Philipp Büttner
Jonathan Engelhardt

recomine – Sustainable Recycling of Contaminated Mine Waste with a Combination of Environmental Technology, Resource Technology and Digitalization

Abandoned contaminated mining sites such as heaps or slag usually cause major environmental problems, which are or have been rehabilitated in Germany by the government with a large amount of taxes. However, they usually also contain significant amounts of urgently needed strategic raw materials and consist mainly of mineral components that can be used in the ceramics or construction materials industry. These components are not won as part of traditional coverage rehabilitation. "recomine" is a WIR! alliance of over 70 partnering institutions, funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), that deals with the global challenges of contaminated soils and works on innovative, comprehensive concepts regarding their handling. For this matter, the alliance merges a vast know-how in the Erzgebirge region. The partnering institutions in the fields of environmental and resource technology, digitalization, construction materials and community are working together with the aim of marketing the developed, holistic concepts worldwide. First international success was achieved at the BHP Tailings Challenge where the recomine team was chosen by the raw materials conglomerate BHP as one of ten teams out of 153 international contenders for the ongoing proof-of-concept phase.

recomine – Bergbaualtlasten nachhaltig recyceln durch die Kombination von Umwelt-, Ressourcentechnologie und Digitalisierung

Bergbaualtlasten wie Halden oder Schlacken bringen meist große Umweltprobleme mit sich, die in Deutschland mit viel Steuergeld saniert werden bzw. wurden. Sie enthalten jedoch meistens auch noch signifikante Mengen an dringend benötigten strategischen Rohstoffen und bestehen überwiegend aus mineralischen Bestandteilen, die in der Keramik- oder Baustoffindustrie eingesetzt werden können. Im Rahmen der klassischen Sanierung durch Abdeckung werden diese nicht gewonnen. recomine ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes WIR! Bündnis aus über 70 Partnerinstitutionen, welches sich den globalen Herausforderungen zu Bergbaualtlasten stellt und an Innovationen und vor allem ganzheitlichen Konzepten im Umgang mit diesen arbeitet. Das Bündnis vereint dafür ein breites Know-how aus der Region Erzgebirge. Die Partnerinstitutionen aus der Umwelt- und Ressourcentechnologie, Digitalisierung, Baustoffbranche und Gesellschaft arbeiten zusammen mit dem Ziel, die entstehenden holistischen Konzepte global zu vermarkten. Einen ersten internationalen Erfolg hat das Bündnis bereits bei der BHP Tailings Challenge erreichen können. Das recomine-Team wurde vom Rohstoffkonzern BHP als eines von zehn Teams von insgesamt 153 weltweiten Bewerbern für die momentan laufende Proof-of-Concept-Phase ausgewählt.

1 Introduction

During the past ten years, multiple national and European funding programs adressed the resource potential of mining waste (coarse tailings, waste rockpiles, and smelter slag) with a focus on the exploitation of new sources for critical raw materials that were defined as particularly important for the European high-tech industry by the European Committee (1). They are based on the European and national resource strategy (2). One of these programs in Germany was "r^3 - Strategic Metals and Minerals – Innovative Technology for Resource Efficiency", which was founded in 2012 and funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Its aim was to ensure the supply of the German

1 Einleitung

In den letzten zehn Jahren befassten sich mehrere nationale und europäische Förderprogramme mit dem Ressourcenpotential von Bergbauabfällen (Grobbergematerial, Spülhalden und Hüttenschlacken), wobei der Schwerpunkt auf der Erschließung neuer Quellen für kritische Rohstoffe lag, die von der Europäischen Kommission als äußerst wichtig für die europäische High-tech-Industrie definiert wurden (1). Sie beruhen auf den europäischen und nationalen Ressourcenstrategien (2). Eines dieser Programme in Deutschland war das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Programm „r^3 - Strategische Metalle und Mineralien – Innovative Technologien für

economy with strategically significant metals and minerals, and to support projects in the fields of recycling, substitution and reduced resource usage, urban mining, and methods for the evaluation of resource efficiency.

As part of this program, the Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology (HIF) collaborated with partners such as the Technische Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) on various projects on the characterization of mining wastes, and resource exploitation.

HIF pursues the objective of developing innovative technologies for the economy to increase the efficiency of access, use, and environmentally responsible disposal of mineral and metalliferous resources. The HIF was founded in 2011 by the German government as part of the national resource strategy. It is part of the Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) and is closely tied to the TUBAF. In addition, the HIF is an important member of the European network EIT RawMaterials and played a significant role in its establishment.

However, the potential of critical metals in mining waste is not the only topic of current political and public interest. After the catastrophic dam failures in Brazilian mining heaps, e.g., in the Corrego do Feijão mine in Brumadinho (VALE) in 2019, public pressure on the mining industry, tailing operators and managers, e.g., states, and politics increased to lower such risks. The Global Standard on Tailings Management was a new policy developed to prevent such accidents in the future. The International Council on Mining and Metals (ICMM), the UN environment programme and the Principles for Responsible Investment (PRI) collectively advocate for the implementation of global best practices for mining waste. Together they appealed for the global examination of waste dumps to determine an international standard (3).

Due to their environmental risks as well as their high potential as a source for critical and valuable metals, projects on mining waste are very complex. There is a global need for new methods and solutions that are developed from different perspectives with holistic and sustainable approaches under consideration of ecological, technical, social and economic aspects. For this reason, HIF, together with TUBAF, has founded the recomine alliance and coordinates it. The predominantly regional network (Ore Mountains) is developing innovative and holistic solutions with their existing know how and is funded by the BMBF as part of the WIR! program.

2 Major research projects on contaminated soils at the HIF

As part of the r³-program, the HIF began working on the issue of mining waste in the project "Strategic Metals and Minerals from Mine Waste in Saxony (SMSB)". In collaboration with their partners, G.E.O.S Freiberg GmbH, TUBAF, AKW Apparate + Verfahren, and SAXONIA Standortentwicklungs- und verwaltungsgesellschaft mbH, the experts investigated how exactly the mineralogy of old waste dumps can be characterized and how critical raw materials (according to the definition of Critical Raw Materials – CRM by the European Committee) can be extracted in an efficient and environmentally friendly way.

Within the scope of the project, the HIF used the term "remining" to describe the sustainable recycling of mining waste

Ressourceneffizienz", das im Jahr 2012 startete. Ziel war es, die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit strategisch bedeutsamen Metallen und Mineralien zu sichern und Projekte in den Bereichen Recycling, Substitution und reduzierter Ressourcenverbrauch, Urban Mining und Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz zu fördern.

Im Rahmen des Programms arbeiteten das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) mit Partnern wie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) in verschiedenen Projekten zur Charakterisierung von Bergbauabfällen und zur Rohstoffgewinnung zusammen.

Das HIF verfolgt das Ziel, innovative Technologien für die Wirtschaft zu entwickeln, um mineralische und metallhaltige Rohstoffe effizienter verfügbar zu machen, zu nutzen und umweltgerecht zu verwerten. Das HIF wurde 2011 von der Bundesregierung im Rahmen der nationalen Rohstoffstrategie gegründet. Es ist ein Bestandteil des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf (HZDR) und ist eng mit der TUBAF verbunden. Das HIF ist ein Kernmitglied des europäischen Netzwerks EIT RawMaterials und war maßgeblich an dessen Gründung beteiligt.

Doch nicht nur das Potential an kritischen Metallen aus Bergbauabfällen ist heute von politischem und öffentlichem Interesse. Nach den katastrophalen Dammbrüchen bei brasilianischen Bergbauhalden, z.B. in der Corrego do Feijão Mine in Brumadinho (VALE) in Brasilien im Jahr 2019, ist der gesellschaftliche Druck auf die Bergbauindustrie und die Politik gestiegen, diese Risiken zu senken. Mit dem Global Industry Standard on Tailings Management wurde ein neues Regelwerk entwickelt, um solche Unfälle in Zukunft zu vermeiden. Das International Council on Mining and Metals (ICMM), das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und die Principles for Responsible Investment (PRI) setzen sich gemeinsam für die Einführung globaler Best Practices für Bergbauabfälle ein. Sie haben gemeinsam zur globalen Überprüfung von Abraumhalden aufgerufen, um einen internationalen Standard festzulegen. (3)

Ihre Umweltrisiken und gleichzeitig ihr hohes Potential als Quelle für kritische und wertvolle Metalle machen Projekte für Bergbauabfälle komplex. Es besteht ein weltweiter Bedarf an neuen Lösungsansätzen, die aus verschiedenen Perspektiven mit ganzheitlichen und nachhaltigen Ansätzen und unter Berücksichtigung ökologischer, technischer, sozialer und wirtschaftlicher Aspekte entwickelt werden. Aus diesem Grund hat das HIF zusammen mit der TUBAF die recomine-Allianz gegründet und koordiniert diese. Das überwiegend regionale Netzwerk (Erzgebirge) entwickelt aus dem bestehenden Know-how in der Region innovative und ganzheitliche Lösungen für Bergbauabfälle und wird vom WIR! Programm (Wandel durch Innovation in der Region) des BMBF gefördert.

2 Die wichtigsten Forschungsprojekte zu Bergbaualtlasten am HIF

Im Rahmen des r³-Programms hat das HIF mit dem Projekt „Strategische Metalle und Mineralien aus sächsischen Bergbaurestlöchern (SMSB)" begonnen, die Problematik der Bergbauabfälle zu bearbeiten. Gemeinsam mit den Partnern G.E.O.S. Freiberg GmbH, TUBAF, AKW Apparate + Verfahren und der SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH untersuchten die Experten, wie die Mineralogie alter Abraumhalden genau charakterisiert

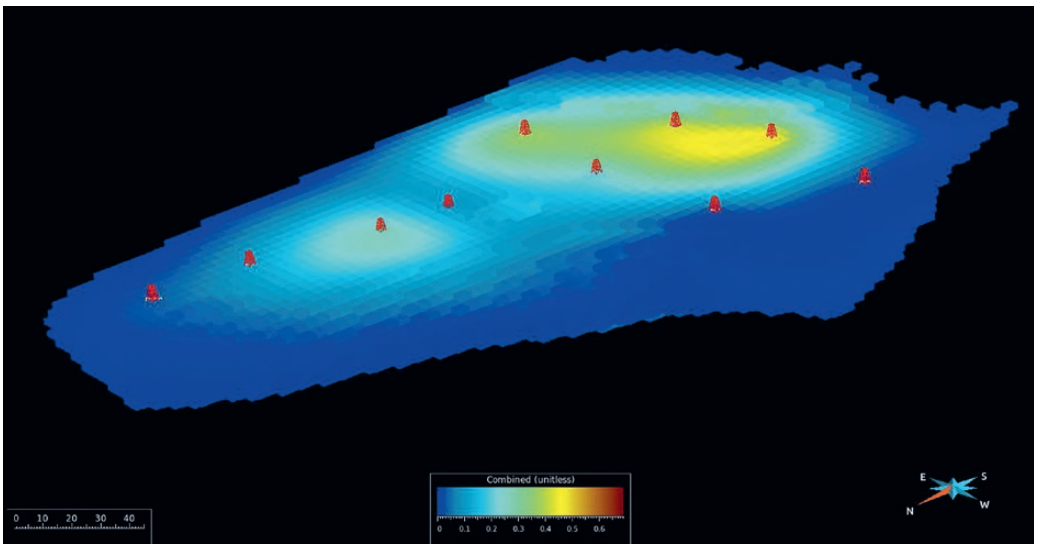

Fig. 1. Resource potential model (3D) of the Davidschacht tailing in Freiberg – processability of the minerals by bioleaching under consideration of material parameters and process limits (red = high processability, blue = low processability).
Bild 1. Ressourcenpotentialmodell (3D) der Spülhalde Davidschacht in Freiberg – Aufbereitbarkeit der Minerale per Biolaugung unter Berücksichtigung der Materialparameter und Prozesslimits (rot = sehr gut aufbereitbares Material, blau = sehr schlecht aufbereitbares Material). Source/Quelle: HIF

and the holistic "near zero waste" approach. The term represents the idea of minimizing the environmental risk of waste dumps that contain large amounts of heavy metals and simultaneously extracting valuable metals. Within the SMSB project, data of the 20 biggest mine waste dumps and tailings in Saxony – including their geographical position, ownership, structure, raw material content, value-added potential of the heaps as well as the origins of the contained materials – were registered in a data base. Two of the waste dumps were examined in detail via a drilling campaign and sampling in combination with processing tests of the overburden material by using flotation, and bioleaching technology. Based on the detailed mineralogical data from the liner samples, e.g., particle size, geochemical information (concentration of valuable metals/minerals) and the liberation of minerals that were measured with an automated mineralogical analysis, a 3D tailingsmodel was constructed (Figure 1) in which geostatistical interpolation methods and the integration of old data were used. Due to a weighting function for the three most important material characteristics for preparation the model considers particle behaviour in the processing line and delivers a realistic estimation of the resource extraction in the examined pile (4).

In the interdisciplinary SMSB project HIF has further developed its know-how in several disciplines, e.g., remote sensing, mineralogical characterisation of mining waste, geostatistical 3D modelling, bioleaching of sulfidic tailings and the fine particle processing by flotation. The promising results of the project have high potential for appliance in the raw material sector, however, there is still room for improvement. Over the past years, knowledge about the characterization and processing of mining waste has been broadened in many follow-up projects.

In these projects, partly completed, partly on-going, many valuable insights regarding the realistic estimation of resource potential of heaps have been gained. The most important lesson that can be learned from the mining waste projects of the HIF, is that there is no general method for the estimation of mine waste potential. Each mine waste dump is different. Each site has its own history. In the past, different technologies were used for different primary resources in a particular regional area. Even if

werden kann und wie die kritischen Rohstoffe (nach Definition der europäischen Kommission zu Critical Raw Materials – CRM) wirtschaftlich und umweltfreundlich gewonnen werden können.

Im Rahmen des Projekts hat das HIF den neuen Begriff „Re-Mining" eingeführt, um die nachhaltige Wiederaufbereitung von Bergbaureststoffen und den ganzheitlichen „Near Zero Waste"-Ansatz zu beschreiben. Der Begriff steht für die Idee, das Umweltrisiko von Abraumhalden, die große Mengen an Schwermetallen enthalten, zu minimieren und gleichzeitig wertvolle Metalle zu gewinnen. Im Rahmen des SMSB-Projekts wurden die Daten der 20 größten sächsischen Abraumhalden – einschließlich geografischer Lage, Eigentumsverhältnissen, Struktur, Rohstoffgehalt, Wertschöpfungspotential der Halden sowie die Herkunft der darin befindlichen Materialien – in einer Datenbank erfasst. Zwei der Abraumhalden wurden mit einer Bohrkampagne und Liner-Probenahmen in Kombination mit Verarbeitungstests des Abraummaterials unter Verwendung von Flotations- und Biolaugungstechnologien eingehend untersucht. Auf der Grundlage der detaillierten mineralogischen Daten aus den Liner-Proben, wie z.B. Partikelgröße, geochemische Informationen (Konzentration wertvoller Metalle/Mineralien) und der Liberierung der Minerale, die durch eine automatisierte mineralogische Analyse gemessen wurden, konnte ein 3D-Abraummodell erstellt werden (Bild 1), indem geostatistische Interpolationsmethoden und die Integration von Fernerkundungs- und historischen Daten verwendet wurden. Dank einer Gewichtungsfunktion der drei wichtigsten Materialeigenschaften berücksichtigt das Modell das Verhalten der Partikel in der Aufbereitungsstrecke und liefert eine realistische Schätzung der Ressourcenextraktion für die untersuchte Halde (4).

Im interdisziplinären SMSB-Projekt hat das HIF sein Know-how in mehreren Disziplinen weiterentwickelt, wie z.B. in der Fernerkundung, der mineralogischen Charakterisierung von Bergbauabfällen, der geostatistischen 3D-Modellierung der Biolaugung und der Feinpartikelaufbereitung durch Flotation. Die vielversprechenden Ergebnisse des Projekts haben ein hohes Potential für eine Anwendung in der Rohstoffindustrie, lassen aber noch Raum für Verbesserungen. In mehreren Folgeprojekten konnte das Wissen über die Charakterisierung und Aufbereitung von Bergbauabfällen in den letzten Jahren stark erweitert werden.

there is a high content of valuable metals and minerals, there is no guarantee for the successful reprocessing of heaps. Besides, technical challenges, that mainly depend on the mineralogical parameters of the material, the success in other challenges decides whether the mineralogical potential can be transferred into an efficient and ecological reprocessing project. Three categories of characteristics are to be considered: the mineralogical and site-specific potential, the technological potential, as well as social and ecological aspects.

2.1 Mineralogical and site-specific potential

At the beginning of each investigation of mining waste, it is necessary to accumulate all available publications, data, maps and older information about past mining and processing activities and the tailing itself. It is of great importance to know the past processing flowsheet and to understand which part of this process the waste dumps resulted from. There is a significant difference between material from a shaking table and material from other technologies such as magnetic separators or flotation cells. This information about past processing can give an impression of the current state of the material.

The mineralogical potential of the mining waste must be characterized by detailed mineralogical and geochemical analyses. It is necessary to understand the mineralogical composition of the material, the liberation and particle size distribution, to decide which type of processing leads to efficient extraction of the desired minerals and metals. Moreover, further important questions regarding content of toxic elements and minerals within the material will be answered. In accordance with national laws and regulations, the hazardous components of the mining wastes must be subjected to a special, costly disposal or treatment if the concentration exceeds certain levels which must be considered in a feasibility study for re-mining.

Other site-specific parameters that are part of this category must be investigated as well. The volume and homogeneity of the investigated site are two of those parameters, since both are needed to estimate the actual amount of valuable metals in the heap. The volume defines a specific body in which valuable metals are to be expected. It can be taken from old data or determined via remote sensing technology (Figure 2) in combination with old maps.

Informations of homogeneity are important for knowing whether material parameters and the concentration of precious metals within a heap are changing significantly. Thus, a geostatistical sample-taking strategy is necessary to obtain representative samples with reliable information about homogeneity and mineral characterization. Mine waste dumps also have great value in regard to the covered area. If the site is located near larger cities, the value of the emerging property can be considered in a feasibility study if the amount of material is considerably reduced by reprocessing. Metal prices also have an impact on the efficient feasibility of a reprocessing project. In case of volatile metal prices, it is important to calculate different scenarios. Finally, it is important to closely analyse the site-specific infrastructure. There is a difference between an area with on-going mining and processing activity with active facilities and an abandoned site in need of capital-intensive investments in new facilities. It is necessary to

In diesen teils abgeschlossenen, teils noch laufenden Projekten wurden sehr wertvolle Erfahrungen bei der realistischen Abschätzung des Ressourcenpotentials von Halden gemacht. Die wichtigste Lektion, die man aus den Bergbauabfallprojekten am HIF gelernt hat, ist, dass es keine allgemeingültige Methode zur Abschätzung des Potentials von Bergbauabfällen gibt. Jede Abraumhalde ist anders. Jeder Standort hat seine eigene Geschichte. In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Technologien für verschiedene Primärressourcen in einem bestimmten regionalen Umfeld eingesetzt. Selbst wenn der Gehalt an wertvollen Metallen und Mineralien hoch ist, bedeutet dies keine Garantie für eine erfolgreiche Wiederaufbereitung einer Halde. Neben den technischen Herausforderungen, die hauptsächlich von den mineralogischen Parametern des Materials abhängen, entscheidet auch der Erfolg bei anderen Herausforderungen darüber, ob das mineralogische Potential in ein ökonomisch und ökologisch machbares Wiederaufbereitungsprojekt umgewandelt werden kann. Dabei sind drei Gruppen von Merkmalen zu unterscheiden: das mineralogische und standörtliche Potential, das technologische Potential sowie die sozialen und ökologischen Aspekte.

2.1 Das mineralogische und standörtliche Potential

Zu Beginn jeder Untersuchung von Bergwerksabfällen ist es notwendig, alle verfügbaren Veröffentlichungen, Datensätze, Karten und historischen Informationen über die früheren Bergbau- und Aufbereitungstätigkeiten sowie die Halde selbst zu sammeln. Es ist wichtig, das frühere Verarbeitungsschema zu kennen und zu verstehen, aus welchem Teil dieses Schemas die Abraumhalden genau stammen. Es ist ein großer Unterschied, ob das Material von einem Rütteltisch oder anderen Technologien wie Magnetabscheidern oder aus einer Flotationszelle stammt. Diese Informationen über die frühere Verarbeitung können bereits eine Vorstellung vom derzeitigen Zustand des Materials vermitteln.

Das mineralogische Potential der vorhandenen Bergbauabfälle muss dann durch eine detaillierte mineralogische und geochemische Untersuchung abgeschätzt werden. Es ist notwendig, die mineralogische Zusammensetzung des Materials, die Freisetzung und die Korngrößenverteilung zu verstehen, um zu entscheiden, welcher Aufbereitungsweg zu einer effizienten Gewinnung der wertvollen Phasen führen kann. Darüber hinaus werden weitere wichtige Fragen nach den Gehalten an toxischen Elementen und Mineralien im Material beantwortet. Gemäß den nationalen Gesetzen und Vorschriften müssen diese gefährlichen Bestandteile einer speziellen und kostspieligen Deponierung bzw. Behandlung unterzogen werden, wenn die Konzentrationen über bestimmten Grenzwerten liegen. Etwaige Entsorgungen gilt es in Machbarkeitsstudien zu berücksichtigen.

Auch andere standortbezogene Parameter, die zu dieser Gruppe gehören, müssen untersucht werden. Das Volumen und die Homogenität des untersuchten Standorts sind zwei dieser Parameter. Beide werden benötigt, um die tatsächliche Menge an wertvollen Metallen in einer Halde abzuschätzen. Das Volumen definiert einen bestimmten Körper, in dem wertvolle Metalle zu erwarten sind. Es kann durch historische Datensätze gegeben sein oder durch Fernerkundungstechnologien (Bild 2) in Kombination mit historischen Karten erstellt werden.

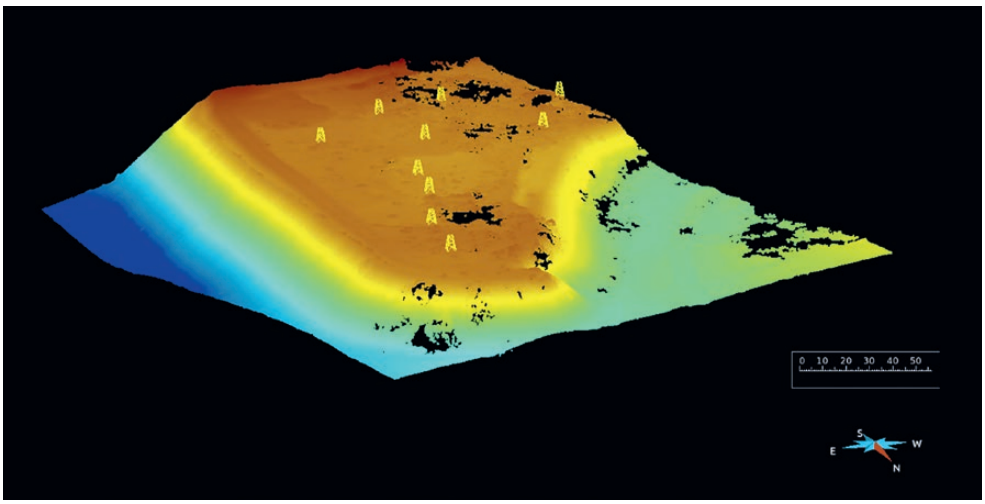

Fig. 2. Digital elevation model of the Davidschacht tailing in Freiberg which was recorded via drones. In combination with old map and layout material this can be used for the detailed estimation of pile volume using special software, e.g., GOCAD.
Bild 2. Digitales Höhenmodell der Spülhalde Davidschacht in Freiberg, welches mittels Drohnen aufgenommen wurde. In Kombination mit historischem Karten- und Rissmaterial kann dies zur detaillierten Bestimmung des Haldenvolumens mit spezieller Software, z.B. GOCAD, genutzt werden.
Source/Quelle: HIF

know the distance to the closest smelting operation which can be a potential purchaser of locally generated metal concentrates. Based on this distance, transport costs can be estimated.

2.2 Technological potential

Based on a detailed investigation of the mineralogical and site-specific potential, the technological potential must be evaluated. The aim must be to answer questions on whether a technology is capable of efficiently extracting the desired metals and minerals from the material. Good understanding of the target minerals' parameters, and the material matrix is required to choose a suitable technology. This means a site-specific combination of different technologies, such as milling, crushing, magnetic separation, chemical and biological leaching, flotation, hydrometallurgical and pyrometallurgical steps, sensor-based sorting, density separation and more. Pilot scale experiments must test and optimize the performance of each step in a flowsheet. Some of the most important flowsheet parameters are

- total energy consumption of the facility;
- recovery rate of processing activities;
- yield in the final concentrate;
- percentage of toxic elements in the concentrate;
- facility performance;
- logistic costs of the operation for concentrate production.

All these parameters have significant impact on CAPEX, OPEX and revenue. Each individual parameter can lead to a reprocessing activity becoming inefficient and must therefore be considered. However, economic use must also be incorporated in the resulting concepts since holistic recycling of heaps can save the government, or mining operation, more money long-term than traditional rehabilitation (coverage with on-going control/maintenance) that causes eternity costs.

2.3 Social and ecological aspects

Aside from the technical, mineralogical and site-specific aspects, there are always certain non-technical, social aspects in a working area that can affect reprocessing projects positively or negatively. These aspects must be investigated. They can be distinguished in two categories: environmental aspects and social aspects. Environmental aspects can be viewed from two perspec-

Informationen über die Homogenität sind wichtig, um zu wissen, ob sich die Materialparameter und die Konzentration von Edelmetallen innerhalb dieses Haldenkörpers wesentlich verändern. Daher ist eine geostatistische Probenahmestrategie erforderlich, um repräsentative Proben mit zuverlässigen Informationen über die Homogenität und die Mineralcharakterisierung zu erhalten. Abraumhalden haben auch einen Wert in Bezug auf ihre bedeckte Fläche. Befindet sich der Standort in der Nähe größerer Städte, kann der Wert des Grundstücks in der Durchführbarkeitsstudie berücksichtigt werden, wenn durch die Wiederaufbereitung die Materialmenge erheblich reduziert wird. Auch die Metallpreise haben einen Einfluss auf die wirtschaftliche Durchführbarkeit des Wiederaufbereitungsprojekts. Bei starken Schwankungen des Metallpreises ist es wichtig, verschiedene Fälle zu berechnen. Schließlich ist es wichtig, die am Standort vorhandene Infrastruktur näher zu betrachten. Es ist ein großer Unterschied, ob in dem Gebiet noch Bergbau- und Aufbereitungsaktivitäten mit aktiven Anlagen stattfinden oder ob der Standort aufgegeben wurde und eine kapitalintensive Investition in neue Anlagen erforderlich ist. Es ist notwendig, die Entfernung zum nächsten Hüttenunternehmen zu kennen, das ein potentieller Abnehmer für ein vor Ort erzeugtes Metallkonzentrat sein wird. Anhand dieser Entfernung lassen sich die Transportkosten abschätzen.

2.2 Das technologische Potential

Auf der Grundlage einer detaillierten Untersuchung des mineralogischen und standörtlichen Potentials muss das technologische Potential abgeschätzt werden. Ziel muss es sein, die Frage zu beantworten, ob eine Technologie in der Lage ist, die gewünschten Metalle und Mineralien wirtschaftlich aus dem Material zu gewinnen. Durch ein tiefes Verständnis der Parameter der Zielminerale und der Matrix des Materials kann eine Technologie ausgewählt werden. Anhand dieser muss dann ein Aufbereitungsschema entwickelt werden. Dabei handelt es sich um eine standortspezifische Kombination verschiedener Technologien, wie z.B. Mahlen, Zerkleinern, Magnetabscheidung, chemische oder biologische Auslaugung, Flotation, hydro- oder pyrometallurgische Schritte, sensorgestützte Sortierung, Dichteseparation oder andere. Bei Versuchen im Pilotmaßstab muss die Leistung jedes Schritts im Flowsheet gemessen und optimiert werden. Einige der wichtigsten technischen Parameter für das Flowsheet sind

tives. From one perspective, mining waste is seen as a source of emissions that can cause negative mutual reactions in the environment. Contamination caused by heavy metals, contaminated dust emissions or acidic drainage can impact the surrounding ecosystems negatively. Usually, this results in pressure on local authorities to take rehabilitation measures that are very expensive for the entire community.

If a holistic re-mining concept can eliminate or immobilize these hazardous emissions, while simultaneously winning valuable metals, the community can profit from this new, sustainable rehabilitation concept. Earnings from the metal sale can refinance the rehabilitation so that less public money must be used for the emission issue. In addition, no eternity costs are created in comparison to traditional rehabilitation, which usually covers the waste with a dense layer, since hazardous compounds are extracted, concentrated and disposed in small amounts in special dumps, or steadily immobilized during the process. Moreover, a new source of critical resources is created, which can assist the supply of high-tech industrial nations that depend on CRM.

However, environmental aspects can also interfere with re-mining projects. Abandoned mining dumps have often been deserted after mining activities had been shut down. Nature has often reclaimed these areas where rare, heavy metal resistant plants could grow unhindered and rare animals could generate new populations. Since such habitats are scarce in our man-made landscape, these abandoned mining dumps are often refugia for highly protected and rare species. European and national environmental protection laws are very strict, e.g., regarding the sand lizard in Germany. Processing mining waste would result in disturbing these protected animals, which is legally possible, if there is a legitimate collective interest, i.e. a high risk of toxic emissions. The motivation of economic metal winning, even if it supplies critical metals to the national industry, is legally insufficient. This aspect is very important and can cease re-mining activity. Figure 3 shows how nature has progressed in the Davidschacht tailing in Freiberg that was shut down over 40 years ago.

The category of social aspects is closely linked to local history. Land ownership is one of these aspects. While mining was run by state-owned operations in the former German Democratic Republic (GDR), the working area was often dispossessed property that had been merged by authorities to one or multiple larger parcels of land. Nowadays, e.g., in the newly formed German States most mining wastes are located on a few or one individual parcel that usually belongs to a single owner.

In the former West German States mining wastes are often spread over more than ten parcels that all belong to different owners. To initiate a reprocessing project, all owners would have to sell their parcels, or at least be willing to participate in such a project, which can hinder the realisation of a reprocessing enterprise. This is mainly a German issue. However, it must be considered to estimate the actual re-mining potential in this country.

In 2020, the mining region Ore Mountains was named a World Heritage Site. This resulted in another social aspect of importance. Historical mining sites including heaps with high mineralogical potential are part of the protected area. To rework these areas, it is necessary for the UNESCO-department in Paris to first approve the concept to prevent the region from los-

- der Gesamtenergieverbrauch der Anlage,
- die Rückgewinnungsrate des Verarbeitungsprozesses,
- der Gehalt des Endkonzentrats,
- der Gehalt an gefährlichen Elementen im Konzentrat,
- die Leistung der Anlage,
- die Logistikkosten für den Betrieb der Konzentratproduktion.

Alle diese Parameter haben einen großen Einfluss auf CAPEX, OPEX und die Verkaufserlöse. Jeder einzelne Parameter kann dazu führen, dass eine Wiederaufbereitungsaktivität unwirtschaftlich wird und muss daher berücksichtigt werden. Allerdings muss in den resultierenden Konzepten auch der volkswirtschaftliche Nutzen Berücksichtigung finden, da eine ganzheitliche Verwertung der Halden im Vergleich zu einer mit Ewigkeitskosten verbundenen klassischen Sanierung (Abdeckung mit dauerhafter Kontrolle/Pflege) dem Staat – oder dem Bergbauunternehmen – langfristig viel Geld spart.

2.3 Die sozialen und ökologischen Aspekte

Neben den technischen, mineralogischen und standortspezifischen Aspekten hat eine Abbaustätte immer auch nicht-technische, soziale Aspekte, die ein potentielles Wiederaufbereitungsprojekt begünstigen oder behindern können. Diese Aspekte müssen untersucht werden. Sie können in zwei Gruppen unterteilt werden: Umweltaspekte und soziale Aspekte. Die Umweltaspekte können aus zwei verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Eine Perspektive ist, dass die Bergbauabfälle eine Emissionsquelle darstellen und negative Wechselwirkungen mit der Umwelt haben. Schwermetallverunreinigungen, kontaminierte Staubemissionen oder saure Drainagen wirken sich negativ auf die umliegenden Ökosysteme aus. Dies führt in der Regel zu einem sozialen Druck auf die regionalen Behörden, Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen. Sanierungen kosten die Gesellschaft Geld.

Wenn ein ganzheitliches Re-Mining-Konzept diese gefährlichen Emissionen beseitigt oder immobilisiert und gleichzeitig die wertvollen Metalle gewinnt, wird die Gesellschaft von diesem neuen nachhaltigen Sanierungskonzept profitieren. Einnahmen aus dem Metallverkauf können die Sanierung refinanzieren, sodass weniger Steuergelder für die Lösung des Emissionsproblems aufgewendet werden müssen. Auch fallen im Vergleich zur klassischen Sanierung, bei der die Abfälle in der Regel mit einer dichten Schicht abgedeckt werden, hier keine Ewigkeitskosten an, da die gefährlichen Stoffe bei der Materialaufbereitung extrahiert, konzentriert und in geringen Mengen in speziellen Deponien abgelagert werden. Andererseits wird eine neue Quelle für kritische Rohstoffe geschaffen, welche die Versorgung der von CRM abhängigen High-Tech-Industrienationen stärkt.

Aber auch Umweltaspekte können Re-Mining-Projekte behindern. Bergbauhalden wurden oft zurückgelassen, nachdem die Bergbautätigkeit eingestellt wurde. Sehr oft hat sich die Natur das Gebiet zurückerobert, seltene schwermetallresistente Pflanzen konnten ungestört wachsen und seltene Tiere konnten an diesen Standorten große Populationen entwickeln. Da wir solche Lebensräume in unserer Kulturlandschaft nur noch selten vorfinden, sind die stillgelegten Bergbauhalden oft Rückzugsgebiete für hoch geschützte seltene Arten. Das europäische und nationale Umweltschutzrecht ist sehr streng, z.B. für die Zauneidechse in Deutschland. Die Aufbereitung der Bergbauabfälle bedeutet eine Störung

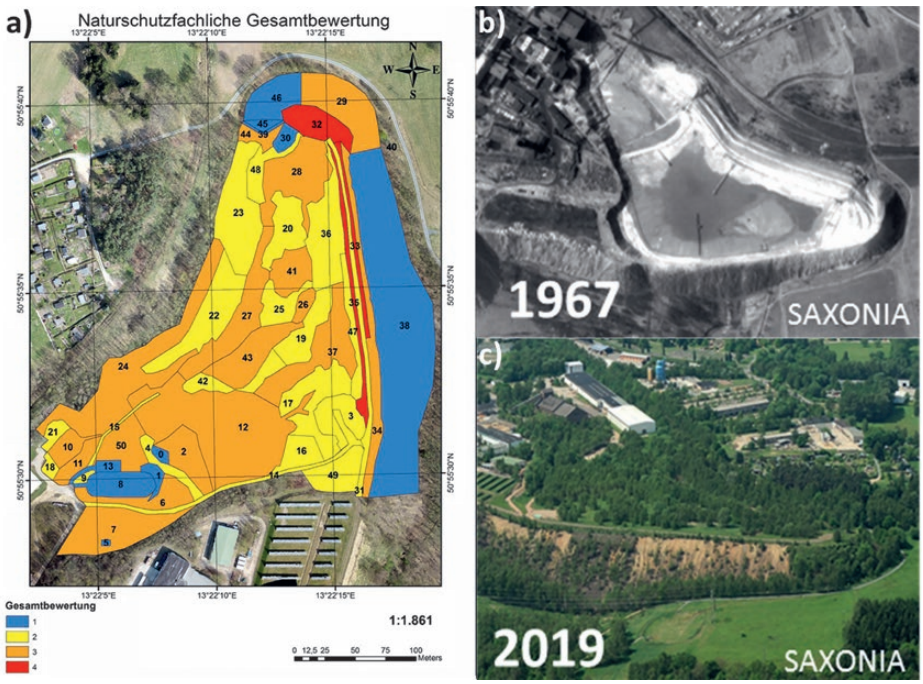

Fig. 3. a) Extract of the sand lizard biotope mapping of the Davidschacht tailing. The red areas show large occurrences of the strictly protected species in the heap. b) Aerial shot of the Davidschacht tailing at the time of its closure in 1967. c) Aerial shot of the Davidschacht tailing in 2019. The majority of the surface was left uncovered, today there is a birch forest that houses a variety of partially rare and strictly protected animal and plant species. (5)
Bild 3. a) Ausschnitt der Biotopkartierung der Spülhalde Davidschacht für die Zauneidechse. Die roten Bereiche weisen hohe Vorkommen der streng geschützten Art auf der Halde aus. b) Luftbild der Spülhalde Davidschacht in der Zeit Ihrer Schließung 1967. c) Luftbild der Spülhalde Davidschacht 2019. Die Oberfläche der Halde wurde zu großen Teilen nicht abgedeckt, mittlerweile befindet sich dort ein Birkenwald mit zahlreichen, teils seltenen und streng geschützten Tier- und Pflanzenarten. (5)

ing its World Heritage status. Should the re-mining enterprise jeopardize this status, it is very likely that it will not be collectively accepted which leads to the abortion of the project.

Actual land use, or classification is another important criterion. Heaps can be overbuilt with civic infrastructure, such as solar plants, or be part of designated woodland or preserved areas. The accessibility of these mine waste dumps must be evaluated before the start of a project. If the site is located in a national park or in a preserved area, it is unlikely that a reprocessing project will be licensed.

After all, social acceptance is generally of great importance. How is the project going to impact surrounding communities? Is mining part of the regional identity, or would re-mining interfere with this identity, e.g., if it is a tourist region and the dust and noise pollution caused by trucks impacts businesses negatively.

3 recomine – conceptual design for resource-oriented environmental technology

It is important for the future to develop new holistic concepts for mining waste that not only consider social, but also technical and mineralogical aspects and can combine resource technology, environmental technology and digitalization to create social values and sustainable solutions for modern mining.

For this reason, the HIF founded the recomine alliance in 2018 that is funded by the BMBF as part of its WIR! programme until 2025 and will act independently from then on. The association shares a

der geschützten Tiere, was gesetzlich nur möglich ist, wenn die Gesellschaft ein berechtigtes Interesse hat, z.B. wenn ein hohes Risiko durch toxische Emissionen besteht. Die Motivation einer wirtschaftlichen Metallgewinnung, auch wenn sie einer nationalen Industrie kritische Metalle liefert, ist rechtlich nicht ausreichend. Dieser Aspekt ist sehr wichtig und kann eine Re-Mining-Aktivität stoppen. Bild 3 zeigt, wie die Natur sich auf der vor über 40 Jahren geschlossene Spülhalde Davidschacht in Freiberg entwickelt hat.

Soziale Aspekte sind stark mit der regionalen Geschichte verbunden. Die Grundbesitzverhältnisse sind einer dieser Aspekte. Während der Bergbau in der ehemaligen DDR von staatlichen Unternehmen betrieben wurde, handelte es sich bei der genutzten Fläche oft um enteignetes Land, das von den Behörden in einer oder mehreren größeren Parzellen zusammengefasst wurde. Dementsprechend erstrecken sich heute in den neuen Bundesländern die Bergbauabfälle auf einige wenige Flurstücke oder auf jeweils ein Flurstück, das meist einem Eigentümer gehört.

In den alten Bundesländern erstrecken sich die Bergbauabfälle oft über mehr als zehn Parzellen, die verschiedenen Eigentümern gehören. Um einen Wiederaufbereitungsprozess zu starten, müssen alle Eigentümer ihre Parzellen verkaufen oder sich zumindest an einem solchen Projekt beteiligen, was die Realisierung eines Wiederaufbereitungsprojekts erheblich erschwert. Dies ist in erster Linie ein deutsches Problem, muss aber berücksichtigt werden, um das tatsächliche Wiederabbaupotential hierzulande abzuschätzen.

Der UNESCO-Welterbestatus wurde der Bergbauregion Erzgebirge im Jahr 2020 verliehen. Damit ist ein weiterer gesellschaftlicher Aspekt eingetreten, der berücksichtigt werden muss. Historische Bergbauflächen einschließlich Bergbauhalden mit hohem mineralogischem Potential sind Teil der Schutzgebiete. Um diese Gebiete umzuwandeln, muss das UNESCO-Büro in Paris zunächst zustimmen, dass die Region ihren Status als UNESCO-Welterbe nicht verliert. Wenn ein Wiederabbauprojekt diesen Status gefährdet, ist es sehr wahrscheinlich, dass die gesellschaftliche Akzeptanz für das Projekt nicht gegeben ist, was zum Abbruch des Projekts führt.

Die tatsächliche Landnutzung bzw. Klassifizierung ist ein weiteres wichtiges Kriterium. So können Haldenkörper z.B. mit städtischer Infrastruktur, z.B. Solaranlagen, überbaut sein oder sie sind Teil eines ausgewiesenen Wald- oder Naturschutzgebiets. Die Zugänglichkeit der Abraumhalden muss geklärt werden, bevor ein Projekt gestartet werden kann. Liegt der Standort in einem Nationalpark oder Naturschutzgebiet, ist es unwahrscheinlich, dass eine Genehmigung für ein Wiederaufbereitungsprojekt erteilt wird.

vision of further developing local skills in the field of environmental, and resource technology for the exploitation of disperse raw material sources. Common contaminated sites such as the trial and pilot areas in the Ore Mountains are examples for mining waste sites around the globe. The rehabilitation of these sites can be financed by reprocessing leftover raw materials. Based on numerous specific activities in this field, e.g., equity-financed research programmes and industry competitions, such as the BHP Tailings Challenge, a global increase in the need for holistic solutions for contaminated sites in the mining industry can be seen. Since the publication of the new "Global Industry Standard on Tailings Management" 2020 in London, that focuses on its "zero harm" concept (no more harm caused by contaminated sites), many mining companies have worked out concrete measures for the reduction and recycling their mine waste. This holds high potential for further development and the global marketing of this know-how for the Ore Mountains region, that is very experienced in the handling of contaminated sites and for the recomine association itself. The recomine vision is shown in figure 4.

Typical recomine projects adress coarse mine waste and tailings, pit and mine water, as well as slags and ashes since these material flows are considered the main contaminated waste streams from the mining industry. In addition, social issues that are closely connected to the topic will be addressed.

Local industry partners and research institutions not only have comprehensive know-how in resource and environmental technology, but also considerable knowledge of automation and sensor technology. By using this know-how, future-proof and highly efficient technology can be established.

The mining and smelter history of the Ore Mountains region, that dates back multiple centuries, makes the region an ideal model location for the development of environmental and resource-oriented technology in pilot facilities for the international market. For this reason, five development sites were set up in the recomine alliance:

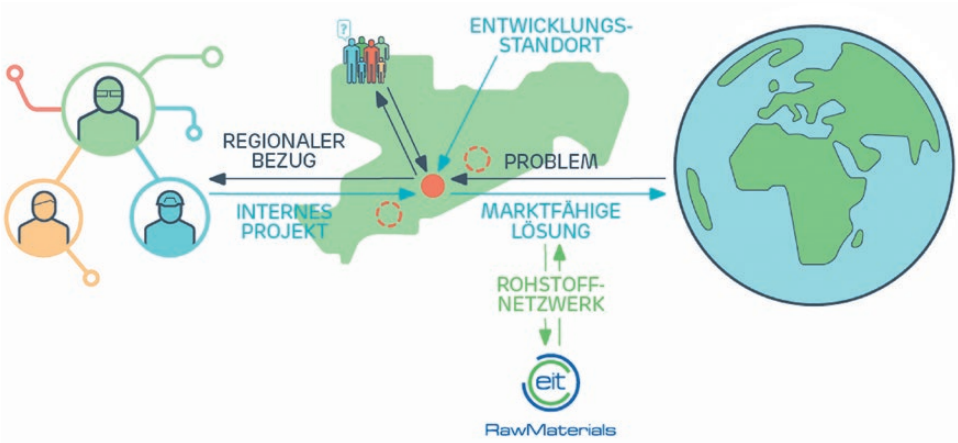

Fig. 4. The recomine vision: Internationally relevant and innovative solutions for the issue of contaminated sites are developed in local development sites and tested under real conditions. In the future, these sites are to be used as training and meeting locations that market the locally developed concepts worldwide, i.e. via pilot facilities. // Bild 4. Die recomine-Vision: An regionalen Entwicklungsstandorten sollen innovative Lösungen für Altlastenfragestellungen von weltweiter Relevanz entwickelt und unter realen Bedingungen erprobt werden. Die Standorte sollen zukünftig auch Ausbildungs- und Begegnungsstätten sein, über welche die regional entwickelten Konzepte weltweit vermarktet werden können, beispielsweise durch Demonstrationsanlagen. Source/Quelle: HIF

Nicht zuletzt ist auch die soziale Akzeptanz wichtig. Wird sich das Projekt auf die umliegenden Gemeinden auswirken und wie? Gehört der Bergbau zur Identität der Region oder wird der Wiederabbau die Identität stören, z. B. wenn es sich um eine Fremdenverkehrsregion handelt und die Staub- und Lärmemissionen der Lkw sich negativ auf das Geschäft auswirken.

3 recomine – Konzeptentwicklung für ressourcenorientierte Umwelttechnologien

Für die Zukunft ist es notwendig, neue ganzheitliche Konzepte für Bergbauabfälle zu entwickeln, die sowohl die sozialen als auch die technischen und mineralogischen Aspekte berücksichtigen und die Ressourcentechnologie, Umwelttechnologie und Digitalisierung miteinander verbinden, um soziale Werte und nachhaltige Lösungen für einen modernen Bergbau zu schaffen.

Dazu haben das HIF und die TUBAF im Jahr 2018 die recomine-Allianz gegründet, die vom BMBF in dessen WIR! Programm noch bis 2025 gefördert wird und danach eigenständig agiert. Das Bündnis hat die Vision, regional gewachsene Kompetenzen auf dem Gebiet der Umwelt- und Ressourcentechnologien zur Erschließung disperser Rohstoffquellen weiterzuentwickeln. Typische Altlasten wie die Versuchs- und Demonstrationsflächen im Erzgebirge sind Beispiele für Bergbaurückstände weltweit. Die Sanierung solcher Standorte kann durch die Rückgewinnung der verbleibenden Rohstoffe refinanziert werden. Anhand zahlreicher eigenfinanzierter Programme und Wettbewerbe der Industrie, z. B. der BHP Tailings Challenge, lässt sich weltweit ein steigender Bedarf an diesen ganzheitlichen Lösungen in der Bergbaubranche erkennen. Nachdem der neue Industriestandard zum Tailingsmanagement 2020 unter der Maßgabe „Zero Harm" (keine Schäden mehr durch Bergbaualtlasten) in London veröffentlicht wurde, haben viele Bergbaukonzerne konkrete Maßnahmenpläne zur Reduzierung und Verwertung ihrer Halden aufgesetzt. Dies birgt für die im Umgang mit Bergbaualtlasten sehr erfahrene Erzgebirgsregion und das recomine-Bündnis ein hohes Potential zur Weiterentwicklung und weltweiten Vermarktung dieses Wissens. Die Vision des recomine-Bündnisses ist in Bild 4 dargestellt.

Typische recomine-Projekte adressieren Grobberge- und Spülhalden, Gruben- und Bergbauwässer sowie Schlacken und Aschen, da diese Stoffströme weltweit die wesentlichen Altlasten aus der Bergbaubranche darstellen. Zusätzlich werden die gesellschaftlichen Fragestellungen adressiert, die unmittelbar mit dem Thema verbunden sind.

Die regionalen Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen verfügen neben dem umfangreichen Know-how in der Ressourcen- und Umwelttechnologie auch über ein beachtliches Wissen in der Automatisierungs- und Sensortechnik. Durch Einbeziehung dieses Know-hows können

1. the Davidschacht tailing in Freiberg;
2. the Rote Graben in Tuttendorf (below (1));
3. the tailings I & II and the drainage adit in Ehrenfriedersdorf;
4. the historic smeltery Muldenhütten; and
5. the IAA Bielatal in Altenberg.

In the future, more locations, e.g., in Bad Schlema (in collaboration with the Wismut GmbH) and Freiberg (new metallurgy technical centre of the HIF) are to be used for technology development, training and research. Figure 5 shows, which subject matters are of importance in the recomine development sites and can be addressed in projects.

By combining comprehensive know-how in recomine, the association successfully contributed to the BHP Tailings Challenge with a concept for the recycling of copper mine heaps. With their modular concept, recomine managed to get into the top 10 of 153 contending teams. Their modular approach is now being tested in the on-going proof-of-concept phase. In the beginning of 2022, it will be decided whether the alliance will set up one of the three pilot facilities in the subsequent phase (6). Further information on the association, current projects and the BHP Tailings Challenge can be found under www.recomine.de.

zukunftssichere und effiziente Technologien mit höchstem Wirkungsgrad etabliert werden.

Die über Jahrhunderte gewachsene Bergbau- und Hüttengeschichte des Erzgebirges zeichnet die Region als idealen Modellstandort aus, um ressourcenorientierte Umwelttechnologien in Pilot- und Demonstrationsanlagen zu entwickeln und für den internationalen Markt weiterzuentwickeln. Zu diesem Zweck wurden in der recomine-Allianz zunächst fünf Entwicklungsstandorte eingerichtet:
1. die Spülhalde Davidschacht in Freiberg,
2. der Rote Graben in Tuttendorf (unterhalb (1)),
3. die Spülhalden I & II und der Grubenwasserstollen in Ehrenfriedersdorf,
4. der historische Hüttenstandort Muldenhütten und
5. die IAA Bielatal in Altenberg.

Zukünftig sollen auch noch weitere Standorte, z.B. in Bad Schlema (in Kooperation mit der Wismut GmbH) und Freiberg (neues Metallurgietechnikum des HIF) für Technologieentwicklung, Ausbildung und Forschung genutzt werden. Bild 5 zeigt, welche Themenfelder an welchen Entwicklungsstandorten von recomine eine Rolle spielen und durch Projekte adressiert werden.

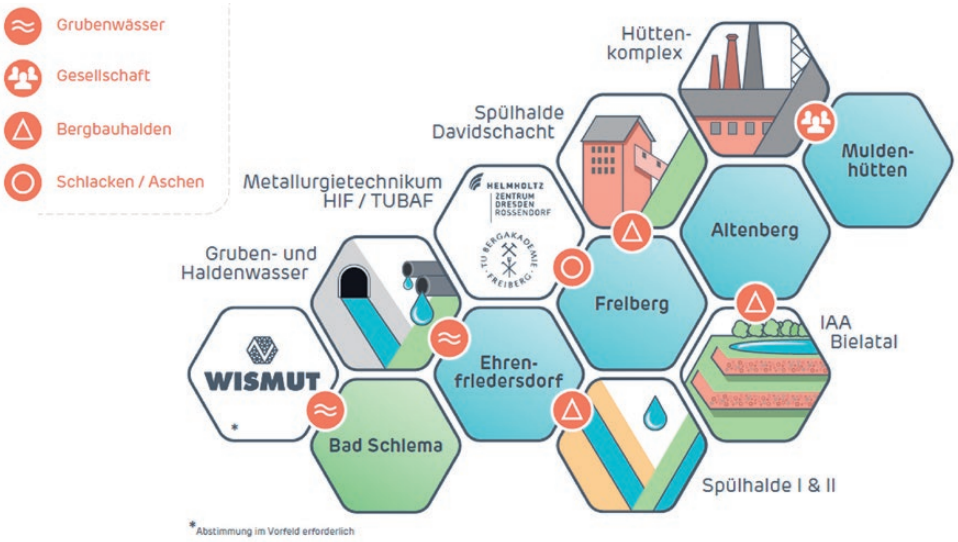

Fig. 5. Recomine development sites and their respective subject-matters.
Bild 5. Die recomine-Entwicklungsstandorte und die dort adressierten Themenfelder. Source/Quelle: HIF

Durch das umfassende Know-how welches sich unter recomine versammelt, konnte es dem Bündnis gelingen, sich bei der BHP Tailings Challenge mit einer Idee zur Verwertung von Halden aus dem Kupferbergbau einzubringen. Mit seiner modularen Idee hat es recomine geschafft, unter die Top 10 der 153 Bewerberteams zu gelangen. In der aktuell laufenden Proof-of-concept-Phase wird nun der modulare Ansatz von recomine getestet. Anfang 2022 wird sich dann entscheiden, ob das Bündnis in der anschließenden Phase eine von drei Pilotanlagen aufbauen wird (6). Weitere Informationen zum Bündnis, den laufenden Projekten und der BHP Tailings Challenge befinden sich unter www.recomine.de.

References / Quellenverzeichnis

(1) European Commission (2020): Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN
(2) Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2010.
(3) Website: https://globaltailingsreview.org/, 29.09.2020.
(4) Büttner, P.; Osbahr, I.; Zimmermann, R.; Leißner, T.; Satge, L.; Gutzmer, J. (2018): Recovery potential of flotation tailings assessed by spatial modelling of automated mineralogy data. In: Minerals Engineering, Vol. 116, pp. 143–151, ISSN 0892-6875.
(5) Eigene Darstellung nach einer durch das Helmholtz-Institut Freiberg beauftragten naturschutzfachlichen Biotopkartierung (2017) der Spülhalde Davidschacht durch das Naturschutzinstitut Freiberg und Abbildungen der SAXONIA Standortverwaltungs- und -entwicklungsgesellschaft mbH.
(6) https://expandemineria.cl/convocatoria-custom/bhp-tailings-challenge/?lang=en

Authors / Autoren

Dipl. Geoök. Philipp Büttner, Dr. Jonathan Engelhardt, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF), Freiberg