

Management von Grubenwasser 3.0 – Blick in die Zukunft

Christian Wolkersdorfer^{1,2}

International Mine Water Association, Ginsterweg 4, 90530 Wendelstein, Germany¹

SARChI Chair for Acid Mine Drainage Treatment, Tshwane University of Technology, Pretoria, Südafrika², christian@wolkersdorfer.info

Vor 150 Jahren wurde Grubenwasser nachweislich erstmals mit chemischen Methoden neutralisiert. Seitdem wurde diese Technologie kontinuierlich verbessert, aber wir sind weit davon entfernt, neue Technologien regelmäßig einzusetzen. Obwohl diese neuen zuverlässigeren Technologien existieren, öffnen sich Bergwerksbetriebe diesen nur allmählich. Darüber hinaus besteht bislang kein holistisches Konzept, um Grubenwasser als eine Ressource zu nutzen anstatt als Abfall anzusehen. Im Vortrag wird ein möglicher Weg aufgezeichnet, mit dem es gelingen könnte, das Management von Grubenwasser zu optimieren und neue Technologien zu entwickeln, indem alle beteiligten Partner ihre Zusammenarbeit optimieren oder Forschung und Entwicklung fördern.

150 years ago the first mine water neutralization plant was described in the literature. Since then this technology has been continuously improved, but we are still far away of using modern technologies on a regular basis. Although the technologies to reliably treat mine water exist, mining companies tend to behave conservatively. In addition, up to now no holistic approach exists to use mine water as a resource instead of a waste product. This paper will present a pathway for optimizing mine water management and to develop technologies by bringing together all interested partners in order to foster development and research.

1. Jeder Aufstieg beginnt im Kopf

Dieser Beitrag im dreihundertsten Jahr der wissenschaftlichen Erstnennung des Begriffs Nachhaltigkeit soll als Memento verstanden werden, die Reinigung von Grubenwasser zu überdenken. Es soll ein Aufruf sein, die eigene (auch die des Autors) Arbeit zu überdenken und gänzlich Neues zu wagen. Es hat den Anschein, als würde die Grubenwassergemeinschaft nur wenig Neues hervorbringen, das am Ende im Feldmaßstab eingesetzt wird. Grundlage dieser Vermutung ist die Auswertung von mehreren Tausend Fachbeiträgen in den vergangenen eineinhalb Jahren, deren Ergebnis im kommenden Jahr als deutschsprachiges Buch über Reinigungsverfahren für Grubenwasser erscheinen soll. Zahlreiche vielversprechende Methoden finden nur zögerlich Eingang in die Bergwerksindustrie, weil deren Wirksamkeit nur unzureichend getestet ist, die Pilotversuche zu kleinmaßstäblich ablaufen oder das Forschungsprojekt nach drei Jahren Förderung eingestellt werden musste. Dabei gibt es wirksame Techniken, die nur weiter Weiterentwicklung bedürften – aber der Zeit- und Finanzdruck lastet auf den Bergbau- oder Sanierungsunternehmen und oftmals muss auf Bekanntes zurückgegriffen werden – ein völlig verständlicher und nachvollziehbarer Vorgang. Dies ist die eine Seite der Medaille.

Die andere Seite ist die der Forschenden. Zahlreiche Verfahren werden zig-mal untersucht, und die Ergebnisse sind mit denen der Vorgänger weitgehend identisch. Wenn die Forschenden doch nur die Vorgänger gelesen hätten – solange aber die Anforderung besteht, keine Literatur ins Literaturverzeichnis aufzunehmen, die älter als 1 bis 2 Jahrzehnte ist, wie sollen dann die jungen Studenten an die alte Literatur herantreten! In den Zeiten, in denen es möglich ist, auf umfangreiche Literaturdatenbanken, virtuelle Fachbibliotheken oder OPACs zurückzugreifen, sollte es eine Selbstverständlichkeit sein, sich mit den Vorgängerarbeiten auseinander zu setzen und nur das zu erforschen, was diese als Lücke hinterlassen haben. So ist es nicht verwunderlich, wenn eine Forschungsarbeit über passive Grubenwasserreinigung nicht die Originalarbeit aus dem Jahr 1994 zitiert oder die umfangreichen Arbeiten anderer Arbeitsgruppen nicht diskutiert und letztendlich zu den gleichen Ergebnissen kommt. Das Rad muss nicht jedes Mal neu erfunden werden.

Bei den Literaturrecherchen für den GARD Guide (*Global Acid Rock Drainage Guide*) – der wie viele andere Handlungsempfehlungen selbstverständlich seine Stärken und Schwächen aufweist – wurden mehr als 5000 Literaturstellen ausgewertet – am Ende blieben weniger als 500 relevante, nicht doppelt publizierte oder doppelt untersuchte übrig. Daraus lässt sich ganz einfach ableiten, dass große Mengen an Forschungsgeldern verschwendet werden, die sinnvoll eingesetzt zu neuen Techniken bei der Behandlung von Grubenwasser führen könnten. Interessant dabei ist, dass Südafrika, möglicherweise wegen des ehemaligen Embargos und der nach wie vor bestehende Randlage, Reinigungsverfahren entwickelt hat, die als „neuer“ gelten können und dieses Land ist derzeit bei der Sulfatentfernung aus Grubenwasser technologisch weiter als andere Länder. Wäre nur der Informationsfluss besser.

Womit das nächsten Problem zu erwähnen wäre: die Sprachbarrieren. China oder Russland haben in der zurückliegenden Dekade Behandlungsweisen entwickelt und zur Industriereife gebracht – doch wer kennt sie? Nur wenige. In Deutschland gelang es *in-lake*-Verfahren zu entwickeln, die nur wenig internationale Berücksichtigung finden! Somit gibt es drei Problembereiche, der sich dieser Beitrag streifend annehmen will: die Sprachbarrieren, die oftmals fehlende Literaturrecherche zu bekannten Systemen und der Weg nach vorne.

Oder wie sagt ein bekannter südtiroler Montanist: „Alles beginnt mit einem Tagtraum. Daraus wächst eine Idee. Indem ich mich auf sie konzentriere [...] entsteht ein Ziel. Ein stiller Entschluss in mir zündet die Tat. Jeder Aufstieg beginnt im Kopf“. Dazu mehr in den folgenden Abschnitten.

2. Wie war es? Grubenwasser 1.0

Grubenwasser ist einer der weltweit volumenreichsten Abfallströme – auch wenn Grubenwasser rechtlich nicht in jedem Land als Abfall angesehen wird. In vielen Fällen sind Grubenwässer nur unwesentlich kontaminiert und stellen folglich keine Gefahr für die Ökosphäre, die Anthroposphäre oder das Grundwasser dar. Dort, wo das Wasser jedoch eine erhöhte Mineralisation aufweist, der pH-Wert eine potentielle Gefahr für die Vorfluter darstellt oder der Feststoffgehalt eine Verschlammung beziehungsweise Sedimentation der Gewässer verursacht, besteht Handlungsbedarf. Dieser Handlungsbedarf bezieht sich in der Regel auf die bergbautreibenden Unternehmen, deren Rechtsnachfolgerinnen oder die Allgemeinheit und kann eine ganze Palette an unterschiedlichen Maßnahmen zur Reinigung der Grubenwässer beinhalten.

Kontaminiertes Grubenwasser verunreinigt tausende von Kilometern an Gewässern, beeinträchtigt die Lebensqualität von Menschen und bedroht manchenorts Naturschutzgebiete. Um die potentiellen Gefahren für diese Kompartimente abzuwehren, haben Ingenieure, Techniker und Wissenschaftler im Laufe der Jahrhunderte eine Vielzahl von Maßnahmen entwickelt. Einige davon haben sich besser etabliert, meist weil sie einfach handzuhaben sind, weil sie keinem Patentschutz unterliegen oder weil sie preiswert sind, andere hingegen fristen ein Schattendasein, befinden sich in der Entwicklung, sind zu teuer, gelten als zu teuer, unterliegen einem Patentschutz oder sind der Grubenwassergemeinschaft schlichtweg nicht bekannt.

Als die erste in der Literatur beschriebene chemische Grubenwasserreinigungsanlage darf die Neutralisation von saurem Wasser auf der Königshütte in Oberschlesien angesehen werden. Dort gelang es Ende der 1850er Jahre, saures Grubenwasser der Königsgrube bei Beuthen (Bytom) durch gelöschten Kalk (Calciumhydroxid) zu neutralisieren und den Dampfkesseln der Königshütte zur Verfügung zu stellen. Eine der frühesten Anlagen mit Flockungshilfsmitteln zur Reinigung von Wasser wurde von dem Belgier R. A. Henry entwickelt und vom Niersverband/Nordrhein-Westfalen in den 1930er Jahren installiert. Ab 1934 finden sich solche Anlagen häufiger, und die erste Anlage die Grubenwasser großmaßstäblich nach dem Birtley-Henry-Verfahren reinigte, nahm 1935 an der Kohlenzeche Wallsend Rising Sun in Newcastle-upon-Tyne/England den Betrieb auf.

In den USA bestand an der Zeche Calumet (Westmoreland County, Pennsylvania, USA) von 1914 bis zum Ende des Krieges eine Anlage, die saures Grubenwasser neutralisierte, um es im dortigen Kraftwerk und den Dampfmaschinen verwenden zu können. 1966 installierte die Besitzerin *Jones and Laughlin Steel Corporation* an der Zeche Vesta № 5 (Thompson Bohrloch, Pennsylvania, USA; zwischen Marianna und Beallsville an der PA-2011) eine Neutralisationsanlage mit Kalk. Die Anlage bestand aus einem Beruhigungsbecken, um den Zulauf gleichmäßig regeln zu können, einem Mischtank um den Kalk und das Grubenwasser zu mischen, einem Absetzbecken und einem

Fischteich zur Qualitätskontrolle. Um die Reinigung zu steuern war ein pH-Meter installiert, das den Zulauf des Kalks regulierte. Aller anfallende Schlamm wurde mittels LKW zu einem nahegelegenen Bohrloch der Zeche Vesta № 6 transportiert.

Bis 1970 folgte die Neutralisation von Grubenwasser fast ausschließlich dem Prinzip, das schon 1858 auf der Königshütte angewendet wurde. Dies, obwohl in den USA seit dem Rechtsakt 194 aus dem Jahr 1965 eine Vielzahl von Studien initiiert wurden, die alle damals bekannten Reinigungsverfahren auf ihre Wirksamkeit hin untersuchten. Den Durchbruch erzielten jedoch ein Ingenieur, der ein akutes Problem zu lösen hatte und nach dreijähriger Forschungsarbeit, sowie durch seine Beharrlichkeit das Ziel erreichte: Paul Kostenbader, der Erfinder der Dickschlammmethode. Woran liegt der Erfolg dieser Methode begründet? Vor allem daran, dass Paul Kostenbader sein Patent nach weniger als drei Jahren aufgab und es der Allgemeinheit kostenfrei zur Verfügung stellte. Er hatte erkannt, dass Grubenwasser eines der größten Probleme in Pennsylvanien und der Welt ist, und er wollte seinen Teil dazu beitragen, die Umwelt zu bewahren. Daher gibt es heute eine Vielzahl unterschiedlichster Verfahren, die alle auf dem ehemaligen Patent Kostenbaders beruhen.

Seitdem gab es nur noch unwesentlich Neuerungen bei der Reinigung von Grubenwasser, wenn man von kleineren, schrittweisen Verbesserungen absieht. Fast alle heute üblichen Techniken wurden bereits vor 1900 erstmals angewendet und seitdem lediglich optimiert oder für Grubenwasser angepasst. Was fast alle dieser Verfahren gemeinsam haben ist: das Grubenwasser soll von unerwünschten Stoffen gereinigt und in eine Vorflut geleitet oder einer industriellen Anlage eingesetzt werden. Was bleibt ist in der Regel ein Abfall, der sich aus den unerwünschten Stoffen, den eingesetzten Chemikalien und Restwasser zusammensetzt.

3. Wie ist es? Grubenwasser 2.0 – 2.5

Heute sind etwa zwei bis drei Dutzend Behandlungsweisen bekannt, die mehr oder weniger regelmäßig bei der Reinigung von Grubenwasser eingesetzt werden. Manche davon gelten als „Standard“, andere als „Innovativ“ und noch andere als „Embryonal“ – das ist jedoch nur eine sehr subjektive Betrachtungsweise, denn was heute als Standard gilt, wird in Publikationen der 1960er Jahre noch als innovativ bezeichnet und heutige embryonale Verfahren könnten in nur wenigen Jahren möglicherweise zum Standard gehören. Folglich sind diese Begriffe nur wenig geeignet, um Systeme zur Grubenwasserreinigungsanlage einzuordnen – im Gegenteil; sie geben den Anschein, dass sich um embryonale Verfahren nicht gekümmert werden müsste.

Unabhängig von der Klassifikation hat ohne Zweifel die Neutralisation mit anschließender Belüftung, Zugabe von Flockungshilfsmittel und Absetzern den Status des Klassikers. Es gibt zahllose Variationen und je nach Vorliebe oder Fachkenntnis kommen Dünnschlamm- oder Dickschlammverfahren zum Einsatz. Alle diese Behandlungsweisen sind sehr flexibel; können veränderlichen Durchflüssen oder Änderungen im Grubenwasserchemismus schnell angepasst werden. Ihre Herstellung ist verhältnismäßig preiswert, die Bestandteile gehören fast zum Standard und die Verfahrensprozesse sind hinreichend gut bekannt (die ablaufenden chemisch-physikalischen Details hingegen nicht – auch wenn das oftmals so dargestellt wird). Gravierender Nachteil der Methode ist, dass große Schlammvolumina entstehen für die es in der Regel keine Verwendung gibt – obwohl schon bei der Anlage auf der Königsgrube im Jahr 1858 darüber nachgedacht wurde, den Abfallstoff als Dünger zu verwenden.

Daneben konnten sich Membrantechniken in der Grubenwasserreinigung etablieren. Noch immer existieren allerdings Publikationen, in denen auf den Kenntnisstand vor 1990 Bezug genommen wird. Membranverfahren nehmen im GARD-Guide daher gerade einmal einen Umfang von weniger als 500 Wörtern ein – dabei arbeiten die beiden ersten „Null-Abfall-Grubenwasserreinigungsanlagen“ in Südafrika genau mit dieser Technologie. Es scheint fast wie mit *Thiobazillus thiooxidans* zu sein, der sich noch immer in aktuellen Publikationen über Grubenwasser findet, der aber seit dem Jahr 2000 von "*cidithiobazillus thiooxidans*" abgelöst wurde – denn dieser Mikroorganismus ist es, der die Pyritoxidation katalytisch unterstützt. Kurz vor 1990 gelangte neuartige Membranen auf den Markt und seitdem hat sich deren Preis erheblich erniedrigt. Membrantechnologien standen seit den 1960er Jahren in den Startlöchern, unterstanden intensivster Forschungen und dem Mut einzelner Unternehmen ist es zu verdanken, dass die Methode den Durchbruch in der Trinkwasseraufbereitung

und der Reinigung problematischer Wässer vollzog. Heute sind weltweit etwa 16.000 Entsalzungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von etwa 80 Mm³ pro Tag installiert.

Eine weitere Methode, die derzeit eine Steilvorlage hinzulegen scheint, sind die elektrochemischen Behandlungsmethoden. In nur wenigen Jahren gelang es in China, eines der möglichen Verfahren (Elektrosorption) aus dem Labormaßstab in den großindustriellen Maßstab zu überführen. In der Abwasserbehandlung gehört die Elektrokoagulation zu einem der Standardverfahren und die Membrandialyse besitzt ebenfalls großes Potential Grubenwasser zuverlässig zu reinigen – nur noch wenig Forschung und Entwicklung wäre nötig, diese Methode zu etablieren.

Einen weiten Bereich nehmen passive Reinigungsmethoden ein. Weltweit sind mehrere tausend unterschiedlich arbeitender Anlagen installiert und tragen dazu bei, dass die Vorfluter weniger stark verunreinigt werden. Zwischenzeitlich ist relativ gut bekannt, wie diese Anlagen herzustellen sind und es gibt zahlreiche Handbücher, in denen die Vorgehensweise schrittweise erklärt ist. Prinzipiell lassen sie die passiven Methoden in aerobe und anaerobe konstruierte Feuchtgebiete, Vertikale Durchflusssysteme und Permeable Reaktionswände unterteilen. Daneben gibt es Karbonatkanäle und unterschiedlichen Oxidationssysteme. Insgesamt können die Methoden als weitgehend bekannt gelten und die Mehrzahl der Forschungsarbeiten erfolgten zwischen den 1980er und 2010er Jahren. Sie haben im Wesentlichen überall dort ihren Einsatz gefunden, wo die Schadstofffracht nicht übermäßig groß ist – es gibt auch Ausnahmen – oder wo nur finanziell begrenzte Mittel für eine dauerhafte chemische Aufbereitung zur Verfügung steht. Eine vernünftige Lösung muss jedoch oftmals die Details berücksichtigen und vereinzelte Beispiele, bei denen dies nicht erfolgte, sind aus der ganzen Welt bekannt.

Derzeitige Forschungen konzentrieren sich auf die Optimierung der Neutralisation und auf Membrantechnologien. Es gibt nur wenige Projekte zur Sekundärnutzung von Grubenwasserschlämme oder zu anderen Verfahren. Und die Anzahl der Untersuchungen, über Vermeidungsstrategien scheint gar auf Null gesunken zu sein. Woran liegt das? Wird sich auf dem Erreichten ausgeruht? Dabei steht die Grubenwassergemeinschaft vor drei Herausforderungen, der bisher nur ganz wenige Lösungen zur Hand stehen: Erniedrigung der Sulfatfrachten, Erniedrigung der Gesamtmineralisation und das Problem ungenügender Wassermengen. Diese Herausforderungen muss die Gemeinschaft gemeinschaftlich lösen und dazu sind neue, intelligent Ansätze nötig.

4. Wie soll es sein? Grubenwasser 3.0

Deutschland gehörte bis zum 2. Weltkrieg zu den führenden Industrie- und Forschungsländern. Es gab Frauen und Männer die den Mut hatten, Undenkbares zu denken und denen Zeit gegeben wurde, sich auch über einen längeren Zeitraum einer Aufgabe zu widmen – selbst wenn nach drei Jahren noch kein sofortiger wirtschaftlicher Gewinn absehbar war oder keine 9 Publikationen publiziert waren. Über die Dickschlammethode wurde lediglich eine einzige Fachpublikation verfasst – und die hätte jede seriöse Fachzeitschrift abgelehnt, weil sie beispielsweise kein einziges Literaturzitat enthält. Der Zwang, Neues um jeden Preis zu produzieren und wenigstens drei Publikationen in angesehenen Fachzeitschriften pro Jahr zu platzieren hat dazu geführt, dass weniger das Ziel als der Weg an Bedeutung erlangte und vielversprechende universitäre Forschungsprojekte nach drei Jahren abbrechen. Um dem Miteilergebnispublikationszwang aus dem Weg zu gehen, beschäftigen heute schon zahlreiche der großen Bergbauunternehmen ihre eigenen Forschungseinrichtungen, wo sie früher noch eng mit Universitäten zusammengearbeitet haben. Wo nun, liegen die künftigen Problem- und somit Forschungsfelder in der Grubenwasserreinigung? Wo soll der künftige Weg hinführen? Wie kann ein holistischer Ansatz im Grubenwassermanagement aussehen?

Zunächst gilt es, das Grubenwassermanagement innerhalb des Bergwerks zu optimieren. Nach wie vor werden in den meisten Fällen alle Wässer im Tagebau oder dem Tiefbau in einem Sumpf zusammengefasst und in die Reinigungsanlage geleitet. Eine „Trennkanalisation“ könnte dazu beitragen, die Kosten der Grubenwasserreinigung erheblich zu senken. Es besteht keine Notwendigkeit, zwei oder mehrere Pumpenstränge vorzuhalten. Vielmehr würde es genügen, einen Sauberwassersumpf und einen Sumpf für das kontaminierte Grubenwasser vorzuhalten. Sogar eine Voroxidation des Grubenwasser untertage ließe sich durchführen, um bereits einen Teil des CO₂ im Wasser zu stripfen oder Eisen zu hydrolysieren. Nachteil dieser Methode ist, dass mögliche

Verdünnungseffekte wegfielen oder das Sauberwasser trotz untertägiger Trennung unerwünschte Wasserinhaltsstoffe aufweist. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens wäre, dass das Sauberwasser für eine geothermische Nutzung zur Verfügung stünde. Eisenhaltiges Grubenwasser neigt dazu, Wärmeaustauscher nachhaltig zu schädigen, wie das Beispiel Schloss Freudenstein in Freiberg exemplarisch zeigt. Dies zieht hohe Wartungskosten nach sich, die bei der Verwendung sauberen Wassers weitgehend vermeiden werden können. Gleichzeitig hätte die Trennung des Grubenwassers den Vorteil, dass eine höhere Fracht potentiell nutzbarer (Semi)-Metalle anfielen, die in deren besseren Nutzung mündet.

Einer weiteren Optimierung bedarf das Monitoring. Die bisherigen Sonden oder Messmethoden sind nur selten den rauen Umgebungsbedingungen im Bergbau angepasst oder eignen sich nur bedingt für kontinuierliches Monitoring. Temperatur, Wasserstand oder elektrische Leitfähigkeit sind verhältnismäßig einfach zu messende Parameter im Bergbau – vom Skaling der Sonden einmal abgesehen. Aber die wichtigen Parameter Eisen, Sulfat, Azidität, Alkalinität, Redoxpotential oder pH-Wert lassen sich mit den heutigen Methoden nur bei kleinsten Konzentrationen zuverlässig online messen. Auch die Entwicklung eines Grubenwasserchips, so wie er in der Medizin bereits erhältlich ist, steht aus.

Dies leitet über zu der Datenerfassung und deren Auswertung. Bislang findet sich kein publiziertes Beispiel, in dem moderne Methoden des Big Data oder die Analyse von Wavelets herangezogen wurde, um die Abläufe beim Grubenwassermanagement zu optimieren (exakt zur Zeit des Vortrags findet im australischen Brisbane der erste ‚Global Big Data Analytics in Mining Summit‘ statt). Dies erscheint angesichts fehlender on-line Messgeräte noch nicht nötig, wird aber bei der zunehmenden Elektronisierung im Bergbau in absehbarer Zeit unbedingt nötig werden. Einer kürzlich publizierten Studie zufolge erachten gerade einmal 7% der europäischen Unternehmen Big Data als sehr relevant für ihre Prozessabläufe – sodass der Forschung dazu und der Akzeptanzerhöhung eine erhebliche Bedeutung zukommt. Zum Thema Datenerfassung gehören auch optimierte Probenahmeabläufe. Mit den Werkzeugen des RFID lassen sich Fehler bei der Messwerterfassung oder beim Monitoring sowie der Behandlung der Proben erheblich reduzieren. Geeignete Middlewareanwendung können schließlich eine verbesserte Zusammenarbeit zwischen Bergwerk, Probenehmern und Analyselabors nach sich ziehen.

Im Zusammenhang mit der online Messwerterfassung führt diese Vorgehensweise zum Internet of Mine Water (IoMW; Abb. 1) – dem Grubenwasserinternet, in dem sämtliche für das Management des Grubenwassers relevanten Prozesse im und um das Bergwerk erfasst sind. Dadurch ließen sich weitere Prozessabläufe optimieren, Wasser zum richtigen Zeitpunkt an der richtigen Stelle bereitstellen und potentielle Probleme frühzeitig erkennen. Anglo Platinum hat bereits vor mehreren Jahren begonnen, sein Grubenwassermanagement zu optimieren und konnte dadurch die Kosten erheblich reduzieren.

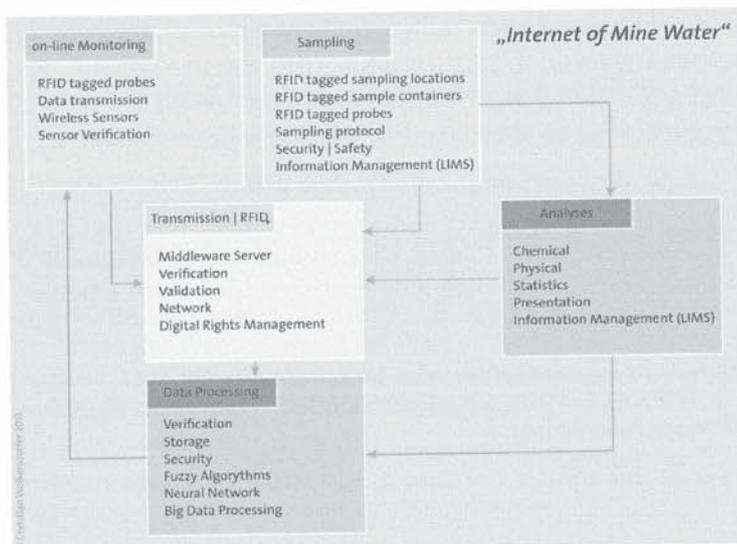


Abb. 1: Schema des „Internet of Mine Water“ (IoMW).

Ein weiteres künftiges Forschungsfeld ist das Prozessverständnis. In vielen Fällen sind die Grundzüge von Grubenwasserreinigungsmethoden bekannt, aber die auf molekularer Ebene ablaufenden Vorgänge sind noch nicht hinlänglich erforscht. Dies führt dazu, dass es nach wie vor eines erheblichen laborativen Aufwands bedarf, um für gegebenes Grubenwasser die jeweils optimale Reinigungsmethode zu erkunden oder das geeignete Flockungshilfsmittel zu wählen. Es müsste das Ziel sein, aus einer chemischen Grubenwasseranalyse exakt ableiten zu können, welche Methode mit welcher konstruktiven oder methodischen Vorgehensweise sich am besten für die Grubenwasserreinigung eignet. Dabei geht es nicht darum, *eine* Methode zu finden sondern vielmehr muss es das Ziel sein, aus einer Palette von Methoden die geeignetste integrative Anlage zu errichten.

Das Ziel müsste sein, ein auf chemisch-thermodynamischen Prinzipien arbeitendes, umfassendes Programm zu entwickeln, das es erlaubt, exakter als heute die geeignete Anlage zu ermitteln – solche Programme existieren bereits (z.B. UsimPac, GoldSim), aber sie sind in der Regel mit einem Expertenprogramm gekoppelt anstatt gänzlich auf den exakten chemisch-thermodynamischen Grundsätzen zu beruhen. Die Prognose eines Einkomponentensystems oder synthetischen Grubenwassers ist mitunter gut zu verstehen. Nicht jedoch die ablaufenden Prozesse bei dem Multikomponentensystem eines realen Grubenwassers. Forschungen in den Niederlanden zeigen, dass es bereits in Ansätzen gut gelingt, den Wasserchemismus von Bergbauabfällen zu prognostizieren.

Dies führt schließlich zum letzten noch offenen Punkt in der Grubenwasserreinigung: der Valorisierung des Grubenwassers. Valorisierung ist die Nutzbarmachung der Wasserinhaltsstoffe. Schon bei der Anlage des Jahres 1858 planten die Entwickler eine Optimierung, um den Reststoff als Dünger zu nutzen – seither ist jedoch nicht viel geschehen, obwohl einige Sulfatdünger zu verhältnismäßig hohen Kosten gehandelt werden.

Bleiben zwei Technologiebereiche übrig, denen bislang zu wenig Augenmerk geschenkt wurde: Nanotechnologie und Mikrobiologie im Grubenwasser. Zu letzterem besteht lediglich bei den passiven Verfahren eine große Zahl an wissenschaftlichen Arbeiten. Inwieweit sich allerdings eine Optimierung der Mikrobiologie, im Sinne der synthetischen Biologie, auf eine Verbesserung der Reinigungsleistung auswirkt, ist noch nicht hinreichend genau untersucht. Auch in diesem Bereich sollten daher neue Forschungen zu neuen Ergebnissen führen.

Fast alle der oben dargestellten Methoden existieren bereits auf die eine oder andere Art und Weise. Ziel der künftigen Forschung und Entwicklung muss es folglich sein, diese Bits und Bytes zusammen zu bringen, um eine holistische Herangehensweise an das Grubenwassermanagement 3.0 zu erreichen. Mit vereinten Kräften sollte es dem deutschsprachigen Raum gelingen, wieder eine führende Rolle im Grubenwassermanagement einzunehmen. Dazu müssen gänzlich neue Forschungsansätze zu den vorgenannten Themen erfolgen. Die wenigen Finanzmittel sollten verwendet werden, um Lücken zu identifizieren und zu schließen, statt bereits existierende Methoden zu verifizieren und deren Experimente zu wiederholen. Nur so wird es gelingen das derzeitige Grubenwassermanagement 2.5 auf die nächste Stufe, das Grubenwassermanagement 3.0 zu heben – gewissermaßen aus dem Käfermotor einen Hochleistungsdieselmotor zu erschaffen, denn „jede Bergtour beginnt vor dem Aufbruch, und der letzte Schritt zum Gipfel hängt ab vom ersten Schritt dem Ziel entgegen“.

5. Literatur

Ein Beitrag ohne Literatur? Natürlich nicht. Ausnahmsweise einmal alles zusammengefasst am Ende, denn die korrekte Zitierung hätte den Lesefluss dieses erweiterten glossenartigen Mementos erheblich beeinträchtigt.

ADENIYI, A., MAREE, J., MBAYA, R. & POPOOLA, P. (2013): HybridICE™ filter design in freeze desalination of mine water. – In: BROWN, A., FIGUEROA, L. & WOLKERSDORFER, CH.: Reliable Mine Water Technology. – S. 507–512, 8 Abb.; Golden (International Mine Water Association).

ANONYMUS (1859): Entsäuerung der Grubenwasser zum Speisen der Dampfkessel. – Polytechnisches Journal, 152: 74; Berlin.

ANONYMUS (1934): The Henry Process for the Clarification of Polluted Water. – Engineering, 138 (8, 9): 213–215, 293–295, 17 Abb.; London.

- ANONYMUS (1935): Wallsend – At their Rising Sun pit the Wallsend & Hebburn Coal Co. Ltd. have erected what is probably the most complete coal preparation plant in the world. – *Colliery Engineering*: 15 Abb.; London.
- BENTHAUS, F.-C. & LUCKE, B. (2013): Innovative Mine Water Treatments in Post-Mining-Areas of Germany. – In: BROWN, A., FIGUEROA, L. & WOLKERSDORFER, CH.: *Reliable Mine Water Technology*. – S. 919–924, 5 Abb.; Golden (International Mine Water Association).
- BEZUIDENHOUT, N., VERBURG, R., CHATWIN, T. & FERGUSON, K. (2009): INAP's Global Acid Rock Drainage Guide and the Current State of Acid Rock Drainage Assessment & Management in South Africa. – In: WATER INSTITUTE OF SOUTHERN AFRICA & INTERNATIONAL MINE WATER ASSOCIATION: *Proceedings, International Mine Water Conference*. – S. 29–37, 1 Abb.; Pretoria (Document Transformation Technologies).
- CARTWRIGHT, P. S. (2012): Application of Membrane Separation Technologies to Wastewater Reclamation and Reuse. – In: DRELICH, J., HWANG, J.-Y., ADAMS, J., NAGARAJ, D. R., SUN, X. & XU, Z.: *Water in Mineral Processing*. – S. 115–129, 6 Abb., 8 Tab.; Littleton (SME).
- COLIN, F. & QUEVAUVILLER, P. (1998): *Monitoring of Water Quality – The Contribution of Advanced Technologies*. – Amsterdam (Elsevier).
- COLMER, A. R., TEMPLE, K. L. & HINKLE, M. E. (1950): An Iron-Oxidizing Bacterium from the Acid Drainage of some Bituminous Coal Mines. – *J. Bacteriol.*, 59 (3): 317–328, 4 Abb., 2 Tab.; Washington.
- www.Desalination.com
- DITTMAR, C., OSSENDOTH, V. & SCHULZE, K.-D. (2013): Are European companies ready for Big Data? – 81 S., 46 Abb., 9 Tab.; Issy-les-Moulineaux (Groupe Steria SCA).
- DURÁN, A. P., RAUCH, J. & GASTON, K. J. (2013): Global spatial coincidence between protected areas and metal mining activities. – *Biol. Conserv.*, 160 (0): 272–278, 2 Abb., 3 Tab.; Amsterdam.
- EMAMJOMEH, M. M. & SIVAKUMAR, M. (2009): Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. – *J. Environ. Manage.*, 90: 1663–1679, 2 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- ERMITE CONSORTIUM. (2004): *Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management*. – *Mine Water and the Environment*, 23 (Supplement 1): S2-S80, 28 Abb., 6 Tab.; Berlin.
- GELLER, W., SCHULTZE, M., KLEINMANN, R. & WOLKERSDORFER, CH. (2013): *Acidic Pit Lakes – The Legacy of Coal and Metal Surface Mines: Environmental Science and Engineering*. – 525 S., 212 Abb., 66 Tab.; Heidelberg (Springer).
- GOETTE, H. (1934): Das Henry-Verfahren zum Klären von Ab- und Schlammwässern. – *Technische Blätter – Wochenschr. z. Dtsch. Bergwerksztg.*, 42: 683–684; Essen.
- GOLDSTEIN, R. (2005): *Kurt Gödel – Jahrhundertmathematiker und großer Entdecker*. – 313 S., 3 Fot.; München (Piper).
- HALL, A., SCOTT, J. A. & SHANG, H. (2011): Geothermal energy recovery from underground mines. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2): 916–924, 2 Abb., 5 Tab.; Amsterdam.
- HEBLEY, H. F. (1953): *Stream Pollution By Coal Mine Wastes*. – *Min. Eng.*, 5: 404–412, 7 Tab.; Littleton.
- HEDIN, R. S., NAIRN, R. W. & KLEINMANN, R. L. P. (1994): *Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. – Bureau of Mines Information Circular, IC-9389: 1–35, 13 Abb., 19 Tab.; Washington.
- HUTTON, B., KAHAN, I., NAIDU, T. & GUNTHER, P. (2009): Operating and Maintenance Experience at the Emalaheni Water Reclamation Plant. – In: WATER INSTITUTE OF SOUTHERN AFRICA & INTERNATIONAL MINE WATER ASSOCIATION: *Proceedings, International Mine Water Conference*. – S. 415–430, 13 Abb.; Pretoria (Document Transformation Technologies).
- JENKE, D. R. & DIEBOLD, F. E. (1984): *Electroprecipitation Treatment of Acid Mine Wastewater*. – *Water Res.*, 18 (7): 855–859, 2 Abb., 4 Tab.; Oxford.
- KALAYEV, V. A., KAMENTSEV, A. V. & KOZLOV, V. M. (2006): Sposob ochistki shakhtnykh vod ot vrednykh primesey [Methoden um Grubenwasser von Verunreinigungen zu befreien]. – *Ugol [Kohle]*: 57–59, 2 Abb., 4 Tab.; Moskau.

- KEGEL, K. (1950): Bergmännische Wasserwirtschaft einschließlich Grundwasserkunde, Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. – In: KEGEL, K., SPACKELER, G. & RAMMLER, E.: Berg- und Aufbereitungstechnik, Band III Geologische und technologische Grundlagen des Bergbaues III (Teil 1). – 3. Aufl., 374 S., 240 Abb., 49 Tab.; Halle/Saale (Knapp).
- KELLY, D. P. & WOOD, A. P. (2000): Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera "*acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov.. – Int. J. Syst. Evol. Microbiol., 50: 511–516, 1 Abb., 1 Tab.; Reading.
- KOSTENBADER, P. D. & HAINES, G. F. (1970): High-density sludge treats acid mine water. – Coal Age, 75 (September): 90–97, 5 Abb., 3 Tab.; New York.
- LAWSON, D. C. & SONDEREGGER, J. L. (1978): Geothermal data-base study – Mine-water temperatures. – Special Publication – State of Montana Bureau of Mines and Geology, 79: 38, 4 Abb., 1 Tab., 1 Anh.; Butte.
- LIEFFERINK, M. & VAN EEDEN, E. S. (2010): Proactive environmental activism to promote the remediation of mined land and acid mine drainage: a success story from the South African goldfields. – In: WOLKERSDORFER, CH. & FREUND, A.: Mine Water and Innovative Thinking – International Mine Water Association Symposium. – S. 537–541; Sydney, NS (Cape Breton University Press).
- LOTTERMOSER, B. (2003): Mine Wastes – Characterization, Treatment and Environmental Impacts. – 277 S., 65 Abb., 45 Tab.; Heidelberg (Springer).
- MCPHILLIAMY, S. C. & GREEN, J. (1973): A Chemical and Biological Evaluation of Three Mine Drainage Treatment Plants: Work Document No. 47. – 53 S., 3 Abb., 12 Tab.; Wheeling, (U. S. Environmental Protection Agency).
- MESSNER, R. (2010): Berge Versetzen – Das Credo eines Grenzgängers. – 6. Aufl., 255 S.; München (BLV).
- PINT, T. & HINCK, P. (2013): Use of an integrated source-to-receptor model to facilitate rapid assessment of water quality impacts during mine planning. – In: BROWN, A., FIGUEROA, L. & WOLKERSDORFER, CH.: Reliable Mine Water Technology. – S. 435–440, 3 Abb.; Golden (International Mine Water Association).
- SCHÖNAICH-CAROLATH IN TARNOWITZ, A. B. H. Prinz von (1860): Beschreibung des Verfahrens zur Entsäuerung der für die Speisung der Dampfkessel auf der Königshütte in Oberschlesien bestimmten Grubenwasser. – Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinen-Wesen, 8: 28–31, 3 Abb.; Berlin.
- SCHULTZE, M. (2012): Maximising use of waters produced by mining. – In: MCCULLOUGH, C. D., LUND, M. A. & WYSE, L.: International Mine Water Association Symposium. – S. 11–24; Bunbury (Edith Cowan University).
- SERRANO, L. (2007): Synthetic biology: promises and challenges. – Mol. Syst. Biol., 3 (158): 1–5; Heidelberg.
- SHONE, R. D. C. (1987): The freeze desalination of mine waters. – J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 87 (4): 107–112, 5 Abb., 1 Tab.; Johannesburg.
- SINGER, P. C. & STUMM, W. (1970): Acidic Mine Drainage – Rate-Determining Step. – Science, 167 (3921): 1121–1123, 2 Abb.; Washington.
- SLATTER, K. A., PLINT, N. D., COLE, M., DILSOOK, V., VAUX, D. d., PALM, N. & OOSTENDORP, B. (2009): Water Management in Anglo Platinum Process Operations: Effects of Water Quality on Process Operations. – In: WATER INSTITUTE OF SOUTHERN AFRICA & INTERNATIONAL MINE WATER ASSOCIATION: Proceedings, International Mine Water Conference. – S. 46–55, 7 Abb., 2 Tab.; Pretoria (Document Transformation Technologies).
- SLOOT, H. A. v. d. & ZOMEREN, A. v. (2012): Characterisation Leaching Tests and Associated Geochemical Speciation Modelling to Assess Long Term Release Behaviour from Extractive Wastes. – Mine Water and the Environment, 31 (2): 92–103, 7 Abb., 3 Tab.; Heidelberg.
- SMITH, G. C., STEINMAN, H. E. & YOUNG JR., E. F. (1970): Clean Water From Coal Mines. – Min. Eng., 22: 118–119, 1 Abb., 3 Tab.; Littleton.
- SMITH, K. S., FIGUEROA, L. A. & PLUMLEE, G. S. (2013): Can treatment and disposal costs be reduced through metal recovery?. – In: BROWN, A., FIGUEROA, L. & WOLKERSDORFER, CH.: Reliable Mine Water Technology. – S. 729–734, 2 Abb.; Golden (International Mine Water Association).

- SRI CONSULTING BUSINESS INTELLIGENCE (2008): Disruptive Civil Technologies – Six Technologies with Potential Impacts on US Interests out to 2025 CR 2008-07. – 34 S., 1 Abb., 6 Tab., 6 Anh.; Washington (National Intelligence Council).
- STRZODKA, M., PREUSS, V. & THÜRMER, K. (2013): Underwater Nozzle Pipelines (UNP) – A new Process for in-lake Liming. – In: BROWN, A., FIGUEROA, L. & WOLKERSDORFER, CH.: Reliable Mine Water Technology. – S. 741–746, 5 Abb.; Golden (International Mine Water Association).
- SUN, X. & HWANG, J.-Y. (2012): Desalination of Coal Mine Water with Electrosorption. – In: DRELICH, J., HWANG, J.-Y., ADAMS, J., NAGARAJ, D. R., SUN, X. & XU, Z.: Water in Mineral Processing. – S. 237–245, 6 Abb., 1 Tab.; Littleton (SME).
- SVANKS, K. & SHUMATE, K. S. (1973): Factors Controlling Sludge Density During Acid Mine Drainage Neutralization. – 156 S., 36 Abb., 11 Tab.; Columbus (State of Ohio Water Resources Center – Ohio State University).
- TRACY, L. D. (1921): Mine-water Neutralizing Plant at Calumet Mine. – Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng., 66: 609–623, 2 Abb., 10 Tab.; New York.
- VAN ITERSOM, F. K. T. (1938): The clarification of coal-washery effluent. – Proc. Kon. Ned. Akad. Wet., 41 (2): 81–94, 11 Abb.; Amsterdam.
- WILDEMAN, T., BRODIE, G. & GUSEK, J. (1993): Wetland Design for Mining Operations. – 408 S., 67 Abb., 40 Tab.; Richmond, BC (BiTech).
- WOLFERS, B. & ADEMMEER, C. (2010): Grenzen der bergrechtlichen Nachsorgehaftung – Verhältnismäßigkeitsprüfung im Bergrecht nach dem Rammelsberg-Urteil. – Deutsches Verwaltungsblatt – Abhandlungen, 2010 (1): 22–27; Köln.
- WOLKERSDORFER, CH. (2008): Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. – 466 S., 126 Abb., 34 Tab.; Heidelberg (Springer).
- WOLKERSDORFER, CH. & YOUNGER, P. L. (2002): Passive Grubenwassereinigung als Alternative zu aktiven Systemen. – Grundwasser, 7 (2): 67–77, 7 Abb., 2 Tab.; Heidelberg.
- YOUNG, E. F. & STEINMAN, H. E. (1967): Coal mine drainage treatment. – Purdue Univ., Eng. Bull., Ext. Ser., 52 (3): 477–491, 15 Abb., 7 Tab.; Lafayette.
- YOUNGER, P. L., BANWART, S. A. & HEDIN, R. S. (2002): Mine Water – Hydrology, Pollution, Remediation. – 464 S.; Dordrecht (Kluwer).