



Christian Wolkersdorfer

Reinigungs- verfahren für Grubenwasser

 Springer Spektrum



Reinigungsverfahren für Grubenwasser

Christian Wolkersdorfer

Reinigungsverfahren für Grubenwasser

Christian Wolkersdorfer
South African Research Chair for Acid Mine
Drainage Treatment, Tshwane University of
Technology (TUT)
Pretoria, Südafrika

Finnish Distinguished Professor for Mine Water
Management, LUT University
Mikkeli, Finland

ISBN 978-3-662-61720-5 ISBN 978-3-662-61721-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61721-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Stephanie Preuß

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*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 will mich nicht unter Verrückte
begeben“, bemerkte Alice.*

*„Oh, das ist nicht zu vermeiden“, sagte die Katze,
„wir sind hier alle verrückt. Ich bin verrückt. Du
bist verrückt.“*

*„Woher weißt du, daß ich verrückt bin?“, fragte
Alice.*

*„Du mußt es sein“, sagte die Katze, „sonst wärst
du nicht hier hergekommen.“*

LEWIS CARROLL

*Alice im Wunderland (Neuübersetzung von Nadine
Erlner)*

*Hier bin ich mir bewusst, weit hinter dem Mög-
lichen 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

Hinweise des Autors

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 dient nur beschreibenden Zwecken 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-Mainstreaming 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 Fehlerpotenziale 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 bei Springer Nature wurde mit Az.: 46(13)-4331/142/27, B 559 im Mai 2014 zugestimmt.

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 Wasserreinigungsmethoden nur bedingt ein Vorteil. Daher stellt sich zu Recht die Frage: Warum noch ein Buch? Diese lässt sich einfach beantworten: weil es bisher kein umfangreiches und zusammenfassendes Buch 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 zusammengefasste Œuvre der Kolleginnen und Kollegen kennen, die sich mit Grubenwasserreinigung befassen. Und dies zu erschließen, soll dieses Buch helfen. Gerne hätte ich ein Kochbuch oder ein *Circa instans* verfasst, mit dem der Praktiker in die Lage versetzt wird, eine Anlage zu planen – Sie wissen schon, so mit DIN 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 Vereinigten Staaten von Amerika 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 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 einfachen, 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 Grubenwasserreinigung wichtig sind, setzte ich allerdings voraus. Durch das umfassende Literaturverzeichnis mit über 900 Einträgen 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 sich das Buch an Ingenieurbüros, die Grubenwasserreinigungsanlagen (GWRA – 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 30-jährigen Erfahrung im Bergbaumfeld

Beispiele eingefügt, die sich 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 Grubenwasserreinigung 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 erfolgversprechenden 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 Grubenwässer 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 Grubenwasserreinigung 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 diesem Buch 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 Anthrozoidea herablassen würden. Da das vermutlich nur wenige wollen, müssen wir versuchen, die Probleme proaktiv 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 (Abb. 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), wo sie von Kindern und Frauen abgebaut werden, und allen die finanziellen Mittel zur Wasseraufbereitung fehlen – solange müssen wir mit dem Problem Grubenwasser umgehen.

Conrad Matschoss, der Herausgeber der *Agricola*-Übersetzung aus dem Jahr 1928, hat in seinem Vorwort über Georgius Agricola Folgendes 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.“



Abb. 1 Kleinbergbau auf Gold in Panompa bei Phichin in Thailand. Zwei Arbeiter installieren eine Pumpe zum Sumpfen ihres Abbaues. (© REUTERS/Damir Sagolj)

Ich hoffe, dass dieses Buch, ganz im Sinne von Agricola, dazu beiträgt, die Grubenwasserreinigung im deutschsprachigen Raum zu verbessern (wenn Ihnen ein Begriff nicht geläufig ist, werfen Sie einen Blick in das Glossarium im Anhang). 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.

Im südafrikanischen Sommer (Pretoria),
im mitteleuropäischen Winter (Tirol) und
in südatlantischer Schwüle (St. Helena)
2020

Christian Wolkersdorfer

Danksagung

Zunächst bedanke ich mich bei Christin Jahns, die mich in mehreren Telefonanrufen nach Österreich davon überzeugt hat, dieses Buch zur Grubenwasserreinigung zu schreiben. Danke vor allem dem LfULG in Dresden/Sachsen und Frank Sander, die durch die Finanzierung einer Studie im Rahmen des deutsch-tschechischen EU-Projekts VODAMIN die Idee zu diesem Buch lieferten. Ohne sie wäre es nicht so weit gekommen.

Danke an meinen Kollegen Wu Qiang von der chinesischen Bergbauuniversität in Xuzhou, der mir eine Empfehlung chinesischer Literatur zum Thema gegeben hat – 谢谢你们的帮助。Bob Hedin hat mir großzügig Fotos seiner Pigmente, Jeff Skousen seiner passiven Reinigungsanlagen, Kathy Karakatsanis das Prinzipbild zur Grubenwasserreinigungsanlage in eMalaheni sowie an der Optimum-Kohlengrube und Eberhard Janneck seines Schwertmannits überlassen. Charles Cravotta III stellte selbstlos Tabellen und Abbildungen zur Verfügung und Nad'a Rapantova sowie Jiří Wlosok übersetzten die englische Zusammenfassung ins Tschechische. Irina Levchuk hat mir geholfen, einen russischen Text zu verstehen, und Olga Oleksienko hat darüber nachgedacht, wie wir in das ukrainisch-russische Kriegsgebiet kommen könnten, ohne bei der Besichtigung einer Grubenwasserreinigungsanlage Schaden zu nehmen (wir haben es letztendlich bleiben lassen). Evan T. Williams II und Gary Antol Sr. haben einen Samstagvormittag damit verbracht, das Thompson Bohrloch der Zeche Vesta № 5 in Pennsylvania zu lokalisieren (Danke, Herr Zuckerberg). Dank an alle, die mir auf meine E-Mail-Anfragen geantwortet haben oder die mir erlaubt haben, ein Foto zu verwenden, das von ihnen stammt, so wie Martin Jochman, oder auf dem sie zu sehen sind. Besonders den Bearbeitern, die sich mit dem F-LLX-Prozess befassen, möchte ich danken. Bei keiner Technologie habe ich so viele E-Mails geschrieben wie bei dieser, um an Informationen zu gelangen. Daher Danke an Todd Beers, Dave Cercone und John McArdle, die mir ihr Material zugeschickt haben – Thanks so much for your generosity. Alle Fotos ohne Urheberhinweise sind von mir selbst.

Danke an Stephanie Preuß, Sebastian Müller und Martina Mechler vom Springer-Verlag, die geduldig auf das finale Manuskript gewartet haben, und danke der Lektorin Tatjana Strasser, die mit großem Einfühlungsvermögen die Knitter im Text ausgebügelt hat.

Vor allem richte ich meinen Dank an alle meine Freunde, Kollegen, Studenten und Studentinnen, Chefs, Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen in Clausthal, Freiberg, München, auf der Kap-Breton-Insel in Kanada, in Finnland und in Südafrika, die mich in den vergangenen drei Dekaden begleiteten. Ohne ihre unermüdliche Unterstützung und ohne die Fehler, die sie mit mir gemeinsam begangen haben, hätte es dieses Werk nicht geben können.

Ich danke allen meinen Freunden bei der International Mine Water Association, die mir Fragen beantworteten, die ich nicht selbst beantworten konnte. Allen voran Bob Kleinmann, der mich ermutigt hat, als es gar nicht mehr weiter gehen wollte! Aber auch unsere ehemaligen Präsidenten Adrian Brown und John Waterhouse und den Kassierern Lee Atkinson, Jennifer Geroni und Alison Turner – die, anders als mein Freund Henk Coetzee, dem ich viele Einblicke in die südafrikanischen Verhältnisse verdanke und dem nachgesagt wird, perfekt Deutsch zu verstehen, vermutlich nie in der Lage sein werden, dieses deutschsprachige Werk zu lesen.

Dank an Ines, die mir im Sommer 2012 vier Tage lang eine völlig neue Sichtweise auf Grubenwasser ermöglicht hat. Danke an Kathleen und Mike sowie an alle Mitarbeiter der Rösterei Momo in Freiberg/Sachsen, die einen erheblichen Anteil daran haben, dass dieses Buch fertig werden konnte. Ohne Euren Kaffee, Tee und Kuchen wäre manches Kapitel nicht so gelungen ausgefallen! Danke an die Einwohner von Jamestown auf St. Helena, die mich eine Woche bei sich aufgenommen haben, allen voran Toni, Ivy und Nim sowie Jane von Anne's Place. Ich danke Kay Florence, die mich eine Zeitlang durch ihr Vertrauen ermutigt hat, dieses Buch nicht aus den Augen zu verlieren und die mir gestattete, Abbildungen zu verwenden, die ich für ihre Dissertation angefertigt hatte. Ngiyabonga meinem Hünchenfarmer und Postdoc Themba Oranso Mahlangu, der sich der Mühe unterzogen hat, alle fehlenden DOIs zu ergänzen. Kiitos auch an Riko Bergroth, aus Muurla, der mir geduldig zugehört hat, als wir unser erstes transportables VFR in Finnland errichtet haben. Ich danke Anne Weber, die mir eine Liste von Namen der Restlöcher in der Lausitz zur Verfügung stellte. Danke an all jene, die sich der Mühe unterzogen haben, diesen Text besser zu machen, allen voran Bernd Schreiber, Kathrin Kranz und Elke v. Hünefeld-Mugova, aber vor allem den Fachkollegen Georg Wieber, Frank Wisotzky, Michael Paul, Thomas Walter, Broder Merkel, Esther Takaluoma, Petra Schneider, Oliver Totsche, Felix Bilek, Uwe Grünewald und dem Franken Roland Haseneder. Einige Eurer Kommentare konnte ich fast wörtlich in den Text einfließen lassen – die Verantwortung für noch verbliebene Fehler verbleibt selbstredend bei mir.

Ich hoffe, es wird uns eines Tages gelingen, gemeinsam ein Verfahren zur Marktreife zu bringen, um die Grubenwasserreinigung eine Stufe höher zu tragen – und wenn nicht, dann hatten wir wenigstens Freude am Experimentieren.

Zuletzt danke ich aber vor allem Ulrike, Karoline und Franziska. Auch wenn Ihr es nicht immer gespürt haben solltet – Ihr wart mir stets die Motivation bei allen meinen Projekten.

Deutsche Zusammenfassung

Anlass dieser Zusammenstellung von Reinigungsverfahren für Grubenwasser war das Deutsch-Tschechische Gemeinschaftsprojekt VODAMIN. Dieses hatte sich zum Ziel gesetzt, die Auswirkungen der Bergbauaktivitäten auf die Wasserqualität von Grund- und Oberflächenwässern zu untersuchen. Innerhalb des Arbeitspaketes 4 sollten Reinigungsverfahren für Grubenwasser vorgestellt und wenn möglich bewertet werden. Ziel dieser Publikation ist daher, 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 3000 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 näherzukommen. Dazu könnte auch das „Internet of Mine Water“ beitragen (siehe Abschn. 1.1), in dem alle relevanten Komponenten des Grubenwasser-Managements 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 in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien sind. Darunter befinden sich die Neutralisation, elektrochemische Verfahren, Membrananwendungen und einige bislang weniger bekannte Methoden. Auf spezielle Varianten, die meist aus patentrechtlichen Gründen zum Einsatz kommen, 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 unberücksichtigt. Drei alternative Methoden, die ein erhebliches Entwicklungspotenzial 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 Grubenwasserreinigung anfallen.

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 effects on the ecosphere and anthroposphere, it is essential to treat contaminated mine water such that the environmental impact 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 book, 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.

Česká Resumé (Shrnutí)

Předložená publikace uvádí řadu postupů pro hodnocení důlních vod a představuje dosud známé metody a systémy čištění důlních vod. V první části je uveden obecný přehled znalostí o důlních vodách, jejich klasifikaci a vhodných způsobech 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 důlních děl se zaměřením na využití důlních vod. Text je navíc doplněn o příklady zdůrazňující potenciální nástrahy způsobů vzorkování a správy.

Svým objemem jsou důlní vody považovány za jeden z největších zdrojů vod přímo souvisejících s antropogenní činností, ne vždy jsou však kontaminovány. I přesto jsou nečištěnými kyselými důlními vodami či důlními vodami s obsahem kovů kontaminovány či potenciálně ohroženy tisíce kilometrů vodních toků, rozsáhlá území v přírodních rezervacích a nespočet aquiferů. Pro minimalizaci negativních dopadů na ekosféru a antroposféru je proto nezbytné čistit důlní vody tak, aby byl dopad na životní prostředí minimální nebo žádný. Z tohoto důvodu jsou důlní vody čištěny 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“, prostřednictvím kterého mohou být vzaty v úvahu všechny složky procesu hospodaření s důlními vodami.

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 stanovovány při každém odběru, zatímco jiné mohou být stanoveny podle potřeby. Publikace shrnuje 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 a jejichž využití je většinou omezeno kvůli patentové ochraně, nejsou zahrnuty. Z pasivních metod je zde 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 rozvojovým 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 injekce reziduí z procesu čištění vod.

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Glosse – oder Erfahrungen nach über sieben Jahren Recherche.....	1
1.2	Begriffsklärungen.....	8
1.2.1	Probleme bei der Definition von Begriffen.....	8
1.2.2	Aktive Grubenwasserreinigung.....	14
1.2.3	Basenkapazität (k_B ; Acidität; Azidität; m-Wert).....	14
1.2.4	Bergwerk.....	16
1.2.5	Bioreaktor.....	16
1.2.6	Circular Economy.....	17
1.2.7	Entwässerungsstollen, Erbstollen, Wasserlösungsstollen.....	17
1.2.8	First Flush (Erstspülung).....	18
1.2.9	Grubenflutung.....	21
1.2.10	Grubenwasser (Schachtwasser, Stollenwasser).....	22
1.2.11	Konstruiertes Feuchtgebiet.....	24
1.2.12	Koagulation und Flockung.....	25
1.2.13	Netto-acidisches oder netto-alkalisches Grubenwasser.....	25
1.2.14	Passive Grubenwasserreinigung.....	26
1.2.15	Pflanzenkläranlage.....	27
1.2.16	Phytoremediation (Phytosanierung).....	27
1.2.17	pH-Wert.....	28
1.2.18	Säurekapazität (k_S ; Alkalität; Alkalinität; p-Wert).....	30
1.2.19	Sauerwasser.....	30
1.2.20	Sorption, Adsorption, Kopräzipitation, Oberflächen- komplexierung und andere derartige Reaktionen.....	31
1.2.21	Schwermetall.....	34
1.2.22	Unedles Metall.....	34
1.3	Entstehung von Grubenwasser und Puffermechanismen.....	34
1.4	Klassifikationen und Klassifizierung von Grubenwasser.....	42

2	Voruntersuchungen	49
2.1	Einleitende Hinweise	49
2.2	Probenahme von Grubenwasser	55
2.2.1	Checklisten und Hinweise	55
2.2.2	Hinweis zum Arbeitsschutz	58
2.2.3	Verfahren der Probenahme	60
2.2.4	Qualitätskontrolle	65
2.2.5	Messgeräte und Probenahme	67
2.2.6	Bezeichnung der Proben	69
2.2.7	Gelöste und gesamte Konzentrationen oder auch Filtration	70
2.2.8	Dokumentation	74
2.3	Essenzielle Vor-Ort-Parameter	75
2.3.1	Einleitender Hinweis	75
2.3.2	Elektrische Leitfähigkeit (Spezifische Leitfähigkeit)	78
2.3.3	Basenkapazität (k_B ; Acidität)	81
2.3.4	Säurekapazität (k_S ; Alkalität; Alkalinität)	82
2.3.5	Durchfluss und Frachten	83
2.3.6	pH-Wert	91
2.3.7	Eisenkonzentration	94
2.3.8	Mangankonzentration	96
2.3.9	Aluminiumkonzentration	96
2.3.10	Redoxspannung (E_h)	96
2.3.11	Sauerstoffsättigung	100
2.4	Wasseranalytik	100
2.5	Untersuchungen zur Kalkzugabe oder Säulenversuche	101
2.6	Aktive oder passive Grubenwasserreinigung?	103
2.7	Die endlose Grubenwasserreinigung	106
2.8	Pourbaix-Diagramme (Stabilitätsdiagramme, Prädominanzdiagramme)	107
3	Aktive Methoden zur Behandlung von Grubenwasser	111
3.1	Einleitung	111
3.2	Neutralisationsverfahren	113
3.2.1	Prinzipien und geschichtliche Entwicklung	113
3.2.2	Dünnschlammverfahren (LDS)	123
3.2.3	Dickschlammverfahren (HDS)	125
3.2.4	In der Schachtel lebt sich's leichter	128
3.3	Elektrochemische Verfahren	131
3.3.1	Elektrokoagulation	131
3.3.2	Elektrosorption (Kondensatorische Deionisierung)	136
3.3.3	Elektrodialyse/Membranelektrolyse	137

3.4	Membranverfahren	138
3.4.1	Einleitung	138
3.4.2	Mikrofiltration	144
3.4.3	Ultrafiltration	144
3.4.4	Nanofiltration	144
3.4.5	Umkehrosmose (Reverse Osmosis, RO)	146
3.4.6	SPARRO-Prozess (Slurry Precipitation And Recycle Reverse Osmosis)	149
3.4.7	Vorwärtsosmose (Forward Osmosis, FO)	150
3.5	Fällungsverfahren für seltenere Schadstoffe	152
3.6	Ettringit-Ausfällung	153
3.6.1	SAVMIN™-Verfahren	153
3.6.2	Andere Verfahren	156
3.7	Schwertmannit-Verfahren	156
3.8	Bioreaktoren (Fermenter)	157
3.9	Ionenaustauscher	160
3.10	Sorption	164
3.11	Erweiterte Oxidation	167
3.12	Flotations-Flüssig-Flüssig-Extrahierung (F-LLX: Flotation Liquid-Liquid Extraction; VEP: Vale Extraction Process; Hydro Flex Technology)	169
3.13	Eutektische Gefrierkristallisation	171
4	Passive Methoden zur Behandlung von Grubenwasser	175
4.1	Hinweis	175
4.2	Was ist passive Grubenwasserreinigung?	179
4.3	Carbonatkanäle und -gerinne	184
4.3.1	Einteilung der Kanäle und Gerinne	184
4.3.2	Anoxischer Carbonatkanal (Anoxic Limestone Drain, ALD)	184
4.3.3	Oxischer Carbonatkanal (Oxic Limestone Drain, OLD)	187
4.3.4	Offene Carbonatgerinne (Open Limestone Channel, OLC)	188
4.4	Konstruierte Feuchtgebiete	190
4.4.1	Zum Geleit (das wollte ich schon immer einmal schreiben)	190
4.4.2	Aerobes konstruiertes Feuchtgebiet (<i>aerobic wetland, reed bed</i>)	192
4.4.3	Anaerobes konstruiertes Feuchtgebiet (<i>anaerobic wetland, compost wetland</i>)	195

4.5	Reduzierende Alkalinitätssysteme (Reducing and Alkalinity Producing Systems, RAPS; Successive Alkalinity Producing Systems, SAPS; Sulfate Reducing Bioreactor, Vertical Flow Wetlands)	198
4.6	Absetzbecken (<i>settlement lagoon</i>)	200
4.7	Permeable reaktive Wände (durchströmte Reinigungswände)	204
4.8	Vertikaldurchflussreaktor (Vertical Flow Reactor, VFR)	206
4.9	Passive Oxidationssysteme (Kaskaden, Trompe)	208
4.10	ARUM-Prozess (Acid Reduction Using Microbiology: mikrobielle Säureerniedrigung)	214
5	Alternative Methoden zum Management von Grubenwasser	217
5.1	Gedanken über alternative Methoden und deren Anwendung im deutschen Sprachraum	217
5.2	Natürliche und kontrollierte natürliche Selbstreinigung	222
5.2.1	Natürliche Selbstreinigung	222
5.2.2	Kontrollierte natürliche Selbstreinigung	223
5.3	Änderung der Abbaumethoden	227
5.4	Biometallurgie, Geobiotechnologie, Biomimetik oder Agrobergbau.	228
6	In-situ- und Vor-Ort-Sanierungsmaßnahmen	231
6.1	Vorbemerkung	231
6.2	In-lake-Verfahren	232
6.2.1	Einleitung.	232
6.2.2	In-lake-Kalkung.	232
6.2.3	Stimulierte Eisen- und Sulfatreduktion in Seen.	232
6.2.4	Elektrochemische und elektrobiochemische Behandlung	233
6.3	Chemische Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung	236
6.3.1	Behandlung von sauren Seen.	236
6.3.2	Chemische Vor-Ort-Maßnahmen.	241
6.4	Rückspülung von Schlämmen, Reststoffen oder Kalkmilch	242
6.5	Sanierung verunreinigter Fließgewässer	246
6.6	In-situ-Sanierung von uranhaltigen Gruben- und Sickerwässern	247
6.7	Mischung pyrithaltiger Substrate mit alkalischem Material	249
6.8	Verschluss von Entwässerungs- und Bergwerksstollen	251
7	Restnutzung der Sanierungsobjekte oder Aufbereitungsrückstände	257
7.1	Nutzung der Sanierungsobjekte	257
7.2	Aufbereitungsrückstände als Wertstoffe (Circular Economy)	264

8 Finis	273
Lagniappe – Bonuskapitel	275
Literatur	285
Stichwortverzeichnis	343



1.1 Glosse – oder Erfahrungen nach über sieben Jahren Recherche

Bei den Recherchen zu diesem Buch, die im Juni 2012 begannen, fiel mir auf, dass im Zusammenhang mit vielen Verfahren oftmals die Begriffe „innovativ“, „einzigartig“, „erstmalig“ oder „kein oder wenig Abfall“ auftauchen. In den dazugehörigen Publikationen oder Endberichten steht dann „erfolgreich gereinigt“. Sobald es jedoch aus dem Labormaßstab in die Pilotanlage oder gar in eine industrielle Anlage übergehen soll, bleiben viele Verfahren in den Kinderschuhen stecken und gelangen nie zur Anwendung. Häufig stellte ich fest, dass ein „innovatives“ Verfahren bereits von anderen Autoren publiziert wurde oder dass patentrechtliche Gründe verhindern, dass ein Verfahren von anderen optimiert werden kann. Ich will mit diesem Buch zeigen, was bereits getan wurde und wo Sie Details zu verschiedenen Reinigungsmethoden nachlesen können (Best Practice aber werde ich weitgehend vermeiden, denn gerade im Grubenwasserbereich wird Copy-and-paste Sie nicht weiterbringen). Versuchen Sie nicht, das Rad neu zu erfinden, sondern nehmen Sie sich – sofern Sie in der Forschung tätig sind – den Schwachpunkt einer Methode und versuchen Sie, diesen zu beheben – James Watt hat auch nicht die Dampfmaschine erfunden, wie viele glauben, sondern lediglich einen Teilaspekt optimiert, den er sogar einer anderen Methode abgeschaut hatte (lesen Sie unter „Fliehkraftregler“ oder „Prozessintensivierung“ nach). Und Johannes Gutenberg hat nicht den Buchdruck erfunden. Versuchen Sie, als Forscher ein James Watt oder ein Johannes Gutenberg der Grubenwasserreinigung zu werden, oder, alternativ, wenn Sie das nicht wollen oder können (wenn Sie unter Zeitdruck stehen, können Sie den folgenden Absatz getrost überspringen):

Schreiben Sie, wenn Sie eine vermeintlich neue Methode entwickelt haben:

„Mit dem innovativen, umweltfreundlichen MyTREatmeNT®-Verfahren ist es erstmals gelungen, Grubenwasser kosteneffektiv abzureinigen, wobei das Abfallvolumen auf ein Mindestmaß reduziert wurde und die Kosten vergleichbar mit denen herkömmlicher Methoden sind. Das Grubenwasser der A-Mine konnte im Technikumsversuch erfolgreich bis zu den behördlich vorgegebenen Einleitgrenzwerten gereinigt werden. Nach einer Kosten-Nutzen-Analyse besitzt das neue Verfahren das Potenzial für einen Einsatz im industriellen Maßstab und kann die Reinigungskosten signifikant senken. Weitere Forschung ist nötig, um die optimalen Bedingungen für eine Pilotanlage und die Kommerzialisierung des Verfahrens zu erhalten.“

(Während ich diese Zeilen schreibe, bekomme ich eine E-Mail mit der Bitte, einen Artikel über Arsenentfernung aus Trinkwasser zu begutachten – ich habe das Gefühl, die Autoren haben meinen obigen Satz abgeschrieben.) Setzen Sie statt MyTREatmeNT den Namen Ihres Verfahrens ein, lassen Sie sich den Namen schützen und das Verfahren patentieren, indem Sie ein bereits bestehendes Verfahren geringfügig ändern. Veranlassen Sie eine ausreichende Anzahl an Presseerklärungen, laden Sie Rundfunk und Fernsehen ein, setzen Sie eine Internetseite online und eröffnen Sie ein Facebook-Konto, zu dem Sie alle Ihre Geschäftskollegen einladen. Beantragen Sie ein Forschungsprojekt (nicht unter 250.000 €) gemeinsam mit einer namhaften Forschungseinrichtung oder einem weniger bekannten Industrieunternehmen, und veröffentlichen Sie jedes Jahr wenigstens drei Publikationen, die sich inhaltlich nur unwesentlich voneinander unterscheiden zu brauchen, solange die Titel voneinander verschieden sind. Streuen Sie diese möglichst breit in Zeitschriften mit hohen Impaktfaktoren und lassen Sie sich nach drei Jahren ein neues Projekt einfallen. Passen Sie Ihre Daten an, wie es Ihnen beliebt, lassen Sie unliebsame Werte raus, oder machen Sie einen Tippfehler – den Reviewern fällt es nicht auf, denn sie sind mit Reviews überlastet und finden keine Zeit, Ihre Daten eingehend zu prüfen. Vor allem sollten Sie unverständliche, vielleicht sogar oulipotische Schachtelsätze bilden, die mit Fremdwörtern gespickt sind, damit jeder Sie für hochgebildet hält – oder versuchen Sie doch einmal die sorptive Gewinnung von Unobtainium (Misra 1990). Verwenden Sie viele Substantive und Akronyme (die Sie am besten neu einführen), erfinden Sie ein Wort, das es im Duden noch nicht gibt (z. B. OuEaMiPo), und schon klingt Ihr Verfahren innovativ; staffieren Sie Ihre Texte vor allem mit Gleichungen aus, wobei Sie Differenzialgleichungen den Vorzug geben sollten (ich würde Ihnen ja gerne ein gutes Negativbeispiel geben, aber die Suchmaschine Ihrer Wahl führt Sie, als Gefährten innerhalb der Turing-Galaxis, vermutlich ganz schnell auf die richtige Spur, und ich will niemandem persönlich zu nahe treten). Je breiter Sie dann Ihre Publikationen streuen, je öfter Sie Ihre Ergebnisse wiederkauen, umso erfolgreicher werden Sie. Schicken Sie sich auf keinen Fall an, sich mit zu vielen unterschiedlichen Themen zu befassen, das würde dem Utilitarismus Ihrer Publikationsweise widersprechen und bekäme Ihrer Karriere und Ihrem Bekanntheitsgrad nur bedingt. Bei meinen Literaturrecherchen für den GARD-Guide blieben von anfänglich 5000 Artikeln nur weniger als 500 übrig, die sich als relevant oder nicht doppelt publiziert erwiesen

(www.wolkersdorfer.info/gard/refbase/index.php). Ob Sie dies so interpretieren wollen, dass nur ein Zehntel aller Publikationen erforderlich ist, sei Ihnen überlassen.

Einzig die HDS-Methode scheint mir ein wirklich innovatives Verfahren zu sein, das in der Grubenwasserreinigung oder der industriellen Reinigung von Wässern keinen Vorläufer hatte. Drei Jahre intensive Forschung steckten in dem Verfahren, und der einzige dazu publizierte Artikel genügt nicht einmal den Standards, die an Fachartikel gestellt werden – er besitzt nämlich kein einziges Zitat. Und der Erfinder verzichtet sogar nach einigen Jahren auf seine Patentrechte – vielleicht einer der zahlreichen Gründe, warum sich das Verfahren durchsetzen konnte? Nehmen Sie sich Paul Kostenbader, Wilhelm Röntgen oder gerne auch Jonas Salk als Beispiel, der auf die Frage danach, wer die Patente für die von ihm erfundene Polioimpfung inne habe, antwortete: „Nun ja, die Menschheit würde ich sagen. Es gibt kein Patent. Kann man die Sonne patentieren?“ (Oshinsky 2005, S. 211). Wilhelm Röntgen, der sogar den Adelstitel ablehnte, den man ihm angeboten hatte, erklärte gegenüber dem Ingenieur Max Levy von der AEG, „daß er durchaus, der guten Tradition deutscher Professoren entsprechend, der Auffassung sei, daß seine Erfindungen und Entdeckungen der Allgemeinheit gehören und nicht durch Patente, Lizenzverträge u. dgl. einzelner Unternehmungen vorbehalten bleiben dürfen. Er war sich darüber klar, daß er mit dieser Stellungnahme darauf verzichte, geldliche Vorteile aus seiner Erfindung zu ziehen“ (Glasser 1995, S. 88, 277).

Schließlich sind mir bei meinen Recherchen Publikationen aufgefallen, die ganz einfach wiederholen, was Kollegen in anderen Ländern schon exakt genauso getan haben. Das ist schon beinahe als unverschämte zu bezeichnen – keine Sorge, wenn Sie das Deutsche hier lesen können, meine ich ganz sicher nicht Sie. Natürlich steht es jedem frei, bereits publizierte Experimente in modifizierter Form oder fallspezifisch zu wiederholen. Wenn allerdings das Experiment im Prinzip nur eine Kopie dessen ist, was in einer anderen Publikation steht, und wenn das dann über mehrere Zeitschriften hinweg nur geringfügig verändert publiziert wird, dann halte ich dieses Verhalten für ethisch ausgesprochen fragwürdig, wenn nicht unkollegial. Vor allem wenn sich erkennen lässt, dass diese Kollegen nahezu alle Experimente einer anderen Arbeitsgruppe scheinbar systematisch wiederholen und publizieren, ohne dabei viel Neues, Eigenes zu produzieren – dann gehen mir schon einmal die Worte aus. So wie jetzt ...

Weiterhin war bei meinen Recherchen auffallend, dass Autoren ihre Daten sehr selektiv wiedergeben. Schäfer und Schwarz (2019) haben diese „Publikationsverzerrung“ in einem lesenswerten Artikel näher untersucht. Es werden, so mein Eindruck, zu unterschiedlichen Zeiten, teilweise von verschiedenen Autoren mit fast identischem Text, Vorträge gehalten oder Beiträge publiziert, und beim Vergleich der Daten in den Publikationen sind vermeintlich unliebsame Messwerte ausgelassen oder Werte plötzlich falsch abgedruckt, oder es werden keine Fehler bei den Werten angegeben (ein eindrucksvolles Beispiel von fünf miteinander verglichenen Publikationen finden Sie hier: www.wolkersdorfer.info/selektiv). Nennen Sie es, wie Sie wollen, zum Beispiel alternative Fakten. Aus wissenschaftlicher Sicht ist dies kaum verständlich und trägt wenig dazu bei, die Akzeptanz des Bergbaues in den Kreisen zu fördern, die dem

Bergbau bereits kritisch gegenüberstehen. Ich spreche hier nicht von ruppigen Affären, aber es muss unser aller Ziel sein, zuverlässige, belastbare, nachprüfbar und vor allem korrekte Ergebnisse zu präsentieren. Wir müssen dahin kommen, unsere Werte – wie in der Physik, Medizin oder Chemie – mit Fehlerbalken zu versehen oder auf die Fehlergrenzen hinzuweisen. Kaum eine der Publikationen, die ich bearbeitet habe, genügt diesen Anforderungen (und ich nehme meine Publikationen, die in dieser Tradition ohne Fehlerbalken entstanden sind, nicht aus). Wir sollten es uns angewöhnen, Fehler zuzugeben und nicht erfolgreiche Versuche oder Daten zu publizieren.

Es gibt Zeitschriften, die sich ganz speziell auf „verunglückte“ Experimente oder Forschungen spezialisiert haben. Die Harvard University (Institute for Quantitative Social Science – IQSS) hat eine Webseite eingerichtet, um neben erfolgreichen Versuchsdaten auch negative Versuchsergebnisse für die Nachwelt zu dokumentieren (www.dataverse.org). Es wäre schön, wenn sich dort auch Arbeiten fänden, die sich auf Grubenwasserreinigung beziehen, sodass wir künftig daraus lernen können (Tab. 1.1). van Emmerik et al. (2018) stellen einen anderen Aspekt dar: Wissenschaftler verzichten

Tab. 1.1 Zeitschriften und Online-Quellen, die negative oder nicht erfolgreiche Ergebnisse von Experimenten publizieren

Titel	ISSN	Fachgebiet
Dataverse Network Project	www.dataverse.org	offen für alle
Journal of Contradicting Results in Science	2278-7194 Online	offen für alle
Journal of Interesting Negative Results in Natural Language Processing and Machine Learning	1916-7423 Online	Sprachverarbeitung, maschinelles Lernen
Journal of Negative Results in BioMedicine	1477-5751	Biomedizin
Journal of negative results: ecology & evolutionary biology	1459-4625	Ökologie, Evolution
Journal of pharmaceutical negative results	2229-7723	Pharmazie
Journal of unsolved questions	2192-0745	offen für alle
Nature Precedings	1756-0357	Erscheinen eingestellt
The All Results Journals: Biol	2172-4784	Biologie
The All Results Journals: Chem	2172-4563	Chemie
The All Results Journals: Nano	2444-0035	Nanotechnik
The All Results Journals: Phys	2174-1417	Physik
The journal of irreproducible results – Official organ of the Society for Basic Irreproducible Research	0022-2038	offen für alle, anekdotisch

zunehmend auf Experimente im Gelände, da mit diesen größere „Risiken“ verbunden seien, negative Ergebnisse zu erlangen, und der Publikationsprozess sich länger hinzieht. Vielmehr wird lieber modelliert, um zu einem schnelleren Durchsatz von publizierbaren Artikeln zu gelangen (lesen Sie dazu auch den Kommentar in Abschn. 1.2.20). Bei meinen Recherchen habe ich genau dies auch etliche Male gehört: dass Kollegen die Ergebnisse nicht publizieren wollen, weil sie aus ihrer Sicht nicht erfolgreich waren. Aber vielleicht können andere aus diesen Daten lernen. „Pinnacles“ der Grubenwasserforschung gewissermaßen.

Wie können Sie zu einem James Watt oder Johannes Gutenberg der Grubenwasserreinigung werden? Indem Sie zunächst einmal lesen, lesen und nochmals lesen. Finden Sie Schwachpunkte in den bestehenden Methoden und konzentrieren Sie sich darauf, diese zu beseitigen (Stichwort „Process Intensification“). Zwei Aspekte stellen auch nach über 50 Jahren intensivster Forschung noch eine ungelöste Herausforderung dar: Was sollen wir mit dem Schlamm aus der Neutralisation anfangen (Ødegaard 2004), und wie können wir die hochkonzentrierten Lösungen der Membranverfahren sowie der Ionenaustauscher weiter verwerten. Das Coal Research Bureau schrieb beispielsweise 1971 – ohne dass sich bis heute auch nur das Geringste geändert hätte: „Derzeit gibt es keine praktische Verwendung für den Schlamm aus der Grubenwasserreinigung von Kohlenbergwerken, noch gibt es eine brauchbare Methode für die Verwertung der Nebenprodukte“ (Coal Research Bureau 1971, S. 1). Oder gehören Sie zu den mutigen Phantasten? Dann stellen Sie sich gleich die Frage: Können wir eine Methode entwickeln, die weder Schlamm noch hochsalinare Lösungen zurücklässt? Wiederholen Sie bitte nicht, was andere vor Ihnen getan haben. Daher fordere ich Sie auf:

„An alle, die anders denken: die Rebellen, die Idealisten, die Visionäre, die Querdenker, die, die sich in kein Schema pressen lassen, die, die Dinge anders sehen. Sie beugen sich keinen Regeln, und sie haben keinen Respekt vor dem Status quo. Wir können sie zitieren, ihnen widersprechen, sie bewundern oder ablehnen. Das Einzige, was wir nicht können, ist, sie zu ignorieren, weil sie Dinge verändern, weil sie die Menschheit weiterbringen. Und während einige sie für verrückt halten, sehen wir in ihnen Genies. Denn die, die verrückt genug sind zu denken, sie könnten die Welt verändern, sind die, die es tun.“

Und wer hat das gesagt? Steve Jobs und der Computerkonzern Apple in seinen Werbekampagnen zwischen 1997 und 2002 (Isaacson 2011, S. 329). Lesen Sie diesen Text gerade auf einem iPad oder iPhone? Dann wissen Sie jetzt, welchen Weg Sie gehen sollten. Ein Kollege aus den Vereinigten Staaten von Amerika hat in seinem Blog auf den Punkt gebracht, woran es ebenfalls hapert:

„In gleichem Maße wie Bergbau wichtig für die Gesellschaft ist, ist die Branche überraschend langsam dabei, neue Technologien auszuprobieren oder einzusetzen. Techniken und Geräte, die in den frühen 1900er-Jahren entwickelt wurden, sind heute in vielen modernen Bergbauanlagen nach wie vor der Standard. Gleichzeitig kämpfen neuere Technologien wie Bioremediation und elektrochemische Wasseraufbereitung darum, einen Fuß in die Branche zu setzen“ (Dallas Kachan am 29. Oktober 2012).

Sollten wir darin den Grund suchen, dass nur wenige neue Methoden der Grubenwasserreinigung den Weg aus dem Pilotmaßstab in den industriellen Maßstab finden? Wenn wir natürlich immer wieder der Forderung gegenüberstehen, in unseren Empfehlungen für Grubenwasserreinigungsanlagen nur Methoden zu berücksichtigen, die in den zurückliegenden X Jahren ihre praktische Wirksamkeit gezeigt haben – wie sollen wir denn dann neue Verfahren zur Marktreife bringen? Deutschland hat stets den Mut gezeigt, Neues zu wagen und auszuprobieren – nicht umsonst ist die Anzahl der Patentanmeldungen in unserem Land weltweit führend. Oder einmal anders gefragt: Wer hat das Telefon erfunden? Wenn Ihnen also Watt oder Gutenberg nicht gefallen, dann werden Sie eben ein Reis der Grubenwasserreinigung. Und wenn Sie gerade einem Bergbaubetrieb vorstehen: Haben Sie den Mut eines Artur Fischer und gehen ein Wagnis ein.

Ein Beispiel für eine künftige Entwicklung ist das Internet of Mine Water (IoMW – Grubenwasserinternet; Abb. 1.1). Bereits jetzt wird das Internet of Things als eine der kommenden umwälzenden Technologien für den technologischen Fortschritt angesehen (Carayannis et al. 2018; Losavio et al. 2019; S. R. I. Consulting Business Intelligence 2008). Im IoMW erhalten sämtliche für das Wassermanagement in einem Bergwerk relevanten Komponenten wie Messfühler (Sensoren), Schieber, Probenahmegefäße oder

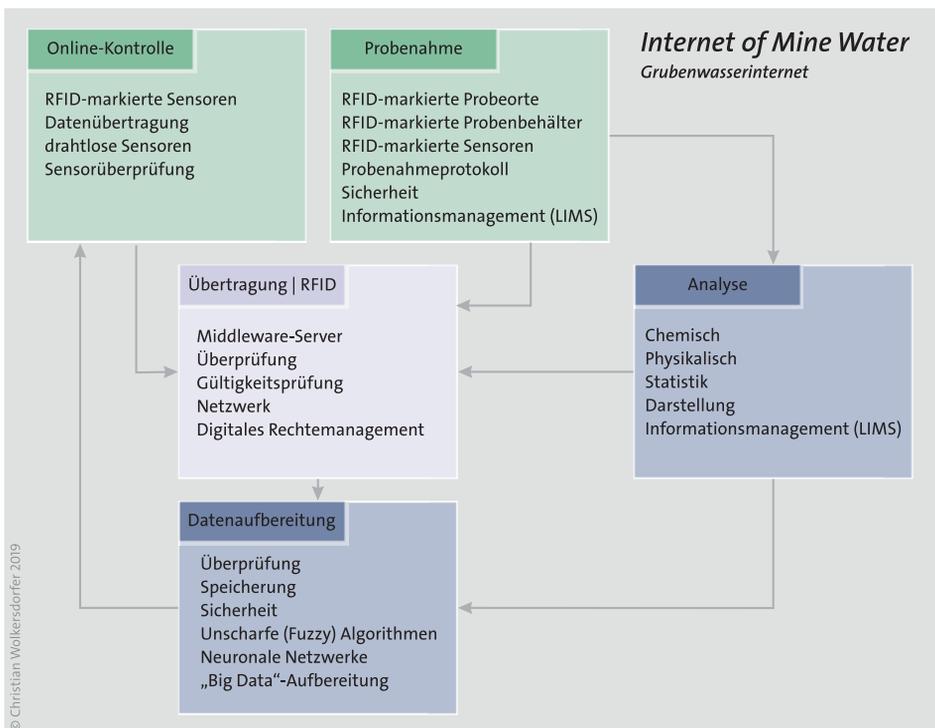


Abb. 1.1 Flussdiagramm für das „Internet of Mine Water“. (Aus Wolkersdorfer 2013)

Messstellen mit RFID-Funketiketten. Gemäß der Idee des Internet of Things werden diese Komponenten über das Internet auslesbar, erkennbar, lokalisierbar, adressierbar und kontrollierbar sein (S. R. I. Consulting Business Intelligence 2008, Anhang F). Dabei spielt es keine Rolle, ob die Verbindung der Komponenten zum IoMW drahtlos, über ein Funknetzwerk, RFID-Sensoren oder mittels eines lokalen Netzwerks erfolgt (More und Wolkersdorfer 2020).

Wie dem auch sei – mit all dem Forschermut gewappnet können Sie endlich loslegen, Ihr neues Verfahren zu entwickeln, und uns schließlich Ihren Memplex weitergeben. Zuvor allerdings sollten Sie wenigstens *einige* der zusammenfassenden englischen Publikationen über Grubenwasserreinigungsanlagen gelesen haben, um unnötige Replikationen zu vermeiden (es hat den Anschein, als würde es in anderen Sprachen als Englisch bisher kaum Überblickspublikationen geben):

Hier eine Auswahl zusammenfassender Werke, alphabetisch sortiert:

- Hatch (2014): Study to Identify BATEA for the Management and Control of Effluent Quality from Mines
- Jacobs und Pulles (2007): Best Practice Guideline H4: Water Treatment
- Lorax Environmental (2003): Treatment of Sulphate in Mine Effluents
- Senes Consultants Limited (1994): Acid Mine Drainage – Status of Chemical Treatment and Sludge Management Practices
- Skelly und Loy und Penn Environmental Consultants (1973): Process, Procedures, and Methods to Control Pollution from Mining Activities
- Skousen et al. (1998): Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage
- Society for Mining Metallurgy and Exploration (1998): Remediation of historical mine sites – technical summaries and bibliography
- The Pennsylvania Department of Environmental Protection (1998): Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania
- U. S. Environmental Protection Agency (1983): Design Manual – Neutralization of Acid Mine Drainage
- U. S. Environmental Protection Agency (2000): Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook
- U. S. Environmental Protection Agency (2014): Reference guide to treatment technologies for mining-influenced water

und in Türkisch:

- Karadeniz (2005): Asit Maden (Kaya) Drenajında Aktif ve Pasif Çözüm Yöntemleri