

Emerging Global Trends in the Extractive Industry – International Potential and Future Roles of Remediation Expertise from Germany

Never in history were more mineral resources extracted than at present. In the past 20 years alone global metal ore extraction doubled. If current growth rates continue, more metals will be mined by 2028 than from the beginning of humankind to 2013. This exploding demand is set to rise even further as fossil-fuel based economies transform into low-carbon societies. Along with expanded mining, inevitably, associated environmental impacts are also poised to increase. These impacts may be even more severe than in the past as future deposits are more difficult to mine, have lower grades, create more waste, need more water, more energy and larger hidden material flows to be exploited. Apart from driving up commodity prices this also increases an already fierce competition for land, water and energy, especially in the global south. Like in the past, the brunt of the global hunger for resources is borne mostly by low- and middle-income countries that are least equipped to cope with it. Unsurprisingly, acceptance levels for mining are at a historic low, not only in affluent countries where the NIMBY attitude already prevails for some time, but also in developing countries that used to welcome mining jobs. Communities withholding

“social licenses to operate” (SLO) are now regarded as single most important business risks for global mining, exacerbating already existing supply risks. Consequences include ever-growing lists of metals and minerals regarded as “critical” by importing countries as well as a rise in resource nationalism and associated geopolitical tensions. Much of the public resistance towards expansion of mining is rooted in poor, or even completely lacking, remediation of closed mines and the toxic long-term impacts of contaminated legacy sites. Based on the high standards applied in remediating large mining districts over the past three decades in the former GDR, Germany is now recognised as a leader setting international benchmarks in rehabilitating mining-impacted land. This paper argues that the accumulated know-how in Germany is an important tool for helping address the global resource dilemma. Examples from Wismut GmbH, Chemnitz/Germany, are used to illustrate how remediation priorities originally applied may be adapted to changed needs and priorities brought about by emerging global trends that are outlined in the first part of the paper.

Neue globale Trends in der Rohstoffindustrie – Internationales Potential und die zukünftige Rolle der deutschen Sanierungsexpertise

Noch nie wurden so viele mineralische Rohstoffe gefördert wie heute. Allein in den vergangenen 20 Jahren hat sich die weltweite Metallerganzgewinnung verdoppelt. Sollte das derzeitige Wachstum weiter andauern, wird bis 2028 mehr Metall gefördert werden als vom Anbeginn der Menschheit bis zum Jahr 2013. Dieser explodierende Bedarf wird noch weiter steigen, da sich Volkswirtschaften, die bisher auf fossilen Brennstoffen basierten, zu Gesellschaften mit geringem CO₂-Ausstoß entwickeln. Neben der Erweiterung des Bergbaus werden auch die damit verbundenen unvermeidbaren Auswirkungen auf die Umwelt zunehmen. Diese Auswirkungen können unter Umständen noch größer sein, als in der Vergangenheit, da die Lagerstätten zukünftig schwieriger zu erschließen und von geringerem Wertstoffgehalt sind, mehr Abfall generieren und zur Gewinnung mehr Wasser, Energie und größere versteckte Materialflüsse benötigen. Neben den daraus resultierenden höheren Rohstoffpreisen steigt auch der ohnehin schon starke Wettbewerb um Boden, Wasser und Energie, vor allem im globalen Süden. Wie schon in der Vergangenheit wird die Hauptlast des globalen Ressourcenhungers hauptsächlich von Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen getragen, die am wenigsten dafür gerüstet sind. Es ist nicht überraschend, dass die Akzeptanz des Bergbaus historisch niedrig ist, nicht nur in wohlhabenden Ländern, in denen seit geraumer Zeit das St.-Florian-Prinzip vorherrscht, sondern auch in Entwicklungs-

ländern, die den Bergbau früher willkommen hießen. Gemeinden, die soziale Betriebslizenzen, sogenannte Social Licences to Operate (SLO), vorenthalten, gelten aktuell als das größte Unternehmensrisiko für den globalen Bergbau und verschlimmern schon vorhandene Versorgungsprobleme. Zu den Folgen gehören ständig wachsende Listen von Metallen und Mineralen, die von Importländern als „kritisch“ angesehen werden, sowie ein Anstieg des Ressourcennationalismus und die damit verbundenen geopolitischen Spannungen. Ein Großteil des öffentlichen Widerstands gegen die Ausweitung des Bergbaus wurzelt in der schlechten oder sogar fehlenden Sanierung stillgelegter Bergwerke und den toxischen Langzeitfolgen kontaminierter Altlasten. Aufgrund der hohen Standards, die in den letzten 30 Jahren bei der Sanierung großer Bergbaugebiete in der ehemaligen DDR angewendet wurden, gilt Deutschland heute als Marktführer, der internationale Maßstäbe in der Sanierung von Bergbauflächen setzt. Diese Abhandlung erörtert, weshalb das in Deutschland angesammelte Know-how ein wichtiges Werkzeug bei der Lösung des globalen Rohstoffdilemmas ist. Beispiele der Wismut GmbH, Chemnitz, veranschaulichen, wie die bisher angewendeten Sanierungsprioritäten an die neuen Anforderungen und Prioritäten angepasst werden können, die durch die aktuellen globalen Trends verursacht werden. Diese Trends werden im ersten Teil der Arbeit dargestellt.

1 Emerging global trends in mining: a brief overview

1.1 Unprecedented scale of mineral extraction

As technology improved over the course of human history so did the number metals and elements used, ranging from times by types used: three for windmills in the 1700s to nine in steam engines of the 1800s and 20 in cars of the 1900s to 36 in solar panels, wind turbines and modern cars (1). From 1998 to 2008 the global resource trade increased by a factor of six (2), while the total amount of metal ore extracted from 2000 to 2019 doubled (3). In large parts this exploding metal demand was driven by the economic growth of China accounting for 50% of the global Fe consumption. If the current rise in demand for base metals of 5% per annum continues over the next 15 years, the global metal production in that comparably short period of time will equal that of the entire production from the advent of humankind right through to 2013 (4). In addition to more minerals to be extracted there is also a corresponding rise in energy required. Currently, some 10% of the world energy consumption is used for extracting and processing mineral resources, which is well over three times the annual electricity consumption of Germany (4, 5). Vidal et al. (4) propose that not lack of minerals, but a lack of energy needed to mine them may eventually become the limiting factor for transforming into low-carbon economies, further stressing the importance of the much-explored energy-extractive resource nexus including the geopolitical implications (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13).

1.2 Future expansion of global mining

Fuelled by the unprecedented rise in demand for mineral resources to feed the global transformation towards a low-carbon society, the extraction of mineral resources – especially battery and high-tech metals for the energy and transport sectors – is set to increase significantly. This is mainly due to the fact that the number and amount of minerals and metals required for generating renewable energy and for E-mobility are significantly higher than that of the old technologies they replace. Compared to a conventional car, e.g., electric vehicle require on average approximately seven times more metal. In terms of energy infrastructure the spread is even larger, with off-shore wind turbines, e.g., consuming 15 times more metal per energy unit produced than gas turbines (11). For equivalent installed capacity solar and wind facilities require up to 15 times more concrete, 90 times more Al, 50 times more Fe, Cu and glass compared to fossil fuels (4). For 1 MW of wind energy, e.g., 1,15 t Cu, 3 t Al and 130 t of ferrous metals are needed resulting in some 150 t of metal for a typical wind farm (14), while a 1 km² solar park contains 11 t of Ag. Consequently, the demand for major metals (such as iron, manganese, aluminium etc.) between 2010 and 2050 is predicted to double or even quadruple (6). This results in a vicious circle where one non-renewable resource (fossil fuel) is replaced by another (mineral resources) (4).

1.3 Worsening environmental impacts

One consequence of expanding mining operations is the associated increase of adverse environmental and social impacts, including mine waste-related pollution, increasing scarcity and competition for water, threats to biodiversity, habitat clearance, competing land use, soil erosion as well as adverse impacts on so-

1 Aufkommende globale Trends im Bergbau: ein kurzer Überblick

1.1 Beispielloser Ausmaß der Mineralgewinnung

Mit der Verbesserung der Technologie im Lauf der Menschheitsgeschichte stieg auch die Zahl der verwendeten Metalle und Elemente: von drei Materialien in Windmühlen um 1700 über neun in Dampfmaschinen um 1800 und 20 in Autos um 1900 bis hin zu 36 verschiedenen Materialien in Sonnenkollektoren, Windturbinen und modernen Autos (1). Von 1998 bis 2008 hat sich der weltweite Rohstoffhandel versechsfacht (2), während sich die Gesamtmenge der geförderten Metallerze von 2000 bis 2019 verdoppelt hat (3). Dieser explodierende Metallbedarf ist zu einem großen Teil auf das Wirtschaftswachstum Chinas zurückzuführen, auf das 50% des weltweiten Eisenverbrauchs entfällt. Wenn sich der derzeitige Anstieg der Nachfrage nach Basismetallen um 5%/a in den nächsten 15 Jahren fortsetzt, wird die weltweite Metallproduktion in diesem vergleichsweise kurzen Zeitraum der gesamten Produktion von der Entstehung der Menschheit bis 2013 entsprechen (4). Zusätzlich zu den vermehrt abzubauenen Mineralen steigt auch der Energiebedarf. Derzeit werden etwa 10% des Weltenergieverbrauchs für die Gewinnung und Aufbereitung von Bodenschätzen aufgewendet, was weit mehr als dem Dreifachen des jährlichen Stromverbrauchs in Deutschland entspricht (4, 5). Vidal et al. (4) gehen davon aus, dass nicht der Mangel an Mineralen, sondern der Mangel an Energie, die für ihren Abbau benötigt wird, schließlich zum begrenzenden Faktor für die Umstellung auf eine kohlenstoffarme Wirtschaft werden könnte, was die Bedeutung des viel erforschten Nexus zwischen Energie und mineralischen Rohstoffen einschließlich der geopolitischen Auswirkungen weiter unterstreicht (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13).

1.2 Künftige Expansion des weltweiten Bergbaus

Aufgrund des beispiellosen Anstiegs der Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen für den globalen Wandel hin zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft wird der Abbau von mineralischen Rohstoffen – insbesondere von Batterie- und Hightech-Metallen für den Energie- und Verkehrssektor – erheblich zunehmen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Anzahl und die Menge der Minerale und Metalle, die für die Erzeugung erneuerbarer Energien und für die E-Mobilität benötigt werden, deutlich höher sind als die der alten Technologien, die sie ersetzen. Im Vergleich zu einem konventionellen Auto benötigen z.B. Elektrofahrzeuge im Durchschnitt etwa siebenmal mehr Metall. Bei der Energieinfrastruktur ist die Spanne sogar noch größer: Offshore-Windturbinen verbrauchen z.B. 15-mal mehr Metall pro erzeugter Energieeinheit als Gasturbinen (11). Für eine gleichwertige installierte Kapazität benötigen Solar- und Windkraftanlagen im Vergleich zu fossilen Brennstoffen bis zu 15-mal mehr Beton, 90-mal mehr Al, 50-mal mehr Fe, Cu und Glas (4). Für 1 MW Windenergie werden z.B. 1,15 t Cu, 3 t Al und 130 t Eisenmetalle benötigt, was etwa 150 t Metall für einen typischen Windpark ergibt (14), während ein 1 km² großer Solarpark 11 t Ag enthält. Folglich wird sich der Bedarf an wichtigen Metallen wie Eisen, Mangan, Aluminium usw. zwischen 2010 und 2050 voraussichtlich verdoppeln oder sogar vervierfachen (6). Dies führt zu einem Teufelskreis, bei dem eine nicht erneuerbare Ressource (fossile Brennstoffe) durch eine andere (mineralische Rohstoffe) ersetzt wird (4).

cially vulnerable communities through unfair and unsafe labour practice and inadequate governance by regulating authorities and health and safety issues (8, 9, 15, 16, 17). With easy-to-mine resources being largely exhausted, future mining in more remote areas at lower grades and greater depth will require more energy and resources and will have even greater impacts on local water, land, soil and ecosystems (4, 16). Mining of lower grade ore is likely to become significantly more costly as these orebodies are often deeper below surface, more difficult to mine due to complex geology and, of course, generate more waste per unit of commodity extracted. In a survey of 3,000 mines Luckeneder et al. (3) also found that over 90% of the mines operated in areas with below average water availability exacerbating existing water stress. In addition to increased energy and water footprints mining increasingly also affects biodiversity and protected areas (3). Since increased mining is the result of moving away from fossil fuels as a threat to the earth's climate this leads to the paradox that to potentially damage the environment in order to protect the environment (5). Finally, nearly all critical minerals and metals, e.g., REE, are associated with naturally occurring radioactive material (NORM), often leading to elevated radiation levels and associated exposure of miners and residents.

1.4 Dwindling social acceptance

Like in the recent past, expanded mineral extraction will primarily affect low- and middle-income countries of the global south where most of the current and future mining takes place¹. This is particularly problematic as it is these countries that frequently lack the resources required to adequately address these impacts (2, 17). In contrast, Europe consumes 25 to 30% of the world metal production while producing only 3% (16).

Owing to poor experiences in the past with reckless mining and the perpetual burden legacy sites place on future generations, local communities even in poverty-stricken regions increasingly resist new mining projects, regardless of the much-needed jobs that are promised. Withholding what is termed the "social license to operate" (SLO) is now regarded among the single most important business risk faced by the global mining industry and leads to a dilemma where parts of the world need more resources than ever before while other parts that provide them, are least prepared continuing doing so (18).

Moreover, rising ("dirty") resource-nationalism especially regarding critical raw materials (CRM) leads to increasing geopolitical tensions which further jeopardise supply security² (12). Unabated, these trends may well have the potential to derail the green transformation altogether (4, 7).

1.5 Critical raw materials and rising resource nationalism

As one of the consequences of declining acceptance levels, there is a trend of rising resource nationalism. Many affluent nations

¹ The 81 countries whose economies significantly rely on mineral extraction comprise more than 70% of the world's extremely poor population. For 63 of the 72 low- and middle-income countries among them, the dependence on mining had increased over the past 20 years (17).

² According to the survey by EY (18) geopolitical risks rank 4th among global mining companies.

1.3 Zunahme der Umweltbelastungen

Eine Folge der Ausweitung des Bergbaus ist die damit verbundene Zunahme negativer ökologischer und sozialer Auswirkungen, einschließlich der Verschmutzung durch Bergbauabfälle, der zunehmenden Wasserknappheit und der Konkurrenz um Wasser, der Bedrohung der biologischen Vielfalt, der Zerstörung von Lebensräumen, der konkurrierenden Landnutzung, der Bodenerosion sowie der negativen Auswirkungen auf sozial schwache Gemeinschaften durch unfaire und unsichere Arbeitspraktiken und unzureichende Kontrolle durch die Regulierungsbehörden sowie in Gesundheits- und Sicherheitsfragen (8, 9, 15, 16, 17). Da die leicht abbaubaren Ressourcen weitgehend erschöpft sind, wird der künftige Abbau in entlegeneren Gebieten mit geringeren Wertstoffgehalten und in größerer Teufe mehr Energie und Ressourcen erfordern und noch stärkere Auswirkungen auf Wasser, Land, Boden und Ökosysteme vor Ort haben (4, 16). Der Abbau von weniger hochwertigem Erz wird wahrscheinlich erheblich teurer werden, da diese Erzkörper oft in größeren Teufen liegen, aufgrund der komplexen Geologie schwieriger abzubauen sind und natürlich mehr Abfall pro geförderter Rohstoffeinheit erzeugen. In einer Untersuchung von 3.000 Bergwerken stellten Luckeneder et al. (3) außerdem fest, dass über 90% der Bergwerke in Gebieten mit unterdurchschnittlicher Wasserverfügbarkeit betrieben werden, was den bestehenden Wasserstress noch verschärft. Der Bergbau erhöht nicht nur den Energie- und Wasserverbrauch, sondern beeinträchtigt auch zunehmend die biologische Vielfalt und Schutzgebiete (3). Da der zunehmende Bergbau auf die Abkehr von fossilen Brennstoffen als Bedrohung für das Erdklima zurückzuführen ist, führt dies zu dem Paradoxon, dass man potentiell die Umwelt schädigt, um die Umwelt zu schützen (5). Schließlich sind fast alle kritischen Minerale und Metalle, z.B. Seltene Erden, mit natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen (NORM) assoziiert, was häufig zu einer erhöhten Strahlenexposition für Beschäftigte wie Anwohner führt.

1.4 Schwindende gesellschaftliche Akzeptanz

Wie schon in der jüngeren Vergangenheit wird die Ausweitung des Rohstoffabbaus vor allem die Länder des globalen Südens mit niedrigem und mittlerem Einkommen betreffen, in denen der größte Teil des derzeitigen und künftigen Bergbaus stattfindet¹. Dies ist besonders problematisch, da diese Länder häufig nicht über die notwendigen Ressourcen verfügen, um die Auswirkungen angemessen zu bewältigen (2, 17). Im Gegensatz dazu verbraucht Europa 25 bis 30% der weltweiten Metallproduktion und produziert nur 3% (16).

Aufgrund der schlechten Erfahrungen in der Vergangenheit mit rücksichtslosem Bergbau und der ständigen Belastung künftiger Generationen durch Altlasten wehren sich lokale Gemeinschaften selbst in armen Regionen zunehmend gegen neue Bergbauprojekte, ungeachtet der dringend benötigten Arbeitsplätze, die versprochen werden. Die Verweigerung der sogenannten Social Licence to Operate (SLO) gilt heute als eines der wichtigsten Geschäftsrisiken für die globale Bergbauindustrie und führt zum

¹ Die 81 Länder, deren Wirtschaft in erheblichem Maße vom Abbau von Mineralen abhängt, umfassen mehr als 70% der extrem armen Bevölkerung der Welt. In 63 der 72 Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen hat die Abhängigkeit vom Bergbau in den letzten 20 Jahren zugenommen (17).

compile ever-expanding lists of CRM as most have exhausted their own resource base during the first industrial revolution. Apart from increased global competition for scarce minerals, the rapidly growing mismatch between supply and demand also causes drastic price increases as seen, e.g., in battery metals like lithium rising by 700% since the beginning of 2022. This illustrates that replacing the dependence of non-renewable fossil fuels with a dependence on non-renewable minerals carries the risk of replacing old with new geopolitical tensions and dependencies (7, 12). In fact, in terms of geographical diversity the situation has even worsened. While OPEC controls 34% of global oil production, 70% of all CRM production are controlled by only ten countries (5). Since rising geopolitical tensions and competing bloc initiatives introduce additional risks to the overall global resource security, this carries the risk of turning into a vicious circle.

1.6 Introduction of ESG

In response to the growing global resistance of communities to ever expanding mining activities and the associated detrimental impacts on the environment investors at major stock exchanges introduced Environmental, Social and (corporate) Governance criteria (ESG) for mining companies to meet in order to access required capital (19, 20). On the environmental side this includes compliance with applicable legislation, but also efforts to achieve carbon neutrality and increase resource efficiency especially regarding water and energy. Social aspects relate to fair labour practice in terms of decent wages and working conditions as well as health and safety while governance includes fighting corruption, respecting human rights of indigenous land owners, financial transparency etc. Ultimately, ESG aims at increasing public acceptance (SLO) in local mining communities of the global south but also with consumers in affluent nations who are increasingly critical of unethical practices. Given the long history of reckless practices in many developing countries and continued impacts of mine legacy sites on livelihoods, scepticism is rife among host communities as to what ESG may really change for them. This, in particular, as earlier concepts like Corporate Social Responsibility (CSR) frequently failed to deliver on their promises for more equity and participation in the wealth the extraction of their local resources generated. Social degradation of communities due to migrant labour systems and its associated social ills like the spread of sexually transmissible disease through prostitution incl. HIV/AIDS, unsafe working conditions with high fatality rates, low wages and curbed labour rights in combination with mining companies competing for land, water and energy still linger on and continue to feed conflicts. Adverse impacts of mine closure like economic decline, rising unemployment and ghost-town scenarios as well as long-term contamination of water and soil are among the major concerns of host communities. Given the poor public perception of mining, it is imperative to prove that successful remediation is indeed possible and that adverse impacts can indeed be mitigated and affected land be returned to meaningful use (Figures 1, 2). Applying proven, high-standard remediation strategies may be an important tool for regaining the lost trust needed if mining is to be expanded.

Dilemma, dass Teile der Welt mehr Ressourcen als je zuvor benötigen, während andere Teile, die diese Ressourcen bereitstellen, immer weniger bereit sind, dies weiterhin zu tun (18).

Darüber hinaus führt der zunehmende („schmutzige“) Ressourcennationalismus, insbesondere bei kritischen Rohstoffen, zu wachsenden geopolitischen Spannungen, welche die Versorgungssicherheit weiter gefährden² (12). Ungebremst haben diese Trends durchaus das Potential, die grüne Transformation gänzlich zum Scheitern zu bringen (4, 7).

1.5 Kritische Rohstoffe und zunehmender Ressourcennationalismus

Eine der Folgen der sinkenden Akzeptanz ist der Trend zu einem wachsenden Ressourcennationalismus. Viele wohlhabende Nationen stellen immer längere Listen von kritischen Rohstoffen zusammen, da die meisten ihre eigene Ressourcenbasis während der ersten industriellen Revolution erschöpft haben. Neben dem verschärften globalen Wettbewerb um knappe Ressourcen führt auch das rasch wachsende Missverhältnis zwischen Angebot und Nachfrage zu drastischen Preissteigerungen, wie z.B. bei Batteriemetallen wie Lithium, deren Preise seit Anfang 2022 um 700% gestiegen sind. Dies zeigt, dass das Ersetzen der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren fossilen Brennstoffen durch ebenfalls nicht erneuerbare Minerale das Risiko birgt, alte durch neue geopolitische Spannungen und Abhängigkeiten zu ersetzen (7, 12). In Bezug auf die geografische Vielfalt hat sich die Situation sogar noch verschlechtert. Während die OPEC 34% der weltweiten Ölproduktion kontrolliert, werden 70% der gesamten Produktion von kritischen Rohstoffen von nur zehn Ländern kontrolliert (5). Da zunehmende geopolitische Spannungen und konkurrierende Blockinitiativen zusätzliche Risiken für die globale Ressourcensicherheit insgesamt mit sich bringen, besteht die Gefahr, dass sich dies zu einem Teufelskreis entwickelt.

1.6 Einführung der ESG

Als Reaktion auf den weltweit wachsenden Widerstand gegen die immer weiter ausufernden Bergbauaktivitäten und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben die Investoren an den großen Börsen Umwelt-, Sozial- und (Corporate) Governance-Kriterien (ESG) eingeführt, die Bergbauunternehmen erfüllen müssen, um Zugang zum erforderlichen Kapital zu erhalten (19, 20). Auf der Umweltseite umfasst dies die Einhaltung der geltenden Rechtsvorschriften, aber auch Bemühungen um Kohlenstoffneutralität und die Steigerung der Ressourceneffizienz, insbesondere in Bezug auf Wasser und Energie. Soziale Aspekte beziehen sich auf faire Arbeitspraktiken in Bezug auf menschenwürdige Löhne und Arbeitsbedingungen sowie auf Gesundheit und Sicherheit, während Governance die Bekämpfung von Korruption, die Achtung der Menschenrechte indigener Landbesitzer, finanzielle Transparenz usw. umfasst.

¹ Die 81 Länder, deren Wirtschaft in erheblichem Maß vom Abbau von Mineralen abhängt, umfassen mehr als 70% der extrem armen Bevölkerung der Welt. In 63 der 72 Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen hat die Abhängigkeit vom Bergbau in den letzten 20 Jahren zugenommen (17).

² Laut der Studie von EY (18) liegen geopolitische Risiken auf Platz 4 weltweiter Bergbauunternehmen.



Halde 366 in Aue-Alberoda (1991)



Autobahnzubringer auf sanierter Halde 366 (2017)

Fig. 1. Remediating waste rock dumps. // Bild 1. Sanierung einer Halde für Altgestein. Photos/Fotos: Wismut

1.7 Circular economy and the zero-waste approach

In addition to the environmental aspects of ESG there is increasing emphasis on transforming the current linear economy based on the extract-use-discard-model into a circular economy of reusing – recycling – re-purposing – reclaiming extracted resources eventually preventing the generation of waste (zero-waste

Letztendlich zielt ESG darauf ab, die öffentliche Akzeptanz (SLO) in den lokalen Bergbaugemeinden des globalen Südens zu erhöhen, aber auch bei den Verbrauchern in den wohlhabenden Ländern, die unethischen Praktiken zunehmend kritisch gegenüberstehen. In Anbetracht der langen Geschichte rücksichtsloser Praktiken in vielen Entwicklungsländern und der anhaltenden Auswirkungen von Bergbaualtlasten auf die Lebensgrundlagen ist die Skepsis in den Bergbaugemeinden groß, was ESG für sie wirklich ändern könnte. Dies insbesondere deshalb, weil frühere Konzepte wie die soziale Verantwortung der Unternehmen (Corporate Social Responsibility – CSR) ihre Versprechen für mehr Gerechtigkeit und Teilhabe am Wohlstand, der durch den Abbau ihrer lokalen Ressourcen entsteht, häufig nicht einhalten konnten. Die soziale Degradierung von Gemeinschaften durch Wanderarbeitssysteme und die damit verbundenen sozialen Missstände wie die Ausbreitung sexuell übertragbarer Krankheiten durch Prostitution einschließlich HIV/AIDS, unsichere Arbeitsbedingungen mit hohen Raten tödlicher Unfälle, niedrige Löhne und beschnittene Arbeitsrechte in Kombination mit Bergbauunternehmen, die um Land, Wasser und Energie konkurrieren, halten immer noch an und nähren weiterhin Konflikte. Die negativen Auswirkungen der Bergwerksschließung wie wirtschaftlicher Niedergang, steigende Arbeitslosigkeit und Geisterstädte sowie die langfristige Verunreinigung von Wasser und Boden gehören zu den größten Sorgen der betroffenen Kommunen. Angesichts der schlechten öffentlichen Wahrnehmung des Bergbaus muss unbedingt nachgewiesen werden, dass eine erfolgreiche Sanierung möglich ist und dass die negativen Auswirkungen tatsächlich gemildert und die betroffenen Flächen wieder sinnvoll genutzt werden können (Bilder 1 und 2). Die Anwendung bewährter Sanierungsstrategien auf hohem Niveau kann ein wichtiges Instrument sein, um das verlorene Vertrauen zurückzugewinnen, das für eine Ausweitung des Bergbaus erforderlich ist.

1.7 Kreislaufwirtschaft und der Null-Abfall-Ansatz

Zusätzlich zu den Umweltaspekten der ESG wird zunehmend Wert darauf gelegt, die derzeitige lineare Wirtschaft, die auf



Betriebsgelände Crossen (1991)



Sanierte Betriebsfläche Crossen (2010)

Fig. 2. Dismantling of former processing plant and infrastructure at Crossen.

Bild 2. Abbruch von ehemaliger Aufbereitungsanlage und Infrastruktur in Crossen. Photos/Fotos: Wismut

concept). Given that mining is among the largest generators of waste, often discarding well over 90% of the extracted material in form of tailings and waste rock, this is a formidable challenge to the extractive industry. This in particular as the presence of NORM accompanying many minerals often limit the extent to which such waste can be used. Current technologies often focus on reclaiming valuable trace elements from tailings still leaving the bulk of material to be discarded. This also applies to the use of mining infrastructure such as mine voids that are often simply flooded and become environmental liabilities. Managing emanating mine water after closure (Figure 3) is commonly



Kontrollstrecke Nord



Aufbereitungsanlage für Grubenwasser



Mobiles Pumpaggregat für tiefe Grundwasserüberwachungsbrunnen

Fig. 3. Controlled flooding of the Königstein mine.
Bild 3. Kontrollierte Flutung der Grube Königstein.
Photos/Fotos: Wismut

dem Modell der Gewinnung – Verwendung – Entsorgung basiert, in eine Kreislaufwirtschaft umzuwandeln, die auf Wiederverwendung – Recycling – Wiederverwertung – Rückgewinnung der gewonnenen Ressourcen und schließlich auf die Vermeidung von Abfällen („Zero Waste“, also Null-Abfall-Konzept) ausgerichtet ist. Da der Bergbau zu den größten Verursachern von Abfällen gehört und oft weit über 90% des abgebauten Materials in Form von Abraum und Aufbereitungsrückständen entsorgt werden, stellt dies eine große Herausforderung für die mineralgewinnende Industrie dar. Zumal das Vorhandensein von NORM in vielen Erzen das Ausmaß, in dem diese Abfälle verwendet werden können, begrenzt. Die derzeitigen Technologien konzentrieren sich häufig auf die Rückgewinnung wertvoller Spurenelemente aus den Abgängen, wobei der Großteil des Materials verworfen werden muss. Dies gilt auch für die Nutzung von Bergbauinfrastrukturen wie Grubenhohlräumen, die oft einfach geflutet werden und eine Umweltbelastung darstellen. Die Bewirtschaftung des austretenden Grubenwassers nach der Stilllegung (Bild 3) ist in der Regel der kostenintensivste Teil der Sanierung und stellt eine erhebliche finanzielle Belastung für künftige Generationen dar. Insbesondere diese Aspekte erfordern innovative Ansätze, um die damit verbundenen langfristigen Auswirkungen zu minimieren und zu wirklich nachhaltigen Lösungen für eine Kreislaufwirtschaft zu gelangen.

1.8 Politische Reaktion

Angesichts des Ernstes der rohstoffbedingten Bedrohungen und ihres Potentials, die grüne Transformation gänzlich zum Scheitern zu bringen, engagieren sich mehrere internationale Organisationen sowie die deutsche Bundesregierung proaktiv in einer Reihe von politischen Initiativen, die von der Unterstützung größerer Transparenz im Bergbausektor über das Verbot von Konfliktmineralien bis hin zur Durchsetzung von ESG-Prinzipien in der gesamten Branche reichen. Beispiele hierfür sind globale Initiativen wie die Agenda 2030 der Vereinten Nationen mit den 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung, die Initiative für Transparenz in der Rohstoffwirtschaft (EITI), die CONNEX-Initiative der G7-Staaten sowie verschiedene regionale Bemühungen (21, 22, 23). Für Deutschland gehören dazu das Sektorprogramm „Ressourcen und Entwicklung“ des Bundesministeriums für internationale Zusammenarbeit (BMZ) sowie der Nationale Aktionsplan zur Umsetzung der UN-Leitprinzipien für wirtschaftliche Entwicklung und Menschenrechte, das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm, Phase III (2020 bis 2023), die Ressourcenstrategie der Bundesregierung sowie das Gesetz über Sorgfaltspflichten in Lieferketten (24, 25, 26, 27, 28, 29). Letztlich zielen all diese Initiativen darauf ab, die öffentliche Akzeptanz für den Abbau von Bodenschätzen in den Standortgemeinden rohstoffexportierender Länder zu erhöhen. Sie richten sich auch an die Verbraucher in den Importländern, die zunehmend kritisch gegenüber Industrien sind, die sich nicht an ethische Standards halten. Da Millionen von Menschen auf der ganzen Welt von Bergbauaktlasten betroffen sind, ist deren erfolgreiche Sanierung der Schlüssel zu einer größeren Akzeptanz des zukünftigen Bergbaus auf globaler Ebene, da in Deutschland jahrzehntelange praktische Erfahrungen mit der erfolgreichen Sanierung innerhalb dicht besiedelter Regionen vorliegen.

the most cost-intensive part of remediation placing a significant financial burden on future generations. These aspects, in particular, need innovative approaches to minimise associated long-term impacts and arrive at truly sustainable solutions for a circular economy.

1.8 Political responses

Given the seriousness of resource-related threats and their potential to derail the green transformation altogether, several international organisations as well as the Federal Government of Germany pro-actively engage in a range of political initiatives ranging from supporting greater transparency in the mining sector, banning conflict minerals and helping to enforce ESG-principles across the industry. Examples include global initiatives like United Nation's Agenda 2030 with the 17 Sustainable Development Goals, the Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) the CONNEX Initiative of the G7-Nations, as well as several regional efforts (21, 22, 23). For Germany, the latter include the Sectoral Programme "Resources and Development" of the Federal Department for International Collaboration (BMZ) as well as the National Action Plan for implementing UN-lead principles on economic development and human rights, the German Programme on Resource Efficiency, Phase III (2020 to 2023), the resource strategy of the Federal Government as well as the Act on Duty of Care in Supply Chains (24, 25, 26, 27, 28, 29). Ultimately, all these initiatives are aimed at raising public acceptance for mineral extraction in host-communities of resource-exporting nations. It also aims at consumers of importing countries, who are increasingly critical towards industries not adhering to ethical standards. With mine legacy sites around the world continue to haunt millions of people, their successful remediation is key for achieving greater acceptance levels for future mining on a global scale. Given the decades of hands-on experiences in successfully remediating within densely populated regions, Germany is well posed to address this challenge.

1.9 Technology trends

In line with ESG-investment criteria, mining companies are no longer exclusively assessed by their economic performance and profitability but increasingly also by ecological parameters like water and energy efficiency, CO₂-footprint, sustainability of used resources etc. Consequently, many mines are actively pursuing a technological transition from fossil to renewable energy sources. Several companies also explore innovative projects for repurposing exhausted mines for generating and storing renewable energy ranging from pumped hydro systems placed underground to compressed air storage in mine voids, suspended weight gravimetric systems using abandoned shafts as well as solar updraft tower covering dry tailings deposits (30). At the same time technological efforts are underway to reduce the amount of water and energy per unit of ore/metal mined and comply with international best-practice recommendations and benchmarks. In this regard the various components of digitalisation such as augmented reality applications, process optimisation through artificial intelligence, robotics, drones and in-situ-sensors for monitoring purposes etc. are key components

1.9 Technologische Trends

Im Einklang mit ESG-Investitionskriterien werden Bergbauunternehmen nicht mehr ausschließlich nach ihrer wirtschaftlichen Leistung und Rentabilität bewertet, sondern zunehmend auch nach ökologischen Parametern wie Wasser- und Energieeffizienz, CO₂-Fußabdruck, Nachhaltigkeit der eingesetzten Ressourcen usw. Infolgedessen bemühen sich viele Bergwerke aktiv um einen technologischen Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energiequellen. Mehrere Unternehmen erforschen auch innovative Projekte zur Umnutzung stillgelegter Bergwerke für die Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energie, die von unterirdischen Pumpsystemen über Druckluftspeicher in Grubenhohlräumen, gravimetrischen Systemen mit schwebendem Gewicht, die stillgelegte Schächte nutzen, bis hin zu solaren Aufwindkraftwerken zur Abdeckung von Absetzanlagen reichen (30). Gleichzeitig werden technologische Anstrengungen unternommen, um die Wasser- und Energiemenge pro Einheit geförderten Erzes/Metalls zu verringern und internationalen Best-Practice-Empfehlungen und Standards zu entsprechen. In diesem Zusammenhang sind die verschiedenen Komponenten der Digitalisierung wie Augmented-Reality-Anwendungen, Prozessoptimierung durch künstliche Intelligenz, Robotik, Drohnen und In-situ-Sensoren für Überwachungszwecke usw. Schlüsselkomponenten zur Verbesserung der Ressourceneffizienz sowie der Produktivität und des Arbeitsschutzes.

2 Deutsches Sanierungs-Know-how: ein wichtiges Zukunftsgut

Deutschland ist besonders gut positioniert, um auf diesem Gebiet international eine führende Rolle zu übernehmen. Einschlägige Erfahrungen wurden u.a. bei der Sanierung von Braunkohlenbergwerken in Ostdeutschland gesammelt, wo riesige Tagebaue, die lebensfeindlichen Mondlandschaften ähnelten, in touristisch attraktive Seenlandschaften verwandelt wurden. Weitere Beispiele finden sich in Sachsen und Thüringen, wo eigens ein staatliches Unternehmen gegründet wurde, um die Hinterlassenschaften von mehr als 40 Jahren Uranabbau und -verarbeitung im Kalten Krieg zu beseitigen.

Da Bergleute und Anwohner erhöhten Werten natürlicher Radioaktivität einschließlich Radon ausgesetzt sind, wird der Uranbergbau allgemein als eine der problematischsten Arten der Mineralgewinnung angesehen, insbesondere wenn dicht besiedelte Gebiete betroffen sind. Nach mehr als drei Jahrzehnten steht das Wismut-Projekt, das wohl eines der komplexesten und größten Sanierungsprogramme aller Zeiten ist, kurz vor dem Abschluss. Die meisten ehemaligen Altlasten wurden einer neuen Nutzung zugeführt, und viele von ihnen gelten als internationale Benchmarks für die Sanierung von Bergbaufolgelandschaften. Solche Beispiele sind wichtige Meilensteine, um das Vertrauen in den Bergbaugemeinden weltweit wiederherzustellen. Vor dem Hintergrund des oben beschriebenen aktuellen Ressourcendilemmas ist dies vielleicht der bedeutendste Erfolg neben dem Erreichen der ursprünglichen Sanierungsziele der Risikominderung und der Rückführung der Wismut-Altlasten in eine produktive Nutzung.

Im Einklang mit der Notwendigkeit, das gewonnene Fachwissen über den aktuellen Projektumfang hinaus zu nutzen,

for improving resource efficiency as well as productivity, health and safety.

2 German remediation know-how: an important future asset

Germany is particularly well positioned to take on a leading international role in this field. Relevant experiences include, inter alia, the remediation of lignite mines in central East-Germany, where vast open pits resembling lifeless moon-like landscapes were turned into a tourist-attracting scenic lake-scape. Other examples are found in Saxony and Thuringia, where a dedicated state-owned company was established to tackle the legacy of over 40 years of cold-war uranium mining and milling.

Owing to the exposure of miners and residents to elevated levels of natural radioactivity including radon, uranium mining is generally perceived as being among the most problematic types of mineral extraction, especially when affecting densely populated areas. After more than three decades, the Wismut project, arguably one of the most complex and largest remediation programmes ever undertaken, is now approaching finalisation. Most former legacy sites have been returned to re-use and many are recognised as international benchmarks in post-mining remediation. Such examples serve as important milestones towards rebuilding trust in mining communities world-wide. In the context of the current resource dilemma described above, this is perhaps the most significant achievement apart from reaching the original remediation goals of risk reduction and returning the Wismut legacy to a productive use.

In line with the need to utilise the gained expertise beyond current project scopes, this paper explores possible ways of doing so. For future strategies extending beyond the scope of current remediation to be successful, the rapid changes of the global extractive industry need to be understood. The main objective of this paper is thus to provide an overview on how emerging global trends in mining may be shaping future tasks of German remediation companies looking beyond completion of current projects. Based on the Wismut project as a case study the authors are particularly familiar with, the need to duly recognise emerging trends and developments is stressed for developing adequate strategies to future-proof remediation strategies and take advantage of the global recognition German remediation expertise has earned.

Many trends described above such as ESG, decarbonisation and resource efficiency do not only relate to active mining operations but are also applicable to closure and remediation of mines. Currently, Germany plays an internationally leading role in mine remediation, mainly based on expertise gained in the eastern part of the country, where most mines closed in the early 1990s ranging from vast open-cast lignite mines in central and eastern Germany, underground copper mines in the Mansfeld District, subsurface salt mines in the Werra region as well as various uranium mining and milling sites in the Wismut region of Saxony and Thuringia. In 2018, after nearly two centuries, underground hard coal mining in western Germany also ceased adding another large mining district to the portfolio of German remediation projects. While the coal mining districts are still exploring and optimising the best strategies to cope with

werden in diesem Artikel mögliche Wege dazu untersucht. Damit künftige Strategien, die über den Rahmen der aktuellen Sanierung hinausgehen, erfolgreich sein können, müssen die raschen Veränderungen in der globalen Rohstoffindustrie verstanden werden. Das Hauptziel dieses Beitrags ist es daher, einen Überblick darüber zu geben, wie neue globale Trends im Bergbau die zukünftigen Aufgaben deutscher Sanierungsunternehmen über den Abschluss aktueller Projekte hinaus beeinflussen können. Anhand des Wismut-Projekts als Fallbeispiel, mit dem die Autoren besonders vertraut sind, wird die Notwendigkeit dargelegt, aufkommende Trends und Entwicklungen richtig zu erkennen, um adäquate Strategien für zukunftssichere Sanierungen zu entwickeln und von der weltweiten Anerkennung zu profitieren, die sich deutsche Sanierungskompetenz erworben hat.

Viele der oben beschriebenen Trends wie ESG, Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz beziehen sich nicht nur auf den aktiven Bergbau, sondern gelten auch für die Stilllegung und Sanierung von Bergwerken. Derzeit spielt Deutschland eine international führende Rolle bei der Bergbausanierung, die vor allem auf dem in den östlichen Bundesländern erworbenen Fachwissen beruht, wo die meisten Bergwerke Anfang der 1990er Jahre geschlossen wurden. Dazu gehören die großen Braunkohlentagebaue in Mittel- und Ostdeutschland, die untertägigen Kupferbergwerke im Mansfelder Revier, die untertägigen Salzbergwerke im Werragebiet sowie verschiedene Uranbergbau- und Aufbereitungsstandorte in der Wismut-Region in Sachsen und Thüringen. Mit der Beendigung des untertägigen Steinkohlenbergbaus in Westdeutschland wurde 2018 nach fast zwei Jahrhunderten ein weiteres großes Bergbaurevier in das Portfolio der deutschen Sanierungsprojekte aufgenommen. Während in den Steinkohlenrevieren noch nach den besten Strategien zur Bewältigung der sogenannten Ewigkeitsaufgaben der Nachsorge gesucht und Verfahren optimiert werden, stehen viele Sanierungsprojekte in Ostdeutschland vor dem Abschluss.

Anstatt dieses Kapitel einfach abzuschließen und die dazugehörige Dokumentation zu archivieren, wird nicht zuletzt auf politischer Ebene dafür plädiert, das in diesem Prozess angesammelte Fachwissen nicht nur zu bewahren, sondern auch aktiv zu nutzen, um die aktuellen Herausforderungen im globalen Ressourcensektor zu bewältigen.

Um dies erfolgreich zu tun, muss sich der Sektor jedoch bewusst sein, dass sich die Eckpfeiler in der Zwischenzeit verschoben und sich die Erwartungen und Prioritäten der Gesellschaft bei Sanierungsprojekten in ähnlicher Weise verändert haben wie beim aktiven Bergbau. Um auf den Erfahrungen bei der Bewältigung künftiger Herausforderungen aufbauen zu können, müssen die Bergbausanierungsaktivitäten auf die beschriebenen neuen Trends reagieren. Im folgenden Abschnitt wird versucht, einige dieser Veränderungen anhand des Wismut-Sanierungsprojekts zu veranschaulichen.

3 Das Wismut-Projekt: ein Blick über die aktuelle Sanierung hinaus

Die 1991 als Staatsbetrieb gegründete Wismut GmbH, Chemnitz, wurde mit der Stilllegung und Sanierung der Uranbergbau- und Produktionsanlagen der ehemaligen gemeinsamen sowjetisch-

what is termed “perpetual tasks” of post-closure water management, many remediation projects in eastern Germany are now approaching finalisation.

Instead of simply closing this chapter and archiving the associated documentation it is argued, not least on a political level, that the expertise accumulated in the process should not only be preserved but indeed actively used to address the current challenges in the global resource sector.

To do so successfully, the sector needs to be aware, however, that the goal posts have moved in the meantime and that expectations and priorities of society changed in much the same way for remediation projects as they did for active mining. To build on experience for tackling future challenges mine remediation activities will have to respond to the outlined emerging trends. In this section an attempt is made to illustrate some of these changes using the Wismut remediation project as a case study.

3 The Wismut project: looking beyond current remediation

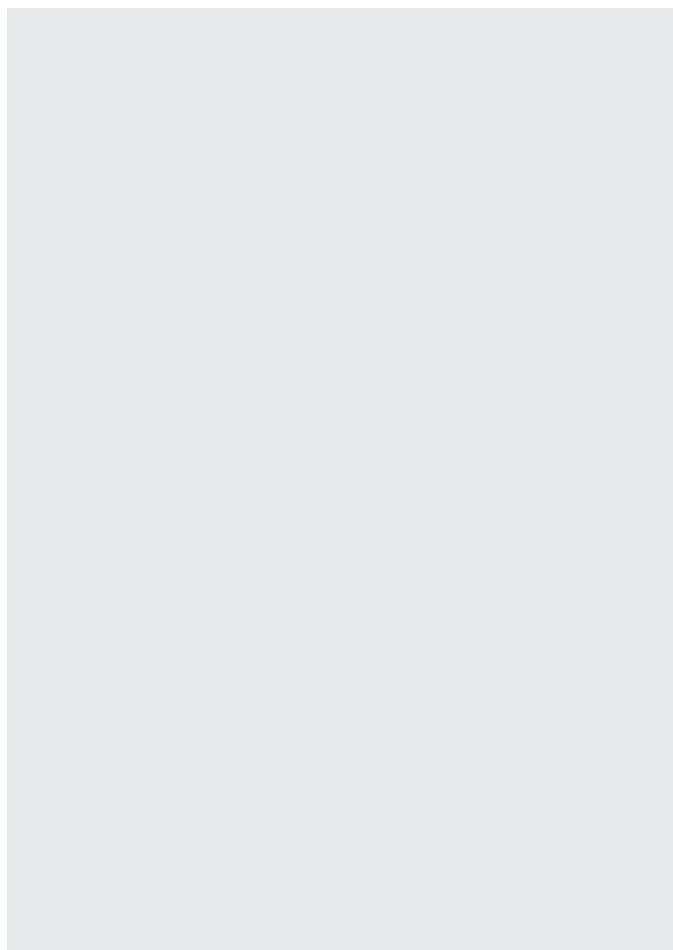
Established in 1991 as a state-owned enterprise Wismut GmbH, Chemnitz/Germany, was mandated with the decommissioning and remediation of uranium mining and production facilities of the former joint Soviet-German SDAG Wismut. With a total production of well over 200,000 t of uranium this was the largest single uranium producer during the Cold War era globally. Accordingly serious were associated environmental impacts in the densely populated region ranging from contaminated water bodies, lowered groundwater levels and dried-up streams, radon exhalation and wind-blown tailings dust to devastated landscapes, ground subsidence and elevated levels of radioactivity posing risks to the environment as well as to the public (31). As varied as the environmental risks is the nature of objects requiring remediation ranging from Europe’s largest uranium tailings storage facilities to an over 200 m deep open pit, to Europe’s deepest underground mine as well as an extensive in-situ leach operation that pumped thousands of tons of sulphuric acid underground (32).

Apart from overcoming widespread scepticisms among local communities and environmental activists that questioned the wisdom of putting the former miner SDAG Wismut in charge of the remediation, the newly established company also had to comply with a complex and strict legislative framework spanning across different types of laws (among others water, mining and radiological protection) as well as across different judicial levels (national, provincial, local). In retrospect, the ability of Wismut to regain the trust of the public while strictly complying with applicable legislation and to not get bogged down in endless bureaucratic procedures despite applying for over 10,000 permits, clearly stands out as a key achievement (33). Management tools and procedures developed in the process are deemed to have significant application potential elsewhere quite independently of the concrete legislation.

A major advantage that allowed Wismut to be successful was the fact, that unlike many other large GDR companies that were wound up after reunification, internal expertise was retained in the form of competent and loyal staff benefiting from decades of intimate insights into uranium mining and processing. The combination of 40 years of mining experience with the expertise gener-

deutschen SDAG Wismut beauftragt. Mit einer Gesamtproduktion von weit über 200.000 t Uran war dieses der weltweit größte Einzeluranproduzent während des Kalten Kriegs. Dementsprechend gravierend waren die damit verbundenen Umweltauswirkungen in der dicht besiedelten Region, die von verseuchten Gewässern, abgesenkten Grundwasserspiegeln und ausgetrockneten Oberflächengewässern, Radonexhalation und vom Wind verwehtem Abraumstaub bis hin zu devastierten Landschaften, Bodensenkungen und erhöhten Radioaktivitätswerten reichten und sowohl für die Umwelt als auch für die Bevölkerung ein Risiko darstellten (31). Ebenso vielfältig wie die Umweltrisiken ist auch die Art der zu sanierenden Objekte, die von Europas größtem Schlammteich für Uranaufbereitungsrückstände über einen mehr als 200 m tiefen Tagebau bis hin zu Europas tiefstem Untertagebergwerk und einem bedeutenden In-situ-Laugungsbergwerk reichen, bei dem Tausende von Tonnen Schwefelsäure in den Untergrund gepumpt wurden (32).

Das neu gegründete Unternehmen musste nicht nur die weit verbreitete Skepsis der örtlichen Bevölkerung und von Umweltschützern überwinden, die den Sinn der Beauftragung des ehemaligen Bergbauunternehmens SDAG Wismut mit der Sanierung in Frage stellten, sondern auch einen komplexen und strengen Rechtsrahmen einhalten, der verschiedene Arten von Gesetzen, u.a. Wasser- und Bergrecht, Strahlenschutzgesetzgebung, sowie verschiedene Rechtsebenen (Bund, Länder, Gemeinden) umfasste. Rückblickend ist die Fähigkeit der Wismut, das Vertrauen





Golfpark Bad Schlema auf abgedeckter Haldenfläche der Halde 382, mit Betriebsfläche des Schachtes 382, April 2017

Fig. 4. Golf course on covered former waste rock dump at Bad Schlema. Bild 4. Golfplatz auf der abgedeckten ehemaligen Halde in Bad Schlema. Photo/Foto: Wismut



Tagebaurestloch Lichtenberg (1991)



Saniertes Tagebaugelände (2010)

Fig. 5. Open pit Lichtenberg: before remediation (top), rehabilitated mining site (bottom). // Bild 5. Tagebau Lichtenberg: vor der Sanierung (oben), rehabilitierte Abbaustätte (unten). Photos/Fotos: Wismut

der Öffentlichkeit wiederzugewinnen und dabei die geltenden Gesetze strikt einzuhalten und sich trotz der Beantragung von über 10.000 Genehmigungen nicht in endlosen bürokratischen Verfahren zu verzetteln, eindeutig als eine der wichtigsten Leistungen zu bewerten (33). Die in diesem Prozess entwickelten Managementinstrumente und -verfahren haben unabhängig von der konkreten Gesetzgebung ein erhebliches Anwendungspotential in anderen Bereichen.

Ein großer Vorteil, der Wismuts Erfolg ermöglichte, war die Tatsache, dass im Gegensatz zu vielen anderen DDR-Großbetrieben, die nach der Wiedervereinigung abgewickelt wurden, das interne Know-how in Form von kompetenten und loyalen Mitarbeitern erhalten blieb, die über jahrzehntelange Einblicke in den Uranbergbau und die Aufbereitung verfügten. Die Kombination von 40 Jahren Bergbauerfahrung mit dem in den folgenden drei Jahrzehnten der industriellen Sanierung erworbenen Fachwissen ist heute sicherlich ein einzigartiger Wettbewerbsvorteil von der Wismut (34).

Das Wismut-Projekt, mit einem Finanzvolumen von nahezu 7 Mrd. € eines der weltweit komplexesten Sanierungsvorhaben, die bisher durchgeführt wurden, steht kurz vor dem Abschluss. Die Bergbaustadt Schlema, die einst von den Zeitungen als „Tal des Todes“ bezeichnet wurde, erstrahlt als Kurort wieder in neuem Glanz (Bild 4), und das radioaktive Loch des Tagebaus Lichtenberg wurde buchstäblich in eine „blühende Landschaft“ verwandelt (Bild 5), die Bestandteil einer nationalen Gartenbauausstellung war. Viele Wismut-Projekte werden inzwischen von internationalen Organisationen, wie z.B. der IAEA, als richtungsweisend angesehen und in Best-Practice-Leitfäden aufgenommen. Dabei hat sich die Wismut von einem anfänglichen Nettoempfänger von internationalem Wissen zu einem Nettoexporteur entwickelt, der heute ein gefragter Berater für Sanierungsprojekte in der ganzen Welt ist (EU, Zentralasien, Afrika, Lateinamerika usw.) (35). Trotz aller Erfolge besteht jedoch die Notwendigkeit, mit den neuesten Entwicklungen Schritt zu halten. Einige der künftigen Aufgaben und Verantwortlichkeiten in diesem Bereich werden im Folgenden kurz skizziert.

Bisherige Sanierungsansätze konzentrierten sich in erster Linie darauf, die Gesundheitsrisiken möglichst kostengünstig und sicher auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Allgemeine Entscheidungen zur Erreichung dieses Ziels wurden auf der Grundlage von Multi-Attribut-Analysen für alternative Sanierungslösungen getroffen, bei denen u.a. die Bau- und Langzeitkosten sowie die Gesundheitsrisiken (radiologisch, konventionell) berücksichtigt wurden. Obwohl das Wismut-Programm von Anfang an Nachhaltigkeitsaspekte wie Ressourceneffizienz und eine qualitativ hochwertige Nachnutzung berücksichtigte (36), bleiben in dieser Hinsicht Herausforderungen bestehen, die mit der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Nachsorge, einer kostspieligen Grubenwasserbewirtschaftung und langfristigen Überwachungsmaßnahmen zusammenhängen (37). Künftige Lösungen für die Sanierung von Bergbaustandorten in einem globalen Kontext müssen zusätzliche Fragestellungen im Zusammenhang mit den verschiedenen oben erörterten neuen Trends berücksichtigen. Dazu gehören u.a. die folgenden Aspekte:

ated in the following three decades of industrial-scale remediation certainly is a unique competitive advantage of Wismut today (34).

As one of the world's most complex remediation effort undertaken to date, the Wismut project is now approaching completion representing a value of nearly 7 bn €. The mining town of Schlema once dubbed the "valley of death" by newspapers has been returned to its former glory as a spa resort (Figure 4) and the radioactive hole of the Lichtenberg open pit was turned literally into a "blossoming landscape" (Figure 5) forming an integral part of a national horticultural exhibition. Many Wismut projects are now regarded as benchmark-setting by international organisations like e.g. IAEA and are included in best practice guides. In the process, Wismut turned from a net-recipient of international knowledge at the beginning to a net-exporter that is now a thought after consultant supporting remediation projects across the world (EU, Central Asia, Africa, Latin America etc.) (35). However, despite all the success, there is a need to keep up with latest developments. Some of the future roles and responsibilities envisaged in this field are briefly outlined below.

Past approaches to remediation focussed primarily on reducing health risks to acceptable levels in the most cost-effective and safe way. General decisions to achieve that were based on multi-attribute-analyses for alternative remediation solutions considering construction and long-term costs, health risks (radiological; conventional) among other aspects. Although the Wismut programme considered sustainability aspects such as resource efficiency and high-quality after-use from the very beginning (36), challenges remain in this regard relating to the need for continued after-care, costly mine water management and long-term monitoring efforts (37). Future solutions for remediating mining sites in a global context would now need to consider additional aspects relating to the various emerging trends discussed above. These include inter alia the following:

- ensuring affordability of solutions to less affluent nations of the global South;
- improving economic sustainability to minimise/avoid perpetual post-closure management costs, e.g., pump-and-treat;
- improving water and energy efficiency during and after active remediation;
- repurposing of mine infrastructure;
- valorisation of mine waste in line with the circular zero-waste economy concept;
- strict adherence to ESG principles; and
- digitalisation to optimise long-term monitoring and after care.

In order to implement the above-listed aspects and thereby future-proof the accumulated remediation expertise at Wismut a number of focal areas were identified including the following.

3.1 International collaboration and knowledge transfer

Given the continued prevalence of legacy sites still observed in many countries Wismut regards the sharing and exchanging of knowledge with low- and middle-income countries an essential activity to contribute to future global resource security. The main objective is to jointly develop innovative, affordable, and sustainable solutions for mine closure and remediation of legacy sites.

- Gewährleistung der Finanzierbarkeit von Sanierungslösungen für weniger wohlhabende Länder des globalen Südens,
- Verbesserung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit zur Minimierung/Vermeidung von Ewigkeitskosten für das Nachsorge-management, z.B. für Wasserfassung und -behandlung,
- Verbesserung der Wasser- und Energieeffizienz während und nach der aktiven Sanierung,
- Wiederverwendung der Grubeninfrastruktur,
- Verwertung von Bergwerksabfällen im Einklang mit dem Konzept der abfallfreien Kreislaufwirtschaft,
- strikte Einhaltung der ESG-Grundsätze und
- Digitalisierung zur Optimierung der langfristigen Überwachung und Nachsorge.

Zur Umsetzung der oben genannten Aspekte und damit zur Zukunftssicherung des bei der Wismut angesammelten Sanierungs-Know-hows wurde eine Reihe von Schwerpunktbereichen identifiziert, darunter die folgenden.

3.1 Internationale Zusammenarbeit und Wissenstransfer

Angesichts der Tatsache, dass es in vielen Ländern immer noch zahlreiche Altlasten gibt, betrachtet die Wismut die gemeinsame Nutzung und den Austausch von Wissen mit Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen als eine wesentliche Maßnahme, um zur künftigen globalen Ressourcensicherheit beizutragen. Das Hauptziel ist die gemeinsame Entwicklung innovativer, erschwinglicher und nachhaltiger Lösungen für die Stilllegung von Bergwerken und die Sanierung von Altlasten. Dies ist keineswegs eine Einbahnstraße, sondern kommt auch der Wismut zugute, indem die Mitarbeiter motiviert werden, sich über die neuesten Entwicklungen auf dem Laufenden zu halten. Ein für beide Seiten vorteilhafter Austausch von Wissen und Fachkenntnissen, insbesondere mit rohstoffexportierenden Ländern des globalen Südens, ist eine Möglichkeit, internationale und bundespolitische Richtlinien in die Praxis umzusetzen. Er kann auch dazu beitragen, vertrauensvolle Beziehungen als Voraussetzung für die Entwicklung belastbarer strategischer Ressourcenpartnerschaften aufzubauen. Im Allgemeinen sind Aktivitäten dieser Art nicht kommerzieller Natur und umfassen auch die aktive Teilnahme an IAEO-Initiativen wie UMREG (Uranium Mining and Milling Remediation Exchange Group, die von der Wismut mitbegründet wurde), CGULS (Coordinating Group for Uranium Legacy Sites) oder ENVIRONET. In ähnlicher Weise arbeitet die Wismut auch mit ihren Pendanten in der Tschechischen Republik (DIAMO) und den USA (Office of Legacy Management, DoE) zusammen.

3.2 Forschungspartnerschaften

Ein weiterer zukünftiger Schwerpunkt ist die aktive Beteiligung der Wismut an der bergbaubezogenen wissenschaftlichen Forschung. Aufgrund ihrer großen praktischen Erfahrung mit der Anwendung von Sanierungstechnologien und dem Zugang zu realen Bergbaustandorten hat sich die Wismut zu einem gefragten Partner für die Wissenschaft und Forschung entwickelt. Relevante Themen konzentrieren sich auf innovative Ansätze für das Grubenwassermanagement nach der Stilllegung wie die Speicherung und Erzeugung erneuerbarer Energie in wiederverwendeter Grubeninfrastruktur, die abfallfreie Kreislaufwirtschaft, die

This is by no means a one-way street but also benefits Wismut through motivating staff staying abreast of latest developments. Engaging in mutually beneficial exchange of knowledge and expertise especially with resource exporting countries of the global south is one way of putting international and federal policy guidelines into practice. It may also assist with forming trust-based relationships as a prerequisite for building resilient strategic resource partnerships. Generally, activities of this kind are non-commercial in nature and also include active participation in IAEA initiatives such as UMREG (Uranium Mining Remediation Group co-established by Wismut), CGULS (Coordinating Group for Uranium Legacy Sites) or ENVIRONET. In a similar fashion Wismut also cooperates with its equivalents in Czech Republic (DIAMO) and the USA (Legacy Management, DoE).

3.2 Research partnerships

Another future focal area is the active participation of Wismut in mining-related scientific research. Owing to its vast amount of relevant hands-on experience with full-scale application of remediation technologies and its access to real mining sites Wismut grew into a sought-after partner for scientific research. Relevant themes cluster around innovative approaches to post-closure mine water management like storage and generation of renewable energy in repurposed mine infrastructure, circular zero-waste economy, revalorisation of mine waste, management of NORM (naturally occurring radioactive material) and the management of radon, to name but a few.

3.3 Capacity building

Faced with ever stricter and more sophisticated legislative requirements regarding closure and remediation of mines, many mining operations and regulating authorities around the world struggle to attract qualified staff able to develop adequate concepts and rigorously check compliance, respectively. This skill gap is no longer confined to low- and middle-income countries but increasingly also affects developed nations, even resource-based economies like Canada and Australia where academia struggles to attract talented students for mining and resource related study subjects. Acting as partner to academic institutions specialising in mining and metallurgy in the region as well as of international organisation like the IAEA, or the EU-Erasmus programme, Wismut is therefore committed to actively contribute to capacity building on national and international level.

3.4 Strengthening key competencies

Within the multifaceted field of mine remediation Wismut developed a number of key competencies in niche areas specific to the radioactive nature of the remediated uranium legacy sites. This includes, inter alia, the routine handling of NORM in accordance with applicable legislation on radiological protection. Given the complexity of the associated rules and regulation there are few other entities available in Germany with this level of experience and expertise. Since environmental impacts associated mining CRM are substantial and often associated with NORM, this niche competence of Wismut may well prove crucial for ensuring public acceptance of future mining. Similar scarce skills exist in the field of radon management, where in-

Verwertung von Grubenabfällen, das Management von NORM (natürlich vorkommende radioaktive Stoffe) und das Management von Radon, um nur einige zu nennen.

3.3 Aufbau von Kapazitäten

Angesichts immer strengerer und anspruchsvollerer gesetzlicher Vorschriften für die Stilllegung und Sanierung von Bergwerken haben viele Bergbaubetriebe und Aufsichtsbehörden in der ganzen Welt Schwierigkeiten, qualifiziertes Personal zu finden, das in der Lage ist, angemessene Konzepte zu entwickeln bzw. die Einhaltung der Vorschriften zu kontrollieren. Diese Qualifikationslücke ist nicht mehr nur auf Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen beschränkt, sondern betrifft zunehmend auch Industrienationen, sogar rohstoffbasierte Volkswirtschaften wie Kanada und Australien, wo die Hochschulen Schwierigkeiten haben, talentierte Studenten für bergbau- und rohstoffrelevante Studienrichtungen anzuziehen. Als Partner von auf Bergbau und Metallurgie spezialisierten akademischen Einrichtungen in der Region sowie von internationalen Organisationen wie der IAEA oder dem EU-Erasmus-Programm ist die Wismut daher bestrebt, aktiv zum Aufbau von Kapazitäten auf nationaler und internationaler Ebene beizutragen.

3.4 Stärkung von Schlüsselkompetenzen

Innerhalb des vielschichtigen Bereichs der Bergbausanierung hat die Wismut eine Reihe von Schlüsselkompetenzen in Nischenbereichen entwickelt, die speziell auf die radioaktive Natur der sanierten Uran-Altlasten zugeschnitten sind. Dazu gehört u.a. der routinemäßige Umgang mit NORM in Übereinstimmung mit den geltenden Rechtsvorschriften zum Strahlenschutz. Angesichts der Komplexität der damit verbundenen Vorschriften und Regelungen gibt es in Deutschland nur wenige andere Unternehmen, die über ein derartiges Maß an Erfahrung und Fachwissen verfügen. Da die mit dem Bergbau verbundenen Umweltauswirkungen beträchtlich sind und häufig mit NORM in Verbindung gebracht werden, könnte sich diese Nischenkompetenz der Wismut als wichtiger Beitrag für die Sicherstellung der öffentlichen Akzeptanz künftigen Bergbaus erweisen. Ähnlich knappe Kompetenzen gibt es im Bereich des Radonmanagements, in dem innovative Wege zur Minimierung der Exhalation und Exposition von Wohnhäusern unter teilweise sehr schwierigen Bedingungen entwickelt und angewendet wurden.

3.5 Bergbauausbildung und das Bewusstsein für mineralische Rohstoffe

Um das öffentliche Bewusstsein für die Bedeutung des Abbaus von Bodenschätzen nicht nur im Ausland, sondern auch im Inland zu stärken, fördert die Wismut aktiv einschlägige Bildungsprojekte, die sich an Schulen und die breite Öffentlichkeit richten. Zu den Initiativen gehören das Schulprojekt „Grüne Klasse“ in Ronneburg sowie die Unterstützung mehrerer Museen und Ausstellungen. Ergänzt werden diese Bemühungen durch Beiträge zum UNESCO-Welterbe Montanregion Erzgebirge/Krušnohoří und die neu gegründete Wismut-Erbe-Stiftung. Darüber hinaus unterstützt die Wismut auch Initiativen zur Wiederbelebung aktiven Bergbaus sowie lokale Gruppen zur Bewahrung der Bergbautraditionen.

novative ways of minimising exhalation and exposure of residential homes were developed and applied by Wismut in partly very challenging settings.

3.5 Mining education and mineral resource awareness

In order to increase public awareness on the significance of mineral resource extraction, not only abroad but also at home, Wismut actively promotes pertinent education projects targeting schools and the general public. Initiatives include the “green class” school project at Ronneburg as well as the support of several museums and exhibitions. These efforts are complemented by contributions to the UNESCO world heritage site “Ore Mountains” and the recently established Wismut-Heritage organisation. In addition to this Wismut also supports initiatives to revive active mining as well as local groups preserving mining traditions.

4 Summary and conclusions

Over the past few decades, the global extraction of mineral resources reached scales unprecedented in human history. This trend is set to accelerate even further as the global transition from fossil fuel based to a climate-neutral low-carbon society requires many times more mineral resources and metals than their technological predecessors. Given the associated detrimental ecological effects historical mining all too often had, this results in the paradox that for protecting the climate we risk destroying the environment. Moreover, poor experiences of mining communities with social and environmental degradation feed an increasing resistance against further expansion of global mining. The growing mismatch between supply and demand threatens global supply security and leads to rising nationalism in trying to secure critical minerals often exacerbating geopolitical tensions and the fragility of the resource trade system.

Against this backdrop, the expertise accumulated over decades of coping with mass closure of East-German mines following reunification is regarded as an important strategic asset to help address global challenges in the mineral resource sector. In many respects, strategies and technologies developed for remediating very different types of mining impacts ranging from vast open lignite pits to radioactive uranium legacy sites are now regarded as international leading and benchmark setting.

However, emerging global trends in the resource sector discussed above are now requiring to adapt historic approaches in order to meet changed expectations of today’s society. In terms of remediation this includes, inter alia, reducing long-term post-mining costs especially around the water-energy nexus, e.g., find substitutes for the costly perpetual pump-and-treat approach to post-mining water management, valorisation of mine waste in line with a zero-waste oriented circular economy and above all, ensuring adherence to globally agreed environmental, social and governance standards.

Using the example of the Wismut remediation project, concrete ways are discussed on how accumulated know-how can be applied and expanded to meet future challenges. It is concluded that the internationally leading remediation expertise in Germany is an important potential tool for implementing global political initiatives on the ground thereby helping to secure a sustainable supply of mineral resources.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In den letzten Jahrzehnten hat der weltweite Abbau von Bodenschätzen Ausmaße erreicht, wie sie in der Geschichte der Menschheit noch nie dagewesen sind. Dieser Trend wird sich noch weiter beschleunigen, da der globale Übergang von einer auf fossilen Brennstoffen basierenden zu einer klimaneutralen, kohlenstoffarmen Gesellschaft ein Vielfaches an mineralischen Rohstoffen und Metallen erfordert. Angesichts der damit verbundenen schädlichen ökologischen Auswirkungen, die der historische Bergbau nur allzu oft hatte, führt dies zu dem Paradoxon, dass die Gefahr besteht, zum Schutz des Klimas die Umwelt zu zerstören. Darüber hinaus nähren die schlechten Erfahrungen der Bergbaugemeinden mit sozialer und ökologischer Degradation einen zunehmenden Widerstand gegen eine weitere Expansion des globalen Bergbaus. Das wachsende Missverhältnis zwischen Angebot und Nachfrage bedroht die globale Versorgungssicherheit und führt zu zunehmendem Nationalismus beim Versuch, sich kritische Ressourcen zu sichern, was häufig zu einer Verschärfung geopolitischer Spannungen und der Fragilität des Rohstoffhandelsystems führt.

Vor diesem Hintergrund wird das Fachwissen, das bei der Stilllegung und Sanierung ostdeutscher Bergbaureviere seit der Wiedervereinigung über Jahrzehnte hinweg erworben wurde, als wichtiges strategisches Kapital zur Bewältigung der globalen Herausforderungen im Bereich der mineralischen Rohstoffe angesehen. In vielerlei Hinsicht gelten die Strategien und Technologien, die für die Sanierung sehr unterschiedlicher Arten von Bergbauhinterlassenschaften entwickelt wurden – von riesigen Braunkohlentagebauen bis hin zu radioaktiven Uran-Altlasten – heute als international führend und richtungsweisend.

Die beschriebenen neuen globalen Trends im Rohstoffsektor machen es jedoch erforderlich, bisherige Ansätze zu adaptieren, um den veränderten Erwartungen der heutigen Gesellschaft gerecht zu werden. Im Hinblick auf die Sanierung bedeutet dies u.a., dass die langfristigen Kosten nach Beendigung des Bergbaus gesenkt werden müssen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Wasser-Energie-Nexus, z.B. durch die Suche nach Ersatz für den kostspieligen Ansatz des dauerhaften Abpumpens und Aufbereitens von Wasser nach Einstellung des Bergbaus, durch die Verwertung von Bergbauabfällen im Einklang mit einer abfallfreien Kreislaufwirtschaft und vor allem durch die Gewährleistung der Einhaltung weltweit vereinbarter Umwelt-, Sozial- und Regierungsstandards.

Am Beispiel des Wismut-Sanierungsprojekts werden konkrete Möglichkeiten erörtert, wie das gesammelte Know-how angewandt und erweitert werden kann, um künftigen Herausforderungen zu begegnen. Abschließend wird festgestellt, dass die international führende Sanierungsexpertise in Deutschland ein wichtiges Potential darstellt, um globale politische Initiativen vor Ort umzusetzen und damit einen Beitrag zur Sicherung einer nachhaltigen Versorgung mit mineralischen Rohstoffen zu leisten.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Wellmer, F. W. (2020): Nachhaltigkeit und Rohstoffgewinnung – ein Widerspruch? In: *Bergbau*, 6/2020, S. 261–269.
- (2) United Nations (2021): Policy brief: Transforming extractive industries for sustainable development. May 2021, p 18.
- (3) Luckeneder, S.; Giljum, S.; Schaffartzik, A.; Maus, V.; Tost, M. (2021): Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems. In: *Global Environmental Change*, 69, 102303, doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303.
- (4) Vidal, O.; Goffe, B.; Arndt, N. (2013): Metals for a low-carbon society. In: *Nature Geoscience*, Vol. 6, Nov., pp 894–896, www.nature.com/naturegeoscience
- (5) Glüsing, J.; Hage, S.; Jung, A.; Klawitter, N.; Schultz, S. (2021): Raubbau im Namen der Umwelt. In: *Der Spiegel*, Nr. 44; 30.10.2021, S. 8–16.
- (6) Elshkaki, A.; Graedel, T. E.; Ciacci, L.; Reck, B. K. (2018): Resource demand scenarios for the major metals. In: *Environmental Science & Technology*, 52, pp 2491–2497, DOI: 10.1021/acs.est.7b05154.
- (7) Bazilian, M.; Bradshaw, M.; Goldthau, A. (2019): Model and manage the changing geopolitics of energy. In: *Nature* 569, pp 29–31 (2019), doi: https://doi.org/10.1038/d41586-019-01312-5.
- (8) Watari, T.; McLellan, B. C.; Giurco, D.; Dominish, E.; Yamasue, E.; Nansai, K. (2019): Total material requirement for the global energy transition to 2050: a focus on transport and electricity. In: *Resources, Conservation & Recycling*, 148, pp 91–103, doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015.
- (9) Watari, T.; Nansai, K.; Nakajima, K. (2020): Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. In: *Resources, Conservation & Recycling*, 155, 104669, doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669.
- (10) Bainton, N.; Kemp, D.; Lebre, E.; Owen, J. R.; Marston, G. (2021): The energy-extractive nexus and the just transition. In: *Sustainable Development*, pp 1–11, doi: 10.1002/sd2163.
- (11) International Energy Agency (IEA) (2022): The role of critical minerals in clean energy transition. World energy outlook special report. Revised version, March 2022, www.iea.org/corrections, p 284.
- (12) Thompson, H. (2022): The geopolitics of fossil fuels and renewables reshape the world. In: *Nature*, 603, 364, doi: https://doi.org/10.1038/d41586-022-00713-3.
- (13) Anonymous (2022): Resource nationalism and the metals crunch. In: *Mining Review Africa*, 19th April, miningreview.com.
- (14) Gerdes, I.; Grotelüschen, F.; Knauer, R.; Schick, M.; Titz, S. (2018): The cost of the wind. *Discovered – the HZDR research magazine*, 2/17, pp 2–3.
- (15) Lebre, E.; Stringer, M.; Svoboda, K.; Owen, J. R.; Kemp, D.; Cote, C.; Arratia-Solar, A.; Valenta, R. K. (2020): The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. In: *Nature Communications*, doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9, pp 1–8.
- (16) European Academies Science Advisory Council (EASAC) (2016): Priorities for critical materials for a circular economy. EASAC policy report 29, Nov., ISBN 978-3-8047-3679-5, www.easac.eu, p 21.
- (17) United Nations Environmental Programme (UNEP) (2020): Mineral resource governance in the 21st century. ISBN 978-92-807-3779-0, Report by the International Resource Panel UNEP, Nairobi, Kenya.
- (18) Ernst and Young (EY) (2020): Global mining and metals top 10 business risks and opportunities – 2021. EYG no. 006539-20Gbl, p 34, ey.com/miningmetals.
- (19) Mbere, N.; Steenkamp, S. (2022): ESG in the mining industry: What's missing? In: *Mining Review Africa*, 7th April, miningreview.com.
- (20) Motaung, H. (2022): Jagersfontein crisis – woes of a mining community. In: *Mining Review Africa*, 14th Sep., miningreview.com.
- (21) Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) (2020): Progress report.
- (22) United Nations (UN) (2020): The sustainable development goals report 2019.
- (23) G 7 Germany (2015): Abschlusserklärung G7-Gipfel, 7.–8. Juni 2015, Schloss Elmau.
- (24) Europäische Union (EU) (2017): Verordnung (EU) 2017/821 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2017 zur Festlegung von Pflichten zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette für Unionseinführer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten. Amtsblatt der Europäischen Union, L130/1, 19.5.2017, DE.
- (25) BMWi (2017): Nationaler Aktionsplan Umsetzung der VN-Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte 2016–2020. September 2017, S. 30.
- (26) BMWi (2018): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018, S. 50.
- (27) BMWi (2019a): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen, S. 37.
- (28) BMWi (2019b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III 2020–2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. S. 87.
- (29) BMWi (2021): Rohstoffe. Bergbau, Recycling, Ressourceneffizienz – wichtig für Wohlstand und Arbeitsplätze. 26.2.2020.
- (30) Winde, F. (2020): Turning water pollution sources into assets: exploring innovative options of using abandoned mines for generating and storing renewable energy. In: *Geography, Environment, Sustainability*, 13 (2), pp 6–16, https://DOI-10.24057/2071-9388-2020-03.
- (31) Gatzweiler, R.; Mager, D. (1993): Altlasten des Uranbergbaus. Der Sanierungsfall WISMUT. In: *Die Geowissenschaften* 11 (1993), S. 164–172.
- (32) Leupold, D.; Paul, M. (2007): Das Großprojekt WISMUT – Nachhaltige Sanierung und Revitalisierung von Uranerzbergbaustandorten in Sachsen und Thüringen. In: *Bergbau*, 10 (2007), S. 438–444.
- (33) Beleites, M. (2019): Rückblick auf eine Zeitenwende und Gedanken zur gesellschaftlichen Relevanz der Uranbergbau-Sanierung. Proc. Intern. Bergbausymposium WISSYM 2019, S. 17–18.
- (34) Paul, M.; Barnekow, U.; Dullies, F.; Hiller, A.; Metschies, T.; Schmidt, P. (2019): Innovationen und Langzeiterfahrungen bei der Sanierung der Hinterlassenschaften des ostdeutschen Uranbergbaus. Proc. Intern. Bergbausymposium WISSYM 2019, S. 19–34.
- (35) Schmidt, P.; Barnekow, U.; Kunze, C.; Paul, M.; Walter, U. (2011): Experience gained in transferring Wismut Know-How to international projects in Uranium Mining.
- (36) Paul, M.; Mann, S.; Metschies, T. (2012): Sustainability assessment of the results of the WISMUT Environmental Remediation Programme (1990-2011). Proc. ICARD 2012, Ottawa, Canada 20-26 May 2012, Vol 1, pp 633–645.
- (37) Paul, M.; Meyer, J.; Jenk, U.; Kassahun, A.; Schramm, A.; Baacke, D.; Forbrig, N.; Metschies, T. (2015): Water Management – a Core Task of the Wismut Remediation Programme. In: *Mining Report Glückauf* 151 (2015) No. 6, pp 508–518.

Authors / Autoren

Dr. Michael Paul, Wismut GmbH, Chemnitz/Deutschland,
Dr. habil. Frank Winde, Wismut GmbH, Chemnitz/Deutschland,
North-West University, Potchefstroom/Südafrika