

## Blue Mining Strategically Integrates Circular Economy

The mining industry faces a complex and pressing challenge driven by an increasing demand for raw materials and a socially demanding and globalized world. The extraction of primary raw materials has gained importance as one of the cornerstones of humanity's sustainable development, significantly because the necessary raw materials to evolve towards a sustainable future as copper, lithium, nickel and cobalt could be sourced by 2050 only in 10% by recycling. Therefore, the remaining needed 90% must

be sourced by primary extraction (1). Furthermore, raw material extraction is faced nowadays with higher environmental and safety standards and regulations. In addition to the industry's efforts toward responsible mining, these challenges offer the opportunity to enhance "blue mining" as a sustainable holistic approach that integrates the principles needed to plan sustainable, reliable and responsible mines for today's and future generations incorporating circular economy as one of its principles.

## Blue Mining setzt strategisch auf die Kreislaufwirtschaft

Die Bergbauindustrie steht vor einer komplexen und drängenden Herausforderung, angetrieben durch die steigende Nachfrage nach Rohstoffen in einer sozial anspruchsvollen und globalisierten Welt. Die Gewinnung von primären Rohstoffen hat an Bedeutung gewonnen und ist zu einem Eckpfeiler der nachhaltigen Entwicklung der Menschheit geworden, insbesondere weil die erforderlichen Rohstoffe für eine nachhaltige Zukunft wie Kupfer, Lithium, Nickel und Kobalt bis 2050 nur zu 10% durch Recycling gewonnen werden können. Daher müssen die verbleibenden benötigten 90% durch die primäre Gewinnung beschafft werden (1). Darüber

hinaus sieht sich die Rohstoffgewinnung heutzutage mit strengeren Umwelt- und Sicherheitsstandards und -vorschriften konfrontiert. Ergänzend zu den Bemühungen der Industrie um einen verantwortungsvollen Bergbau bieten diese Herausforderungen die Möglichkeit, „Blue Mining“ als nachhaltigen, holistischen Ansatz zu fördern, der die Grundsätze für die Planung eines nachhaltigen, zuverlässigen und verantwortungsvollen Bergwerks für heutige und künftige Generationen berücksichtigt und die Kreislaufwirtschaft als einen der Grundsätze mit einbezieht.

### 1 Motivation

Various factors, including environmental impact, resource scarcity, social responsibility, and economic uncertainty, shape the contemporary landscape of the mining industry. The production of minerals necessary to meet the demand from clean energy technologies is estimated to increase by 500% in 2050 for critical minerals such as graphite, lithium and cobalt (2, 31). Easily accessible, high-grade ore deposits tend to be depleted, forcing mining companies to develop into deeper and more complex deposits. This has mostly affected the evolution of resources into reserves, influenced as well by a shift on investors value systems towards more sustainable practices, fluctuations in commodity prices and geopolitical uncertainties. Alternatives to develop novel approaches to solve this issue are currently under development such as Modular Mining Systems for scalable and adaptable mining projects (3). This concept is based on modular architecture for designing modern mines and centers on a future full electric, zero-entry, low-emissions, scalable and adaptable mine. Many mining companies have taken important steps to become more sustainable, implementing measures like progressive closure strategies, rehabilitation programs and developed renewable energy projects.

### 1 Motivation

Verschiedene Faktoren wie Umweltbelastung, Ressourcenknappheit, soziale Verantwortung und wirtschaftliche Unsicherheit prägen die heutige Landschaft der Bergbauindustrie. Die Produktion von Mineralien, die für den Bedarf an erneuerbaren Energietechnologien erforderlich sind, wird bis 2050 um 500% steigen, insbesondere bei kritischen Mineralien wie Graphit, Lithium und Kobalt (2, 31). Leicht zugängliche, hochgradige Lagerstätten sind oft erschöpft, sodass Bergbauunternehmen gezwungen sind, tiefere und komplexere Lagerstätten zu erschließen. Dies hat sich vor allem auf die Entwicklung der Ressourcen zu Reserven ausgewirkt. Hinzu kommen eine Verschiebung der Wertesysteme der Investoren hin zu nachhaltigeren Praktiken, Schwankungen der Rohstoffpreise und geopolitische Unsicherheiten. Es werden derzeit alternative Ansätze zur Lösung dieses Problems entwickelt, wie beispielsweise das Konzept Modular Mining Systems für skalierbare und anpassbare Bergbauprojekte (3). Dieses basiert auf modularen Architekturen für die Planung moderner Bergwerke und konzentriert sich auf künftige elektrische, automatisierte, emissionsarme, skalierbare und anpassungsfähige Bergwerke. Viele Bergbauunternehmen haben zudem wichtige Schritte unternom-

This is enhanced by a stricter regulatory framework and ESG policies. In the European Union (EU), regulations such as the Critical Raw Materials Act and the Net Zero Industry Act promote mining. These see mining as important for the energy transition and promote more sustainable ways of working in the industry (4, 5). Embedded in social memory however are particularly negative environmental impacts, such as landscape sprawl, depletion of local water resources, water pollution and emission of greenhouse gases. Despite the efforts, the public image has not yet changed. In order to change this perception, the industry must do a better job of communicating their sustainable practices and the steps they are taking towards a more responsible and sustainable future, advocating for transparency and fostering trust.

Disruptive technologies and new developments such as digitalization, automation and electrification drive the digital transformation (DT) in mining. Nonetheless, their implementation can result in an increase in capital expenditure which limits their propagation to the overall industry. Strategies to democratize the DT such as retrofitting for autonomous operation of machinery and agnostic systems for mine digitalization are currently under development. Furthermore, implementing new technologies can be a daunting task for any company. This is where change management (CM) comes when implementing disruptive technologies. It involves preparing an organization for changes, identifying potential resistance to change and effective communication. It helps to ensure that the implementation is successful and the benefits of the new technology are maximized. Without CM, the implementation of new technologies can be chaotic and problematic, causing more harm than good. Moreover, the DT requires mining engineers, electrical, mechatronics, software and affine required disciplines with a deeper understanding of information systems. Skills that could be supplied by a younger workforce born in this digital era. Unfortunately, the industry faces the enormous challenge of attracting a younger generation that is not interested in raw materials extraction. The need for action is hereby intensified by an aging active workforce on the way to retirement and the forecast of a rising demand for critical minerals.

In this challenging environment, the further development of the concept of blue mining offers a promising solution. This requires a fundamental shift from the traditional linear economy approach to a sustainable, circular economy strategy. For the mining industry, this means the introduction of innovative technologies, the increased recovery of materials from waste and the consistent questioning and application of circular principles along the entire life cycle of a mine. This transition will not only help reduce environmental impacts, but also improve the economic stability and social acceptance of the mining industry.

## **2 Blue mining in the context of the circular economy**

Blue mining is a concept developed by the Institute of Mining of Clausthal University of Technology (CUT), Clausthal-Zellerfeld/Germany, presented at the 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry, in 2013 to reshape sustainability practices in mining. The term "blue mining" was inspired by the definition of the blue footprint and comes, from the German, "Blaupause" which stands for responsible mining in which sustainability is incorporated from the very first planning phase.

men, um nachhaltiger zu werden und Maßnahmen wie proaktive Schließungsstrategien, Wiederherstellungsprogramme und die Entwicklung von Projekten zum Einsatz erneuerbarer Energien zu implementieren. Dies wird durch einen strengeren Regulierungsrahmen und eine ESG-Politik verstärkt. In der Europäischen Union (EU) unterstützen Gesetze wie der Critical Raw Materials Act und der Net Zero Industry Act den Bergbau. Sie sehen ihn als wichtig für die Energiewende und fördern nachhaltigere Arbeitsweisen in der Branche (4, 5). Im gesellschaftlichen Gedächtnis verankert sind besonders negative Umweltauswirkungen wie Landschaftszersiedlung, Verknappung der lokalen Wasserressourcen, Wasserverschmutzung und der Ausstoß von Treibhausgasen. Trotz dieser Bemühungen hat sich das Bild der Öffentlichkeit noch nicht verändert. Um diese Wahrnehmung zu ändern, muss die Branche sich bemühen, ihre nachhaltigen Vorgehensweisen und die Schritte, die sie auf dem Weg zu einer verantwortungsvolleren und nachhaltigeren Zukunft unternimmt, besser zu kommunizieren, sich für Transparenz einzusetzen und Vertrauen zu schaffen.

Disruptive Technologien und neue Entwicklungen wie die Digitalisierung, Automatisierung und Elektrifizierung treiben die digitale Transformation (DT) im Bergbau voran. Dennoch kann deren Implementierung zu höheren Kapitalausgaben führen, was ihre Verbreitung in der Gesamtbranche begrenzt. Um die DT im Bergbau zu demokratisieren, werden derzeit Strategien entwickelt, wie z. B. die Nachrüstung für den autonomen Betrieb von Maschinen und agnostische Systeme für die Digitalisierung des Bergbaus. Darüber hinaus kann die Implementierung neuer Technologien für jedes Unternehmen eine gewaltige Aufgabe darstellen. Bei der Einführung disruptiver Technologien kommt das Veränderungsmanagement (VM) ins Spiel. Es umfasst die Vorbereitung eines Unternehmens auf Veränderungen, potentielle Widerstände und die Einführung einer effektiven Kommunikation. Dies hilft sicherzustellen, dass die Implementierung erfolgreich ist und die Vorteile der neuen Technologie maximiert werden. Ohne ein VM kann die Einführung neuer Technologien chaotisch und problematisch verlaufen und mehr Schaden als Nutzen anrichten. Außerdem, die DT erfordert Bergbauingenieure, Elektro-, Mechatronik-, Software- und affine verwandte Disziplinen mit einem tieferen Verständnis von Informationssystemen. Fähigkeiten, die von den jüngeren Arbeitskräften des digitalen Zeitalters bereitgestellt werden können. Leider steht die Branche vor der enormen Herausforderung, diese jüngere Generation, die sich kaum für die Gewinnung von Rohstoffen interessiert, anzuziehen. Der Handlungsbedarf wird durch eine alternde aktive Belegschaft auf dem Weg in den Ruhestand und die Prognose steigender Nachfrage nach kritischen Mineralien verstärkt.

In dieser herausfordernden Umgebung stellt die weitere Entwicklung des Konzepts des Blue Mining in die Bergbauindustrie einen vielversprechenden Ansatz dar. Dies impliziert einen Wandel von einer linearen zu einer nachhaltig orientierten Wirtschaftsweise. Für die Bergbauindustrie bedeutet dies die Einführung innovativer Technologien, die verstärkte Rückgewinnung von Materialien aus Abfällen und das konsequente Hinterfragen und Anwenden von Kreislaufprinzipien entlang des gesamten Lebenszyklus eines Bergwerks. Ein solcher Wandel kann nicht nur die ökologischen Auswirkungen mindern, sondern auch zur wirtschaftlichen Resilienz und gesteigerten gesellschaftlichen Zustimmung für den Bergbau beitragen.

In general, blue mining describes mines that are sustainable, energy-efficient and ergonomic as an operation that

- operates in an energy-efficient and ergonomic manner;
- pursues full automation; and
- support sustainability by promoting the continuous use of mine sites during and after extraction.

Integrating these principles into the early stages of mining existence requires a fundamental redesign of mine planning towards an integrative mine planning approach. The idea of multi-use mines is also consistent with the central goal of the circular economy to use energy but also further resources and products repetitive times throughout their life cycle. Converting mines into multifunctional facilities during and after the production phase helps to promote resource efficiency and thus supports the core objective of circularity. Furthermore, this term includes the subsequent use beyond extraction, namely, in the case of optimization of energy use, as a possible energy supplier. Hereby, the operation could return the energy used during the extraction phase even after the extractive life span of the mine has been reached. The integration of this concept must therefore be considered for mine planning over the entire life of a mine or deposit (6 to 15). This concept is supported by three stages. In the first stage, different opportunities considering the aspects of blue mining are identified and evaluated according to the project inherent situation. Then, synergies and conflicts of the interaction of the selected opportunity are identified. Finally, in the third stage, the detailed plan for integration is developed and assessed maximizing synergies and minimizing the conflicts that might occur (6 to 16).

The Department of Underground Mining Methods and Machinery at CUT has been involved in several research projects since more than ten years ago, integrating the concept as an alternative for planning post-mining strategies. Since 2011, different approaches have been researched regarding using abandoned mines in Germany (7 to 15, 32). These include the Energy and Water Storage Harz (EWAZ) and Water Storage Harz 2050 (WSH2050) projects. In EWAZ, alternatives for the after-use of underground and surface mines have been evaluated for water-stress regions, including an integrative approach using the forecast of flooding and drought periods in the affected region. The WSH2050 project focused on water quality development using a hydro-analytical water management tool to identify potential uses of mining infrastructure to support water management in the Upper Harz Mountains (17). Integrating mine infrastructure for energy and water storage and using alternative energy sources in the blue mining approach illustrates how resource efficiency can be promoted in mining, which is a central concern of the circular economy.

The concept of the circular economy revolves around a sustainable model of production and consumption. It promotes the sharing, leasing, repairing, refurbishing and recycling of existing materials and products, with the aim of extending the life cycle of these items as much as possible. By doing so, the amount of waste generated is significantly reduced creating further value (19). CUT has involved in this endeavor by adopting circular economy as guiding principle for research, teaching and technology transfer developing a holistic circular economy framework (Figure 1). While mining is not the first industry that

## 2 Blue Mining im Kontext der Kreislaufwirtschaft

Blue Mining ist ein vom Institut für Bergbau der Technischen Universität Clausthal (TUC), Clausthal-Zellerfeld, entwickeltes Konzept, das auf der 6. Internationalen Konferenz zur nachhaltigen Entwicklung in der Bergbauindustrie 2013 vorgestellt wurde, um die Nachhaltigkeit im Bergbau neu zu gestalten. Der Begriff „Blue Mining“ wurde von der Definition des „blauen Fußabdrucks“ inspiriert und kommt vom deutschen Wort Blaupause, was für den verantwortungsvollen Bergbau steht, der Nachhaltigkeit bereits ab der ersten Planungsphase repräsentiert.

Im Allgemeinen beschreibt Blue Mining Bergwerke, die nachhaltig, energieeffizient und ergonomisch sind, als Betriebe, die

- energieeffizient und ergonomisch arbeiten,
- eine vollständige Automatisierung anstreben und
- die Nachhaltigkeit durch die Förderung der kontinuierlichen Nutzung von Bergwerksanlagen während und nach dem Abbau unterstützen.

Die Integration dieser Prinzipien in die frühen Phasen der Bergbauexistenz erfordert eine grundlegende Umgestaltung der Bergbauplanung hin zu einem integrativen Bergbauplanungsansatz. Die Idee der Bergwerke mit Mehrfachnutzung steht im Einklang mit dem zentralen Ziel der Kreislaufwirtschaft, Energie, aber auch weitere Ressourcen und Produkte während ihres Lebenszyklus mehrfach zu nutzen. Die Umwandlung von Bergwerken in multifunktionale Einrichtungen während und nach der Produktionsphase trägt zur Förderung der Ressourceneffizienz bei und unterstützt damit das Kernziel der Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus schließt dieser Begriff die Nachnutzung über den Abbau hinaus ein, nämlich im Fall der Optimierung des Energieverbrauchs als möglicher Energielieferant. So könnte der Betrieb die in der Abbauphase eingesetzte Energie auch nach dem Abbauende wieder zur Verfügung stellen. Die Integration dieses Konzepts muss daher bei der Bergbauplanung über die gesamte Lebensdauer eines Bergwerks oder einer Lagerstätte berücksichtigt werden (6 bis 15). Blue Mining wird durch drei Stufen unterstützt. In der ersten Phase werden verschiedene Möglichkeiten unter Berücksichtigung der Aspekte des Blue Mining identifiziert und entsprechend der projektspezifischen Situation bewertet. Anschließend werden Synergien und Konflikte im Zusammenspiel mit den ausgewählten Möglichkeiten ermittelt. Schließlich wird in der dritten Phase ein detaillierter Plan für die Integration entwickelt und bewertet, um die Synergien zu maximieren und die möglicherweise auftretenden Konflikte zu minimieren (6 bis 16).

Die Abteilung für Maschinelle Betriebsmittel und Verfahren im Bergbau unter Tage der TUC ist seit über zehn Jahren in mehreren Forschungsprojekten involviert, bei denen das Konzept als Alternative zur Planung von Nachbergbau-Strategien angewendet wird. Seit 2011 wurden unterschiedliche Ansätze zur Nachnutzung stillgelegter Bergwerke in Deutschland erforscht (7 bis 15, 32). Zu diesen gehören das Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ)- und Wasserspeicher Harz 2050 (WSH2050)-Projekt. Im Rahmen des EWAZ-Projekts wurden Alternativen für die Nachnutzung von Bergwerken und Tagebauen für Wasserstressgebiete untersucht, einschließlich eines integrativen Ansatzes zur Vorhersage von Hochwasser- und Dürreperioden in der betroffenen Region. Das Projekt WSH2050 konzentrierte sich auf die Entwicklung der Wasserqualität mit Hilfe





Fig. 1. Circular Economy framework (18).  
Bild 1. Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft (18).

comes to mind when thinking about the circular economy, it is not entirely foreign to the concept. Moreover, as discussed in the Responsible Mining Leadership Forum 2023 held in England by the International Council on Mining and Metals (ICMM), the processes that currently take part in mining have not been built to support a circular economy. In fact, mining can play a role in it by extracting, reusing and re-purposing valuable raw materials from waste and discarded products. According to the framework of circular economy, redesigning products and processes stand for a key component when pursuing circularity. Considering the challenges, the mining industry is facing, disruptive technologies, developments and concepts, are changing completely the current way we plan, conduct and develop mining. To achieve this, new concepts are integrated into strategic mine planning having clear goals and objectives from the “blue print” of a mine leading to a maximization of resources beyond the mere life of the extractive mine (Figure 2).

Therefore, the advanced blue mining concept has implemented two changes: one is the addition of two more sustainability principles, water and circularity, to the previous energy and ergonomics aspects. Additionally, the early implementation of all aspects was complemented by integrative mine planning. The last is based on optimizing processes to minimize the resources that enter the mine and reduce the resulting outputs for every element part of mine planning. This way, advanced blue mining integrates and enhances circularity and sustainability setting a framework for the operation of sustainable mines that can increase and improve the image of mining as a sustainable and responsible extractive industry.

eines hydroanalytischen Wassermanagement-Tools zur Erkennung von Nutzungspotentialen der bergbaulichen Infrastruktur zur Unterstützung des Wassermanagements im Oberharz (17). Die Integration von bergmännischer Infrastruktur für die Energiespeicherung und Wasserversorgung sowie die Einbeziehung erneuerbarer Energiequellen im Rahmen des Blue Mining-Konzepts zeigt, wie die Ressourceneffizienz im Bergbau gefördert werden kann und stellt ein zentrales Anliegen der Kreislaufwirtschaft dar.

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft dreht sich um ein nachhaltiges Produktions- und Konsummodell. Es fördert das Teilen, Leasen, Reparieren, Aufbereiten und Recyceln vorhandener Materialien und Produkte mit dem Ziel, die Produkte so lange wie möglich im Wertstoffkreislauf zu erhalten. Dadurch werden die Mengen an erzeugtem Abfall erheblich reduziert und weitere Werte geschaffen (19). Die TUC hat sich diesem Vorhaben angeschlossen, indem sie die Kreislaufwirtschaft als Leitprinzip für Forschung, Lehre und Technologietransfer übernommen und einen holistischen Rahmen für die Kreislaufwirtschaft entwickelt hat (Bild 1). Bergbau ist gesellschaftlich zwar nicht der erste Industriezweig, der mit der Kreislaufwirtschaft assoziiert wird, dennoch ist dieses Konzept der Branche nicht fremd. Jedoch wurde auf dem Responsible Mining Leadership Forum 2023 des International Council on Mining and Metals (ICMM) in England festgestellt, dass die derzeitigen Bergbauprozesse nicht darauf ausgerichtet sind, die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Dabei bietet der Bergbau das Potential, wertvolle Rohstoffe aus Abfällen und ausrangierten Produkten zu gewinnen, wiederzuverwenden und neu einzusetzen. Entsprechend dem Rahmen der Kreislaufwirtschaft stellt die Neugestaltung von Produkten und Prozessen eine Schlüsselkomponente bei der Umsetzung der Zirkularität dar. In Anbetracht der Herausforderungen, mit denen die Bergbauindustrie konfrontiert ist, verändern disruptive Technologien, Entwicklungen und Konzepte die aktuelle Vorgehensweise bei der Planung, Durchführung und Entwicklung von Bergbauprojekten grundlegend. Um dies zu erreichen, werden innovative Konzepte in die strategische Bergbauplanung integriert, um klare Ziele bereits von der „Blaupause“ eines Bergwerks zu definieren, die zur Maximierung von Ressourcen über die reine Lebensdauer des Bergwerks hinausgehen (Bild 2).

Daher hat das erweiterte Blue Mining-Konzept zwei Änderungen umgesetzt: Hinzugefügt zu den zuvor behandelten Aspekten Energie und Ergonomie wurden zwei weitere Nachhaltigkeitsprinzipien:



Fig. 2. Aspects of the advanced blue mining concept, modified after (7).  
Bild 2. Aspekte des erweiterten Blue Mining-Konzepts, modifiziert nach (7).

### 3 New aspects of blue mining

Experiences gathered in the integration of blue mining in research projects at CUT proved the relevance of integrative mine planning for the implementation of the concept. Planning is a vital aspect of mining operations and it involves a range of procedures and processes that must be adequately integrated to ensure a project's success. From exploration and resource assessment to production scheduling, every stage of the mining process must be planned and executed with precision and accuracy. By integrating all the aspects involved in blue mining into integrative mine planning, mining companies can achieve better outcomes in terms of safety, efficiency, profitability and sustainability. By introducing water management optimization in early stages i.e., the most profitable areas for water use and optimization can be identified (see Chapter 3.2). Similarly, integrating circularity and circular economy principles since early stages can help mining companies optimize production and minimize the impact on the environment.

#### 3.1 Integrative mine planning and circularity

Integrative mine planning entails all planning stages of traditional mine planning. It integrates circular economy and blue mining based on the principle of reducing inputs and minimizing outputs

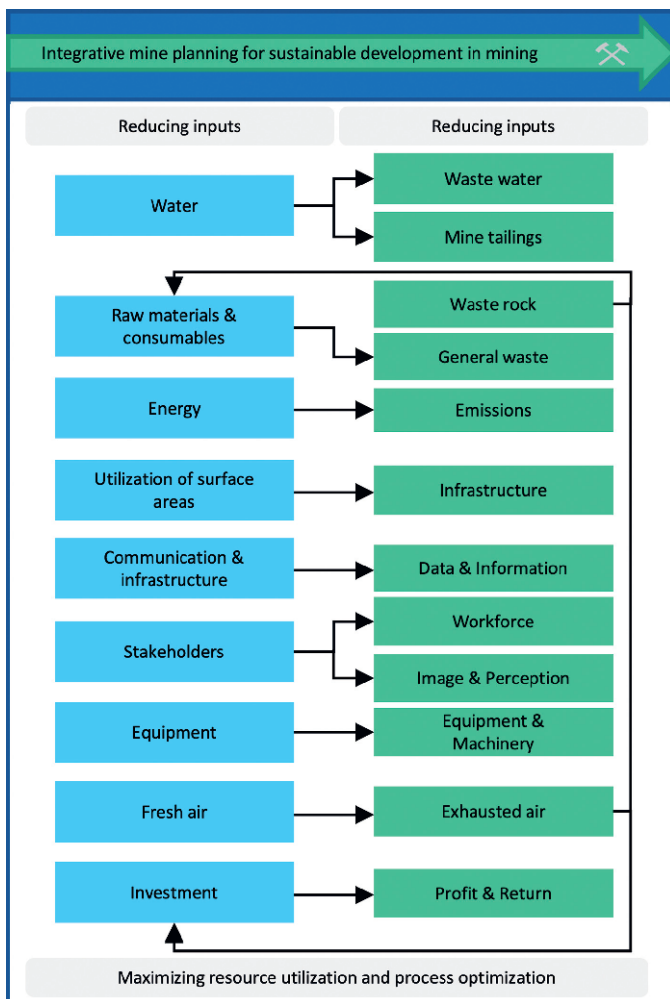


Fig. 3. Inputs, outputs, interrelations and principles of integrative mine planning. // Bild 3. Inputs, Outputs, Zusammenhänge und Prinzipien der integrativen Bergbauplanung. Source/Quelle: TUC

Wasser und Zirkularität. Außerdem wurde die frühzeitige Umsetzung aller Aspekte durch eine integrierte Bergbauplanung ergänzt. Letzteres basiert auf der Optimierung von Prozessen mit dem Ziel, die Ressourcen, die in das Bergwerk gelangen, zu minimieren und die daraus resultierenden Emissionen für jedes Element der Bergbauplanung zu reduzieren. Mit dieser Umsetzung integriert und verbessert „Advanced Blue Mining“ die Kreislaufwirtschaft und die Nachhaltigkeit und schafft einen Rahmen für den Betrieb nachhaltiger Bergwerke, um das Erscheinungsbild des Bergbaus als nachhaltige und verantwortungsvolle extraktive Industrie zu verbessern.

#### 3 Neue Aspekte des Blue Mining

Die Erfahrungen, die bei der Integration des Blue Mining-Konzepts in Forschungsprojekte an der TUC gesammelt wurden, haben die Relevanz der integrierten Bergbauplanung für die Umsetzung des Konzepts bestätigt. Von der Erkundung und Ressourcenabschätzung bis zur Produktionsplanung muss jeder Schritt des Bergbauprozesses sorgfältig und präzise geplant und umgesetzt werden. Durch die Integration aller im Blue Mining-Konzept angewandten Prinzipien in die integrierte Bergbauplanung können Bergbauunternehmen bessere Ergebnisse in Bezug auf Sicherheit, Effizienz, Rentabilität und Nachhaltigkeit erzielen. Durch die frühzeitige Einführung eines optimierten Wassermanagements können beispielsweise die rentabelsten Gebiete für die Wassernutzung und -optimierung ermittelt werden (vgl. Kapitel 3.2). Ebenso kann die frühzeitige Einbeziehung der Grundsätze der Kreislaufwirtschaft und der Zirkularität Bergbauunternehmen helfen, die Produktion zu optimieren und die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren.

#### 3.1 Integrative Bergbauplanung und Zirkularität

Die integrative Bergbauplanung umfasst alle Planungsphasen der traditionellen Bergbauplanung. Darüber hinaus werden die Kreislaufwirtschaft und Blue Mining integriert, die auf dem Prinzip der Reduzierung von Inputs und der Minimierung von Outputs in der gesamten Wertschöpfungskette eines Bergbauprojekts beruhen. Integrative Planung steht somit für die Optimierung der Nutzung von Ressourcen und Prozessen als entscheidendem Schritt zur Erzielung besserer nachhaltiger Ergebnisse und zur Steigerung der Gesamteffizienz. Integrative Bergbauplanung bietet einen klaren Überblick über die verschiedenen im Betrieb benötigten Ressourcen und einen kontrollierten Überblick über die erzeugten Outputs (Bild 3).

Unter Berücksichtigung der Auswirkungen aller Elemente und Prozesse können Planer Möglichkeiten und Formen zur Optimierung ihrer Verwendung im Bergbau identifizieren. Daher werden in Bild 3 die Verbindungen, die durch Kreislaufwirtschaft erreicht werden, skizziert. Im Folgenden werden ausgewählte Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft vorgestellt, wobei das bei der Gewinnung entstehende Fördergut als Produkt hier nicht berücksichtigt wurde, da seine Gewinnung maximiert werden soll. Wenn man beispielsweise den Abraum betrachtet, so kann das verworfene Material in den Bau von Anlagen oder als Straßenbaumaterial innerhalb und außerhalb des Bergwerksgeländes integriert werden. Wo möglich, können Kooperationen mit nahegelegenen Steinbrüchen für die Aufbereitung und Siebung genutzt werden, um die Kosten für den Vortrieb zu senken und eine neue Quelle für nachhaltige Baumaterialien zu schaffen (20). Bei Energie als Input interagieren verschiedene Energiequellen innerhalb eines Bergbaubetriebs und

throughout the complete mining value chain. Integrative planning stands for the optimization of the use of resources and processes as a crucial step in achieving better sustainable results and improving overall efficiency. Integrative mine planning provides a clear view of the different resources required in the mining operation and provides a controlled overview on the generated outputs (Figure 3).

Considering the impacts of all elements and processes, planners can identify opportunities and forms to optimize their usage in mining. Therefore, figure 3 delineates the interconnections reached with circularity. In the following, selected circularity opportunities are introduced, however the mined material resulting of the extraction, as a product, has not been included here since its recovery is to be maximized. Considering waste rock as an example, discarded material can be used in the construction of facilities or as road construction material within and outside the mine site. Whenever is possible, alliances can be established to nearby quarries for processing and screening, to reduce costs for development drifts and to establish a new source of sustainable construction materials (20). For energy as an input, different sources of energy interact within one mining operation and can be composed by a mix of fossil fuels, compressed air and electricity. Depending on the type of operation, one type of energy source will have a higher demand than the others. Traditional and ongoing operations can have a higher demand on fossil fuels meanwhile modern operations, on the other hand, will have a higher demand of electricity. Either way, scope 1 and 2 emissions are generated. To better manage the generated emissions, different strategies can be implemented for reduction ranging from technological changes towards electrification and automation, to optimization of processes based on ventilation on demand (VoD) to reduce energy consumption since VoD can result in possible annual energy savings of up to 50 % (21). In the case of scope 2 emissions, some mining operations as Olympic Dam mine of BHP in Australia, have opted to source electricity from renewable sources going off-grid. This has resulted in lower costs, independence from the electrical network, elimination of blackout risk for remote operations and drastic emission reductions. Off-grid mines powered by renewable sources can drive down energy costs by up to 25 % in existing operations and 50 % in the case of new mines (22).

Moreover, in the field of energy generation, special attention must be set on blue mining, integrative planning, circularity and post-mining. The evolution of off-grid operations can have a positive impact not only during the mining operation but also after extraction has ceased. Hereby, after-use of mining facilities and infrastructure can be planned since early stages to support regional development for the post-mining era. Research at CUT has identified that one of the limiting factors when re-purposing abandoned or closed mines is the high capital cost required to rehabilitate and adapt the available infrastructure for the after-use. Integrative mine planning of post-mining strategies can create secondary profitable opportunities for mining operations since the necessary additional infrastructure can be developed along the mine life using fewer resources and reducing costs for the closure phase. The alternatives evaluated in the EWAZ project are a clear example of the opportunities of integrative mine planning and the potential of blue mining for regional development

können sich aus einer Mischung von fossilen Brennstoffen, Druckluft und Elektrizität zusammensetzen. Je nach Art des Betriebs hat eine Art von Energiequelle einen höheren Bedarf als die anderen. Traditionelle und laufende Betriebe können eine höhere Nachfrage nach fossilen Brennstoffen haben, während moderne Betriebe hingegen einen höheren Bedarf an Elektrizität haben werden. In beiden Fällen entstehen Scope 1- und Scope 2-Emissionen. Um die erzeugten Emissionen besser zu steuern, können verschiedene Strategien zur Reduzierung eingesetzt werden, die von technologischen Veränderungen in Richtung Elektrifizierung und Automatisierung bis hin zur Optimierung von Prozessen auf der Grundlage von Ventilation on Demand (VoD) zur Reduzierung des Energieverbrauchs reichen, da VoD zu einer jährlichen Energieeinsparung von bis zu 50 % führen kann (21). Im Fall der Scope 2-Emissionen haben einige Bergbaubetriebe wie das Olympic Dam Bergwerk von BHP in Australien sich dafür entschieden, Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu beziehen und netzunabhängig zu arbeiten. Dies hat zu einer Senkung der Kosten, zur Unabhängigkeit vom Stromnetz, zur Beseitigung des Stromausfallrisikos bei abgelegenen Betrieben und zu einer drastischen Verringerung der Emissionen geführt. Netzunabhängige Bergwerke, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden, können die Energiekosten bei bestehenden Betrieben um bis zu 25 % und bei neuen Bergwerken um 50 % senken (22).

Darüber hinaus ist im Bereich der Energieerzeugung ein besonderes Augenmerk auf Blue Mining, integrative Planung, Kreislaufwirtschaft und Nachbergbau zu legen. Die Entwicklung von Off-Grid-Betrieben kann nicht nur während des Bergbaubetriebs, sondern auch nach Abschluss des Abbaus eine positive Auswirkung haben. Hierbei kann die Nachnutzung der Infrastruktur bereits in den frühen Planungsstadien für die Unterstützung der regionalen Entwicklung in der Nachbergbau-Ära geplant werden. Forschungen an der TUC haben ergeben, dass einer der limitierenden Faktoren bei der Wiederverwendung stillgelegter oder geschlossener Bergwerke die hohen Kapitalkosten sind, die für die Sanierung und Anpassung der vorhandenen Infrastruktur für die Nachnutzung erforderlich sind. Die integrative Planung von Nachnutzungsstrategien kann sekundäre wirtschaftliche Möglichkeiten für Bergbaubetriebe schaffen, da die erforderliche zusätzliche Infrastruktur während der Lebensdauer des Bergwerks mit weniger Ressourcen aufgebaut werden kann und die Kosten für die Stilllegungsphase reduziert werden. Die im Rahmen des EWAZ-Projekts bewerteten Alternativen sind ein deutliches Beispiel für die Chancen der integrativen Bergbauplanung und das Potential des Blue Mining für die regionale Entwicklung, indem eine zirkuläre Alternative für das regionale Energiemanagement geboten wird. Derzeit ist die Verknüpfung von Bergbauanlagen und erneuerbarer Energieerzeugung Gegenstand der Forschung in Deutschland, Österreich, Australien, Schweden, den Niederlanden, den USA, Südafrika und Italien (23, 24, 25, 26).

Eine innovative Alternative zur Reduzierung von Scope 1-Emissionen ist die wirtschaftliche Abscheidung von Dieselpartikeln und die Kohlenstoffabscheidung aus Methan im Tagebau, unterirdischen und stillgelegten Bergwerken. Methan wird häufig mit dem Kohlebergbau assoziiert, kann aber auch in Salz-, Kali-, Trona-, Diamanten-, Gold-, Basismetall- und Bleibergwerken auf der ganzen Welt während des Betriebs vorkommen und bleibt als latentes Ri-



providing a circular alternative for regional energy management. Currently, the interconnection of mining facilities and renewable energy generation has been researched in Germany, Austria, Australia, Sweden, Netherlands, the USA, South Africa and Italy (23, 24, 25, 26).

Furthermore, an innovative alternative for scope 1 emissions reduction is the economic capture of diesel particles and carbon capture from methane in underground, surface and abandoned mines. The last is often associated to coal mining but can also be found in salt, potash, trona, diamond, gold, base metals and lead mines worldwide during mine operation and remain present as a latent risk in post-mining stages. In the case of ventilation air methane (VAM), two emerging technologies that enable carbon capture are regenerative thermal oxidation (RTO) and catalytic thermal oxidation (CTO). Another significant development is an initiative from Rockburst Technologies, an Australian start up, with their patent-pending Transcritical CO<sub>2</sub> Pulverization (tCO<sub>2</sub>) technology where carbon dioxide is used for rock breaking in comminution reaching estimated energy saving levels of up to 55 % when compared to traditional methods (27). Moreover, the early integration of carbon capture and emission reduction policies in relation to carbon credits stand therefore as a profitable opportunity for methane extraction in mining operations (28). In the case of general consumables and spare parts management, circular initiatives have started by only introducing products in the mining environment that can be reused, refurbished, transformed or recycled to reduce the carbon footprint of the mine.

For a better overview on the possibilities of circularity in mining, table 1 includes the elements part of integrative mine planning and showcases them as inputs, outputs and proposes linked circularity opportunities.

### 3.2 Integrated Water Management in the framework of Blue Mining

The change in climate influences the global water cycle, so that by the year 2070, a total of 44 million Europeans will be affected by water scarcity. It is expected that the increasing water demand from various industries, including mining, will lead to more conflicts over water usage. To obtain a “social license to operate” and ensure long-term profitability, the mining industry must prioritize sustainable and circular water management (29). The concept of “Integrated Water Management” (IWM) has therefore evolved in the mining industry and other water-intensive sectors in recent decades to emphasize the need for comprehensive, sustainable and efficient use of water resources. This concept of sustainable and circular water management is also at the core of the Blue Mining Initiative.

IWM in mining represents a comprehensive approach to sustainably and responsibly utilize water resources throughout the entire life cycle of mining. This involves careful planning, accurate assessment, sustainable preservation, professional treatment and continuous monitoring of water usage. The primary goal of this approach is to minimize the impacts of mining operations on local water resources, protect water quality and ensure sustainable water management practices to reduce the operation’s water footprint without compromising production. Core elements of integrated water management include:

siko in der Nachbergbauphase bestehen. Im Fall von Abluftmethan gibt es zwei neue Technologien, die eine Kohlenstoffabscheidung ermöglichen: die regenerative thermische Oxidation (RTO) und die katalytische thermische Oxidation (CTO). Eine weitere bedeutende Entwicklung ist eine Initiative von Rockburst Technologies, einem australischen Start-up, mit seiner zum Patent angemeldeten Technologie der Transcritical CO<sub>2</sub> Pulverization (tCO<sub>2</sub>), bei der Kohlendioxid zum Brechen des Gesteins bei der Zerkleinerung verwendet wird und die im Vergleich zu herkömmlichen Methoden geschätzte Energieeinsparungen von bis zu 55 % ermöglicht (27). Darüber hinaus stellt die frühzeitige Integration von Maßnahmen zur Kohlenstoffabscheidung und Emissionsreduzierung in Verbindung mit Carbon Credits eine profitable Möglichkeit für die Methangewinnung in Bergbaubetrieben dar (28). Im Bereich des Managements von Verbrauchsgütern und Ersatzteilen haben Kreislaufinitiativen damit begonnen, ausschließlich Produkte einzuführen, die wiederverwendet, aufgearbeitet, umgewandelt oder recycelt werden können, um den Kohlenstoff-Fußabdruck des Bergwerks zu verringern.

Für einen besseren Überblick über die Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft im Bergbau enthält Tabelle 1 die Elemente der integrativen Bergbauplanung und zeigt sie als In- und Outputs und schlägt verbundene Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft vor.

### 3.2 Integrierte Wasserbewirtschaftung im Rahmen des Blue Mining-Konzepts

Die Veränderung des Klimas beeinflusst den globalen Wasserzyklus, sodass bis zum Jahr 2070 insgesamt 44 Mio. Europäer von Wasserknappheit betroffen sein werden. Es ist davon auszugehen, dass der steigende Wasserbedarf verschiedener Industriezweige einschließlich des Bergbaus vermehrt zu Nutzungskonflikten führen wird. Um eine „soziale Betriebslizenz“ zu erhalten und eine langfristige Rentabilität zu gewährleisten, muss die Bergbauindustrie einer nachhaltigen und zirkulären Wasserbewirtschaftung Vorrang einräumen (29). Der Begriff „Integriertes Wassermanagement“ (IWM) hat sich daher in der Bergbauindustrie und anderen wasserintensiven Sektoren in den letzten Jahrzehnten entwickelt, um die Notwendigkeit einer umfassenden, nachhaltigen und effizienten Nutzung der Wasserressourcen zu betonen. Dieses Konzept der nachhaltigen und kreislaforientierten Wasserbewirtschaftung steht ebenfalls im Mittelpunkt der Blue Mining-Initiative.

IWM im Bergbau stellt einen ganzheitlichen Ansatz dar, um Wasserressourcen während des gesamten Lebenszyklus des Bergbaus nachhaltig und verantwortungsvoll zu nutzen. Dies beinhaltet die sorgfältige Planung, genaue Bewertung, nachhaltige Erhaltung, professionelle Behandlung und konstante Überwachung der Wassernutzung. Das primäre Ziel dieses Ansatzes ist die Minimierung der Auswirkungen des Bergbaubetriebs auf lokale Wasserressourcen, den Schutz der Wasserqualität und die Sicherstellung nachhaltiger Wasserbewirtschaftungspraktiken, um den Wasserfußabdruck des Betriebs zu reduzieren, ohne die Produktion zu beeinträchtigen. Kernelemente des integrierten Wassermanagements sind:

- Die optimierte Nutzung und Wiederverwendung der Wasserressourcen.
- Die Reinigung und Aufbereitung von Abwässern, um Schadstoffe zu entfernen und die Rückführung ins System und in das Ökosystem sicherzustellen.

Elements of integrative mine planning: inputs and outputs approach / Elemente der integrativen Bergbauplanung: Input- und Output-Ansatz			Circularity opportunities / Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft
Reducing Inputs / Reduzierung der Eingaben	Definition / Definition	Minimizing outputs/ Minimierung des Outputs	
Water / Wasser	Fresh water, potable water and natural inflow of water. / Frischwasser, Trinkwasser und natürlicher Zufluss von Wasser.	Waste water / Abwässer	Waster water processing, optimizing and maximizing recirculation of mine and processing water. / Abwasseraufbereitung, Optimierung und Maximierung der Rezirkulation von Gruben- und Abwasser.
		Mine tailings / Bergeteiche	Revalorization of mineral contents, repurposing tailings in industrial application as cemented backfill material, transforming them into bricks or ceramic, or implementing dry stacking tailings management. / Bewirtschaftung der mineralischen Bestandteile, Wiederverwendung von Bergematerial in der Industrie als zementiertes Versatzmaterial, Verarbeitung zu Ziegeln oder Keramik oder Einführung der Trockenstapelung von Bergematerial.
Raw materials and consumables/ Rohstoffe und Verbrauchsgüter	All consumables such as spare parts, explosives, hydraulic, oils, elements for ground support, laboratory equipment and materials, construction materials, steel, concrete, backfill material (paste, cemented, rock fill), piping, ducts etc. / Alle Verbrauchsgüter wie Ersatzteile, Sprengstoffe, Hydraulik, Öle, Elemente für Auskleidung, Laborausrüstungen und -materialien, Baumaterialien, Stahl, Beton, Versatzmaterial (pastös, zementiert, Gesteinsschüttung), Rohrleitungen, Schächte usw.	Waste rock / Abraum	Maximizing the use of waste rock integrating the extracted material in the construction of facilities within and outside of the mine site and operations. / Maximierung der Verwendung von Abraum für den Bau von Einrichtungen innerhalb und außerhalb des Bergwerksgeländes und des Betriebs.
		General waste / Allgemeine Abfälle	Responsible sourcing of materials and consumables, implementation of recycling of waste, minimizing plastic consumption and re-purposing and relocating functional material and small equipment. / Verantwortungsvolle Beschaffung von Materialien und Verbrauchsgütern, Recycling von Abfällen, Minimierung des Kunststoffverbrauchs und Wiederverwendung und Verlegung von Betriebsmitteln und Kleingeräten.
Energy / Energie	All sources of energy such as electricity, diesel, compressed air and the related infrastructure and equipment. / Alle Energiequellen wie Strom, Diesel, Druckluft und die dazugehörige Infrastruktur und Ausrüstung.	Emissions / Emissionen	Optimizing energy management systems or integrating renewable energy sources to provide the site with electricity and implementing post-mining opportunities and requirements for energy generation in the design and construction stages. / Optimierung von Energiemanagementsystemen oder Integration erneuerbarer Energiequellen zur Stromversorgung des Standorts und Umsetzung von Möglichkeiten und Anforderungen der Energieerzeugung im Nachbergbau in der Planungs- und Bauphase.
Utilization of surface areas / Nutzungsflächen	All surface areas used for and affected by the mining operation in the surface or underground. / Alle für den Bergbau genutzten und von ihm betroffenen Flächen über oder unter Tage.	Infrastructure / Infrastruktur	Integrate post-mining as an approach and strategies enhancing the reusability of areas for secondary activities to reduce the grey infrastructure footprint, e.g., water storage, pumping stations, energy generation land, etc. / Integration von Nachbergbaukonzepten und -strategien zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Flächen für sekundäre Aktivitäten, um den Fußabdruck der grauen Infrastruktur zu verringern, z. B. Wasserspeicher, Pumpspeicherwerke, Energieerzeugungsf lächen usw.
Communication and IT infrastructure / Kommunikation und IT-Infrastruktur	All infrastructure and materials related to communication and IT services, including hardware and software. / Alle Einrichtungen und Materialien im Zusammenhang mit Kommunikation und IT-Diensten, einschließlich Hardware und Software.	Data and Information / Daten und Informationen	Sustainable use of information for training purposes, advanced analytics, learning models, optimization analysis and repurpose of communication and network infrastructure to serve the broad society. / Nachhaltige Nutzung von Informationen für Bildungszwecke, fortgeschrittene Analysen, Lernmodelle, Optimierungsanalysen und Wiederverwendung von Kommunikations- und Netzinfrastrukturen im Interesse der Bevölkerung.
Stakeholders / Interessengruppen	All involved internal and external stakeholders. / Alle beteiligten internen und externen Akteure.	Workforce / Arbeitskräfte	Fostering development of workers to gain the most out of their gained experience in mining to ensure a smooth transition to new trends and technologies. / Förderung der Weiterbildung von Arbeitnehmern, um deren Erfahrungen im Bergbau optimal zu nutzen und einen reibungslosen Übergang zu neuen Technologien und Trends zu gewährleisten.
		Image, Perception, Relations / Erscheinungsbild, Wahrnehmung, Beziehungen	Stakeholder engagement as an asset that can support and guarantee the continuity of the project, foster local development opportunities outside of mining and set positive and strong relations as overall goal. / Die Einbindung von Interessengruppen kann die Kontinuität des Projekts unterstützen und gewährleisten, lokale Entwicklungsmöglichkeiten außerhalb des Bergbaus fördern und positive und starke Beziehungen als übergeordnetes Ziel festlegen.
Equipment and Machinery / Ausrüstung und Maschinen	All necessary equipment that is capital intensive such as heavy machinery, processing plant, transportation, shield support, hoisting and conveying, ventilation fans, etc. / Alle erforderlichen kapitalintensiven Ausrüstungen wie schwere Maschinen, Aufbereitungsanlagen, Fahrzeuge, Schildausbau, Fördertechnik, Lüfter, usw.	Equipment and Machinery / Ausrüstung und Maschinen	Re-purpose outdated equipment, resell machinery out of their accountable life time, engage in automation, steel and battery recycling opportunities and on green production integrating it as a deciding factor when sourcing equipment. / Wiederverwendung veralteter Geräte, Weiterverkauf von Maschinen nach Ablauf ihrer rechnerischen Lebensdauer, Einsatz von Automatisierungs-, Stahl- und Batterierecyclingmöglichkeiten und Berücksichtigung von Umweltaspekten bei der Beschaffung von Geräten.
Fresh air / Frischluff	Necessary demand to guarantee optimal operation of machinery and workers H&S. / Notwendige Anforderungen, um den optimalen Betrieb von Maschinen und Arbeitsschutz der Beschäftigten zu gewährleisten.	Exhaust air / Abluft	Integration of VoD, diesel particles capture or carbon capture at the outtake shafts of e.g. coal mines. / Integration von VoD, Dieselpartikelabscheidung oder Kohlenstoffabscheidung an den Abluftschächten von z. B. Kohlebergwerken.
Investment / Investition	Capital investment and operational costs. / Kapitalinvestitionen und Betriebskosten.	Profit, Return / Gewinn, Rendite	Integrate adaptable and modular mining concepts to unlock investments and optimize use of resource to assure ROI. / Integrierte anpassungsfähige und modulare Bergbaukonzepte zur Erschließung von Investitionen und zur Optimierung der Ressourcennutzung, um den ROI zu gewährleisten.

Table 1. Definition of the elements of integrative mine planning and circularity opportunities within blue mining. // Tabelle 1. Definition der Elemente der integrativen Bergbauplanung und der Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft im Rahmen von Blue Mining. Source/Quelle: TUC



- Optimized use and reuse of water resources.
- Treatment and purification of waste water to remove contaminants and ensure its return to the system and ecosystem.
- Avoidance of interference with natural watercourses and the preservation of biodiversity.
- Continuous monitoring of water sources and reserves to detect negative impacts early and enable optimal proactive planning.
- Employee and stakeholder awareness and education about the importance of water protection and management.
- Transparent involvement of the local community in decision-making processes to consider the needs and rights of all parties.

For the development of appropriate management strategies in mining, a profound understanding of both the climatic and hydro-geological conditions and water use in the five main life cycle phases of mining operations is essential. The required amount of water varies depending on the type of mine, applied technologies and processes, environmental regulations and regional water availability. Therefore, the five central phases – exploration, planning, production, closure, and post-mining (Figure 4) – are qualitatively examined in terms of varying water demand and changes in water quality.

- Die Vermeidung von Eingriffen in natürliche Wasserläufe und die Erhaltung der Biodiversität.
- Kontinuierliches Monitoring der Wasserquellen und -reserven, um negative Auswirkungen frühzeitig zu erkennen und eine optimale vorausschauende Planung zu ermöglichen.
- Sensibilisierung und Bildung von Mitarbeitern und Stakeholdern über die Bedeutung von Wasserschutz und -management.
- Die transparente Einbindung der lokalen Gemeinschaft in Entscheidungsprozesse, um die Bedürfnisse und Rechte aller Beteiligten zu berücksichtigen.

Für die Entwicklung geeigneter Managementstrategien im Bergbau ist ein tiefgreifendes Verständnis sowohl der klimatischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen als auch der Wassernutzung in den fünf Hauptlebensphasen des Bergbaubetriebs unerlässlich. Die benötigte Wassermenge variiert je nach Bergwerkstyp, den angewandten Technologien und Prozessen sowie den umweltrechtlichen Anforderungen und der regionalen Wasserverfügbarkeit. Daher werden nachfolgend die fünf zentralen Phasen – Exploration, Planung, Produktion, Schließung und Nachbergbau (Bild 4) – im Hinblick auf den variierenden Wasserbedarf und Veränderungen in der Wasserqualität qualitativ betrachtet.

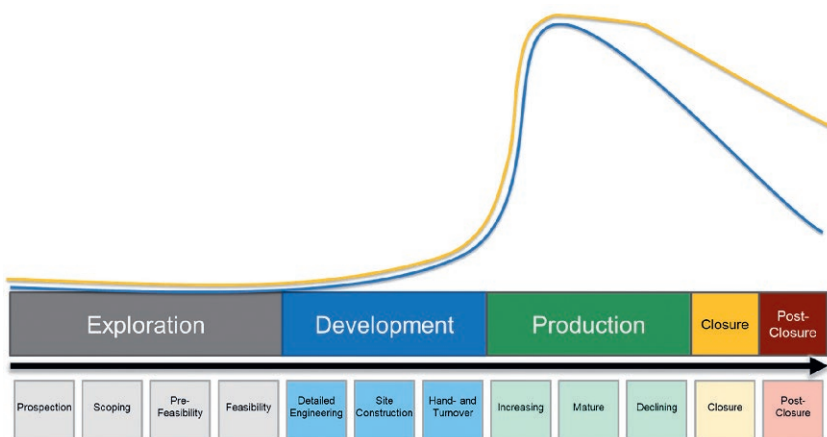


Fig. 4. Simplified representation of the life cycle phases of a mine (qualitative costs above, production below, water demand in blue, processing requirement in orange), modified from Bothe-Fiekert et al. (30). // Bild 4. Vereinfachte Darstellung der Lebensphasen eines Bergwerks (qualitative Kosten oben, Produktion unten, Wasserbedarf blaue Linie, qualitativer Aufbereitungsbedarf orangene Linie), modifiziert nach Bothe-Fiekert et al. (30).

### 3.2.1 Exploration

During the exploration phase, water demand is low, but there is a crucial initial evaluation of the water requirements for the project. A careful assessment of the hydrogeological conditions and the watersheds near the mineral deposit is carried out to identify early risks to local water resources. This process involves collecting and analyzing information about existing bodies of water, their watersheds and flow paths, as well as meteorological, geological and environmental data. The goal of these studies is to understand the hydrological system before mining activities commence and gather enough information to predict the qualitative and quantitative impacts of mining on local water resources. Additionally, other

#### 3.2.1 Exploration

Während in der Explorationsphase der Wasserbedarf gering ist, erfolgt eine entscheidende erste Evaluierung der Wasseranforderungen für das Projekt. Um frühzeitig Risiken für die lokalen Wasserressourcen zu identifizieren, erfolgt eine sorgfältige Bewertung der hydrogeologischen Bedingungen und der Wassereinzugsgebiete in der Nähe des Rohstoffvorkommens. Hierbei werden Informationen über die vorhandenen Wasserkörper, deren Einzugsgebiete und Fließwege sowie meteorologische, geologische und umweltbezogene Daten gesammelt und ausgewertet. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, das hydrologische System vor Beginn der bergbaulichen Aktivitäten zu erfassen und genügend Informationen zu sammeln, um die qualitativen und quantitativen Auswirkungen des Bergbaus auf die lokalen Wasserressourcen vorherzusagen. Zudem müssen weitere Wassernutzer und Stakeholder in der Nähe identifiziert werden, um Nutzungskonflikte proaktiv anzugehen und zu vermeiden.

Bereits in der Erkundungsphase müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um mögliche negative Auswirkungen auf die lokalen Wasserressourcen zu minimieren. Dies bedeutet, dass Bohrkampagnen sorgfältig geplant werden müssen, da fehlgeleitete Bohrungen langfristige Auswirkungen auf den Wasserkreislauf und mögliche Kontaminationen verursachen können. Daher ist die Anwendung umweltfreundlicher Bohrtechniken und die sorgfältige Handhabung von Chemikalien und entstandener kontaminierter Wasser gemäß den geltenden Richtlinien und Gesetzen vor Ort von größter Bedeutung, um Umweltrisiken zu minimieren.

In der ersten Phase wird die übergeordnete Zielstellung der Wassermanagement-Strategie festgelegt, welche je nach klimatischen Bedingungen variieren kann. In ariden Regionen liegt der Fokus auf

water users and stakeholders in the vicinity must be identified to proactively address and avoid usage conflicts.

Special precautions should already be taken during the exploration phase to minimize potential negative impacts on local water resources. This means that drilling campaigns must be carefully planned since misdirected drilling can have long-term effects on the water cycle and potential contamination. Therefore, the use of environmentally friendly drilling techniques and the careful handling of chemicals and resulting contaminated waters in accordance with local guidelines and laws are of paramount importance to minimize environmental risks.

In the initial phase, the overarching objective of the water management strategy is defined, which can vary depending on climatic conditions. In arid regions, the focus is on optimizing water supply, while in humid areas, facilities to prevent uncontrolled runoff, landslides or dam failures during periods of heavy rain flow are of particular importance. During exploration, the potential for water use during and after the operational phase should be identified. The specific usage strategy depends on the (hydro)geological environmental conditions, such as water availability, mineral composition, rock strength and geothermal gradients. Where possible, exploration drill holes should be strategically located so that, ideally, they continue to serve a purpose after exploration, such as being used as groundwater monitoring points in the mine's monitoring plan.

### **3.2.2 Planning and construction**

In the phase during which the detailed design of both the operational areas and the water is created, planning must also consider the future uses of this infrastructure after mine closure. It is essential to identify potential re-usage options early on. This allows for proactive technical planning, proper sizing and ensuring the stability of the infrastructure from the outset. These considerations should be integrated into a comprehensive mining plan that also includes details about underground mine service water systems, mining cooling systems, as well as plans for managing water inflows and civil construction with mechanical, electrical and instrumentation design.

With the start of construction at the mining site, the water infrastructure is simultaneously built, bringing the first visible environmental impacts, including changes in topography, surface runoff and hydraulic alterations in the aquifers. The water management and monitoring program evolve into a detailed description of the water system, providing more precise information about estimated water flows from various plant units and the mining area. At this stage, the critical factors of mining operations that have the highest water demand or the most significant impact on water quality are identified. It is important to examine whether process loops can be optimized and whether certain operational areas can function with lower water quality to reduce freshwater usage.

### **3.2.3 Production**

During the operational phase of a mine, continuous data collection on water quality and quantity is of paramount importance. This data serves to update water balance models and management plans. Moreover, strict monitoring and reporting to the relevant authorities, as well as feedback to stakeholders in the

der Optimierung der Wasserversorgung, wohingegen in humiden Gebieten Einrichtungen zur Verhinderung unkontrollierter Abflüsse, Hangrutschungen oder Dammversagen während Hochwasserperioden von besonderer Bedeutung sind. Während der Exploration sollten Potentiale der Wassernutzung während und nach der Betriebsphase identifiziert werden. Die jeweilige Nutzungsstrategie ist dabei abhängig von den (hydro-)geologischen Umgebungsbedingungen, wie z. B. Wasserdargebot, Mineralbestand und Festigkeit des geothermischen Gradienten des Umgebungsgesteins. Nach Möglichkeit sollten Explorationsbohrlöcher vorrausschauend angelegt werden, sodass diese im Idealfall nach der Exploration noch einen Nutzen erfüllen, indem sie beispielsweise als Grundwassermessstellen in das Monitoringkonzept des Bergwerks einbezogen werden.

### **3.2.2 Planung und Konstruktion**

In der Phase, in welcher das detaillierte Design sowohl der operativen Bereiche als auch der Wasserinfrastruktur entworfen wird, muss die Planung auch zukünftige Nutzungen dieser Infrastrukturen nach der Bergwerksschließung berücksichtigen. Es ist wesentlich, potentielle Nutzungsoptionen frühzeitig zu erkennen. Dies ermöglicht eine vorausschauende technische Planung für die richtige Dimensionierung und Sicherstellung der Stabilität der Infrastrukturen von Beginn an. Diese Überlegungen müssen in einen umfassenden Bergbauplan integriert werden, der auch Details zu unterirdischen Bergwerkswassersystemen, Bergbaukühlssystemen sowie Plänen zur Bewältigung von Wasserzuflüssen und zivilen Konstruktionsarbeiten mit mechanischem, elektrischem und instrumentellem Design enthält.

Mit dem Beginn der Bauarbeiten auf dem Bergbaustandort wird gleichzeitig die Wasserinfrastruktur errichtet, was die ersten sichtbaren Umweltauswirkungen mit sich bringt, darunter Änderungen in der Topographie und dem Oberflächenabfluss sowie hydraulische Veränderungen in den Aquiferen. Das Wassermanagement- und Monitoringprogramm entwickelt sich weiter zu einer detaillierten Beschreibung des Wassersystems und liefert präzisere Informationen zu den geschätzten Wasserflüssen aus den verschiedenen Anlageneinheiten und dem Bergbauareal. In diesem Schritt werden die kritischen Faktoren eines Bergwerksbetriebs ermittelt, die den höchsten Wasserbedarf aufweisen oder den stärksten Einfluss auf die Wasserqualität haben. Hier gilt es zu überprüfen, ob Prozesskreisläufe optimiert werden können und ob gewisse Operationsbereiche auch mit einer geringeren Wasserqualität funktionsfähig sind, um den Frischwassergebrauch zu reduzieren.

### **3.2.3 Produktion**

Während der Betriebsphase eines Bergwerks ist die kontinuierliche Datensammlung zu Wasserqualität und -menge von entscheidender Bedeutung. Diese Daten dienen der Aktualisierung von Wasserbilanzmodellen und -managementplänen. Zudem erfolgt eine strenge Überwachung und Berichterstattung an die zuständigen Behörden sowie ein Feedback an Interessengruppen im Einzugsgebiet. Um Wasser während der Betriebsphase nachhaltig zu nutzen, erfolgt eine Unterteilung in drei Kategorien: Prozess- und Grauwasser, natürliche Wasserquellen und Abwässer. Jede dieser Kategorien erfordert spezialisierte Überwachungssysteme und ggf. Aufbereitungsmaßnahmen. Während der Betriebsphase sind verschiedene Nutzungsoptionen für Wasser von Bedeutung, um den Wasserbedarf zu minimieren und gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck

watershed, are conducted. To sustainably utilize water during the operational phase, it is divided into three categories: process and gray water, natural water sources and waste water. Each of these categories requires specialized monitoring systems and, if necessary, treatment measures. Likewise, in this phase, various usage options for water are significant to minimize water demand while reducing the ecological footprint. Besides its use in ore processing, as cooling water, or for dust control, with appropriately designed infrastructure, water can be utilized for energy generation and storage for renewable energy production in solar or wind park facilities. The integration of these into mining operations simultaneously contributes to the energy efficiency of a site. Throughout the entire operation, water demand and water quality development must be monitored and reviewed at regular intervals. Adjustments may be necessary to account for changes in water availability, such as seasonal fluctuations. Water management strategies that extend beyond raw material extraction and are implemented during the operational phase should also present potential utility in the post-mining phase to avoid costly and time-consuming modifications.

### 3.2.4 Closure and post-mining

The closure phase of a mine marks the transition from raw material extraction to the post-mining phase. Careful planning and control of water management during the transition to the post-mining phase are essential, as this period can span several decades, and it is imperative to ensure the quality of life for the local population and the ecological integrity of the environment. In this phase of IWM, the focus is on water treatment and management after mine closure, with the aim of gradually reducing water demand and ensuring long-term water quality with minimal cost and monitoring effort. Traditionally, the emphasis during the closure phase has been on restoring the original environmental conditions. This approach, while environmentally friendly, is often not feasible, especially when significant hydrological interventions, such as redirecting surface water systems, have been made. For the closure concept, it is essential to minimize not only environmental impacts but also consider socio-economic aspects that involve the needs of the surrounding communities and other end-users.

For IMW, this means not only careful monitoring and ensuring water quality but also integrating the identified water usage potentials and existing infrastructure into regional energy and water supply systems. Possible usage options may include:

- geothermal energy;
- hydroelectric power generation;
- energy storage;
- electrochemical energy conversion;
- recovery of valuable materials;
- drinking water;
- process water;
- irrigation;
- aquaculture/hydroponics (using water in hydroponic systems for plant cultivation or in aquaculture for fish farming).

A comprehensive risk assessment for each usage option is essential, including considering the temporal development of water

zu reduzieren. Neben dem Einsatz zur Erzaufbereitung, als Kühlwasser oder zur Staubkontrolle kann das Wasser bei entsprechend ausgelegter Infrastruktur zur Energieerzeugung und -speicherung für erneuerbare Energieerzeugung in Solar- oder Windparkanlagen genutzt werden. Deren Integration in den Bergwerksbetrieb leistet somit zeitgleich einen Beitrag zur Energieeffizienz eines Standorts. Während des gesamten Betriebs müssen der Wasserbedarf und die Wasserqualitätsentwicklung in regelmäßigen Abständen überwacht und überprüft werden. Falls erforderlich, sollten Anpassungen an veränderte Wasserverfügbarkeiten, wie beispielsweise saisonale Schwankungen, vorgenommen werden. Wasserbewirtschaftungsstrategien, die über den Rohstoffabbau hinausgehen und die während der Betriebsphase verfolgt werden, sollten auch in der Nachbergbauphase ein mögliches Nutzungspotential darstellen, um kosten- und zeitintensive Umbauarbeiten zu vermeiden.

### 3.2.4 Schließung und Nachbergbau

Die Schließungsphase eines Bergwerks markiert den Übergang von der Rohstoffgewinnung zur Nachbergbauphase. Eine sorgfältige Planung und Kontrolle des Wassermanagements während des Übergangs zur Nachbergbauphase ist essentiell, da dieser Zeitraum mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen kann und es unabdingbar ist, die Lebensqualität der lokalen Bevölkerung sowie die ökologische Integrität der Umwelt sicherzustellen. In dieser Phase des IWM liegt der Fokus auf der Wasseraufbereitung und -bewirtschaftung nach der Bergbauschließung, mit dem Ziel, den Wasserbedarf allmählich zu reduzieren und die Wasserqualität langfristig mit möglichst geringem Kosten- und Überwachungsaufwand sicherzustellen. Traditionell liegt der Schwerpunkt der Schließungsphase auf der Wiederherstellung der ursprünglichen Umweltbedingungen. Dieser Ansatz, obwohl umweltfreundlich, ist oft nicht realisierbar, vor allem dann, wenn größere hydrologische Eingriffe, wie z. B. die Umleitung von Vorflutsystemen, erfolgt ist. Beim Schließungskonzept ist es unabdingbar, nicht nur Umweltauswirkungen zu minimieren, sondern auch sozio-ökonomische Aspekte zu berücksichtigen, welche die Bedürfnisse der umliegenden Gemeinden und anderer Endnutzer mit einbeziehen.

Für das IWM bedeutet dies nicht nur eine sorgfältige Überwachung und Sicherstellung der Wasserqualität, sondern auch die Integration der identifizierten Nutzungspotentiale des Wassers und der vorhandenen Infrastruktur in regionale Energie- und Wasserversorgungssysteme. Mögliche Nutzungsoptionen können sein:

- Geothermie,
- hydroelektrische Energieerzeugung,
- Energiespeicherung,
- elektrochemische Energieumwandlung,
- Wertstoffrückgewinnung,
- Trinkwasser,
- Prozesswasser,
- Irrigation,
- Aquakultur/Hydroponik (Nutzung des Wassers in Hydroponik-Systemen zur Pflanzenzucht oder in Aquakulturen zur Fischzucht).

Dabei ist eine umfassende Risikobewertung für jede Nutzungsoption unabdingbar einschließlich der Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung von Wasserqualität und -menge. Auch wenn bereits



quality and quantity. Even though usage strategies in the post-mining phase should be considered during the mine planning phase. It should be reviewed whether the existing infrastructure and the geology influenced by mining are suitable for the intended use. Especially since the rock engineering properties may have changed significantly as a result of mining activity.

Finally, IWM in mining ensures that water resources are responsibly and sustainably utilized throughout the entire life cycle of a mine, with a focus on protecting local water resources and minimizing the water footprint. Key to effective water management is a deep understanding of both environmental conditions and water usage in the different phases of mining operations. Particularly during the closure and post-mining phase, it is crucial not only to consider environmental compatibility but also to consider economic and social aspects, including the needs of the surrounding communities, and create synergies to minimize usage conflicts. Ultimately, a forward-looking, integrated water management strategy can ensure that mining sites continue to make a positive contribution to regional water supply and energy generation even after their closure.

#### **4 Conclusions and outlook**

The blue mining concept represents a promising approach to lead the mining industry into a more sustainable and efficient future. The emphasis on responsible mining practices reflects the fundamental principle of the circular economy to develop sustainable business models that are more competitive for the contemporary shift the mining industry is facing. Both concepts complement and recognize the need to minimize environmental and social impacts while advancing economic development. Nevertheless, several challenges stand in the way of the successful implementation of the blue mining concept. A key challenge is the uniqueness of each mining site, which makes generalized application of the concept difficult. Each mining site has specific circumstances that need to be considered, such as different laws and regulations in different regions, which requires tailoring. In addition, accurate redesign of material cycles is critical, but requires transparent insight into current data that is not always readily available. Production and consumption data must be available in sufficient quality and digitally to perform a sound analysis. If such data is available, it can be used in comprehensive life-cycle assessments to identify optimization opportunities for each input and output of a mine. Finally, moving from linear to dynamic planning approaches requires close collaboration with government agencies and consideration of environmental constraints. This is necessary to ensure that the mining industry receives the necessary approvals and support to successfully implement the new approaches. If this transformation succeeds, the industry's tarnished image can be improved in the long term.

in der Planungsphase des Bergwerks Nutzungsstrategien in der Nachbergbauphase berücksichtigt werden sollten, sollte überprüft werden, ob die vorhandene Infrastruktur sowie das bergbaulich beeinflusste Gebirge für die angestrebte Nutzung ausgelegt sind, zumal sich die gebirgstechischen Eigenschaften maßgeblich durch die bergbauliche Aktivität verändert haben können.

Zusammengefasst stellt IWM im Bergbau sicher, dass Wasserressourcen während des gesamten Lebenszyklus eines Bergwerks verantwortungsvoll und nachhaltig genutzt werden, wobei der Schutz lokaler Wasserressourcen und die Minimierung des Wasserfußabdrucks im Vordergrund stehen. Entscheidend für eine effektive Wasserbewirtschaftung ist ein tiefes Verständnis sowohl der Umweltbedingungen als auch der Wassernutzung in den unterschiedlichen Phasen des Bergbaubetriebs. Insbesondere während der Schließungs- und Nachbergbauphase ist es von zentraler Bedeutung, nicht nur auf die Umweltverträglichkeit zu achten, sondern auch wirtschaftliche und soziale Aspekte, wie die Bedürfnisse der umliegenden Gemeinschaften, frühzeitig zu berücksichtigen und Synergieeffekte zur Minimierung von Nutzungskonflikten zu schaffen. Schließlich kann eine vorausschauende, integrierte Wasserbewirtschaftungsstrategie sicherstellen, dass Bergbaustandorte auch nach ihrer Schließung einen positiven Beitrag zur regionalen Wasserversorgung und Energieerzeugung leisten.

#### **4 Schlussfolgerungen und Ausblick**

Das Blue Mining-Konzept stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Bergbauindustrie in eine nachhaltigere und effizientere Zukunft zu führen. Der Fokus auf verantwortungsvolle Bergbaumethoden spiegelt das Grundprinzip der Kreislaufwirtschaft wider, nachhaltige Geschäftsmodelle zu entwickeln, die angesichts des gegenwärtigen Wandels in der Bergbauindustrie wettbewerbsfähiger sind. Beide Konzepte ergänzen sich und erkennen die Notwendigkeit an, die ökologischen und sozialen Auswirkungen zu minimieren und zugleich wirtschaftliche Entwicklung voranzutreiben. Dennoch stehen der erfolgreichen Umsetzung des Blue Mining-Konzepts einige Herausforderungen im Weg. Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Einzigartigkeit jedes Bergbaustandorts, was eine generalisierte Anwendung des Konzepts erschwert. Jeder Bergbaustandort hat spezifische Gegebenheiten, die berücksichtigt werden müssen, wie beispielsweise unterschiedliche Gesetze und Regelwerke in verschiedenen Regionen, was eine maßgeschneiderte Anpassung erfordert. Darüber hinaus ist die genaue Umgestaltung von Materialkreisläufen von entscheidender Bedeutung, erfordert jedoch transparente Einblicke in aktuelle Daten, die nicht immer leicht zugänglich sind. Produktions- und Verbrauchsdaten müssen in ausreichender Qualität und digital vorliegen, um eine fundierte Analyse durchführen zu können. Falls solche Daten verfügbar sind, können sie in umfassenden Lebenszyklusbewertungen genutzt werden, um Optimierungsmöglichkeiten für jeden Input und Output eines Bergwerks zu identifizieren. Schließlich erfordert die Umstellung von linearen auf dynamische Planungsansätze eine enge Zusammenarbeit mit Behörden und die Berücksichtigung von Umweltauflagen. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Bergbauindustrie die erforderlichen Genehmigungen und Unterstützung erhält, um die neuen Ansätze erfolgreich umzusetzen. Wenn diese Transformation gelingt, kann langfristig das schlechte Image der Branche verbessert werden.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) IEA (2021): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, License: CC BY 4.0.
- (2) World Bank (2017): The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. <https://doi.org/10.1596/28312>
- (3) Think & Act Differently, Oz Minerals Exploration Limited (2022): Scalable & Adaptable Mining, reimagine mining through modular architecture and flexibility. Whitepaper. 33 pp.
- (4) European Commission (2023): Proposed European Critical Raw Materials Act. Published March 16, 2023. Accessed September 23, 2023 [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en)
- (5) European Commission (2023): European Net-Zero Act. Published March 16, 2023. Accessed September 23, 2023 [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en)
- (6) Kellner, M.; Agasty, A. A.; Clausen, E.; Langefeld, O.; Swanson, J.-G. (2013): "Blue Mining" – The future of Mining. Initial Considerations for underground pump storage plants. 23rd World Mining congress. X-CD Technologies Inc.
- (7) Langefeld, O.; Binder, A. (2022): Blue Mining. In: Frenz, W.; Preuße, A. (eds):. Yearbook of Sustainable Smart Mining and Energy 2021 – Technical, Economic and Legal Framework, vol 1. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-84315-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-84315-1_13)
- (8) Langefeld, O. (2017): Future Mining – Gedanken und Aspekte zu Mining Trends. In: Bergbau, 68 (7), S. 10 – 12.
- (9) Langefeld, O. (2017): Future Mining – Thoughts on Mining Trends. In: European Geologist Journal (EJG) (44), pp 15–18.
- (10) Langefeld, O. (2017): Vollautomatisierter untertägiger Bergbau. Mining Report Glückauf (153), Heft 5, S. 429–435.
- (11) Langefeld, O.; Binder, A. (2017): Blue Mining – Planning future mines today. In: World of Mining, 69 (2), pp 109–112.
- (12) Langefeld, O.; Binder, A. (2017): Blue Mining – Today's Mine Planning for Future Mines. Z. X. Li (Hg.): Mineral exploitation and sustainability: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2017), Beijing, China. Canamaple Academia Services.
- (13) Langefeld, O.; Binder, A. (2017): Blue Mining – Today's Mine Planning for Future Mines. In: Geo-Resources Environment and Engineering, 2. <https://doi.org/10.15273/gree.2017.02.001>
- (14) Langefeld, O.; Clausen, E.; Kellner, M. (2014): Blue Mining – Nachhaltigkeit im Bergbau. In: Bergbau, 65 (1), S. 10 – 12.
- (15) Langefeld, O.; Kellner, M. (2013): "Blue Mining" – The future of Mining. M. Karmin & Z. Agioutantis (Vorsitz): 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry, Milos Island, Greece.
- (16) Binder, A.; Langefeld, O. (2017): Blue mining – Mine planning for post closure of future mines. RWTH Aachen University. Institute of Mineral Resources Engineering. Aachen international mining symposia, Aachen.
- (17) Bothe-Fiekert, M.; Binder, A.; Langefeld, O. (2023): Historische Bergbauinfrastruktur als Chance für die regionale Wasser- und Energieversorgung: Das Wasserspeicher Harz 2050-Projekt. Mining Report Glückauf, (159), Heft 2, S. 127 – 132.
- (18) DIGIT Research Center n.d., Real laboratories: Circular Economy. Center for Digital Technologies. Accessed 23 September 2023, <https://www.digit-research.de/reallabor-dce>
- (19) European Parliament (2023): Circular Economy: Definition, Importance, and Benefits. European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
- (20) Segui P.; Safhi A. M.; Amrani M.; Benzaazoua M. (2023): Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. In: Minerals. 2023; 13 (1): 90. <https://doi.org/10.3390/min13010090>
- (21) Nyqvist J.; Serres M. (2020): ABB discusses the benefits of ventilation on demand. In: Canadian Mining Journal, pp 37 – 40. [https://library.e.abb.com/public/1ba9a38bf5424acfb2266acf4da146aa/Canadian%20Mining%20Journal%20May20\\_VentilationOnDemand.pdf](https://library.e.abb.com/public/1ba9a38bf5424acfb2266acf4da146aa/Canadian%20Mining%20Journal%20May20_VentilationOnDemand.pdf)
- (22) Deloitte Touche Tohmatsu (2017): Renewables in Mining: Rethink, Reconsider, Replay. Thought leadership series, Vol. 2. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Energy-and-Resources/gx-renewables-in-mining-final-report-for-web.pdf>
- (23) Nowosad S.; Godge A.; Langefeld O. (2023): Underground energy and water storage – a sustainable energy transition approach. Pre-Print. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. SME Annual Conference & Expo, Denver.
- (24) Nowosad, S.; Langefeld, O. (2021): How close and far underground pump storage plants from reality are: status quo and challenges. Pre-Print 2021. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. SME Annual Conference & Expo, Online.
- (25) Nowosad, S.; Hutwalker, A.; Langefeld, O. (2020): Investigating energy and water storage potential in abandoned mining areas. In: Mining Engineering, 72 (12), pp 22 – 27.
- (26) Winde, F. (2023): Innovative Stilllegungskonzepte rund um den Wasser-Energie-Nexus im Bergbau – ein Fallbeispiel aus Südafrika. Mining Report Glückauf (159), Heft 4, S. 392 – 410.
- (27) Dumas, A. (2023): Rockburst Technologies dramatically reduces comminution energy requirements. Unearthed. Accessed October 4, 2023. <https://unearthed.solutions/news/unearthing-rockburst-technologies-dramatically-reduces-comminution-energy-requirements>
- (28) Karmis M. (2023): The business case of reducing emissions. Keynote presented at 33rd annual General Meeting of the Society of Mining Professors (SOMP); September 11 – 19, 2023; Clausthal-Zellerfeld; TU Clausthal.
- (29) Kunz, N. C.; Moran, C. J. (2014): Sharing the benefits from water as a new approach to regional water targets for mining companies. In: J. Cleaner Prod. 84, pp 469 – 474.
- (30) Bothe-Fiekert, M.; Binder, A.; Nowosad, S.; Apollo, F.; Langefeld, O. (2023): Lifecycle of Mine Water. In: Frenz, W., Preuße, A. (eds): Yearbook of Sustainable Smart Mining and Energy 2022 – Technical, Economic and Legal Framework, vol 2. Springer, Cham. ISBN 978-3-031-41872-3.
- (31) World Bank (2020): Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Washington D.C. <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>
- (32) Beck, H.-P.; Schmidt, M. (Hrsg.) (2011): Windenergie-speicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Univ.-Bibliothek Clausthal. <https://doi.org/10.21268/20140612-234203>

## Authors / Autoren

Sandra Nowosad M.Sc., Mareike Bothe-Fiekert M.Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld, Abteilung für Maschinelle Betriebsmittel und Verfahren im Bergbau unter Tage, Technische Universität Clausthal (TUC), Clausthal-Zellerfeld