

Stefanie Krause, Jürgen Kretschmann

Circular Economy in Mining – Active Integration of Environmental, Social and Governance Criteria into the Core Business

Mining companies are the enablers of the energy transition and green future technologies, as they provide the materials urgently needed for these in increasing quantities and on a broader scale. The mining sector is a key industry with regard to many sustainability issues and is therefore confronted with complex demands from its stakeholders. Pressure is arising in particular from stricter political regulations and extensive demands from increasingly critical investors, who require compliance with a wide range of Environmental, Social and Governance (ESG) criteria. In the search for solutions, two-thirds of the world's largest mining companies have already communicated ambitious decarbonization targets. The sector faces the challenge of balancing growth and economic returns, with the need to invest in decarbonization, sustainability

and ESG-related issues. What paths can mining companies take to manage this balancing act and achieve their ambitious goals? Sustainable business model innovation – especially with a focus on Circular Economy (CE) – offers the opportunity to meet the growing demands of stakeholders by creating ESG-focused business cases and integrating ESG criteria directly into the company's core business. This beneficial form of risk management creates a win-win situation for mining companies and their stakeholders, as it leads to increased value creation on both sides. The paper provides a contextual definition, derives key principles, and presents case studies of circular business model innovation. It also discusses influencing factors that should be taken into account in mining.

Circular Economy im Bergbau – Aktive Integration der Environmental-, Social- and Governance-Kriterien in das Kerngeschäft

Bergbauunternehmen sind die Wegbereiter der Energiewende und grüner Zukunftstechnologien, da sie die hierfür dringend benötigten Materialien in wachsender Menge und in breiterem Umfang bereitstellen. Der Bergbausektor ist eine Schlüsselindustrie in Bezug auf viele Nachhaltigkeitsfragen und wird daher mit komplexen Anforderungen von seinen Stakeholdern konfrontiert. Druck entsteht insbesondere durch verschärfte politische Regulierungen und umfangreiche Forderungen von zunehmend kritischen Investoren, welche die Erfüllung vielfältiger Environmental, Social and Governance (ESG)-Kriterien verlangen. Auf der Suche nach Lösungsansätzen haben inzwischen zwei Drittel der weltweit größten Bergbauunternehmen ambitionierte Ziele zur Dekarbonisierung kommuniziert. Der Sektor sieht sich vor der Herausforderung, ein Gleichgewicht zu schaffen zwischen Wachstum und wirtschaftlicher Rendite sowie der Notwendigkeit, in Dekarbonisierung, nach-

haltigkeits- und ESG-relevante Themen zu investieren. Welche Wege können Bergbauunternehmen einschlagen, um diesen Balanceakt zu bewältigen und ihre ehrgeizigen Ziele zu erreichen? Nachhaltige Geschäftsmodellinnovationen – insbesondere rund um das Konzept der Circular Economy (CE) – bieten die Chance, die wachsenden Anforderungen der Interessengruppen durch die Schaffung von ESG-orientierten Business Cases zu erfüllen und die ESG-Kriterien direkt in das Kerngeschäft des Unternehmens zu integrieren. Diese vorteilhafte Form des Risikomanagements schafft eine Win-Win-Situation für die Bergbauunternehmen und ihre Stakeholder, denn sie führt auf beiden Seiten zu erhöhter Wertschöpfung. Der Beitrag liefert eine kontextuelle Definition, leitet Schlüsselprinzipien ab und stellt Fallbeispiele für zirkuläre Geschäftsmodellinnovationen vor. Zudem werden Einflussfaktoren diskutiert, die im Bergbau berücksichtigt werden sollten.

1 Introduction

For the third year in a row, Environmental, Social and Governance (ESG) criteria are the biggest risk for the mining and metals sector, according to the international consulting network Ernst

1 Einleitung

Das dritte Jahr in Folge sind die Environmental-, Social- and Governance (ESG)-Kriterien laut des internationalen Beratungsnetzwerks Ernst and Young das größte Risiko für den Bergbau- und Metallsek-

and Young. At the same time, they are their biggest opportunity to drive differentiation and improvements that will create long-term value for both the sector and all its stakeholders (1). Originally promoted by the United Nations in 2004 as a market-driven initiative, ESG integration is now being tightened by regulatory pressure. It is considered one of the most widely adopted “sustainable benchmarks” on a global level, describing the link between corporate governance, and social and environmental sustainability (2). The increasing relevance of ESG criteria can be seen both in the context of a mining company’s business activities and in the reporting of its sustainability-oriented issues. Particular attention is paid to the impact of mining on local communities, as well as mining waste and its management. Today, safe storage of tailings is a key concern for stakeholders who are demanding that mining companies do more to prevent dam failures, which can lead to devastating consequences for local communities and the environment and cost billions to fix. Furthermore, companies are expected to engage in water stewardship, as well as to attain net zero emissions (1).

A joint recent CEO study by the United Nations Global Compact and the consulting firm Accenture found that 72% of mining and metals CEOs agree that sustainability issues including decarbonization are very important to important when it comes to their company’s future success (compared to an average of 54% throughout all industries) (3). Currently, the mineral resource investment landscape is reshaped by climate change issues (4). So far, more than 100 major financial institutions worldwide have already divested from thermal coal and now focus on opportunities and growth tied to investments in the energy transition (5). 63% of investors would avoid investing in mining companies that fail to meet their decarbonization targets (6). Regulation is exerting pressure by dictating tough time schedules and strict requirements, e.g., EU taxonomy regulation, Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), with the aim to channel capital flows into sustainability-oriented economic activities (7). Mining companies are therefore faced with the balancing act of achieving growth and economic return on the one hand and the need to invest in decarbonization, sustainability and ESG-related issues on the other. Several leading mining companies, e.g., BHP, Rio Tinto, Vale, Glencore, Anglo American, have already committed themselves to become carbon neutral by 2050 by the latest (8). The question remains, what the path to the goal will look like.

A promising approach to meeting this challenge lies in intelligently linking ESG criteria with the core business in order to create financial value. In other words, to create “ESG-oriented business cases”. Sustainability-oriented business model innovations, here especially with a focus on Circular Economy (CE), offer interesting perspectives for the mining sector to reconcile environmental and social requirements with economic returns. They represent the best opportunity to address indirect emissions within the value chain (“Scope 3” emissions) by establishing sustainable supply chains, networks or collaborations. This way, the concept of the CE also becomes a means of risk management for mining companies, assuming its utmost goal is to ensure the company’s long-term existence and optimize its adaptation to a constantly changing environment.

tor. Zugleich sind sie seine größte Chance, um Differenzierung und Verbesserungen voranzutreiben, die sowohl für den Sektor als auch seine Stakeholder langfristige Werte schaffen (1). Ursprünglich im Jahr 2004 als marktgesteuerte Initiative von den Vereinten Nationen (UN) gefördert, wird die ESG-Integration inzwischen durch den Druck der Regulierungsbehörden verschärft und gilt als einer der am weitesten verbreiteten „nachhaltigen Maßstäbe“ auf globaler Ebene, der die Unternehmensführung mit sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit verbindet (2). Die zunehmende Relevanz der ESG-Kriterien zeigt sich sowohl im Kontext der Geschäftstätigkeit eines Bergbauunternehmens als auch bei der Berichterstattung seiner nachhaltigkeitsorientierten Themen. Besonderes Augenmerk erfahren in diesem Zusammenhang der Einfluss des Bergbaus auf lokale Gemeinschaften sowie Bergbauabfälle und deren Management. Die sichere Lagerung von Abraumhalden ist heute ein zentrales Anliegen der Stakeholder, die von den Bergbauunternehmen verlangen, dass sie mehr Einsatz zeigen, um Versagen der Dämme zu vermeiden, die zu verheerenden Folgen für die örtlichen Gemeinden und die Umwelt führen und deren Behebung Milliardenkosten verursachen kann. Weiterhin wird von den Unternehmen insbesondere verantwortungsvoller Umgang mit Wasserressourcen erwartet sowie das Erreichen von Netto-Null-Emissionen (1).

Eine aktuelle Befragung des Globalen Pakts der UN und der Beratungsgesellschaft Accenture hat ermittelt, dass 72% der Bergbauunternehmensvorstände der Meinung sind, dass Nachhaltigkeitsaspekte einschließlich Dekarbonisierung für den künftigen Erfolg ihres Unternehmens sehr wichtig bis wichtig sind (Zum Vergleich: in anderen Branchen teilen diese Auffassung max. 54% der Entscheidenden.) (3). Aktuell befindet sich die Landschaft der Investitionen in Bodenschätze durch den Themenkomplex des Klimawandels im Umbruch (4). Bislang haben sich bereits mehr als 100 große Finanzinstitute weltweit von der Kraftwerkskohle distanziert und konzentrieren sich auf Chancen und Wachstum im Zusammenhang mit Investitionen in die Energiewende (5). 63% der Anleger würden es vermeiden, in Bergbauunternehmen zu investieren, die ihre Dekarbonisierungsziele nicht erreichen (6). Die Gesetzgebung übt zusätzlich Druck aus, indem sie harte Zeitpläne und strikte Anforderungen vorgibt, beispielsweise die EU-Taxonomieverordnung, Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), mit dem Ziel, Kapitalströme in nachhaltigkeitsorientierte Wirtschaftsaktivitäten zu lenken (7). Bergbauunternehmen sehen sich daher mit dem Spagat konfrontiert, ein Gleichgewicht zu schaffen zwischen Wachstum und wirtschaftlicher Rendite einerseits sowie der Notwendigkeit andererseits, in Dekarbonisierung, nachhaltigkeits- und ESG-relevante Themen zu investieren. Die führenden Unternehmen, z. B. BHP, Rio Tinto, Vale, Glencore, Anglo American, haben sich bereits verpflichtet, bis spätestens 2050 kohlenstoffneutral zu werden (8). Die Frage bleibt, wie sich der Weg zum Ziel gestaltet.

Ein vielversprechender Ansatz diese Herausforderung zu meistern, liegt in der intelligenten Verknüpfung von ESG-Kriterien mit dem Kerngeschäft, um so finanzielle Werte zu schöpfen, oder anders ausgedrückt, „ESG-orientierte Business Cases“ zu schaffen. Nachhaltigkeitsorientierte Geschäftsmodellinnovationen, hier insbesondere rund um die Circular Economy (CE), bieten interessante Perspektiven für den Bergbausektor, um ökologische und soziale Ansprüche mit wirtschaftlichen Erträgen in Einklang zu bringen. Sie stellen zudem die beste Möglichkeit dar, um indirekte Emissi-

The current momentum of the CE is fundamentally based on increasingly critical stakeholders and an innovation push (9). The latter is based on the triad of future technologies, business model innovations, and supporting subsidies (9). In their publication "Waste to Wealth" Lacy et al. quoted the additional value creation opportunities through Circular Economy with approximately 4.5 trillion US\$, which should result from the redefinition of "waste" (10). In order to capitalize on the associated opportunities, Lacy et al. proposed business models based on sharing platforms, product use extension, resource recovery, the concept of "product/resource as a service" and circular inputs, such as the use of renewable energy (10, 11). Furthermore, they identified ten key technologies that play a central role in supporting the CE. This list has now grown to 27 technologies and includes artificial intelligence, machine learning, blockchain, 3D printing, nanotechnology, energy harvesting, material science innovations and biotechnologies (11). Financial vehicles focused on CE ("Circular Finance") are also winning pace. The spectrum of circular finance innovations includes any form of financial service or instrument integrating CE indicators into the business or investment decisions, in order to enable and accelerate the circular transition (12, 13). Related investments can be found in many sectors already. Vehicles like circular bonds, public equity funds, venture capital for circular projects are already available on the market and are recording high growth rates (14, 15).

The following article highlights the relevance of the CE and derives a definition of the intensively discussed concept in the context of mining. Furthermore, the article points out potential key principles as well as exemplary business model innovations and their advantages, but also discusses influencing factors that should be taken into account.

2 Interpretation of the CE in mining

The fascination of mining and its processes lies in increasing very low concentrations of minerals and metals to supply core raw materials to most global supply and value chains enabling production of our everyday essentials. However, low concentrations of material come along with the production of a huge amount of mine wastes. In some cases, e.g., gold ores, about 99% of mined material is considered waste. Due to significantly dropping ore grades of a variety of extracted minerals and metals, waste volumes will rise further. Mine wastes occur as solid, liquid or gaseous by-products, in the forms of tailings, waste rock or contaminated fresh water. They consume land, create dust storms and silt streams, contaminate surface water and groundwater (16). Altogether, the mining and metals industry is among the world's greatest generators of waste with approximately 10 bn t/a, which amounts to 40 to 55% of the global total. Per annum, the global mining industry generates approximately 6.5 Mt of tailings (11). How can this waste potential be used profitably?

Generally, the CE is discussed as one of the most effective, promising concepts for the transition towards sustainable development (17). In a first approximation, the CE describes an economic system that is based on business models replacing the "end-of-life" concept seeking to reduce, alternatively reuse, recycle and repurpose materials in production, distribution and consumption processes. CE complements the conceptual basis

onen innerhalb der Wertschöpfungskette („Scope 3“-Emissionen) zu adressieren, indem nachhaltige Lieferketten, Netzwerke bzw. Unternehmenspartnerschaften etabliert werden. Das Konzept der CE gerät zum Mittel des Risikomanagements für Bergbauunternehmen, unter der Annahme, dass es sein oberstes Ziel ist, die langfristige Existenz des Unternehmens zu sichern und seine Anpassung an ein sich ständig veränderndes Umfeld zu optimieren.

Das aktuelle Momentum der CE wird grundsätzlich durch zunehmend kritische Interessengruppen und einen Innovationsschub begründet (9). Letzterer basiert auf dem Dreiklang aus Zukunftstechnologien, Geschäftsmodellinnovationen sowie unterstützenden Fördermitteln (9). Bereits im Jahr 2015 bezifferten Lacy et al. (10) in ihrem Werk „Waste to Wealth“ die zusätzlichen Ertragsmöglichkeiten durch CE mit etwa 4,5 bn US-\$, die aus der Neudefinition von Abfällen resultieren sollen. Sie schlugen zur Nutzung der damit verbundenen Gelegenheiten Geschäftsmodelle vor, die auf Sharing-Plattformen, der Verlängerung des Produktlebens, der Ressourcenzurückgewinnung, dem Konzept des „Produkts/der Ressource als Dienstleistung“ und zirkulären Inputs, wie z. B. der Nutzung erneuerbarer Energien, basieren (10, 11). Weiterhin identifizierten sie zehn Schlüsseltechnologien, die eine zentrale Rolle in der Unterstützung der CE spielen. Mittlerweile ist diese Liste auf 27 Technologien angewachsen und umfasst u. a. künstliche Intelligenz, Machine Learning, Blockchain, 3D-Druck, Nanotechnologie, Energy Harvesting, Innovationen im Bereich der Materialwissenschaften und Biotechnologien (11). Finanzvehikel mit dem Fokus auf CE („Circular Finance“) gewinnen ebenfalls an Fahrt. Das Spektrum der Circular Finance-Innovationen umfasst Finanzdienstleistungen oder -instrumente, die CE-Indikatoren im Rahmen der Geschäfts- oder Investitionsentscheidungen berücksichtigen, um die Kreislaufführung zu ermöglichen bzw. zu beschleunigen (12, 13). Entsprechende Investitionen sind bereits in vielen Sektoren zu finden. Instrumente, wie z. B. zirkuläre Anleihen, öffentliche Beteiligungsfonds und Risikokapital für CE-Projekte, sind auf dem Markt verfügbar und verzeichnen hohe Wachstumsraten (14, 15).

Der nachfolgende Beitrag beleuchtet die Relevanz der CE und wagt eine Definition des derzeit intensiv diskutierten Konzepts im Kontext des Bergbaus. Weiterhin zeigt der Beitrag potentielle Schlüsselprinzipien sowie beispielhafte Geschäftsmodellinnovationen und deren Vorzüge auf, weist jedoch ebenso auf Einflussfaktoren hin, die Berücksichtigung finden sollten.

2 Interpretation der CE im bergbaulichen Kontext

Die Faszination des Bergbaus und seiner Verfahren liegt darin, sehr geringe Konzentrationen von Mineralien und Metallen zu gewinnen, um die wichtigsten Rohstoffe für einen Großteil globaler Liefer- und Wertschöpfungsketten zu liefern, welche die Produktion unserer alltäglichen Gebrauchsgüter ermöglichen. Niedrige Materialkonzentrationen gehen jedoch auch mit der Produktion einer großen Menge von Bergbauabfällen einher. In einigen Fällen, beispielsweise bei Golderzen, werden etwa 99% des abgebauten Materials als Abfall betrachtet. Aufgrund deutlich sinkender Erzgehalte bei einer Vielzahl von abgebauten Mineralien und Metallen wird das Abfallvolumen weiter steigen. Bergbauabfälle entstehen als feste, flüssige oder gasförmige Nebenprodukte in Form von Abraumhalden, Taubgestein oder kontaminiertem Süßwasser. Sie verbrauchen Land, verursachen Staubstürme und Schlammströme und verschmutzen Oberflächen- und Grundwasser (16). Insgesamt zählt die Bergbau- und Metall-

of the “industrial ecology” framework (18) and offers a systemic umbrella concept (19, 20) for a wider range of circular strategies. The CE concept contrasts with the current linear economic model, which is the basis of the predominant business models in industrialized and emerging countries. According to this model, the majority of raw materials are extracted, processed, turned into products, distributed to the markets, used by consumers and then disposed of.

The 2030 UN Agenda and its Sustainable Development Goals (UNSDGs) provide both a framework and objectives for the CE at the political level. The growing requirements of investors channel business operations in an ESG-compliant manner. The research findings of Schroeder et al. underpin that CE practices and corresponding business models can contribute to achieving a considerable number of UNSDGs. The strongest relationships exist between CE practices and the objectives of SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), SDG 12 (Responsible Consumption and Production) and SDG 15 (Life on Land) (21). The overlap with many ESG requirements is already evident at this point.

In their analysis, Parra et al. describe multiple potentials for supporting the SDGs in the mining context (22). However, the recent report of the Responsible Mining Foundation (RMF) and other international studies come to the conclusion that the use of circular strategies, e. g., the use of circular resources, has not yet been sufficiently widespread within the industry (23, 24, 25). Currently it can be seen that more mining companies are investing in recycling, but the structural deficits in the market have not yet been fully overcome in this regard. Glencore can be taken as an example, as it is engaging in battery recycling alongside recycling of base metals such as copper, zinc, nickel, and lead (1). So far, some other companies communicate their recycling-oriented activities mostly implicitly (24). However, the singular approach of recycling does not embody the core idea of the CE, nor is it a business model innovation in the strict sense, that addresses all challenges of the sector.

The general interpretation of the CE obviously contrasts with the traditional concept of mining and consequently poses a challenge, because usually the profit of a mine results from an increase of material consumption. This frequently cited conceptualization is supported by the common visualization of the CE which uses a “downstream focus”, and whose part-value chain CE model ranges from production of goods to consumer goods markets. It omits the significant stages of raw material extraction, material waste/landfill, which according to this interpretation, are limited to flows that should be minimized (26, 27, 28).

This perspective excludes extraction and import of natural resources as well as the outflows of waste materials from the core of the model, leading to the situation, that the primary sector is overlooked in most circular value chains (26) despite its huge potential for CE business cases. However, the commitment to a low-carbon future is resource intensive and can only be realized through a combination of primary and secondary resources. The transition to “clean energy technologies” requires a wider range and quantity of materials compared to fossil fuel-based electricity generation technologies and results in a larger “ma-

industrie mit ca. 10 Mrd. t/a (40 bis 55% des globalen Gesamtaufkommens) zu den weltweit größten Abfallverursachern. Jährlich fallen in der Bergbauindustrie weltweit ca. 6,5 Mio. t Bergematerial an (11). Wie lassen sich diese Abfallpotentiale gewinnbringend nutzen?

Die CE wird im Allgemeinen als eines der effektivsten, viel versprechenden Konzepte für den Transformationsprozess zu einer nachhaltigen Entwicklung diskutiert (17). In einer ersten Annäherung beschreibt die CE ein Wirtschaftssystem, das auf Geschäftsmodellen basiert, die das Konzept des Lebensendes („End-of-Life“) ersetzen und darauf abzielen, Materialien in Produktions-, Distributions- und Konsumprozessen zu reduzieren, alternativ wiederzuverwenden, zu recyceln und neu zu verwenden im Sinne des Umfunktionierens. Die CE stellt eine Ergänzung der konzeptionellen Grundlage des „Industrial Ecology“-Ansatzes dar (18) und bietet ein systemisches Dachkonzept (19, 20) für ein breiteres Spektrum an zirkulären Strategien. Das CE-Konzept steht in Kontrast zum aktuellen linearen Wirtschaftsmodell, welches Basis der überwiegenden Geschäftsmodelle in Industrie- und Schwellenländern ist. Demnach wird der Großteil der Rohstoffe extrahiert, aufbereitet, zu Produkten verarbeitet, in die Märkte distribuiert, von Konsumenten genutzt und anschließend entsorgt.

Die Agenda 2030 und ihre Ziele für nachhaltige Entwicklung (UN Sustainable Development Goals – UNSDGs) bieten einen Rahmen und Zielsetzungen auf politischer Ebene. Die wachsenden Anforderungen der Investoren kanalisieren die Geschäftstätigkeiten in ESG-konformer Weise. Die Forschungsergebnisse von Schroeder et al. (21) unterstützen die Erkenntnis, dass CE-Praktiken und entsprechende Geschäftsmodelle dazu beitragen können, mehrere UNSDGs zu erreichen. Die stärksten Beziehungen bestehen demnach zwischen CE-Praktiken und den Zielen von SDG 6 (Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen), SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie), SDG 8 (Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum), SDG 12 (Nachhaltige/r Konsum und Produktion) und SDG 15 (Leben an Land) (21). Die Überdeckung mit vielen ESG-Anforderungen zeigt sich bereits an dieser Stelle.

Parra et al. (22) beschreiben in ihrer Analyse vielfältige Potentiale für die Unterstützung der SDGs im bergbaulichen Kontext. Der aktuelle Bericht der Responsible Mining Foundation (RMF) sowie weitere internationale Studien kommen jedoch zu der Erkenntnis, dass die Verwendung von zirkulären Strategien, z. B. der Einsatz von zirkulären Ressourcen bislang unzureichend in der Industrie verbreitet ist (23, 24, 25). Es zeigt sich, dass Bergbauunternehmen derzeit vermehrt in Recycling investieren, aber die strukturellen Defizite auf dem Markt hierbei noch nicht behoben sind. Ein Beispiel hierfür sind die Bestrebungen des Unternehmens Glencore, das neben dem Recycling von Basismetallen wie Kupfer, Zink, Nickel und Blei das Batterierecycling vorantreibt (1). Weitere Unternehmen kommunizieren ihre recyclinggerichteten Aktivitäten bislang überwiegend implizit (24). Der singuläre Ansatz des Recyclings verkörpert jedoch weder den Kerngedanken der CE, noch handelt es sich um eine Geschäftsmodellinnovation im engeren Sinne, die sämtliche Herausforderungen des Sektors adressiert.

Die allgemeine Interpretation der CE stellt offensichtlich einen Kontrast zum traditionellen Konzept des Bergbaus und demzufolge eine Herausforderung dar, denn üblicherweise resultiert der Profit eines Bergwerks aus dem erhöhten Verbrauch von Materialien. Unterstützt wird diese Interpretation von den üblichen Visualisierungen der CE mit „nachgelagertem Fokus“, deren par-

terial footprint" (29). At least 23 key minerals – beyond them iron, copper, aluminum, nickel, lithium, cobalt, platinum, silver and rare earth metals – will be critical to the development and deployment of clean energy technologies (30, 31). Although societal interest in combating climate change is apparently increasing, current production and consumption patterns provide a contrasting picture. In particular, the expanding middle class and its high standard of living are the main drivers of resource use. In the time between 1970 to 2017, the annual extraction of materials worldwide grew from 27 to 92 bn t. If this kind of producer and consumer behavior prevails, 190 bn t of material will be required annually by 2060, assuming a global population of approximately 10 bn people (32, 33). So far, only 8.6% of the resources that are extracted return to the production system as input into new everyday essential products (34). The figures of critical raw materials, the clean energy technologies heavily rely on, are even worse. The End-of-Life-recycling rate for rare earths i. e. is estimated to be below 1% (35). The same rate is evaluated for the global lithium recycling (36).

The prerequisite for the conceptual design, strategic use and operationalization of the CE in the corporate context is its careful description and delineation in terms of content. Based on a sustainability-oriented perspective, the following key principles can be identified to operationalize the CE in the mining context in line with ESG and regulatory requirements:

1. Optimize stocks through extending the value of materials, e. g., use of mine's by-products.
2. Act eco-efficiently and eco-effectively in daily operations, e. g., through improved recovery rates both in mining and mineral processing.
3. Eliminate waste by extending value of resources, i. e. through minimized waste (tailings, gaseous emissions, effluent). The development of feasible approaches for lower grade ores (37).
4. Implement "Extended Producer Responsibility" (EPR), e. g., by enabling tracking and tracing of materials and alloys at the End-of-Life (EoL) stage with aid of information technologies.
5. Circular product and process design through corporate collaboration ("material stewardship"), e. g., improved reuse of water and material by implementing cyclic systems. Collaboration with the manufacturing sector in favor of circular product design (38).
6. Creating "shared values" for the local communities and beyond, e. g., through community health and education measures. Development of infrastructure; integration of local suppliers; use of renewable energies. Consideration of the post-mining phase on the basis of innovative business models (39).

Further investigation of circular business cases should ideally take into account the entire life cycle of the mine with the phases of prospecting, exploration, development, extraction, closure and reclamation. This perspective is endorsed by the European Union (EU) Circular Economy Action Plan, which also examined best practices in its "Extractive Waste Management Plans" (42). Depending on the status – greenfield or brownfield – of the mine project, the degree of management influence on the application of circular aspects varies.

tielles Wertschöpfungskettenmodell von der Produktion bis zu den Konsumgütermärkten reicht. Es fehlen die bedeutenden Stufen der Rohstoffgewinnung, des Materialabfalls, der Deponien, die es demnach lediglich zu minimieren gilt (26, 27, 28).

Diese Perspektive schließt die Gewinnung und den Import natürlicher Ressourcen sowie die Abfallströme aus dem Kern des Modells aus, was dazu führt, dass der Primärsektor in den meisten zirkulären Wertschöpfungsketten übersehen wird trotz seines enormen Potentials für zirkuläre Business Cases (26). Das Engagement für eine kohlenstoffarme Zukunft ist jedoch ressourcenintensiv und kann nur durch die Kombination von primären und sekundären Ressourcen realisiert werden. Die Verbreitung „sauberer Energietechnologien“ ist im Vergleich zu den auf fossilen Brennstoffen basierenden Stromerzeugungstechnologien in hohem Maß von einer größeren Bandbreite und Menge an Materialien abhängig und sorgt demzufolge für einen größeren „Fußabdruck“ (29). So werden mindestens 23 wichtige Mineralien – darunter Eisen, Kupfer, Aluminium, Nickel, Lithium, Kobalt, Platin, Silber und Seltene Erden – für die Entwicklung und den Einsatz sauberer Energietechnologien entscheidend sein (30, 31). Wenngleich das gesellschaftliche Interesse an der Bekämpfung des Klimawandels augenscheinlich steigt, liefern die aktuellen Produktions- und Konsummuster ein gegensätzliches Bild. Insbesondere die wachsende Mittelschicht und ihr hoher Lebensstandard sind im Wesentlichen verantwortlich für den stark steigenden Ressourcenverbrauch. Im Zeitraum von 1970 bis 2017 stieg die jährliche Materialentnahme weltweit von 27 auf 92 Mrd. t. Sollte sich dieses Produktions- und Konsumverhalten fortsetzen, werden von der antizipierten Weltbevölkerung von etwa 10 Mrd. Menschen jährlich 190 Mrd. t Materials benötigt (32, 33). Der CE-Report hat zugleich ermittelt, dass derzeit nur etwa 8,6% der gewonnenen Ressourcen in das Produktionssystem zurückfließen und zu neuen Produkten des alltäglichen Lebens verarbeitet werden (34). Bei kritischen Rohstoffen, auf die saubere Energietechnologien in hohem Maß angewiesen sind, fallen die Rückläufe sogar noch weitaus geringer aus. So wird die End-of-Life-Recyclingrate für Seltene Erden auf unter 1% geschätzt (35). Die gleiche Rate wird für das weltweite Lithium-Recycling ermittelt (36).

Die Voraussetzung für die konzeptionelle Ausgestaltung, strategische Nutzung und Operationalisierung der CE im Unternehmenskontext bildet deren sorgfältige inhaltliche Beschreibung und Abgrenzung. Auf der Grundlage einer nachhaltigkeitsorientierten Perspektive können die folgenden Schlüsselprinzipien identifiziert werden, um die CE im Bergbaukontext in Übereinstimmung mit den ESG- und Regulierungsanforderungen zu operationalisieren:

1. Optimierung der Bestände durch erweitertes Verständnis des Materialwerts, z. B. Beiproduktmanagement.
2. Ökoeffizientes und ökoeffektives Handeln im täglichen Betrieb, beispielsweise durch die Verbesserung der Rückgewinnungsraten im Bergbau und der Mineralienaufbereitung.
3. Eliminierung von Abfällen durch ein erweitertes Verständnis der Ressourcenwerte, z. B. durch Minimierung des Abfallaufkommens (Abraumhalden, Gasemissionen, Abwasser). Die Entwicklung praktikabler Ansätze für niedriggradige Erze (37).
4. Umsetzung einer „erweiterten Herstellerverantwortung“, z. B. Ermöglichung der (Rück)Verfolgung von Materialien und Legierungen am Lebensende mit Hilfe von Informationstechnologien.

Generally, circularity at the mine site can be achieved in two ways: First, miners are material suppliers and initiate the most product value chains. Second, they are industrial buyers/users of products and services at the mine site (technical operating system including physical infrastructure, equipment and further assets that are created and/or utilized at the mine site). With this dual perspective, a bunch of CE opportunities evolves at the mine site and also beyond, if the mining company engages in collaborations, e.g., with local mining operators, upstream supply vendors, other key partners in the downstream value network (39). This extended interpretation of the CE for mining is illustrated in figure 1. It links the cycles of the upstream and downstream stages of the value chain.

Depending on the type of resource, location of the deposit and available options to collaborate, circular initiatives can be implemented at the micro level – throughout the mine site – involving material and company aspects – the meso level – within so-called eco-industrial parks engaging in industrial symbiosis – and the macro level – across the local community, region for optimized infrastructure and energy use. The more network activities are expanded, the more business cases will usually arise.

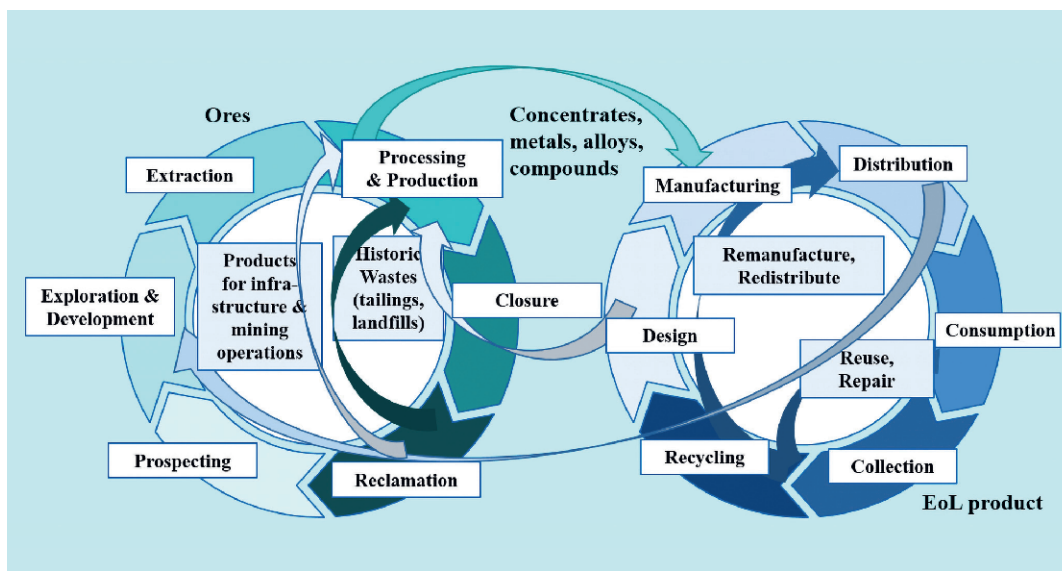


Fig. 1. Circular Economy in mining (Own illustration based on (26, 40, 41)).
Bild 1. Circular Economy im Bergbau (Eigene Darstellung basierend auf (26, 40, 41)).

The principles and activities along the entire minelife cycle described above fulfill the three core objectives of the CE and support a holistic approach:

1. The productive life of resources is extended to keep materials and products in the system and at their highest utility for as long as possible to optimize their values.
2. Waste and pollution are ideally designed out of the economic system through fully costing their impacts and generating additional values by recycling, reusing and repurposing the materials.
3. Natural systems are regenerated to protect essential functions (clean water and air, healthy soils, carbon storage and flood protection) (19, 39).

5. Zirkuläre Produkt- und Prozessgestaltung durch Unternehmenskooperationen („Material Stewardship“), z. B. verbesserte Wiederverwendung von Wasser. Kooperation mit dem produzierenden Gewerbe für zirkuläres Produktdesign (38).
6. Schaffung von gemeinschaftlichen Werten („Shared Values“) für die lokalen Gemeinschaften und darüber hinaus, z. B. durch Fortbildungsmaßnahmen, Aufbau von Infrastruktur, Integration lokaler Zulieferer, Nutzung erneuerbarer Energien, Berücksichtigung der Nachbergbauphase anhand von innovativen Geschäftsmodellen (39).

Bei der Identifikation von CE Business Cases sollte idealerweise der gesamte Lebenszyklus eines Bergwerks (Prospektion, Exploration, Erschließung, Abbau, Stilllegung und Rekultivierung) berücksichtigt werden. Diese Sichtweise wird vom Aktionsplan der Europäischen Union (EU) für die CE unterstützt, der in seinen Plänen auch bewährte Verfahren für die Bewirtschaftung von mineralischen Abfällen untersucht hat (42). Je nach Status – Greenfield oder Brownfield – des Bergbauprojekts, variiert der Grad des Einflusses des Managements auf der Anwendung von Kreislaufaspekten.

Allgemein betrachtet kann die CE am Standort des Bergwerks auf zwei Arten erreicht werden: Erstens ist das Bergbauunternehmen Materiallieferant und initiiert die meisten Produktwertschöpfungsketten. Zweitens sind die Unternehmen zugleich industrielle Käufer und Nutzer von Produkten und Dienstleistungen auf dem Bergwerksgelände (technisches Betriebssystem einschließlich physischer Infrastruktur, Ausrüstung und weiterer Vermögenswerte, die auf dem Bergwerksgelände geschaffen und/oder genutzt werden). Mit dieser doppelten Perspektive entsteht eine Vielzahl von Möglichkeiten am Bergwerksstandort und darüber hinaus, wenn das Bergbauunternehmen Kooperationen eingeht, z. B. mit vorgelagerten Zulieferern und

anderen wichtigen Partnern im nachgelagerten Wertschöpfungsnetzwerk (39). Diese erweiterte Interpretation der CE für den Bergbau wird in Bild 1 veranschaulicht. Sie verbindet die Kreisläufe der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen.

Je nach Art der Ressource, dem Standort der Lagerstätte und den verfügbaren Optionen für eine Zusammenarbeit können CE-Initiativen auf der Mikroebene – dem gesamten Bergwerksgelände – der Mesoebene – industrielle Symbiosen innerhalb von sogenannten Öko-Industrieparks – und der Makroebene in der gesamten lokalen Gemeinschaft, der Region für eine optimierte Infrastruktur und Energienutzung umgesetzt werden. Je weiter die Netzwerkaktivitäten ausgebaut werden, desto mehr Business Cases werden im Regelfall entstehen.

3 Influencing factors of the CE in mining

Achieving the circular transition of the mining and metals sector entails redistributing resources, opportunities and power among actors and thus, will be a mid- to long-term project, contested and conflict-ridden. Shifting to a CE system requires overcoming barriers. In many cases radical innovation and socio-institutional change is necessary. Innovation on companies' side relates to technology, product and process design and revenue models and will therefore entail holistic business model innovation and the courage to do so. How can the circular transition of such an influential sector be accelerated? What is the role of mining companies and their decision makers? More specifically: What drivers can they leverage or what barriers must they overcome?

Many studies have investigated influential factors of the CE cross-sectoral, using different research methods (literature reviews, group discussions with stakeholders, expert interviews, international case studies) (43, 44, 45, 46). Due to the fact, that CE influencing factors do not act in isolation, but are intertwined, their interrelationships have been examined – on a regional level in the EU (47) and by mapping causality networks from the macro-level perspective (48). Also numerous studies already exist for the mining and metals sector which investigate different stages of the mining and metals value chain. Barriers and their intensity were evaluated (49), interrelationships were identified in an emerging economy context (50), light was shed on the status quo of large-scale mining companies (24). Technological issues – with a focus on mine wastes – have been reviewed and described many times, e.g., by Lottermoser (51), Gaustad (52), Kinnunen et al. (53, 54). Also further downstream some studies exist, especially with a focus on critical raw materials and derived products, e.g., high-performance permanent magnets (55, 56).

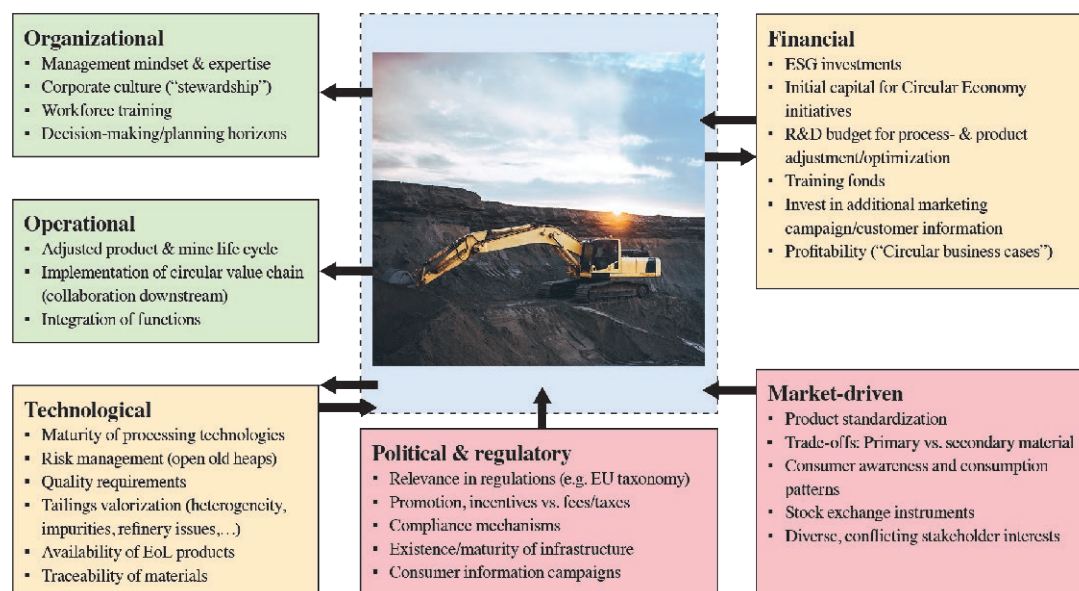


Fig. 2. Internal and external influencing factors of the Circular Economy in Mining (Own illustration based on (24, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56)).

Bild 2. Interne und externe Einflussfaktoren der Circular Economy im Bergbau (Eigene Darstellung basierend auf (24, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56)).
Photo/Foto: Korshunov, A. (<https://unsplash.com/de/fotos/NWByxwVN-J0>)

Mit den zuvor beschriebenen Prinzipien und Aktivitäten entlang des Bergbau-Lebenszyklus werden die drei Kernziele der CE erfüllt und ein holistischer Ansatz unterstützt:

1. Die produktive Lebensdauer von Ressourcen wird verlängert. Materialien und Produkte werden so lange wie möglich im System und mit ihrem höchsten Nutzen gehalten, um ihre Werthaltigkeit zu optimieren.
2. Abfälle und Umweltverschmutzung werden (bestmöglich) aus dem Wirtschaftssystem eliminiert, indem deren Auswirkungen vollständig kalkuliert und zusätzliche Werte durch Recycling, Wiederverwendung und Wiederverwertung der Materialien geschaffen werden.
3. Die Regeneration natürlicher Systeme wird gefördert, um wesentliche Funktionen (sauberes Wasser und saubere Luft, gesunde Böden, Kohlenstoffspeicherung und Hochwasserschutz) zu schützen (19, 39).

3 Einflussfaktoren der CE im Bergbau

Die zirkuläre Transition des Bergbausektors erfordert eine Umverteilung von Ressourcen, Geschäftsgelegenheiten und Macht zwischen den Akteuren und ist daher ein mittel- bis langfristiges konflikträchtiges Projekt, welches die Überwindung von Barrieren voraussetzt. In vielen Fällen werden radikale Innovationen und sozio-institutionelle Veränderungen erforderlich sein. Aus unternehmerischer Perspektive sind sowohl technologische als auch Produkt-, Dienstleistungs- und Prozessinnovationen notwendig sowie die Bereitschaft für neue Erlösmodelle. Demzufolge sind holistische Geschäftsmodellinnovationen erforderlich. Wie kann der zirkuläre Übergang eines so einflussreichen Sektors beschleunigt werden und welche Rolle spielen dabei die Bergbauunternehmen und ihre Entscheider? Genauer betrachtet: Welche Treiber können sie nutzen bzw. welche Hemmnisse müssen überwunden werden?

Zahlreiche Studien haben sich mit den Einflussfaktoren der CE sektorübergreifend und auf Basis verschiedener Forschungsmethoden (Literaturrecherchen, Gruppendiskussionen mit Stakeholdern, Experteninterviews, internationale Fallstudien) beschäftigt (43, 44, 45, 46). Da die Einflussfaktoren nicht isoliert wirken, wurden auch ihre Wechselbeziehungen untersucht – sowohl auf regionaler Ebene innerhalb der EU (47) als auch durch die Abbildung von Kausalitätsnetzwerken auf der Makroebene (48). Zudem existieren einige Studien für den Bereich des Bergbau- und Metallsektors und seine verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette.

Reviewing this extensive literature basis, a total of six categories of influencing factors can be identified, which are divided into internal as well as external factors, but also show intersections (Figure 2). ESG investments i. e. are influenced from inside and outside, as visualized by corresponding arrows. Miners can positively contribute to investments by innovating their business models towards ESG requirements (inside-out). On the other hand, companies cannot influence the development of investment criteria (outside-in). The highest system level, i. e. the macro-level of society as a whole, shows the greatest distance here from the level of action of the decision-makers in the mining company. This level can hardly be influenced by the company, unless it is reinforced by cross-company or cross-sector cooperation (meso level). Internal factors entail the categories “organizational”, “operational”, “financial” and “technological”. External factors comprise the clusters “political/regulatory” and “market-driven”. Characteristic for the mining sector is, that some boundary conditions exist, that are dependent on the deposit, e. g., location, and can therefore hardly be influenced although they can be attributed to the internal factors.

4 Circular business model innovation in mining – case studies

Alongside the predominantly singular recycling approaches of mining companies described at the beginning, there are fortunately already case studies of more comprehensive initiatives.

One of these is the “BHP Tailings Challenge”, which was launched in 2020. BHP mining operations in North and South America generate several million tons of copper tailings every year. These tailings consist mainly of ground rock, unrecoverable or uneconomic metals, chemicals, organic matter and effluent from the process used to extract the desired products from the ore. They usually leave the processing plant in a slurry form (diluted with water) and are often stored on the surface in tailings storage facilities (TSFs). BHP’s objective is to safely operate and close these TSFs. With this in mind, the company decided to focus on open innovation and launched an external competition with the aim of developing innovative solutions to repurpose these copper tailings and reduce the amount of tailings stored. The challenge met a great demand. From 19 countries 156 submissions were received, of which twelve were short-listed to proceed to the proof-of-concept stage. Among them was the project “recomine” of the Helmholtz Institute Freiberg (HIF) (57). In mid-2022, two finalists were selected to conduct pilot tests in a controlled environment. A collaboration between Auxilium Technology Group and Metso Outotech developed a solution that aimed to fully repurpose BHP’s copper tailings. Copper, as well as other valuable metals, can be recovered in this approach. Water is removed from the remaining tailings, which can subsequently be used as construction aggregate or are converted into an insulating material. A consortium of Americas Tailings Inc. and Advancing Materials Processing Inc. provided the second finalist, whose approach is to produce fertilizer from copper tailings. By the end of the fiscal year 2023, both teams had completed controlled testing stage. The results are currently being evaluated for on-site replicability (58).

Genex Power Ltd. is an Australian Securities Exchange (ASX)-listed company, focused on developing a portfolio of

Hierbei wurden Barrieren und ihre Intensität evaluiert (49), Zusammenhänge in einem Schwellenland identifiziert (50) sowie der Status quo großer Bergbauunternehmen untersucht (24). Technologische Fragestellungen – mit dem Fokus auf Bergbauabfälle – wurden vielfach aufgearbeitet und beschrieben, beispielsweise von Lottermoser (51), Gaustad (52), Kinnunen et al. (53, 54). Auch weiter stromabwärts existieren einige Studien, insbesondere mit Schwerpunkt auf kritischen Rohstoffen wie Seltene Erden und ihre Endprodukte, z.B. Hochleistungspermanente Magnete (55, 56).

Bei der inhaltlichen Auswertung dieser umfangreichen Literaturbasis lassen sich insgesamt sechs Kategorien von Einflussfaktoren identifizieren, die sich in interne sowie externe Faktoren gliedern, aber Schnittmengen aufweisen (Bild 2). Beispielsweise werden ESG-Investitionen sowohl intern als auch extern beeinflusst, wie durch entsprechende Pfeile symbolisiert wird. Bergbauunternehmen können einen positiven Beitrag zu Investitionen leisten, indem sie ihre Geschäftsmodelle in Bezug auf die ESG-Integration innovieren (inside-out). Andererseits können die Unternehmen die Entwicklung von Investitionskriterien nicht beeinflussen (outside-in). Die höchste Systemebene, also die gesamtgesellschaftliche Makroebene, weist hier die größte Distanz zur Handlungsebene der Entscheidenden im Bergbauunternehmen auf. Diese Ebene kann vom Unternehmen kaum beeinflusst werden, es sei denn, es kommt ggf. zu Verstärkungen durch unternehmens- bzw. sektorübergreifende Kooperationen (Mesoebene). Als interne Faktoren wurden die Kategorien „organisationsgetrieben“, „operativ“, „finanziell“ sowie „technologisch“ abgeleitet. In Bezug auf externe Faktoren konnten die Kategorien „politisch/regulierend“ sowie „marktgetrieben“ identifiziert werden. Charakteristisch für den Bergbausektor ist, dass einige Randbedingungen existieren, die von der Lagerstätte abhängig sind, z. B. der Standort, und daher kaum beeinflusst werden können, obwohl sie den internen Faktoren zuzuschreiben sind.

4 Zirkuläre Geschäftsmodellinnovationen im Bergbau – Fallbeispiele

Neben den eingangs beschriebenen überwiegend singulären Recyclingansätzen von Bergbauunternehmen existieren erfreulicherweise bereits Fallbeispiele für umfassendere Initiativen.

Eines von diesen ist die „BHP Tailings Challenge“, die im Jahr 2020 gestartet wurde. In den BHP-Bergbaubetrieben in Nord- und Südamerika fallen jährlich mehrere Millionen Tonnen Rückstände aus der Verarbeitung von Kupfererzen an. Sie bestehen im Wesentlichen aus gemahlenem Gestein, nicht rückgewinnbarem bzw. unwirtschaftlichen Metallen, Chemikalien, organischen Stoffen sowie Abwässern aus dem Prozess, der zur Gewinnung der gewünschten Produkte aus dem Erz eingesetzt wird. Die sogenannten Tailings verlassen die Aufbereitungsanlage in der Regel in Form von Schlämmen (mit Wasser verdünnt) und werden häufig an der Oberfläche der Bergemateriallager (Tailings Storage Facilities – TSF) gelagert. Die Zielsetzung von BHP besteht im sicheren Betrieb und der Schließung dieser TSF. Vor diesem Hintergrund entschied sich das Unternehmen, auf „Open Innovation“ zu setzen und startete einen externen Wettbewerb mit dem Ziel, innovative Lösungen zu entwickeln, um diese Kupferabfälle wiederzuverwenden und die Menge der lagernden Abraumhalden zu verringern. Der Wettbewerb stieß auf große Nachfrage. Aus 19 Ländern gingen 156 Bewerbungen ein, von denen zwölf in die engere Auswahl genommen wurden, um in die Proof-of-Concept-Phase zu gelangen.

renewable energy generation and storage projects across Australia. Although it is not a mining company, its flagship project, the “Kidston Pumped Storage Hydro”, can be cited as another example of repurposing abandoned mines as part of the CE. In this case, the former mine sites of the Kidston gold deposit in northern Queensland are being used as energy storage systems, in this case the former upper and lower mining pits, which are used to generate hydroelectric power from solar energy. During times of peak demand, water discharges from the upper reservoir to the lower reservoir through reversible pump turbines to generate up to 8 h of continuous electricity. The project, which will be operational in 2025, is the first pumped hydro project in Australia in several decades and the first to be developed by the private sector. According to its own data, it is the third largest electricity storage facility in Australia (59). This case study presents interesting opportunities for cooperation with the mining sector or for long-term business model innovations.

Industrial symbiosis refers to another promising business model pattern in the context of the CE that promotes collaborations beyond the mine gate. It involves transforming waste from one sector into a product or material that is useful to another sector. Industrial symbiosis works particularly well in industrial parks, where companies from different sectors operate in close proximity. The Kokkola Industrial Park (KIP) in Western Finland is a good example of promoting the CE of an entire region. The collaboration between companies and industries is based on material and resource flows from processes that serve as fuels for others. Boliden’s Kokkola zinc smelter, e.g., provides excess heat and steam to generate heat and electricity for buildings in the region. The heat and steam would otherwise be lost, but in this case equates to the energy consumption of about 16,000 households. The energy is also classified as carbon-free because the main fuel in the roasting process is a zinc concentrate that contains almost no carbon. Further, Boliden turns sulphuric acid, a by-product of mining, into a raw material, which is needed by other companies in the KIP. The sulphuric acid supplied by Boliden’s sulphuric acid plant is delivered via pipelines to neighboring industrial partners, reducing transportation-related emissions and costs (60).

5 Conclusion

A growing number of companies across all industries have recognized the CE and its circular strategies as an opportunity to reduce costs, create additional revenues, and manage risks – particularly in relation to ESG criteria and legislation, as well as climate change and decarbonization targets.

This paper highlights the relevance of the CE in the mining sector and points out its extensive potential for ESG-oriented business model innovation. Building on a contextual definition and the derivation of key principles, the paper identified internal as well as external influencing factors and revealed implementation opportunities for mining managers based on practical case studies. With this information base, it contributes to the operationalization of the CE in the mining sector.

The realization of the energy transition is resource-intensive and must therefore build on a combination of the extraction of primary and secondary raw materials. Studies reveal that

Unter ihnen das Projekt „recomine“ des Helmholtz-Instituts Freiberg (HIF) (57). Mitte 2022 wurden zwei Finalisten gekürt, um Pilotversuche in einer kontrollierten Umgebung durchzuführen. Es handelte sich um die Auxilium Technology Group in Kooperation mit Metso Outotech, deren Lösung auf die vollständige Wiederverwendung der Kupferabfälle abzielte. Kupfer sowie andere wertvolle Metalle können bei diesem Ansatz zurückgewonnen werden. Den verbleibenden Rückständen wird das Wasser entzogen, sodass sie in der Folge als Bauzuschlagstoff verwendet oder in ein Isoliermaterial umgewandelt werden können. Ein Konsortium aus der Americas Tailings Inc. und der Advancing Materials Processing Inc. stellte den zweiten Finalisten, dessen Ansatz darin besteht, Düngemittel aus Kupferabfällen herzustellen. Zum Ende des Geschäftsjahrs 2023 hatten beide Teams die kontrollierten Tests abgeschlossen. Die Ergebnisse werden derzeit auf Replizierbarkeit vor Ort überprüft (58).

Genex Power Ltd. aus Australien ist ein börsennotiertes Unternehmen, das sich auf die Entwicklung eines Portfolios von Projekten zur Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energie in Australien fokussiert. Wenngleich es kein Bergbauunternehmen ist, kann sein Flaggschiffprojekt „Kidston Pumped Storage Hydro“ als ein weiteres Beispiel zur Neuwidmung von stillgelegten Bergwerken im Rahmen der CE angeführt werden. In diesem Fall werden die ehemalige Bergwerksgelände der Kidston Goldlagerstätte im Norden Queensland als Energiespeichersysteme genutzt, hier in Form von Ober- und Unterbecken, mit deren Hilfe aus Sonnenenergie Wasserkraft erzeugt wird. In Zeiten des Spitzenbedarfs fließt das Wasser aus dem oberen Reservoir über reversible Pumpturbinen in das untere Reservoir, um bis zu 8 h ununterbrochen Strom zu erzeugen. Das Projekt, welches 2025 in Betrieb gehen wird, ist das erste Pumpspeicherkraftwerksprojekt in Australien seit mehreren Dekaden und zugleich das erste, das vom privaten Sektor entwickelt wurde. Laut eigenen Angaben ist es der drittgrößte Stromspeicher Australiens (59). Hier zeigen sich interessante Möglichkeiten für Kooperationen mit dem Bergbausektor bzw. für langfristige Geschäftsmodellinnovationen.

Die industrielle Symbiose bezeichnet ein weiteres, vielversprechendes Geschäftsmodellmuster im Kontext der CE, das über das Bergwerkstor hinaus Kollaborationen fördert. Dabei werden die Abfälle eines Sektors in ein Produkt oder Material verwandelt, das für eine andere Branche von Nutzen ist. Industrielle Symbiose funktioniert insbesondere in Industrieparks, in denen Unternehmen verschiedener Branchen in räumlicher Nähe agieren. Der Kokkola Industrial Park (KIP) in Westfinland ist ein gutes Beispiel der Förderung der CE einer ganzen Region. Die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Industrien begründet sich auf der Verwertung von Abfällen aus Prozessen, die als Brennstoffe für andere dienen. So liefert die Zinkhütte des Unternehmens Boliden in Kokkola überschüssige Wärme und überschüssigen Dampf zur Erzeugung von Wärme und Strom für die Gebäude in der Region. Die sonst verlorene Wärme und der Dampf entsprechen dem Energieverbrauch von etwa 16.000 Haushalten. Die Energie wird zudem als kohlenstofffrei eingestuft, da der Hauptbrennstoff im Röstverfahren ein Zinkkonzentrat ist, das nahezu keinen Kohlenstoff enthält. Weiterhin verwandelt Boliden Schwefelsäure, ein Nebenprodukt des Bergbaus, in einen Rohstoff, der von anderen Unternehmen im KIP benötigt wird. Die von Bolidens Schwefelsäureanlage gelieferte Schwefelsäure wird über Pipelines an benachbarte Industriepartner geliefert und reduziert somit transportbedingte Emissionen und Kosten (60).

the implementation of CE is successful when it is flanked by a sound business case (61). These business cases do not happen by chance but are the result of active identification and innovation. The CE concept supports decision-makers in actively seeking and striving to realize additional value creation and capture innovation rents. Sustainability-oriented business model innovation is considered the prime technique for miners to integrate ESG criteria into their core business, to proactively address regulatory requirements and to successfully position themselves in the competitive environment in the long term. Circular business model patterns are among the most promising approaches in this context (1, 62).

The holistic design can be realized with the aid of the CE principles for mining, which consider the mining life cycle from raw material extraction to mining waste recycling and link it to the cycle of consumer goods.

5 Fazit

Eine wachsende Zahl von Unternehmen aller Branchen hat die CE und ihre zirkulären Strategien als Gelegenheit zur Kostensenkung, zur Generierung zusätzlicher Erträge und als Mittel zum Risikomanagement – insbesondere in Hinblick auf ESG-Kriterien und Gesetzgebung sowie auf den Klimawandel und die Dekarbonisierungsziele – erkannt.

Dieser Beitrag verdeutlicht die Relevanz der CE im Bergbausektor und zeigt deren umfangreichen Potentiale zur ESG-orientierten Geschäftsmodellinnovation auf. Aufbauend auf einer kontextuellen Definition und der Ableitung von Schlüsselprinzipien, identifizierte der Beitrag interne sowie externe Einflussfaktoren und offenbarte anhand von praktischen Fallbeispielen Umsetzungsmöglichkeiten für Bergbaumanager. Mit dieser Informationsbasis leistet er einen Beitrag zur Operationalisierung der CE im Bergbausektor.

Die Realisierung der Energiewende ist ressourcenintensiv und muss sich daher zwingend auf eine Kombination aus dem Abbau von Primär- und Sekundärrohstoffen stützen. Studien zeigen, dass die Umsetzung der CE erfolgreich ist, wenn sie von soliden Business Cases flankiert wird (61), die jedoch nicht zufällig passieren, sondern das Ergebnis aktiver Identifikation und Innovation sind. Das CE-Konzept unterstützt Entscheider bei der aktiven Suche und dem Bestreben, zusätzliche Wertschöpfung zu realisieren und Innovationsrenten abzuschöpfen. Nachhaltigkeitsorientierte Geschäftsmodellinnovationen gelten grundsätzlich als die wichtigste Technik für Bergbauunternehmen, um ESG-Kriterien in das Kerngeschäft zu integrieren, Regulierungsanforderungen proaktiv zu adressieren und sich erfolgreich und langfristig im Wettbewerbsumfeld zu positionieren. Zirkuläre Geschäftsmodellmuster gehören zu den vielversprechenden Ansätzen in diesem Zusammenhang (1, 62).

Die holistische Auslegung kann mithilfe der CE-Prinzipien für den Bergbau erfolgen, die den bergbaulichen Kreislauf von der Rohstoffgewinnung bis zur Bergbauabfallverwertung berücksichtigen und mit dem Kreislauf der Konsumgüter verbinden.

References / Quellenverzeichnis

- (1) EY (2023): Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2024. London, UK: Ernst & Young Global Limited. Abgerufen am 14. Oktober 2023 von https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/mining-metals/ey-top-10-business-risks-and-opportunities-for-mining-and-metals-in-2024-v3.pdf
- (2) Cãmara, P. (2022): The Systemic Interaction Between Corporate Governance and ESG. In: P. Cãmara, F. Morais: The Palgrave Handbook of ESG and Corporate Governance (pp 3–40). Cham, CH: Springer Nature. doi:10.1007/978-3-030-99468-6.
- (3) Lacy, P.; Hughes, M.; Hull, E. (2022): Reimagining the Agenda. Unlocking the Global Pathways to Resilience, Growth, and Sustainability for 2030. United Nations Global Compact, Accenture. Von <https://www.accenture.com/us-en/insights/sustainability/ungc> abgerufen.
- (4) Svobodova, K.; Owen, J.; Harris, J.; Worden, S. (2020): Complexities and contradictions in the global energy transition: A re-evaluation of country-level factors and dependencies. Applied Energy (Vol. 265), S. 114778. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114778.
- (5) Buckley, T. (2019): Over 100 Global Financial Institutions Are Exiting Coal, With More to Come. Lakewood, US: Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). Von <https://ieefa.org/resources/over-100-global-financial-institutions-are-exiting-coal-more-come> abgerufen.
- (6) Jacobs, K.; Keenan, S.; Cranmer, F. (2022): How investors view mining's new role as a champion of decarbonization. Accenture. Von <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-173/accenture-mining-role-champion-of-decarbonization.pdf#zoom=40> abgerufen.
- (7) Wunder, T. (Mai 2022): CSRD und EU-Taxonomie für mehr Nachhaltigkeit. In: Führung + Organisation (zfo), S. 336–339. Von <https://gfo-web.de/veroeffentlichungen/artikel/238-csrd-und-eu-taxonomie-fuer-mehr-nachhaltigkeit-zfo-toolkit> abgerufen.
- (8) Kuykendall, T. (2021): SPGlobal. Von Path to net-zero: Drive to lower emissions pays in metals, mining sector. Von <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/path-to-net-zero-drive-to-lower-emissions-pays-in-metals-mining-sector-67951431> abgerufen.

- (9) Weenk, E.; Henzen, R. (2021): Mastering the Circular Economy. A practical approach to the circular business model transformation. London, UK; New York, US: Kogan Page Limited.
- (10) Lacy, P.; Rutqvist, J. (2015): Waste to Wealth. The Circular Economy Advantage. New York, US: Palgrave MacMillan. doi:10.1057/9781137530707.
- (11) Lacy, P., Long, J.; Spindler, W. (2020): The Circular Economy Handbook. Realizing the Circular Advantage. London, UK: Palgrave Macmillan (Springer Nature). doi:10.1057/978-1-349-95968-6.
- (12) PwC (2021): Circular finance: The financial industry's role as a key enabler of sustainable transformation. Enabling the transition to a circular economy. Von <https://www.pwc.ch/en/insights/sustainability/circular-finance.html#download> abgerufen.
- (13) FinanCE (2018): Circular Economy Finance Guidelines. Amsterdam: ABN AMRO; ING; Rabobank. Von <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/toolkits-guidelines/circular-economy-finance-guidelines> abgerufen.
- (14) EMF (2022): Financing the circular economy. Von Financing and investing activity has grown rapidly across asset classes and sectors. Von <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/finance/overview> abgerufen.
- (15) Koumbarakis, A. (2021): Circular finance – the fulcrum of a circular economy. Von PwC Research and insights: <https://www.pwc.ch/en/insights/fs/circular-finance-the-fulcrum-of-a-circular-economy.html> abgerufen.
- (16) Kalin-Seidenfaden, M.; Wheeler, W. (2022): Mine Wastes and Water, Ecological Engineering. Cham, CH: Springer Nature Switzerland AG. doi:10.1007/978-3-030-84651-0.
- (17) von Hauff, M. (2023): Grundwissen Circular Economy. Vom internationalen Nachhaltigkeitskonzept zur politischen Umsetzung. München: UVK Verlag. doi:<https://doi.org/10.36198/9783838559889>.
- (18) Walmsley, T.; Ong, B.; Klemes, J. J.; Tan, R.; Varbanov, P. (2019): Circular Integration of processes, industries, and economies. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 107, pp 507 – 515. doi:10.1016/j.rser.2019.03.039.
- (19) Blomsma, F.; Brennan, G. (2019): Circularity Thinking: Systems thinking for circular product and business model (re)design – Identifying waste flows and redirecting them for value creation and capture. In: M. Charter, Designing for the Circular Economy. Strategy and Implementation for the Next Generation of Sustainable Organizations, pp 133 – 147. London, UK: Routledge, Taylor & Francis Ltd. doi:10.4324/9781315113067-13.
- (20) Homrich, A.; Galvão, G.; Gamboa Abadia, L.; Monteiro de Carvalho, M. (2018): The Circular Economy Umbrella: Trends and Gaps on Integrating Pathways. In: Journal of Cleaner Production (175), pp 525 – 543. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.064.
- (21) Schroeder, P.; Anggraeni, K.; Weber, U. (2018): The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. In: Journal of Industrial Ecology, 23 (1), pp 77 – 95. doi:10.1111/jiec.12732.
- (22) Parra, C.; Lewis, B.; Ali, S. (2021): Mining, Materials and the Sustainable Development Goals (SDGs). 2030 and Beyond. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- (23) RMF (2023): RMI Report 2022. Ontwerp, NL: Omdat Ontwerp. Von <https://2022.responsibleminingindex.org/en/summary> abgerufen.
- (24) Upadhyay, A.; Laing, T.; Kumar, V.; Dora, M. (2021): Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. In: Resources Policy (Vol. 72), p 102037. doi:10.1016/j.resourpol.2021.102037.
- (25) Ruokonen, E.; Temmes, A. (2019): The approaches of strategic environmental management used by mining companies in Finland. In: Journal of Cleaner Production (Vol. 210), The approaches of strategic environmental management used by mining companies in Finland. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.273.
- (26) McCarney, G.; Donin, G.; Hossaini, S.; Patel, S.; Hossain, N.; Cairns, S. (2021): Primary Materials in the Emerging Circular Economy. Ottawa: Smart Prosperity Institute; University of Ottawa. Von https://institute.smartprosperity.ca/sites/default/files/emerging_circular_economy_report.pdf abgerufen.
- (27) Lèbre, É.; Corder, G.; Golev, A. (2017): The Role of the Mining Industry in a Circular Economy. A Framework for Resource Management at the Mine Site Level. In: Journal of Industrial Ecology, Vol. 21 (No. 3), pp 662 – 672. doi:10.1111/jiec.12596.
- (28) EMF (2013): Towards the Circular Economy 1: Economic and business rationale for an accelerated transition. Isle of Wight, UK. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
- (29) Hund, K.; La Porta, D.; Fabregas, T.; Laing, T.; Drexhage, J. (2020): Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. International Bank for Reconstruction and Development, Climate-Smart Mining Facility. Washington DC, US: The World Bank. Von <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf> abgerufen.
- (30) Church, C.; Crawford, A. (2018): Green Conflict Minerals: The fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy. Winnipeg, Canada: International Institute for Sustainable Development (IISD). Von <https://www.iisd.org/system/files/publications/green-conflict-minerals.pdf> abgerufen.
- (31) Lèbre, É.; Stringer, M.; Svobodova, K.; Owen, J.; Kemp, D.; Cote, C.; . . . Valenta, R. (2020): The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. In: Nature Communications, 11, p 4823. doi:10.1038/s41467-020-18661-9.
- (32) WEF (2019): The Next Frontier: Natural Resource Targets. Shaping a Competitive Circular Economy within Planetary Boundaries. Genf, CH. Retrieved November 10, 2020, from http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Next_Frontier_Natural_Resource_Targets_Report.pdf
- (33) UNEP (2019): Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want. Paris, F: UNEP. Von https://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/unep_252_global_resource_outlook_2019_web.pdf abgerufen.
- (34) CGR (2022): The Circularity Gap Report 2022. Amsterdam, NL: Circle Economy. Retrieved August 15, 2022, from <https://www.circularity-gap.world/2022#Download-the-report>
- (35) Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; . . . Sonnemann, G. (2011a): Recycling Rates of Metals. A Status Report. Paris, F: Global Metal Flows Working Group, International Panel on Sustainable Resource Management of UNEP. Retrieved November 20, 2020, from <https://www.unep.org/resources/report/recycling-rates-metals-status-report>
- (36) Swain, B. (2017): Recovery and recycling of lithium: A review. In: Separation and Purification Technology, pp 388 – 403. doi:10.1016/j.seppur.2016.08.031.
- (37) Tayebi-Khorami, M.; Edraki, M.; Corder, G.; Golev, A. (2019): Re-Thinking Mining Waste Through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. In: Minerals (9), pp 286 – 298. doi:10.3390/min9050286.
- (38) Bakker, C.; Den Hollander, M.; van Hinte, E.; Zijlstra, Y. (2019): Products that Last. Product Design for Circular Business Models. Delft, NL: BIS Publishers.
- (39) Barreto, A.; Barreto, M.; Chovan, K. (2021): Towards a Circular Economy Approach to Mining Operations. Key Concepts, Drivers and Opportunities. Canada: Enviro Integration Strategies Inc., MERG.

- (40) Hagelüken, C. (2014): Recycling of (critical) metals. In: G. Gunn, *Critical Metals Handbook*, pp 41 – 81. Chichester (UK): John Wiley & Sons, Ltd.
- (41) Meskers, C. E. (2008): Coated Magnesium – Designed for Sustainability. Technische Universität Delft.
- (42) EC (2019): Study supporting the elaboration of guidance on best practices in the Extractive Waste Management Plans. Final Report. Brussels, B: European Commission. Von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5a29b5e3-df3e-11e9-9c4e-01aa75ed71a1> abgerufen.
- (43) de Jesus, A.; Mendonca, S. (2017): Lost in Transition? Drivers and Barriers in the Eco-innovation Road to the Circular Economy. In: *Ecological Economics* (145), pp 75 – 89. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001>.
- (44) Houston, J.; Casazza, E.; Briguglio, M.; Spiteri, J. (2018): Stakeholder Views Report: Enablers and Barriers to a Circular Economy. Brussels, Malta: CSR Europe; University of Malta. Abgerufen am 3. October 2022 von https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/r2pi_-_enablers_and_barriers_to_a_circular_economy_1.pdf
- (45) Ranta, V.; Aarikka-Stenroos, L.; Ritala, P.; Mäkinen, S. (2018): Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe. In: *Resources, Conservation & Recycling* (135), pp 70 – 82. doi:10.1016/j.resconrec.2017.08.017.
- (46) Tura, N.; Hanski, J.; Ahola, T.; Stahle, M.; Piiparinen, S.; Valkokari, P. (2019): Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. In: *Journal of Cleaner Production* (Vol. 212), pp 90 – 98. doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.202.
- (47) Kirchherr, J.; Piscicelli, I.; Bour, R.; Kostense-Smit, E.; Muller, J.; Huibrechtse-Truijens, A.; Hekkert, M. (2018): Barriers to the circular economy: evidence from the European Union (EU). In: *Ecological Economics* (150), pp 264 – 272. doi:10.1016/j.ecolecon.2018.04.028.
- (48) Gue, I.; Promentilla, M.; Tan, R.; Ubando, A. (2020): Sector perception of circular economy driver interrelationships. In: *Journal of Cleaner Production* (Vol. 276), p 123204. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123204.
- (49) Singh, R. K.; Kumar, A.; Garza-Reyes, J. A.; de Sá, M. M. (2020): Managing operations for circular economy in the mining sector: an analysis of barriers intensity. In: *Resources Policy* (Vol. 69), p 101879. doi:10.1016/j.resourpol.2020.101879.
- (50) Gedam, V. V.; Raut, R. D.; Lopes de Sousa Jabbour, A. B.; Agrawal, N. (2021): Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. In: *Resources Policy* (Vol. 74), p 102279. doi:10.1016/j.resourpol.2021.102279.
- (51) Lottermoser, B. (2011): Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes. In: *Elements* (Vol. 7), pp 405 – 410. doi:10.2113/gselements.7.6.405.
- (52) Gaustad, G.; Fleuriault, C.; Gökelma, M.; Howarter, J.; Kirchain, R.; Ma, K.; et al. (2019): REWAS 2019. Manufacturing the Circular Materials Economy. M. & The Minerals (Hrsg.). Cham, CH: Springer Nature Switzerland AG. doi:10.1007/978-3-030-10386-6.
- (53) Kinnunen, P.; Karhu, M.; Yli-Rantala, E.; Kivikytö-Reponen, P.; Mäkinen, J. (2022): A review of circular economy strategies for mine tailings. In: *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 8), p 100499. doi:10.1016/j.clet.2022.100499.
- (54) Kinnunen, P.; Kaksonen, A. (2019): Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization. In: *Journal of Cleaner Production* (228), pp 153 – 160. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.171.
- (55) Prats Raspini, J.; Bonfante, M.; Cúnico, R.; Alarcon, O.; Campos, L. (2022): Drivers and barriers to a circular economy adoption: a sector perspective on rare earth magnets. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1 – 13. doi:10.1007/s10163-022-01424-7.
- (56) Jensen, P.; Purnell, P.; Velenturf, A. (2020): Highlighting the need to embed circular economy in low carbon infrastructure decommissioning: The case of offshore wind. In: *Sustainable Production and Consumption* (24), pp 266 – 280. doi:10.1016/j.spc.2020.07.012.
- (57) Engelhardt, J. (2023): Strategic Science Management meets Exploration and Processing. Presentation Circular Economy Workshop. Freiberg: Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF).
- (58) BHP (2023): BHP News/Case Studies. Abgerufen am 25. August 2023 von BHP tailings challenge: Repurposing copper tailings: <https://www.bhp.com/news/case-studies/2023/08/bhp-tailings-challenge>
- (59) Genex, G. P. (2023): Genex – Renewable Energy on Tap. Kidston Clean Energy Hub Factsheet. Von https://genexpower.com.au/wp-content/uploads/2023/07/230707_Kidston-Factsheet-June-23_v1_FINAL.pdf abgerufen.
- (60) Boliden, B. G. (2023): Boliden Sustainability Case Studies. Contributing to a circular economy at Kokkola. Von <https://www.boliden.com/sustainability/case-studies/ce-kokkola> abgerufen.
- (61) Ghisellini, P.; Cialani, C.; Ulgiati, S. (2016): A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. In: *Journal of Cleaner Production* (Vol. 114), pp 11 – 32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- (62) Drusche, O.; Krause, S.; Kretschmann, J.; Mischo, H.; Ayres da Silva, A. (2021): Business Models for Sustainability. In: *Ökologisches Wirtschaften* 36(4), S. 43 – 50. doi:10.14512/OEW360443.

Authors / Autoren

Stefanie Krause M. Sc., Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, Prof. Dr. rer. pol. Jürgen Kretschmann, RWTH Aachen University, Aachen