameter sind grundsätzlich bei jeder Probenahme zu ermitteln, wohingegen andere nach Bedarf ermittelt werden können.

Insgesamt werden zwölf Gruppen von aktiven Reinigungsverfahren vorgestellt, die derzeit angewendet werden oder sich in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien befinden. Darunter sind die Neutralisation, elektrochemische Verfahren, Membrananwendungen und einige bislang weniger bekannte Methoden. Auf spezielle Varianten, die meist aus patentrechtlichen Gründen zum Einsatz kommen, sich aber nur minimal von anderen Verfahren unterscheiden, wird dabei nicht eingegangen. Von den passiven Verfahren werden elf vorgestellt. Dabei handelt es sich beispielsweise um Carbonatkanäle, konstruierte Feuchtgebiete, permeable reaktive Wände und reduzierende Alkalinitätssysteme. Verfahren, die bislang nur an einem oder zwei Standorten zum Einsatz kamen oder sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden, bleiben dabei weitgehend außen vor. Drei alternative Methoden, die ein erhebliches Entwicklungspotential aufweisen, leiten über zu *In-situ*-Maßnahmen in Tagebauen und Untertagebergwerken. Zu den alternativen Methoden zählen (kontrollierte) natürliche Selbstreinigung, Änderung der Abbaubedingungen oder die im Anfangsstadium stehenden biometallurgischen Verfahren. Von den *In-situ*-Methoden werden die unterschiedlichen *In-lake*-Verfahren sowie die Rückspülung von Reststoffen näher beschrieben.

Abschließend folgt eine Zusammenstellung von alternativen Nutzungsmöglichkeiten. Diese sind aufgeteilt in Nutzung der aufgelassenen Bergwerke selbst und Nutzung der Reststoffe, die bei der Grubenwasseraufbereitung anfallen.

0.2 English Abstract (Short version)

This publication highlights several procedures for the assessment of mine water and presents the currently known methods and systems for the treatment of mine water. In the first part, an overview about mine water, its classification and proper sampling will be given. This is followed by a compilation of the known methods for mine water treatment, based on the international classification into active and passive methods, natural attenuation and *in-situ* methods. At the end, a presentation of alternative uses for abandoned mines is given, focusing on mine water. Interspersed, apostil-like contributions enlighten potential pitfalls of sampling or management.

Mine water is seen as one of the world's largest waste streams by volume, but not all of them are contaminated. Thousands of kilometers of water courses, extensive areas in nature reserves and countless aquifers are contaminated by acid or (semi-)metal-containing mine water or are potentially at risk. To minimize negative impacts on the ecosphere and anthroposphere, it is essential to treat contaminated mine water such that the impact on the environment is kept to a minimum or even completely prevented. Therefore, wherever funds are available to treat mine water to an acceptable water quality, plants or systems are built to do so.

So far, planning a treatment system simply based on a chemical water analysis is limited. Therefore, laboratory experiments and pilot plants need to be conducted before a full installation to determine the optimal system configuration. Future research and development should therefore aim for an optimized understanding of the processes involved to achieve objectives of an integrated approach to mine water purification. In addition, the "Internet of Mine Water" could contribute to reaching this goal, because all relevant components of the mine water management can be considered.

To plan a mine water treatment plant, a reliable sampling protocol is essential. As there is no universally accepted protocol, many companies developed standards, which are largely based on national or international guidelines. In principle, some parameters must be determined at each sampling time, whereas others can be determined as needed. Within the report, the most common parameters are identified, and a correct sampling and measurement of the on-site-parameters will be given.

A total of twelve varieties of active treatment methods that are currently used or are in an advanced stage of development will be described. Included are neutralization, electrochemical processes, membrane applications and some less well-known methods. Specific variants which differ only slightly from other methods, and are mostly usage restricted because of patents, will not be described. Of the passive methods, eleven will be presented. Of those are limestone channels, constructed wetlands, permeable reactive walls and reducing and alkalinity producing systems. Procedures that were previously only tested at one or two sites or that are in a very early stage of development, will not be described. Three alternative methods that have substantial development potential are described before the *in-situ* measures within open pit and underground mines. Among the alternative methods are natural attenuation, modification of mining methods or bio-metallurgical processes which are currently in early stage of development. Of the *in-situ* methods, the different in-lake processes and the re-injection of residues from water treatment plants will be described.

Finally, a compilation of alternative uses of mines and mine water follows. These are divided into the usage of abandoned mines themselves and the use of the residual materials of mine water treatment.

0.3 Česká Resumé (Shrnutí)

Předložená zpráva uvádí řadu postupů pro hodnocení důlních vod a představuje dosud známé metody a systémy čištění důlních vod. V první části je uveden obecný přehled důlních vod, jejich klasifikace a vhodné způsoby vzorkování. Následuje souhrn známých metod čištění důlních vod, rozdělený na základě mezinárodní klasifikace na aktivní a pasivní metody, přirozenou atenuaci a *in situ* metody. Na závěr jsou představeny alternativní způsoby využití uzavřených dolních děl, se zaměřením na využití důlních vod. Navíc jsou doplněny příklady zdůrazňující potenciální chyby způsobu vzorkování a managementu.

Důlní vody jsou kvůli jejich objemu považovány za jeden z největších zdrojů odpadních vod, ne všechny jsou ale kontaminovány. Tisíce kilometrů vodních toků, rozsáhlá území v přírodních rezervacích a nespočet aquiferů je kontaminováno kyselými důlními vodami nebo důlními vodami s obsahem kovů, případně jsou jimi potenciálně ohroženy. Pro minimalizaci negativních dopadů na ekosféru a antroposféru je proto nezbytné upravovat důlní vody tak, aby byl dopad na životní prostředí minimální nebo žádný. Z tohoto důvodu jsou důlní vody upravovány na přijatelnou kvalitu všude tam, kde jsou dostupné finanční prostředky.

Možnosti plánování systému čištění vod, který je navržen pouze na základě výsledků chemické analýzy vod, jsou zatím omezeny. Před plným provozem systému je potřeba nejdříve provádět laboratorní experimenty a následně využít testování pilotních technologií a určit tak optimální konfiguraci celého systému. Budoucí výzkum a vývoj by proto měl být zaměřen na komplexní pochopení dílčích procesů za účelem zřízení integrovaného systému čištění důlních vod. K dosažení tohoto cíle by mohl přispět i „Internet of Mine Water“, protože takto mohou být vzaty v úvahu všechny složky procesu hospodaření s vodou.

Pro navržení systému čištění důlních vod je nezbytná správná metodika vzorkování. Protože neexistuje žádná všeobecně uznávaná metodika, vyvinula řada firem normy, jež jsou z velké části založeny na národních nebo mezinárodních směrnících. Během vzorkování musí být některé parametry stanoveny při každém odběru, zatímco jiné mohou být stanoveny podle potřeby. Zpráva zahrnuje nejběžněji stanovované parametry a správnou metodiku vzorkování a měření parametrů *on-site*.

Je zde popsáno celkem dvanáct druhů aktivních metod čištění, jež jsou v současné době používány, nebo jsou v pokročilé fázi vývoje. Zahrnuty jsou neutralizace, elektrochemické procesy, membránové aplikace i některé méně známé metody. Specifické druhy metod, které se jen nepatrně liší od jiných metod, a jejich využití je většinou omezeno kvůli patentové ochraně, nejsou zahrnuty. Z pasivních metod je také popsáno jedenáct druhů. Patří k nim vápencové drenáže, umělé mokřady, propustné reaktivní bariéry a redukční a alkalické systémy. Metody, jež byly testovány pouze na jednom nebo dvou místech, nebo jsou zatím v rané fázi vývoje, nejsou popsány. Dále jsou uvedeny tři alternativní metody se značným rozvojevým potenciálem. Mezi alternativní metody patří přirozená atenuace, modifikace těžebních metod nebo biometalurgické procesy, které jsou v současné době v rané fázi vývoje. Navazuje výčet *in situ* metod využitelných pro povrchové a hlubinné doly. Z *in situ* metod jsou charakterizovány různé „*in-lake*“ procesy a zpětná injektáž reziduí z procesu čištění vod.

V závěru jsou uvedeny způsoby alternativního využití dolů. Ty jsou rozděleny jednak na využití samotných uzavřených důlních děl, jednak na využití zbytkových materiálů z procesu čištění důlních vod.

1 Vorwort

Über die Reinigung von Grubenwasser gibt es eine Vielzahl an Literatur und jedes Jahr kommt mehr hinzu, da die Probleme, die mit verunreinigtem Grubenwasser in Zusammenhang stehen, weltweit bekannt sind. Während wir bei der Vergrößerung des Œuvres eines Künstlers in der Regel einen Zugewinn sehen, ist dies bei der stetig wachsenden Anzahl von Fachpublikationen über Grubenwasser und Wasseraufbereitungsmethoden nur bedingt ein Vorteil. Daher stellt sich zurecht die Frage: Warum noch ein Buch? Diese lässt sich einfach beantworten: weil es bisher kein umfangreiches und zusammenfassendes in deutscher Sprache gibt. Eine kurze Zusammenfassung hat der viel zu früh verstorbene Kollege Wolfgang Helms verfasst (Helms 1995). In jüngerer Zeit haben einen auf Tagebaue fokussierten Überblick Wilfried Uhlmann und Mitarbeiter gegeben (Uhlmann et al. 2001, S. 33–58 – leider werden weder SENES Consultants Limited 1994 noch Lorax Environmental 2003 zitiert). Bilek (2012) hat eine auf die Lausitz fokussierte Zusammenfassung erstellt.

Wie die Gerichtsurteile zu den Metallbergbauen Rammelsberg und Meggen zeigen, stellt die Reinigung von kontaminiertem Grubenwasser eine sehr langfristige Aufgabe, nicht aber eine „Ewigkeitshaftung“ dar (7. Senat des Bundesverwaltungsgerichts 2014; Anonymus 1995). Die Frage, „wie lange ist sehr langfristig“ kann jedoch noch nicht abschließend beurteilt werden (Beckmann 2006; Spieth 2015; Wolfers und Ademmer 2010). Ich verzichte hier bewusst auf eine Diskussion des Themas, da ob dessen Komplexität selbst zehn Seiten die Fragestellung nicht in all ihren Aspekten beleuchten könnten (und an die Frage, wie lange die „Ewigkeit“ sei wage ich mich erst gar nicht heran, aber ich würde sagen so um die 25 bis 50 Jahre). Unabhängig davon ist es unerlässlich, die vielfältigen Möglichkeiten zur Reinigung von Grubenwasser zu kennen, um eine solche Anlage den jeweiligen Schadstofffrachten und rechtlichen Rahmenbedingungen anpassen zu können. Dies ist nur möglich, wenn wird das Œuvre der Grubenwasserreinigung kennen. Und dies zu erschließen soll dieses Buch helfen. Gerne hätte ich ein Kochbuch verfasst, mit dem der Praktiker in die Lage versetzt wird, eine Anlage zu planen – Sie wissen schon, so mit DINs und Verfahrensskizzen und Faustformeln um eine Anlage planen und bemessen zu können. Bei der Recherche wurde mir jedoch schnell klar, dass dies einer völlig anderen Herangehensweise bedurft hätte. Vielmehr kam es mir darauf an, die Literatur zusammenzufassen, sodass es möglich ist, anhand dieser eine Planung durchzuführen. Das Werk ist folglich leider ein wenig theorielastig geworden, weshalb ich um Ihre Nachsicht bitte.

Da sich die Technologie der Grubenwasserreinigung in den zurückliegenden Jahrzehnten in einigen Bereichen grundlegend verändert hat, hätte das vorliegende Werk noch umfassender und detaillierter werden können (sollte Ihre Publikation hier fehlen, ist dies keine Absicht, sondern einfach der großen Anzahl an Publikationen zum Thema geschuldet). Auch das Portfolio der zu entfernenden Schadstoffe nimmt stetig zu, da sie als problematisch für die Umwelt erkannt werden. Ein Beispiel sind die ubiquitär auftretenden PCBs, die in Deutschland in den vergangenen Jahren als besonderer Problemstoff in Grubenwasser erkannt wurden (Schabronath 2018), in den USA allerdings schon seit Ende der 1980er Jahre als solche wahrgenommen werden (Bench 2000). Ich habe mich jedoch dazu entschieden, nur die Grundzüge der einzelnen Verfahren darzulegen, um dann auf die internationale Literatur zu verweisen. Dies mag für denjenigen, der Englisch nur unzureichend beherrscht, wenig befriedigend sein, aber ich habe in der deutschen Version oftmals auf die Problembereiche hingewiesen, die erfahrungsgemäß beim Anlagenbau auftreten können. Bei der Übersetzung von englischen Textabschnitten habe ich in den Inhalt in leicht lesbares und verständliches Deutsch übertragen – im Einzelfall mag es durchaus andere Übersetzungsmöglichkeiten geben. Die Textlänge der einzelnen Verfahren sagt nichts über deren Bedeutung aus. Es heißt lediglich, dass es über die eine Methode mehr zu schreiben gab als über die andere. Einige der Informationen zu Fallbeispielen, die ich hier gebe, haben mir Kollegen und Kolleginnen im Sinne der Chatham-House-Regel anvertraut. Ihnen allen danke ich dafür, dass sie Ihre Daten unter dieser Prämisse mit mir geteilt haben.

Zielgruppen für dieses Buch sind alle, die sich mit einer einfach verständlichen Sprache mit den Techniken der Grubenwasserreinigung vertraut machen möchten und die nicht unbedingt

über eine umfassende chemisch-physikalische Ausbildung verfügen. Im Speziellen habe ich dabei an Bergbauingenieure, Ingenieure, Geologen, Geoökologen, Biologen, Behördenvertreter, Umweltaktivisten, Studenten, Sanierungsbetriebe und Journalisten gedacht. Ein grundlegendes Verständnis für die chemischen, physikalischen sowie biologischen Vorgänge, die um uns herum ablaufen oder im Zusammenhang mit Wasser oder Grubenwasseraufbereitung wichtig sind, setzte ich allerdings voraus. Durch das umfassende Literaturverzeichnis sollte es Ihnen jederzeit möglich sein, sich ergänzende Informationen anzueignen.

Aber auch Sie, die Sie im täglichen Geschäft Monitoring betreiben sollen, sind angesprochen. Schließlich richtet es sich an Ingenieurbüros, die Grubenwasserreinigungsanlagen (auch Wasserbehandlungsanlage oder Wasseraufbereitungsanlage WBA) planen und sich einen Überblick über die Techniken verschaffen wollen, bevor sie sich in die internationale Literatur vertiefen. Alle Details finden sich in der Literatur. Ich habe außerdem aus meiner 29-jährigen Erfahrung im Bergbauumfeld Beispiele eingefügt, die im Wesentlichen auf „Fallstricke“ konzentrieren: Was kann falsch gemacht werden? Einige dieser Beispiele könnten als Kritik am bestehenden Wissenschaftssystem verstanden werden, in dem oftmals nur noch die Quantität der Publikationen von Relevanz ist – nicht mehr deren Qualität.

Seit etlichen Jahren gibt es mit dem GARD-Guide (**Global Acid Rock Drainage**) eine relativ umfangreiche, englischsprachige Anleitung, wie man verunreinigtes Grubenwasser verhindern oder behandeln kann (Verburg et al. 2009). Auch dort lassen sich viele Details zu den hier vorgestellten Verfahren nachschlagen. International wird der GARD-Guide mitunter für seine „Industrienähe“ kritisiert – aber genau unter dem Aspekt entstand die Anleitung: Aufzeigen erprobter Methoden zur Vermeidung oder Reinigung kontaminierten Grubenwassers. Membranverfahren nehmen dort daher gerade einmal einen Umfang von weniger als 500 Wörtern ein, sodass ich diese Lücken hier geschlossen habe.

Eine Lücke in *diesem* Buch ist die Biometallurgie, die heute auch als Geobiotechnologie in die Literatur Eingang findet. Sie scheint derzeit eine Wiedergeburt zu erfahren, obgleich viele Grundzüge bereits in den 1970er- bis 1990er-Jahren erarbeitet wurden (Lundgren und Silver 1980; Paños 1999). Ohne Zweifel kommt den biometallurgischen Verfahren eine große Bedeutung zu (Rohwerder et al. 2003) und sie wird in den nächsten Dekaden erheblich zunehmen, wenn es gelingt, Grubenwasser und Bergbauabfälle vom Abfall zum Rohstoff zu wandeln. Es gibt jedoch noch keine großtechnische Anlage, die Grubenwasser reinigt und unter dem Stichwort Biometallurgie die Metalle als Rohstoff zur Verfügung stellt. Ähnliches gilt für das Stichwort „Circular Economy“ – leider sind wir noch nicht so weit, dass wir jegliche Wertstoffe aus dem Grubenwasser oder den Reststoffen der Grubenwasseraufbereitung dem Rohstoffkreislauf zuführen könnten. Daher werden Sie in diesem Buch nichts Weiteres zu diesem Thema finden, obgleich ich darauf bezogen nicht mit der Meinung von Fritz Haber übereinstimme, der über die Goldgewinnung aus Meerwasser schrieb: „Ich habe es aufgegeben, nach dieser zweifelhaften Stecknadel in einem Heuhaufen zu suchen“ (Haber 1927, S. 314).

Möglicherweise erlebt der Bergbau auf Nichtenergierohstoffe in Deutschland eine Renaissance, auch wenn derzeit viele der noch vor wenigen Jahren erfolversprechenden Projekte eingestellt sind. Dies würde eine Neuorientierung bei der Grubenwasserreinigungstechnologie erfordern, denn die Anforderungen an eine saubere Umwelt sind heute ungleich höher als zu den Zeiten, da es in Deutschland hunderte von Bergwerken gab. Genannt seien hier nur die Vorkommen von Seltenerdmetallen in Delitzsch (Storkwitz: Seltenerden Storkwitz A.G. 2013, S. 23), Kupfer in der Lausitz (Seidler 2012), Flussspat (Niederschlag: Rauner 2011) oder Zinn im Erzgebirge (Projekt Tellerhäuser der Saxore Bergbau GmbH auf Zinn, Zink, Silber, Indium und Eisen: Sebastian 2013, S. 151), die gegenwärtig oder vor einiger Zeit erkundet wurden. Eine moderne und leistungsstarke Technologie zur Reinigung der Grubenwasser wird an diesen und allen anderen Standorten dazu beitragen, die Akzeptanz des Bergbaus in der Bevölkerung zu stärken. Aber auch eine offene Informationspolitik, sinnvolle Wortwahl und Transparenz tragen erheblich dazu bei, das Verständnis für die Vorgänge im Bergbau und im Zusammenhang mit Grubenwasser zu stärken. Vielleicht würden dadurch Blogs,

Pressemitteilungen oder Webseiten an Sprengkraft verlieren, die den Bergbausektor kritisieren oder gar Verschwörungen vermuten.

Mit dem Ende des Steinkohlenbergbaus in Deutschland im Dezember 2018 (Fischer 2016; Tönjes 2016) schob sich das Thema Grubenwasseraufbereitung in den Vordergrund der Diskussionen um Ewigkeitsaufgaben. Es wird eine geraume Zeit dauern, bis die natürlich ablaufende Flutung der Gruben vollendet sein wird (Baglikow 2012; Terwelp 2013) und wir wissen, mit welcher Qualität das Grubenwasser dann in die Ökosphäre gelangt. Daher ist in dieser Publikation vorerst nichts weiter zu diesem Thema zu finden. Publikationen dazu sind von verschiedenen Seiten in Vorbereitung.

Geben wir uns abschließend jedoch nicht der Illusion hin, dass es uns eines Tages gelingen würde, auf die Behandlung von Grubenwasser zu verzichten. „Drainage happens ...“ pflegte Walter Ficklin (*1937–†1993) zu sagen, und George Vranesh nannte es gar „den gemeinsamen Feind“ (Vranesh 1979). Weder wird es hinreichend gute *In-situ*-Verfahren geben, noch wird der Bergbau eines Tages eingestellt werden. Auch das Ausweichen auf ISL (*in situ leaching*) oder ISR (*in situ recovery*) Verfahren wird das Problem verunreinigten Grubenwassers nicht gänzlich lösen. Keiner von uns, egal wie wir dem Bergbaugewerbe gegenüber eingestellt sind, wird darauf verzichten wollen, im täglichen Leben das eine oder andere Metall zu verwenden oder einen Rohstoff einzusetzen. Schon die Steinzeitmenschen haben Rohstoffe gewonnen und „weltweit“ gehandelt (Holgate 1991; Shepherd 1993), wenngleich die dadurch bedingten Umweltprobleme – so sie vorhanden sind – vergleichsweise gering ausfielen, was jedoch an der Größe der „Betriebe“ liegt. Ein Ende des Bergbaues würde es nur dann geben, wenn wir uns auf das Niveau von *Anthropoidea* herablassen würden. Da das vermutlich nur wenige wollen, müssen wir versuchen, die Probleme pro-aktiv anzugehen und frühestmöglich Verfahren einsetzen, aus denen sich ein verantwortungsvoller Umgang mit der Natur ableiten lässt. Zumindest die großen Konzerne haben in der Regel das Geld und aufmerksame Aktionäre, um die verursachten Umweltprobleme weitgehend zu beseitigen – dem weltweiten Kleinbergbau, der kaum wahrgenommen wird (Abbildung 1), fehlen hingegen oftmals die Informationen und die finanziellen Mittel, um Grubenwasser zu vermeiden oder zu reinigen. Solange Gold von Garimpeiros abgebaut wird oder seltene Metalle über den Umweg China aus dem Kongo kommen (Stichwort Coltan) und dort von Kindern und Frauen abgebaut werden, denen allen die finanziellen Mittel zur Wasseraufbereitung fehlen – solange müssen wir mit dem Problem Grubenwasser umgehen.



Abbildung 1: Kleinbergbau auf Gold in Panompa bei Pichin in Thailand. Zwei Arbeiter installieren eine Pumpe zum Sumpfen ihres Abbaues © REUTERS/Damir Sagolj

Conrad Matschoss, der Herausgeber der Agricola-Übersetzung aus dem Jahr 1928, hat in seinem Vorwort über Georgius Agricola geschrieben (Agricola 1928 [1557], S. IX):

„Agricola hat es als den Zweck seiner Schriften hingestellt, die Jugend zur Erforschung der Natur anzuspornen. Leidenschaftlich und mit ganzer Seele habe er sich dem Studium der Natur gewidmet, und die Wissenschaft habe er höher gestellt als Reichtum, Glücksgüter und Ehrenstellen. Diesen Geist leidenschaftlicher Hingabe an die Wissenschaft brauchen wir für die Fortentwicklung der Menschheit nötiger als je.“

Ich hoffe, dass dieses Buch, ganz im Sinne von Agricola, dazu beiträgt, die Grubenwasserreinigung im deutschsprachigen Raum zu verbessern. Darüber hinaus wünsche ich mir, dass es den einen oder anderen Leser dazu anregt, diese oder jene Methode zu „exportieren“ oder zu optimieren. Wenn dies geschieht, sehe ich mein Ziel als erreicht an.

Christian Wolkersdorfer

Im südafrikanischen Sommer (Pretoria), im mitteleuropäischen Winter (Tirol) und in südantlantischer Schwüle (St. Helena) 2019

Dieses Manuskript wird im Lauf der kommenden Monate bei Springer Nature veröffentlicht werden. Bitte gedulden Sie sich daher bis es soweit ist oder schreiben Sie mir eine E-Mail und fragen um eine vorläufige Version an.