

Predicting Acid Mine Drainage: Past, Present, Future

Total worldwide liability associated current and future remediation of acid mine drainage (AMD) is approximately 100,000 million US-\$. Consequences of failing to predict AMD for individual operations and for the mining industry include unplanned spending on remedial measures and reputational damage. Despite these severe risks, predicting AMD properties of mine wastes is typically not an attribute that is strongly embedded into the development of mineral resources. While the research community needs to establish practical state-of-the-art AMD characterisation tools, industry has

to accept and use such tools, if we are to achieve more cost-effective mine closure and reduce environmental liabilities in the long term. In future, AMD predictive tests and methodologies should rely on integrated field and laboratory tools measuring mineralogical, geochemical, textural and geometallurgical properties. Such an approach supports more effective waste management during operation and ultimately leads to less costly mine closure outcomes. The paper is based on the author's presentation on the Aachen International Mining Symposium (AIMS) at 27th May 2015.

Prognose von Acid Mine Drainage: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft

Die weltweit anfallenden Kosten für die gegenwärtige und zukünftige Aufbereitung von sauren Grubenwässern, auch Acid Mine Drainage oder abgekürzt AMD genannt, belaufen sich auf nahezu 100 Mrd. US-\$. Fehlende AMD-Prognosen für einzelne Bergwerksbetriebe sowie für die gesamte Bergbauindustrie haben nicht nur außerplanmäßige Sanierungskosten zur Folge, sondern rücken den Bergbau insgesamt in ein schlechtes Licht. Trotz dieser schwerwiegenden Risiken ist die Bewertung von AMD-Charakteristika des Nebengesteins normalerweise kein wesentliches Planungselement bei der Erschließung neuer Rohstoffvorkommen. Einerseits muss die Wissenschaft praktische, moderne AMD-Klassifizierungstools entwickeln, andererseits

muss die Bergbauindustrie diese auch annehmen und einsetzen, wenn Bergwerksschließungen kostengünstiger gestaltet und gleichzeitig langfristige Umweltbelastungen reduziert werden sollen. In Zukunft sollten Prognosetests und -verfahren integrierte Feld- und Laborprüfungen beinhalten, die mineralogische, geochemische, gefügestrukturelle und geometallurgische Eigenschaften umfassen. Ein solcher Ansatz unterstützt ein deutlich verbessertes Abraummanagement während des laufenden Betriebs und führt letztendlich zu geringeren Stilllegungskosten. Der vorliegende Beitrag basiert auf einem Vortrag des Autors anlässlich des Aachen International Mining Symposiums (AIMS) am 27. Mai 2015.

1 Introduction

Today, the control and mitigation of acid mine drainage (AMD) is considered to be one of the major environmental challenges facing the mining industry worldwide (1). Likely costs for AMD mitigation in Australia, Canada, Sweden and the USA, e.g., are US-\$ 300 m, US-\$ 1,900–5,300 m, US-\$ 900 m and US-\$ 32,000–72,000 m, respectively (2). South Africa alone needs to spend as much as US-\$ 1,000 m to make AMD water leaking from abandoned mine shafts drinkable (3). The estimated costs for total worldwide liability associated the current and future remediation of AMD are approximately 100,000 million US-\$ (2).

Predicting the environmental risks of mineral resource development is usually not an aspect that is strongly embedded into the development of mineral deposits as other aspects such as resource evaluation and testing for beneficiation, mineral processing and recovery attributes of ores and different ore types take

1 Einführung

Heute wird die Kontrolle und Aufbereitung von saurem Grubenwasser (AMD) als eine der größten Umweltherausforderungen der Bergbauindustrie weltweit (1) angesehen. Beispielsweise muss Australien 300 Mio A\$, Kanada 1,9 Mrd. bis 5,3 Mrd. US-\$, Schweden 900 Mio. US-\$ und die USA zwischen 32 und 72 Mrd. US-\$ für die Sanierung AMD-belasteter Gewässer aufwenden (2). Allein Südafrika kostet die Aufbereitung von aus stillgelegten Abbaubetrieben sickenden, sauren Grubenwässern zu Trinkwasser ca. 1 Mrd. US-\$ (3). Die Gesamtkosten, die aus den heutigen und zukünftigen Verpflichtungen zur Beseitigung von AMD und aus der Aufbereitung von AMD-belastetem Wasser resultieren, belaufen sich schätzungsweise auf 100 Mrd. US-\$ weltweit (2).

Die Vorhersage von Umweltrisiken ist bei der Erschließung neuer Mineralvorkommen normalerweise kein wesentlicher Bestandteil der Planungsarbeiten. Es stehen eher Lagerstättenbegutach-



Fig. 1. AMD waters in the Rio Tinto, Spain.

Bild 1. AMD-belastetes Wasser im Rio Tinto, Spanien.

Photo/Foto Lottermoser

priority. Nevertheless, early AMD characterisation and risk assessment at the exploration, pre-feasibility and feasibility stages support more effective management of ores and wastes during mineral processing, subsequent storage of waste and ultimately improved mine closure outcomes.

Consequently, there is a growing need to provide early predictive information of intrinsic rock characteristics likely to result in AMD, which in turn impact on waste management throughout the life-of-mine phases. The objectives of this contribution are to review the approaches to AMD prediction and to illustrate our advances in knowledge and the challenges ahead.

2 Predicting acid mine drainage: Past

The spontaneous oxidation of sulfide minerals is arguably one of the most important environmental processes at many metalliferous and coal mine sites because the exposure of sulfide minerals to air and water may lead to acid production and the dissolution and mobilisation of metals and metalloids. The knowledge that sulfide minerals oxidise at the Earth's surface and that this process causes the release of environmentally significant elements to ground and surface waters is not new to modern science. Early civilisations of Mesopotamia and Egypt as well as Greek and Roman scholars were familiar with the salts formed from pyrite oxidation (4).

Sulfide oxidation and resultant AMD due to mining have a long history dating back thousands of years, when the Rio Tinto mining district of Spain experienced periods of intense mining during Roman times and the associated production of pyrite-rich wastes and AMD waters (Figure 1). At Rio Tinto, mining is not exclusively accountable for the generation of AMD and its impact on the river (5). Historical accounts document the river's long-standing acidity. The Romans named the Rio Tinto 'urbero', Phoenician for 'river of fire', and the Arab name for it was 'river of sulfuric acid'. The enormous sulfide orebodies experienced long-term deep weathering and erosion in their geological history and, acid weathering of outcropping sulfide ores produced large-scale gossans and natural AMD prior to mining (6). Thus, the river's conditions today are a combination of natural and mining induced AMD.

tung, Erzanreicherungsprüfungen, Gewinnung und Aufbereitung des Erzes oder der unterschiedlichen Erzsor ten im Vordergrund. Dennoch trägt eine frühe AMD-Klassifizierung und eine Risikoabschätzung schon in den unterschiedlichen Planungsphasen von der Erkundung über die Vorstudien und den unterschiedlichen Stufen der Machbarkeitsstudie zu einer effektiveren Bewirtschaftung der Erze und des Abraums, der nachfolgenden Verwahrung des Abraums und letztendlich zu verbesserten Stilllegungsergebnissen bei.

Deshalb werden frühzeitig gewonnene prädiktive Informationen zu intrinsischen Deckgebirgseigenschaften, die zur Entstehung von AMD beitragen könnten, immer wichtiger und würden als Ergebnis die Abraumbewirtschaftung in jeder Phase des Gewinnungsbetriebs beeinflussen. Das Ziel dieses Beitrags ist zum einen die bestehenden Vorgehensweisen bei der AMD-Prognose aufzuzeigen und zum anderen neue Erkenntnisse vorzustellen und die vor uns liegenden Herausforderungen zu beleuchten.

2 Die Prognose von AMD in der Vergangenheit

Die spontane Oxidation von sulfidischen Mineralen ist zweifelsohne einer der wichtigsten umweltrelevanten Prozesse bei zahlreichen erz- und kohlegewinnenden Betrieben, da deren Freisetzung in Luft und Wasser zur Bildung von Säure und zur Auflösung und Mobilisierung von Metallen und Metalloiden führen kann. Die Erkenntnis, dass sulfidische Minerale an der Erdoberfläche oxidieren und dieser Prozess zur Freisetzung von umweltschädlichen Elementen in Grund- und Oberflächenwässern führen kann, ist in der modernen Wissenschaft bekannt. Sowohl frühe Zivilisationen wie Mesopotamien und das alte Ägypten als auch griechische und römische Gelehrte kannten das Phänomen der Pyritoxidation und der damit einhergehenden Salzbildung (4).

Sulfidoxidation und daraus resultierendes AMD als Bergbaufolge gibt es schon seit mehreren tausend Jahren. Ein Beispiel ist das spanische Bergbaugebiet am Rio Tinto, wo es während der Römerzeit Phasen intensiven Bergbaus gab und damit einhergehend die Erzeugung von pyritreichem Abraum und sauren Grubenwässern (Bild 1). Im Falle des Rio Tinto sind allerdings nicht allein die bergbaulichen Aktivitäten für die Bildung von AMD und dessen Auswirkungen auf den Fluss verantwortlich (5). Historische Dokumente belegen die lang anhaltende Acidität des Flusses. Die Römer bezeichneten den Fluss als „urbero“, phönizisch für „Fluss des Feuers“ und die Araber nannten ihn den „Fluss der Schwefelsäure“. In ihrer geologischen Geschichte durchliefen die enormen sulfidhaltigen Erzkörper lang anhaltende Verwitterungs- und Erosionsphasen. Die saure Verwitterung der anstehenden Sulfiderze führte zur Bildung von riesigen eisernen Hüten und natürlichem AMD schon vor dem eigentlichen Gewinnungsprozess (6). Somit ist der Zustand des Flusses sowohl auf Einflüsse von natürlich erzeugtem als auch auf bergbaubedingten AMD zurückzuführen.

Die ersten zukunftsweisenden Beobachtungen in diesem Zusammenhang und der erste Einsatz von Indikatoren zum besseren Verständnis der Entstehung von AMD in Bergwerken wurden schon im 16. Jahrhundert von Diego Delgado aufgezeichnet. Er war Priester und inspizierte auf Geheiß des spanischen Königs Philipp II die Bergwerke entlang des Rio Tinto sowie den Fluss selbst (7). In seinem Bericht zu den Bergwerken stellte Diego Delgado im Jahre 1556 fest:



Fig. 2. Long-term kinetic leach columns to establish water quality characteristics of tailings from the Grasberg Cu-Au mine, Indonesia. Bild 2. Langfristige kinetische Elutionssäulen zur Feststellung der Wasserqualität von Flotationsschlämmen aus der Grasberg Kupfer-Goldmine, Indonesien. Photo/Foto: Lottermoser

The very first ground-breaking observations on AMD and the use of indicators to understand AMD processes at mine sites were documented by Diego Delgado, a 16th century priest, who inspected the Rio Tinto mines and river at the directive of Spain's King Phillip II (7). In 1556 when Diego Delgado reported on the mines, he recognised that

- pyrite oxidation causes the formation of AMD products including sulfuric acid;
- iron dissolves in AMD waters;
- iron hydrolyses and forms iron-rich cements in stream sediments;
- AMD waters are poisonous to fish and other aquatic organisms; and
- simple tests can reveal the ecotoxicity of AMD waters (7).

In doing so, Diego Delgado became one of the first scholars, if not the first, to understand AMD formation and its impacts.

3 Predicting acid mine drainage: Present

3.1 Static and kinetic tests

Since Diego Delgado, remarkable advances in our capability to observe, describe, quantify and predict the oxidation of sulfide minerals and AMD formation have been achieved. In the 1960s, qualitative observations were made between lithology and leachate and these correlations were used to forecast waste properties. In the 1970s, geochemical testing was introduced, based on static and kinetic testwork. To date, much of the industry still utilises these geochemical tests established in the 1970s and, the scientific literature is packed with studies on sulfide oxidation as well as the chemical reactions and processes leading to AMD development. There is a detailed understanding of the weather-

- Pyritoxidation führt zur Bildung von AMD-Produkten, einschließlich Schwefelsäure,
- Eisen löst sich in AMD-belasteten Gewässern auf,
- Eisen hydrolysiert und bildet stark eisenhaltige Zemente im Flusssediment,
- AMD-haltige Gewässer sind für Fische und andere im Wasser lebende Organismen toxisch und
- einfache Tests können die Ökotoxizität von AMD-haltigen Gewässern belegen (7).

Durch seine Aufzeichnungen wurde Diego Delgado zu einem der ersten Wissenschaftler, wenn nicht der erste Wissenschaftler überhaupt, der Erkenntnisse über die Entstehung von AMD und dessen Auswirkungen gewann.

3 Die Prognose von AMD in der Gegenwart

3.1 Statische und kinetische Tests

Seit Diego Delgado wurden beträchtliche Fortschritte bei der Beobachtung, Beschreibung, Quantifizierung und Vorhersage von Oxidationsprozessen sulfidischer Minerale und der Entstehung von AMD erzielt. In den 1960er Jahren kamen qualitative Beobachtungen zur Korrelation zwischen Lithologie und Sickerwasser hinzu, mit deren Hilfe Prognosen zu den Eigenschaften des Nebengesteins erstellt wurden. In den 1970ern wurden dann statische und kinematische Tests eingeführt. Heutzutage werden die in den 1970er Jahren entwickelten Tests immer noch von einem Großteil der Industrie verwendet und in der wissenschaftlichen Literatur gibt es eine Fülle von Studien zur Sulfidoxidation und den chemischen Reaktionen und Prozessen, die zur Entstehung von AMD führen. Detaillierte Kenntnisse über Verwitterungsreaktionen, die zu Sulfidoxidation und Entstehung von AMD führen, sind vorhanden und eine Vielzahl von quantitativen Testmethoden zur Vorhersage des AMD-Entstehungsrisikos sowie der Nebengesteinseigenschaften wurden entwickelt. Diese Verfahren reichen von statischen Labortests bis zu langfristigen kinematischen Tests.

Dabei bevorzugt die Bergbauindustrie statische chemische Tests, wie sie von kommerziellen Testlaboren als Analysepaket angeboten werden. Es gibt eine Vielzahl von statischen Testverfahren, die jedoch alle kurzfristig angelegt sind (i.d.R. Messung über Stunden oder Tage) und auf einem Low-Cost Screening zur Überprüfung der Proben auf ihr Nettosäurepotential basieren (8, 9). Die am häufigsten eingesetzten statischen Verfahren stellen die aus der Sulfidoxidation generierte Säure quantitativ der Säureaufnahme von Karbonaten gegenüber und erfordern:

- Die Messung des gesamten oder sulfidischen Schwefelgehalts und Berechnung der säurebildenden Kapazität.
- Die Messung der säureneutralisierenden Kapazität.

Der Unterschied zwischen diesen Werten gibt einen Hinweis auf das netto-säurebildende Potential des Materials. Obwohl eine derartige Bewertung potentielle AMD-Risiken erkennen lässt, ist doch die Anwendung der statischen Verfahren inadäquat, um festzustellen, ob und wann Säuren und Metallablagerungen durchsickern. Statische Verfahren weisen systeminhärente Grenzen auf (z.B. berücksichtigen sie weder mikrobiologische Aktivitäten noch die tatsächlichen Partikelgrößen in situ). Ebenso vernachlässigen

ing reactions that cause sulfide oxidation and AMD development, and numerous quantitative tests have been designed to predict AMD risks and waste properties. Such methods range from static laboratory-based methods to long-term kinetic trials.

The mining industry prefers static chemical testing to predict AMD risks as they are offered as defined analytical packages by commercial laboratories. Numerous static tests have been developed but all of them are rapid (usually measured in hours and days), low-cost screening tests to evaluate samples for their net acid potential (8, 9). The most widely used static methods quantitatively balance the acid generated from the oxidation of sulfides against the acid consumption of carbonates and require:

- the measurement of total or sulfidic sulfur contents and calculation of the acid generating capacity; and
- the measurement of acid neutralising capacity.

The difference between these values gives an indication of the net acid-forming potential of the material. Although such an assessment can recognise potential AMD issues, the application of these static methods to determine whether and when acid and metal discharge will transpire is inadequate. Static tests have intrinsic limitations (e.g. they do not consider microbiological activities or actual particle sizes on site), and they disregard different dissolution rates of individual minerals and associated acid production and consumption events. The greatest criticism of existing static tests is the immense dissimilarities between laboratory testing and actual site conditions. Therefore, a range of simulated kinetic weathering tests have been developed to predict water quality, e.g. humidity cells, column leach tests (8).

Kinetic tests expose samples to simulated weathering either in the laboratory or the field (Figure 2). The specifics of kinetic tests vary, but all procedures try to simulate recurring wetting/drying and flushing of wastes. Under closely controlled conditions, the natural weathering behaviour of a sample is explored based on periodic leaching of samples, leachate collection and analysis, calculation of rates of acid formation and metal release, and evaluation of long-term water quality trends. Kinetic tests are used to:

1. confirm static test data;
2. recognise the dominant chemical weathering reactions;
3. establish acid-formation rates and assess AMD potential;
4. provide insights into whether and if so when acid production of a particular sample is likely to occur;
5. forecast chemical composition and temporal variation in leachate quality; and
6. estimate the release rate of environmentally significant elements and compounds from tested materials (9, 10).

Major disadvantages of kinetic testing are the need for dedicated laboratory or field space, skilled laboratory technicians and evaluators, and time required to complete the testing, as it is common for these experiments to run for at least half a year and if possible considerably longer (10). There are other issues with laboratory based kinetic tests including the equipment configuration and experimental conditions used, e.g. waste grain size, which may

sie unterschiedliche Auflösungsraten einzelner Minerale und die damit einhergehende Säurebildung bzw. Säureaufnahme. Der schwerwiegendste Kritikpunkt an bestehenden statischen Prüfungen sind die erheblichen Diskrepanzen zwischen den Labortests und den tatsächlichen Bedingungen vor Ort. Deshalb wurden eine Reihe von kinetischen Verwitterungssimulationen zur Bestimmung der zukünftigen Wasserbeschaffenheit, wie z.B. Feuchtezellen oder Säulenelutionstests, entwickelt (8).

Im Falle von kinetischen Tests werden die Proben entweder im Labor oder im Feldversuch einer simulierten Verwitterung ausgesetzt (Bild 2). Die Spezifika der unterschiedlichen kinetischen Tests variieren zwar, jedoch versuchen alle Verfahren wiederkehrende Befeuchtungs-/Trocknungs- oder Durchspülungsbedingungen des Abraums zu simulieren. Das natürliche Verwitterungsverhalten einer Probe wird unter streng kontrollierten Bedingungen auf Grundlage periodischer Auswaschungen der Proben, Auffangen und Analyse des Sickerwassers, Berechnung der Säurebildungs- und Metallfreisetzungsraten und Bewertung der langfristigen Tendenzen der Wasserqualität untersucht. Kinetische Tests werden zu folgenden Zwecken eingesetzt:

1. Bestätigung der statischen Testdaten,
2. Erkennung der vorherrschenden chemischen Verwitterungsbedingungen,
3. Feststellung der säurebildenden Raten und Bewertung des AMD-Potentials,
4. Erkenntnisgewinn ob und wenn ja, wann sich gegebenenfalls Säure in einer bestimmten Probe bilden wird,
5. Prognose der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers und der saisonalen Schwankungen der Sickerwasserqualität, 6. Abschätzung der Freisetzungsraten von umweltschädlichen Elementen und Verbindungen auf Grundlage der getesteten Materialien (9,10).

Die Hauptnachteile der kinetischen Tests sind zum einen die Notwendigkeit, eigens zu diesem Zweck eingerichtete Labore oder Bereiche am Gewinnungsort vorzusehen sowie technische Fachkräfte und Evaluierer im Labor bereitstellen zu müssen und zum anderen die für die Durchführung dieser Tests erforderliche Zeit, denn diese Experimente nehmen normalerweise einen Zeitraum von mindestens einem halben Jahr, möglicherweise sogar noch längere Zeit in Anspruch (10). Weitere Probleme im Hinblick auf kinetische Tests im Labor stellen sich bei der Konfiguration der Geräte und den verwendeten Testbedingungen, wie z.B. die Korngröße im Nebengestein, die eventuell nicht mit dem Material in situ übereinstimmt. Als Folge können die Testergebnisse nicht eingesetzt werden, um die tatsächliche, sich zukünftig entwickelnde Wasserqualität vorherzubestimmen. Dennoch sollten kinetische Feldtests an den Bergbaustandorten durchgeführt werden, da sie die beste Annäherung an die tatsächliche Entwicklung von AMD darstellen. Diese Tests sind jedoch kostspielig, erfordern die Auswahl von sogenannten „Standort-Champions“, sind abhängig von regelmäßiger Überwachung und erfordern einen langen Zeitraum, d.h. Jahre. Diese Langfristigkeit führt dazu, dass kinetische Tests in Vorstudien und Machbarkeitsstudien in der Regel keine Anwendung finden.

not be representative of the material in the field. Consequently, the data of laboratory kinetic tests cannot be used to predict actual water quality that may occur in the future. Regardless, field-based kinetic tests should be established at mine sites as they represent the best approximation for the evolution of AMD. Yet, these tests are costly, require “site champions”, rely on regular monitoring, and need to take place over long time scales, i.e. years. The long-term nature of kinetic tests commonly precludes their use in mining pre-feasibility and feasibility studies.

3.2 Use of AMD tests in industry

Present AMD prediction tools joined with a knowledgeable tactic and cautious analysis of AMD test data allow mine operators to meet planning objectives and to minimise the liabilities and threats arising from AMD. Robust waste management plans can be developed and mine wastes can be fully characterised. Moreover, a number of industry guidebooks are accessible documenting AMD prediction, prevention and remediation, including the Global Acid Rock Drainage (GARD) guide (11), and a comprehensive Mine Environment Neutral Drainage (MEND) prediction manual for the drainage chemistry from sulfidic geological materials (8).

Despite the development of AMD tests and their application in life-of-mine development, significant mine closure liabilities continue to arise. Costs of failing to predict and manage AMD for individual operations and for the mining industry include inadvertent spending on remedial measures and reputational damage (12). For large mines in settings susceptible to the generation of AMD, unplanned remediation costs including the development of AMD have frequently been in the range of 50 to 100 million A\$, and sometimes beyond (12). Thus irrespective of the progress in predictive AMD techniques, there are numerous examples of mine sites that are and will remain long-term post-closure AMD liabilities (Figure 3). The cause for this inconsistency appears to be multi-fold:

1. Environmental management of mineral resources is still a responsive activity, concentrating on compliance and monitoring as well as mine site rehabilitation. This is despite the fact that best practice should use robust predictive AMD tests at the exploration and pre-feasibility stages of mineral resource development.
2. AMD risk assessments commonly depend on few samples and limited predictive static and kinetic test data, with the intrinsic geological variability barely considered and AMD block models hardly ever prepared.
3. Waste classifications rely on simplistic static tests that categorise materials as three waste types: potentially acid-forming (PAF), non-acid-forming (NAF) or uncertain (UC) wastes (13). Such an approach does not consider the mobility of environmentally significant elements at neutral pH conditions, nor does it consider important variables that influence AMD production over time, e.g. mineral reaction rates; microorganisms; particle size; texture; mineral chemistry; formation of soluble and insoluble secondary minerals; waste temperature; pore gas composition and concentrations; development of preferential flow paths; climate.

3.2 Einsatz von AMD-Tests in der Industrie

Bergwerksbetreiber können heutzutage mit Hilfe vorhandener AMD-Prognosetools in Verbindung mit den Erfahrungswerten der Fachleute und einer umsichtigen Analyse der AMD-Testdaten Planungsziele einhalten und Bergbaufolgeschäden und die mit AMD einhergehenden Risiken minimieren. Eine solide Planung zur Beherrschung der bergbaulichen Abfälle kann auf dieser Grundlage entwickelt und der Abraum vollständig klassifiziert werden. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Industriehandbüchern, die Verfahrensweisen zur Abschätzung, Vermeidung und Beseitigung von Sauerwasser dokumentieren, darunter der Global Acid Rock Drainage Guide (GARD) (11) sowie der Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Guide, ein umfangreiches Nachschlagewerk zur Vorhersage der chemischen Zusammensetzung von Sickerwässern aus sulfidischen geologischen Materialien (8).

Trotz der Entwicklung von AMD-Tests und ihrer Anwendung im Gewinnungszeitraum fallen weiterhin erhebliche Bergbaufolgekosten an. Die aus mangelnder Prognose und Beherrschung von AMD resultierenden Kosten für den Einzelbetrieb als auch für die Bergbauindustrie insgesamt umfassen nicht nur unvorhergesehene Ausgaben für Aufbereitungsmaßnahmen, sondern auch Kosten, die aus dem Reputationsschaden für den Bergbau resultieren (12). Im Falle von großen Minen, die in einem für die Entstehung von Sauerwasser anfälligen Umfeld operieren, belaufen sich die außerplanmäßigen Sanierungskosten häufig auf 50 bis 100 Mio. A\$, manchmal liegen sie sogar darüber (12). Somit gibt es trotz Fortschritts im Bereich der prädiktiven AMD-Verfahren zahlreiche Beispiele von Anlagen, die durch saure Grubenwässer bedingte, sehr hohe Bergbaufolgekosten tragen müssen und dies für einen sehr langen Zeitraum (Bild 3). Die Ursache für diesen Widerspruch scheint vielschichtig zu sein:

1. Das Umweltmanagement von mineralischen Rohstoffen ist immer noch reaktiv und konzentriert sich vor allem auf Compliance und Überwachung sowie die Renaturierung stillgelegter Bergwerke. Und das, obwohl die beste Vorgehensweise die Durchführung aussagekräftiger AMD-Prognosetests während der Explorations- und Vorstudienphasen der Lagerstättenschließung wäre.
2. Die AMD-Risikoabschätzung beruht in der Regel auf nur wenigen Proben und sehr begrenzten statischen und kinetischen Prognosetestdaten, wobei die inhärente geologische Variabilität kaum berücksichtigt wird und AMD-Blockmodelle so gut wie nie erstellt werden.
3. Nebengesteinklassifizierungen werden anhand von grob vereinfachten statischen Tests vorgenommen, die die Materialien in drei Kategorien einteilen: potentiell säure-generierend (PAF), nicht säure-generierend (NAF) und Verhalten unsicher (UC) (13). Diese Vorgehensweise berücksichtigt jedoch weder die Elementmobilisierung umweltrelevanter Elemente bei neutralem pH-Wert noch werden wichtige Variablen, die die AMD-Entstehung über einen längeren Zeitraum beeinflussen können, in Betracht gezogen, wie z.B. Mineralreaktionsraten, Mikroorganismen, Partikelgröße, Textur, chemische Zusammensetzung, Bildung von löslichen und nicht-löslichen Sekundärmineralen, Abraumtemperatur, Zusammensetzung und Konzentration des Porengases, Entwicklung bevorzugter Fließpfade oder das Klima.



Fig. 3. Aerial photo of a rehabilitated waste rock dump (Au mine, Australia), showing an exposed, barren sulphide-rich layer on an outer dump batter. A flawed repository design, inadequate waste characterisation and poorly supervised waste management practices led to today's physical instability of waste rock batters, ineffective encapsulation of potentially acid-forming (PAF) materials, exposure of PAF materials, and resultant erosion, vegetation dieback and impacts on ground and surface waters.

Bild 3. Luftaufnahme einer renaturierten Abraumdeponie einer australischen Goldmine. Sie zeigt eine exponierte, karge, sulfidreiche Schicht an den äußeren Bereichen. Ein verfehltes Haldenkonzept, unzureichende Abraumklassifizierung und mangelhaft beaufsichtigte Praktiken der Haldenbewirtschaftung haben zur heutigen Instabilität der Abraumhalden, zu unwirksamem Verschluss und zur Exposition von PAF-Materialien sowie als Folge zu Erosion, Vegetationssterben und zur Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwässern geführt. Photo/Foto: Lottermoser

4. Static tests are intended to be screening tools for initial waste characterisation and classification. Nevertheless, industry relies on static tests to make far-reaching waste management and disposal decisions.
5. Field-based kinetic trials are needed to understand acid and metalliferous drainage. Nevertheless, such long-term experiments are hardly ever pursued by industry.
6. Ambiguity exists in long-term AMD predictions and Environmental Impact Statements that include forecasts on mine water quality. For example, an appraisal of Environmental Impact Statements from 25 mines in the United States showed that 15 of 25 mines (60 %) surpassed water quality criteria for metals and pH after permitting discharge of mine waters into the environment (14).
7. Tailings and waste rock storage facilities are not constructed according to design and mine closure plans. Especially, capping of waste repositories, characterisation of capping materials and placement sequence of wastes into repositories need much more attention by contractors and operators (Figure 3).
8. Monitoring of waste dumping into repositories is insignificant during operation.
9. Rehabilitated repositories and their covers are poorly understood and young landforms that have not equilibrated with the surrounding landscape in terms of weathering and leaching rates.
10. There is little understanding on how the natural flora relates with covers and permits oxygen and water to infiltrate via root zones into sulfidic wastes at depth.
4. Statische Tests sollten eigentlich als Screeningtools zur Ersteinschätzung und -klassifizierung des Nebengesteins dienen. Dennoch verlässt sich die Industrie auf statische Tests als Grundlage für weitreichende Entscheidungen hinsichtlich Management und Verwahrung des Abraums.
5. Kinetische Feldversuche sind erforderlich, um Kenntnisse über saure und metallführende Sickerwasserprozesse zu erhalten. Dennoch werden entsprechende Experimente so gut wie nie von der Industrie durchgeführt.
6. Es herrscht eine gewisse Ambivalenz zwischen langfristigen AMD-Prognosen und Umweltverträglichkeitsgutachten, die Prognosen zur Qualität des Grubenwassers umfassen. Beispielsweise hat eine Auswertung von Umweltverträglichkeitsgutachten von 25 US-amerikanischen Bergwerken ergeben, dass 15 (60 %) dieser 25 Bergwerke die Wasserqualitätsgrenzwerte für Metalle und pH-Wert überschritten, nachdem sie die Ableitung von Grubenwässern in die Umwelt zuließen (14).
7. Tailing- und Abraumverwahrungsorte werden nicht gemäß Konstruktions- und Stilllegungsplänen errichtet. Vor allem die Abdeckung von Abraumhalden, die Charakterisierung der Abdeckmaterialien und die Schichtung des bergbaulichen Abfalls auf den Halden müssen sehr viel mehr Aufmerksamkeit durch Vertragsfirmen und Betreiber erhalten (Bild 3).
8. Die Überwachung der Abraumverbringung zu den Halden wird während des laufenden Gewinnungsbetriebs stark vernachlässigt.
9. Es fehlt an Kenntnissen zu renaturierten Deponien und deren Abdeckungen und zu neuen Landformen, die in Bezug auf eine mögliche Verwitterung und Auslaugungen nicht an die umgebende Landschaft angepasst sind.
10. Es gibt wenig Wissen über das Zusammenspiel zwischen natürlicher Flora und Abdeckmaterialien. Als Folge können Sauerstoff und Wasser über die Wurzeln in den sulfidischen Abraum in größerer Tiefe eindringen.
11. Bislang liegen AMD-Tests bei der Abschätzung des Abraumverhaltens teilweise richtig, jedoch teilweise auch falsch. Der Grund für diese Fehlprognosen scheint zum Teil darin zu liegen, dass heutzutage eingesetzte statische und kinetische Tests inhärente Grenzen aufweisen (10).

Nichtsdestotrotz setzt die Bergbauindustrie weiterhin auf statische und kinetische Tests zur Erstellung von AMD-Prognosen. Diese Tests versprechen viel, z.B., dass mit ihrer Hilfe fundierte Prognosen für Nebengesteinseigenschaften möglich sind. Dementsprechend werden die gewonnenen Daten herangezogen, um standortbezogene Klassifizierungspläne für Nebengestein zu erstellen, die allerdings nur drei Kategorien von Abraum berücksichtigen: PAF, NAF und Abraum mit unsicherem Verhalten (UC) (12). Eine derartige Klassifizierung ist viel zu einfach, zudem dominiert von chemischen Daten und besessen von chemischen Analysen. Wir bauen aber keine Chemikalien ab, wir bauen Minerale ab! Konventionelle Klassifizierungssysteme berücksichtigen in keiner Weise, dass die Reaktivität des Nebengesteins durch Parameter gesteuert wird, die nicht chemischer Natur sind. Diese umfassen die Art und das Vorkommen der Minerale als auch deren Oberfläche, Textur und Härte.

11. Thus far, AMD tests have been correct in predicting waste behaviour in some cases but false in others. The reason for this failure seems to be partly because the existing static and kinetic tests have inherent limitations (10).

Regardless, the mining industry continues to use static and kinetic tests for AMD prediction. These tests promise much. They promise to allow solid forecasts of waste characteristics, and the data are used to design site-specific waste classification schemes that only consider three waste types: PAF, NAF and uncertain waste (12). Such classification is far too simple, blinded by chemical data and obsessed with chemical analyses. We do not mine chemical elements; we mine minerals. Conventional waste classification fails to consider that the reactivity of waste is controlled by parameters other than chemistry. These factors include the type and occurrence of minerals as well as their surface area, texture and hardness.

4. Predicting acid mine drainage: Future

4.1 Total deposit knowledge

Today's mineral resource development requires total deposit knowledge. Total deposit knowledge is the solid understanding of all the pertinent characteristics of a mineral resource. These important characteristics include:

- geological properties;
- metallurgical performance;
- geotechnical aspects;
- the economic value of the resource; and
- its likely environmental impacts.

These five fundamental aspects need to be established early in the life-of-mine span. Investigations on drill core allow a prediction of the likely geological, metallurgical, geotechnical, economic and environmental characteristics of ore bodies. Among the predictive methods pursued to establish likely environmental impacts, field and laboratory testing of ores and wastes has gained prominence.

Existing prognostic characterisation tools and methodologies can provide early predictive information of intrinsic AMD rock characteristics that are likely to impact on ore and waste performance and management during mineral processing, product manufacture and mine closure. Yet, today's AMD predictive tools and methodologies still have serious limitations, are riddled with uncertainties that are hard to quantify, or only allow predictions that represent the best estimate of what will happen in the future. The time has come to drastically improve our scientific efforts to precisely predict operational challenges, impacts and closure liabilities on all scales.

The route to greater confidence in the prediction of ore and waste characteristics is not through more sophisticated modelling. Our skills at modelling have run ahead of our understanding of the complex mineralogical, geochemical and microbiological processes leading to the release of deleterious elements and our ability to test models against real data from the laboratory and the field.

4. Die Prognose von AMD in der Zukunft

4.1. Genaue Kenntnis der Lagerstätte

Werden heutzutage Mineralvorkommen neu erschlossen, ist eine genaue Kenntnis der Lagerstätte Grundvoraussetzung, d.h. ein fundiertes Verständnis aller wesentlichen Eigenschaften eines Minerals ist unabdingbar. Diese umfassen:

- geologische Eigenschaften,
- metallurgisches Verhalten während der Aufbereitung,
- geotechnische Aspekte,
- den wirtschaftlichen Wert des Rohstoffs und
- die möglicherweise resultierenden Umweltschäden.

Diese fünf grundlegenden Aspekte müssen schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt des Gewinnungsprojekts abgeklärt werden. Untersuchungen mit Hilfe von Kernbohrungen ermöglichen die Prognose der wahrscheinlichen geologischen, metallurgischen, geotechnischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Eigenschaften der Erzkörper, wobei bei der Untersuchung der Umweltfolgen Feld- und Labortests von Erzkörpern und Abraum immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Heute eingesetzte Prognosetools und -verfahren zur Charakterisierung des Nebengesteins sind in der Lage, Erkenntnisse über gesteinsinhärente AMD-Eigenschaften zu gewinnen, die potentiell Auswirkungen auf Erz- und Abraumförderleistung und -management während des Gewinnungsbetriebs, der Produktaufbereitung und der Bergwerksstilllegung haben. Dieser Tatsache zum Trotz weisen die heute verwendeten AMD-Prognosetools und -verfahren nicht nur ernstzunehmende Grenzen auf, sondern sind mit Unsicherheiten behaftet, die nur schwer quantifizierbar sind oder sie ermöglichen ausschließlich Vorhersagen, die nur einer bestmöglichen Schätzung dessen gleichkommen, was in der Zukunft geschehen wird. Die Zeit ist reif, unsere wissenschaftlichen Anstrengungen signifikant zu verbessern, um präzise beurteilen zu können, welche betrieblichen Herausforderungen, Umweltbelastungen und Bergbaufolgekosten auf allen Ebenen zu erwarten sind.

Dabei geht der Weg zu mehr Verlässlichkeit bei der Vorhersage von Erz- und Abraumeigenschaften nicht über noch komplexere Modelle. Unsere Fähigkeiten, Simulationsmodelle zu entwickeln, sind unserem Verständnis der komplexen mineralogischen, geochemischen und mikrobiologischen Prozesse, die zur Freisetzung von schädlichen Elementen führen, sowie unseren Fähigkeiten, Modelle mit realen Labor- und Felddaten abzugleichen, weit voraus.

4.2 Veränderung der Vorgehensweise der Bergbauindustrie bei der Prognose von AMD

Das Projekt „Environmental Indicators“ (EI – Umweltindikatorenprojekt) des Australian Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction (CRC ORE – Australisches kooperatives Forschungszentrum zur Optimierung der Rohstoffgewinnung) befasst sich mit der Entwicklung von genauen Tests, die aussagekräftige Informationen zu den Eigenschaften mineralischer Rohstoffe liefern, die potentiell Auswirkungen auf die Umweltleistung des Gewinnungsbetriebs haben.

Die Hauptforschungsthemen des EI-Teams umfassen Schlüsselprojekte im Bereich AMD-Prognose, Abraumklassifizierung, Staubcharakterisierung, Bioverfügbarkeitsprüfungen und Sensortechnologien. Zur Erleichterung der Forschungsarbeiten wur-

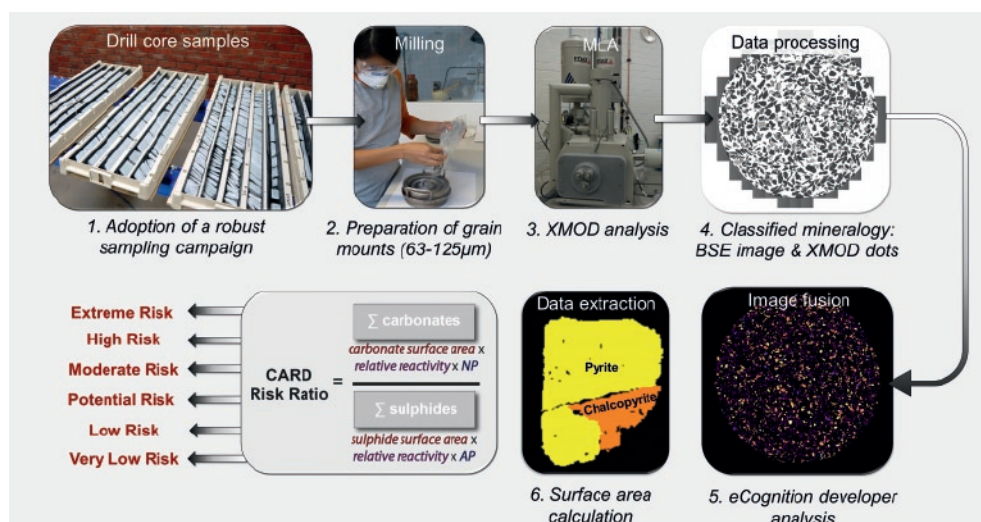


Fig. 4. CARD approach to assessing and domaining AMD risks.

Bild 4. Das CARD Verfahren zur Bewertung und Bestimmung von AMD-Risiken. Source/Quelle: Dr. A. Parbhakar-Fox

4.2 Transforming the mining industry's approach to AMD prediction

The Environmental Indicators (EI) project of the Australian Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction (CRC ORE) focusses on designing accurate tests that yield predictive information on the characteristics of mineral resources, which may potentially impact on the environmental performance of mining operations.

The EI team's research focus covers key research projects in the fields of AMD prediction, waste classification, dust characterisation, bioaccessibility testing, and sensor technologies. To facilitate the research in these areas, several major case study projects were completed that also encompassed the application of geo-metallurgical datasets for AMD prediction and the development of an appropriate AMD testing protocol for drill core materials. The testing protocol activities delivered field-based methodologies to enable AMD domaining to be performed onsite, thus allowing for waste placement decisions to be made rapidly, i.e., in under 48 hours (15).

Successes for the EI team to date have also included the development of new tests for use on mining operations. An extensive array of new environmental indicator tests, as well as validated existing predictive tools that are commonly used in waste classification and management have been developed. In particular, a large-scale validation study was undertaken to determine the best paste pH method to be performed on drill core materials, from which a standardised method of the American Society for Testing and Materials (ASTM) was identified as the most appropriate (16).

Moreover, the microwave assisted thermal energy (MATE) pH test has been developed and patented by the team. This test is a proxy for kinetic trials, which can cost more than A\$ 2,000 per sample for a 30 week test, and is advantageous as it is comparatively rapid, coming in around five days at the lower cost of less than A\$100 per sample.

Also, the EI team developed a new computed acid rock drainage (CARD) risk grade protocol. This test utilises automated mineralogy data in a unique manner, by which surface area data of

den mehrere umfangreiche Fallstudien durchgeführt, die auch die Nutzung geometallurgischer Datensätze für die AMD-Abschätzung sowie die Entwicklung eines geeigneten AMD-Testprotokolls für Kernbohrmaterialien umfassten. Die Erarbeitung von Testprotokollen führte zur Entwicklung von feldbasierten Verfahren, mit deren Hilfe eine AMD-Bestimmung in situ durchgeführt werden kann, so dass Entscheidungen zur Verwahrung von bergbaulichen Abfällen sehr zügig, d.h. in einem Zeitraum von unter 48 Stunden, getroffen werden können (15).

Ein weiterer Erfolg für das EI-Team ist die Entwicklung neuer Tests für den Einsatz am Gewinnungsstandort. Zu den Entwicklungen gehören ein umfangreiches Spektrum neuer Umweltindikatortests als auch validierte vorhandene Prognosetools, die häufig bei der Abraumklassifizierung und im Abraummanagement zum Einsatz kommen. Vor allem wurde eine umfangreiche Validierungsstudie durchgeführt, um das beste bei Kernbohrungsmaterialien einzusetzende Verfahren zur Paste-pH-Wertbestimmung festzulegen. Ergebnis der Studie ist, dass ein standardisiertes Verfahren der ASTM (American Society for Testing and Materials) die besten Resultate liefert (16). Darüber hinaus entwickelte und patentierte das Team ein mikrowellenunterstütztes, thermisches Verfahren (MATE pH) zur pH-Wert-Bestimmung. Dieser Test kann kinetische Versuche ersetzen, die mehr als 2.000 A\$ pro Probe für einen 30-wöchigen Test kosten. Der Vorteil des neuen Tests ist, dass er zum einen vergleichsweise schnell durchzuführen ist – in ungefähr fünf Tagen – und zum anderen weniger als 100 A\$ pro Probe kostet.

Eine weitere Entwicklung des EI-Teams stellt ein neues computergestütztes Verfahren zur Berechnung der AMD-Risikoeinstufung (CARD) dar. Dieser Test greift auf automatisierte Mineralogiedaten in einer einzigartigen Art und Weise zurück, so dass Oberflächen-daten von säurebildenden und neutralisierenden Mineralen sehr schnell berechnet und in die AMD-Risikoberechnungen einfließen können (Bild 4) (17).

Die Ergebnisse der durchgeführten Fallstudien und Forschungsarbeiten im Bereich Verfahrensentwicklung sind sowohl in mehreren CRC ORE Technical Reports veröffentlicht als auch durch Artikel in Fachmagazinen, Vorträgen und Präsentationen der Fachwelt vorgestellt worden. Die Themen reichen von einer kritischen

acid forming and neutralising minerals can be calculated quickly and used in AMD risk calculations (Figure 4) (17).

To date, the EI team have published the outcomes of their case study projects and method development research programs through a series of CRC ORE Technical Reports, as well as peer-reviewed journal articles and conference papers and presentations. These topics range from a review of environmental indicators used by the mining industry, to the development of new testing methodologies for waste, dust and water quality, and the use of sensors to achieve better waste characterisation and classification.

Finally, the EI team has been able to demonstrate that AMD risk assessments need to consider predictive geochemical test data but also mineralogical, textural and geometallurgical rock properties. Only a staged approach to AMD risk assessment and associated screening of different sample types allows cost-effective identification of AMD risks associated with specific rock types (18). Such a new architecture of integrative AMD testing should rely on quantitative measurements and integration of scientific tools and data, backed up by field instruments and state-of-the-art laboratories.

5 Conclusions

Today's mineral resource development requires total deposit knowledge. Total deposit knowledge is the solid understanding of all the pertinent characteristics of a mineral resource including its likely environmental impacts. Predictive characterisation of ores and wastes provides information on AMD risks that exist or may develop during the life of mine phases and after mine closure.

Accurate AMD prediction still represents a challenging concept because of the multifaceted mineralogical, geochemical and microbiological processes leading to AMD. Improvements in our predictive capabilities will come from the application of state-of-the-art characterisation tools and methodologies at individual exploration and mine sites. Research needs to continue on improving predictive static tests and methodologies. In particular, rapid and cost-effective screening tests need to be developed that can be conducted on site, consider or speed up weathering reactions, and address the well-known limitations of present static tests.

There is cause for optimism that the vital advancements are possible. Such optimism is based on the phenomenal improvements in our ability to observe and predict AMD processes using hand-held field instruments and state-of-the-art laboratories. However, focused efforts are necessary if we are to develop innovative AMD tests and risk assessment protocols that will lead to much improved environmental impact assessment, life-of-mine and mine closure plans.

Acknowledgements

The author would like to acknowledge the support of CRC ORE, established and supported by the Australian Government's Cooperative Research Centres Programme. Dr A Parbhakar-Fox (UTAS, Australia) is acknowledged for designing and preparing Figure 4.

Auseinandersetzung mit den von der Bergbauindustrie verwendeten Umweltindikatoren bis hin zur Entwicklung neuer Testverfahren für Abraum, Staub und Wasserqualität und dem Einsatz von Sensoren zur Erzielung besserer Abraumcharakterisierungen und -klassifizierungen.

Letztendlich konnte das EI-Team zeigen, dass eine AMD-Risikoeinschätzung unbedingt prädiktive geochemische Testdaten, aber auch mineralogische, gefügestrukturelle und geometallurgische Gesteinseigenschaften heranziehen muss. Nur ein schrittweises Herangehen an die AMD-Risikoabschätzung und damit einhergehende Untersuchungen unterschiedlicher Proben ermöglichen eine wirtschaftliche Identifikation von AMD-Risiken, die von bestimmten Deckgebirgsstrukturen ausgehen (18). Diese neue Architektur von integrativen AMD-Tests sollte quantitative Messungen und die Hinzuziehung von wissenschaftlichen Tools und Daten umfassen, und das alles gestützt durch Feldversuche und modernste Laboratorien.

5 Schlussfolgerungen

Heutzutage erfordert die Erschließung neuer Mineralvorkommen die exakte Kenntnis der Lagerstätte, d. h. ein fundiertes Verständnis aller wesentlichen Eigenschaften eines Rohstoffvorkommens, einschließlich der möglichen Umweltfolgen. Eine prädiktive Einschätzung von Erzen und Nebengestein liefert Informationen zu schon vorhandenen Entstehungsrisiken oder AMD-Entstehungsrisiken, die während der unterschiedlichen Betriebsphasen und nach Schließung des Bergwerks auftreten können.

Auf Grund der vielschichtigen mineralogischen, geochemischen und mikrobiologischen Prozesse, die zur Bildung von saurem Grubenwasser führen, ist eine akkurate AMD-Prognose immer noch eine große Herausforderung. Prognosefähigkeiten werden dann verbessert, wenn modernste Charakterisierungstools und -verfahren beim Einzelaufschluss und an den Standorten eingesetzt werden. Die Forschung muss weiterhin daran arbeiten, statische Prognosetests und -verfahren zu verbessern. Vor allem schnelle und kostengünstige Screeningtests müssen entwickelt werden, die am Standort durchgeführt werden können, Verwitterungsbedingungen berücksichtigen oder beschleunigen und die bekannten Grenzen der heutigen statischen Tests beseitigen.

Es gibt Anlass für Zuversicht, dass signifikante Fortschritte möglich sind. Diese Zuversicht basiert auf den enorm verbesserten Möglichkeiten, AMD-Prozesse zu beobachten und vorherzusagen und das mit Hilfe tragbarer Feldinstrumente und modernster Laboratorien. Fokussierte Anstrengungen sind jedoch erforderlich, wenn innovative AMD-Test- und Risikoeinschätzungsprotokolle entwickelt werden sollen, die in der Zukunft zu einer deutlich verbesserten Umweltverträglichkeitsabschätzung und zu verbesserten Betriebsdauer- und Schließungsplänen beitragen können.

Danksagungen

Der Autor dankt für die Unterstützung durch das CRC ORE, einem Projekt im Rahmen des von der australischen Regierung finanzierten Programms zur Einrichtung von kooperativen Forschungszentren. Sein Dank gilt ebenfalls Dr. A. Parbhakar-Fox (UTAS, Australien) für den Entwurf und die Erstellung des Bilds 4.

References / Quellenverzeichnis

- (1) International Network for Acid Prevention (INAP), www.inap.com.au, September 2015.
- (2) Tremblay, G.A., Hogan, C.M.: Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Manual 5.4.2d: Prevention and Control. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Natural Resources Canada, Ottawa, 2001.
- (3) Bloomberg, www.bloomberg.com/news/2014-04-10/south-africa-needs-1-billion-to-make-toxic-mine-water-potable.html, January 2015.
- (4) Karpenko, V., Norris, J.A.: Vitriol in the history of chemistry. *Chemicke Listy*, 96, pp. 997–1005, 2002.
- (5) Lottermoser, B. G.: Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 3rd edn., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- (6) Velasco, F., Herrero, J. M., Suarez, S., Yusta, I., Alvaro, A., Tornos, F.: Supergene features and evolution of gossans capping massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 53, pp. 181–203, 2013.
- (7) Salkield, L. U.: A Technical History of the Rio Tinto Mines: Some Notes on Exploitation from Pre-Phoenician Times to the 1950s. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1987.
- (8) Price, W. A.: Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND report 1.20.1, CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories, Smithers, 2009.
- (9) Williams, R. D., Diehl, S. F., Techniques for Predicting Metal Mining Influenced Water. Management Technologies for Metal Mining Influenced Water, Vol. 5, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, 2014.
- (10) White III, W. W., Lapakko, K. A., Cox, R. L.: Static test methods most commonly used to predict acid mine drainage: practical guidelines for use and interpretation. In: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits Part A: Processes, Techniques, and Health Issues, eds. G.S. Plumlee and M.J. Lodgson. Reviews of Economic Geology, Vol. 6A, Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 325–338, 1999.
- (11) Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide), www.gardguide.com, January 2015.
- (12) Dowd, P. J.: The business case for the prevention of acid drainage. In: Proceedings of the 5th Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage, eds. L.C. Bell and R.W. McLean. Australian Centre for Minerals Extension and Research, Kenmore, Australia, pp. 1–10, 2006.
- (13) Smart, R., Skinner, B., Levay, G., Gerson, A., Thomas, J., Sobieraj, H., Schumann, R., Weisener, C., Weber, P., Miller, S., Stewart, W.: ARD Test Handbook. AMIRA P387A Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage. AMIRA International, Melbourne, 2002.
- (14) Jennings, S. R., Neuman, D. R., Blicher, P. S.: Acid mine drainage and effects on fish health and ecology: A review. Reclamation Research Group Publication, Bozeman, MT, United States, 2008.
- (15) Parbhakar-Fox, A. K., Lottermoser, B. G.: Domaining acid rock drainage risks using geometallurgical data. Proceedings 8th Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage, Adelaide, South Australia, Eds. H. Miller and L. Preuss, JK Tech Pty Ltd: Brisbane, pp. 483–494, 2014.
- (16) Noble, T. N., Lottermoser, B. G., Parbhakar-Fox, A. K.: Limitations of acidity testing in acid mine drainage prediction. In: da Silva, E. F., Reis, A. P., Patinha, C., Pereira, E., Rodrigues, S. (eds), 9th International Symposium on Environmental Geochemistry, Aveiro, Portugal, p. 159, 2012.
- (17) Parbhakar-Fox, A. K., Lottermoser, B. G.: Prediction of acid rock drainage from automated mineralogy: the computed acid rock drainage (CARD) risk grade. 3rd International Symposium on Process Mineralogy, Cape Town, South Africa, 26 pp, 2014.
- (18) Parbhakar-Fox, A. K., Lottermoser, B. G., Bradshaw, D.: Cost-effective means for identifying Acid Rock Drainage risks – Integration of the Geochemistry-Mineralogy-Texture approach and geometallurgical techniques. In: 2nd AusIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane, pp. 143–154, 2013.

Author / Autor

Prof. Dr. Bernd Lottermoser,
Leiter des Institute of Mineral Resources Engineering,
Rheinisch Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen