

## Mining Residues, Reprocessing and Related Projects at the BGR

Residues from the mining industry can be separated into waste rock, tailings and stockpiles. These different materials are usually stored separately from one another within the mine site. Where this has not been done – which is sometimes the case in older mines – the subsequent sorting and processing operation will most probably be very expensive, which often makes further reprocessing uneconomical.

When extracting metals and industrial minerals from primary ores it is inherent in the process that a certain proportion of the valuable material will be left behind in the tailings. With growing international demand for raw materials and to recover partially the valuable metal content of primary ores, the quantity

of mining residues is continuously increasing worldwide. The major mining countries are currently storing many billions of tonnes of mining waste from raw materials extraction operations per year – especially from gold, copper and iron ore mining. Concepts and technologies have already been developed and applied for several years in order to make the storage of the mining residues sustainable, environmentally safe, but also to be able to continue reprocessing and (re)using the materials, especially from the tailings. While the content of valuable material in the tailings will vary widely, it is possible at some sites with the use of new and improved processing techniques to recover partially the valuable metals economically.

## Bergbauhalden, deren Wiederaufbereitung und Projekte der BGR

Der Begriff „Halden“ aus dem Bergbau wird im deutschen Sprachgebrauch oftmals nur sehr unspezifisch angewendet. Universell werden damit Bergbaureststoffe bezeichnet, also sowohl der Abraum (engl. „dump“ oder „waste rock“), die Aufbereitungsrückstände (engl. „tailings“) und die Vorrathalden (engl. „stockpiles“). In der Regel werden diese unterschiedlichen Reststoffe auf dem Betriebsgelände getrennt voneinander gelagert. Trifft das nicht zu – oftmals in älteren Bergwerksbetrieben – ist eine spätere Sortierung und Weiterverarbeitung mit großem Aufwand verbunden und macht eine erneute Aufbereitung oftmals unwirtschaftlich.

Bei der Gewinnung von Metallen oder Industriemineralen aus Primärerzen verbleibt prozessbedingt ein Anteil der Wertstoffe in den Aufbereitungsrückständen. Bei wachsendem Rohstoff-

bedarf der Weltwirtschaft, aber auch bei den generell sinkenden Inhalten an Wertmetallen in den Primärerzen, nimmt die Menge der Halden kontinuierlich zu. Viele Milliarden Tonnen an Reststoffen aus der Rohstoffgewinnung lagern in den großen Bergbauländern – besonders aus dem Kupfer-, Gold-, und Eisenerzbergbau – und es werden bereits seit einigen Jahren Konzepte und Technologien entwickelt und angewendet, um die Lagerung der Halden nachhaltig, umweltgerecht und sicher zu gestalten, aber auch um die Haldenmaterialien, insbesondere die Tailings, weiter nutzen zu können. In den Tailings sind die Gehalte an Wertstoffen sehr variabel, dennoch ist man an einigen Standorten in der Lage, die Wertmetalle durch neue und optimierte Aufbereitungsverfahren zumindest teilweise wirtschaftlich zu extrahieren.

### Quantities, value potential and ecological risks of mining residues

The amount of mining waste that is added to the total each year is enormous. According to estimates by the United States Geological Survey (USGS) (1) the global mining industry produced about 8 bn t of tailings in 2016 alone, almost half (46%) of this derived from copper processing and another 21% coming from gold mines. Around 72 bn t of waste rock were generated in the process (Figure 1). More recent global data of mining residues are hardly available. The Global Tailings Portal (3) presents an over-

### Haldenquantität, -potential und -risiko

Die jährliche neu hinzukommende Menge an Tailings ist enorm. Nach Schätzungen des United States Geological Survey (USGS) (1) wurden allein im Jahr 2016 weltweit ca. 8 Mrd. t Aufbereitungsrückstände produziert, wovon nahezu die Hälfte (46%) aus der Kupferaufbereitung stammen und weitere 21% aus der Goldproduktion. Insgesamt fielen dabei rd. 72 Mrd. t Abraum an (Bild 1). Aktuellere globale Daten zu den Tailings sind kaum verfügbar. Im „Global Tailings Portal“ (3) wird eine Übersicht des Aufkommens von Tailings in den wichtigsten Bergbaunationen dargestellt.

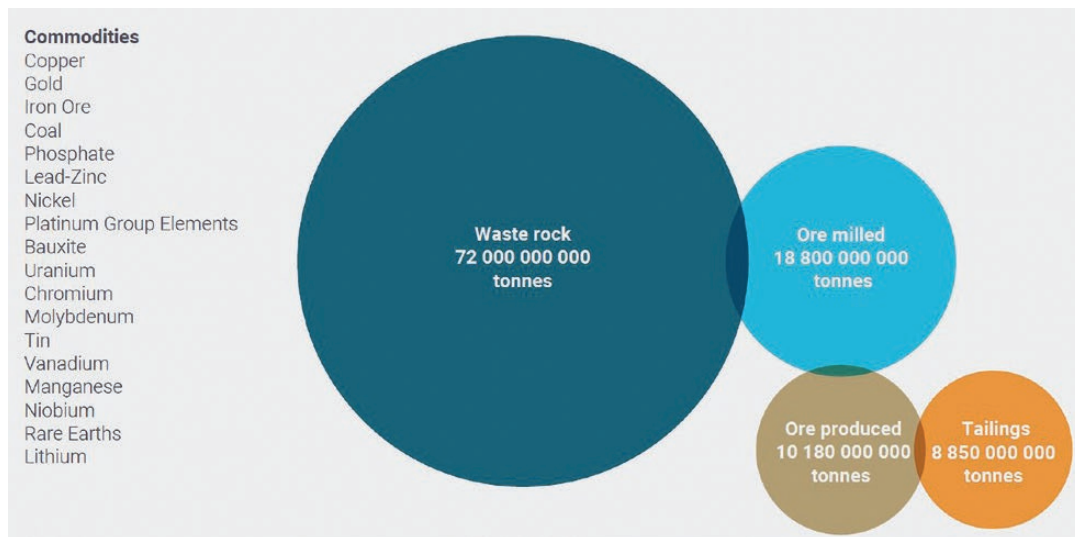


Fig. 1. Estimated amount of tailings and mining waste produced in 2016 in relation to the ore production (1, 2)  
 Bild 1. Schätzung der im Jahr 2016 produzierten Menge an Aufbereitungsrückständen und Abraumhalden im Verhältnis zur Erzproduktion (1, 2).

view of the quantity of produced mining residues by the main mining nations.

Given these statistics, it is not surprising that the world economic, scientific and political focus is being increasingly directed towards the issue of mining residues. Many tailings bear an ecological risk for soil and groundwater. The structural stability of tailings dams can also be a matter of concern, especially when these facilities are deposited close to residential areas. The physical, chemical and hydrological stability of mining waste and their long-term monitoring is a matter of great importance. Many mining nations have introduced financial provisions governing the safety and rehabilitation of waste dumps of this kind. It is the responsibility of the operating mining companies to ensure that these directives are complied and local governments and authorities are required to administer and supervise the necessary activities of the companies.

The long-term safety of residues is a matter of crucial importance. The catastrophic failure of a tailings dam at Vale's Corrego do Feijão iron ore mine near the Brazilian town of Brumadinho in January 2019, caused many fatalities and provided a shocking illustration of risks posed by the storage of mining residues. Immediately after this disastrous accident, the International Council on Mining and Metals (ICMM) published its Global Tailings Review in order to establish a new international standard on tailings facilities management, which was also supported by the United Nations Environment Programme (UNEP) (4, 5). In March 2019 many of the world's mining nations agreed to sign up to this standard, which relates to sustainable and responsible investment (Principles for Responsible Investment – PRI) in the long-term safety of disposal sites for mining waste. This was done in order to regain the trust of the public and civil society.

Mining residues can also pose dangers for human health and the environment. Long-term hazards of this kind are present, for example, in the massive tailings generated from the gold production at the Witwatersrand deposit in South Africa. These huge tailings facilities, which were deposited in the southern suburbs

Angesichts dieser Menge ist es durchaus nachzuvollziehen, dass sich weltweit das wirtschaftliche, wissenschaftliche, aber auch das politische Interesse zunehmend auf Bergbaurückstände richtet. Viele Tailings bereiten Probleme bezüglich der ökologischen Risiken, die von ihnen für Boden und Grundwasser ausgehen können, aber auch wegen ihrer Standsicherheit, besonders in oder nahe besiedelter Gebiete. Die physische, die chemische wie auch die hydrologische Stabilität von Bergbauhalden sowie deren langfristiges Monitoring ist von enormer Bedeutung. Für die Sicherheit und auch für die Sanierung von Bergbauhalden wurden in vielen Bergbaunationen gesetzliche Regelungen vorgenommen und es müssen finanzielle Sicherheiten hinterlegt werden. Die Einhaltung dieser Richtlinien liegt in der Verantwortung der betreibenden Bergbauunternehmen, für deren Kontrollen sind die jeweiligen Regierungen und Behörden zuständig.

Die langfristige sichere Lagerung von Halden spielt eine herausragende Rolle. Der katastrophale Dammbuch im Januar 2019 beim Bergbaukonzern Vale in einem Rückhaltebecken für eingespülte Tailings aus der Eisenerzproduktion im brasilianischen Bergwerk Corrego do Feijão in Brumadinho mit vielen Toten führte die Risiken, die von solchen Aufbereitungsrückständen ausgehen können, erschreckend vor Augen. Unmittelbar nach diesem verheerenden Unfall veröffentlichte das International Council on Mining and Metals (ICMM) mit dem Global Tailings Review, einen neuen Standard für ein sicheres Management von Tailings Facilities, welcher auch vom United Nations Environment Programme (UNEP) unterstützt wurde (4, 5). Bereits im März 2019 verpflichteten sich zahlreiche Bergbaunationen zu diesem Standard, welcher mit nachhaltigen und verantwortungsvollen Investitionen (Principles for Responsible Investment – PRI) in die langfristige Sicherheit von Bergbauhalden verbunden ist. Damit soll das Vertrauen der Zivilgesellschaft und der Öffentlichkeit wiedererlangt werden.

Gefährdungen für die Gesundheit und Umwelt können ebenfalls von Bergbauhalden ausgehen. Solche dauerhaften Gefahren gehen beispielsweise von den immensen Halden aus der Gold-



Fig. 2. Gold-mine tailings facilities at Johannesburg/South Africa. // Bild 2. Aufbereitungsrückstände (Tailings) aus der Goldgewinnung in Johannesburg/Südafrika. Photo/Foto: DERA

gewinnung an der Witwatersrand-Lagerstätte in Südafrika aus, welche im südlichen Stadtgebiet von Johannesburg abgelagert sind und teils auch schon wiederaufbereitet wurden (Bild 2). Es handelt sich um mehrere 100 Mio. t feinkörniger Aufbereitungsrückstände, die einen nicht geringen Inhalt an Uran aufweisen. Besonders in der trockenen Jahreszeit von April bis Oktober kann von diesen Halden uranhaltiger Staub durch Winde in die Siedlungsgebiete gelangen und zu erheblichen Gesundheitsrisiken für die Anwohner führen. Mehrfach wurde schon versucht, diese Halden mit Vegetation abzudecken. Aufgrund der immer länger andauernden Trockenperioden ist eine Rekultivierung bisher jedoch nur teilweise gelungen.

Neben den ökologischen Herausforderungen bieten Bergbaurückstände jedoch auch ein ökonomisches Potential, insbesondere in

of Johannesburg, have already been partially reprocessed (Figure 2). This material comprises several 100 Mt of fine-grained tailings with a significant uranium grade. Indeed uranium-polluted dust can be blown by the wind into the nearby urban areas, especially in the dry season that lasts from April to October. This can lead to serious health risks for the local population. Several attempts have already been made to cover the tailings facilities with vegetation. However, because of the increasingly longer lasting dry periods these reclamation measures have only been partly successful.

Besides the ecological challenges, mining residues also hold an economic potential, particularly in an era of rising raw material prices. In the present economic climate, however, and according to the current status of mineral processing technology, only a small proportion of the existing tailings is suitable for an economic reprocessing. Because of growing political pressure in several mining countries the expectation is that the revenue from the raw materials extracted from the residue material will at least be sufficient to finance the legally mandated tailings facilities remediation activity.

### Economic criteria for tailings reprocessing

Economically promising mineral concentrations are mainly to be found in residues deposited as a result of older mining and processing activities that in some cases may date back several decades. This is because the mineral processing methods employed were less efficient than modern techniques used today. Most improved processing technologies are mainly used for the profitable recovery of precious metals such as gold and platinum. However, reprocessing attempts of residues from the mining and processing of copper, nickel, manganese, lead and zinc, often lacks economically efficient and environmentally compatible processing methods.

In order to assess the profitability of a reprocessing operation for mining residues a pre-feasibility study is generally prepared in the beginning. This investigation can be carried out by a consulting company in the form of a Competent Person's Report (CPR), which contains a description of the project with its legal

Zeiten steigender Rohstoffpreise. Hinsichtlich wirtschaftlicher Kriterien und nach dem Stand der heutigen Aufbereitungstechnologien ist allerdings nur ein kleiner Teil der existierenden Halden für eine Wiederaufbereitung geeignet. Aufgrund wachsenden politischen Drucks in den rohstoffproduzierenden Ländern verspricht man sich vom Erlös der gewonnenen Rohstoffe aus dem Haldenmaterial zumindest die Finanzierung einer gesetzlich verordneten Haldensanierung.

### Ökonomische Kriterien zur Haldenaufbereitung

Wirtschaftlich vielversprechende Wertstoffgehalte finden sich vor allem in Reststoffen aus älteren, teils mehrere Jahrzehnte zurückliegenden Bergbau- und Aufbereitungsaktivitäten, aufgrund der eingesetzten Aufbereitungsmethoden, die nicht dem Stand aktueller technischer Möglichkeiten entsprechen. Mit neuen Aufbereitungstechnologien werden heute vorwiegend Edelmetalle wie Gold, aber auch Platinmetalle aus Aufbereitungsrückständen wirtschaftlich gewonnen. Dennoch fehlen vielerorts ökonomisch effiziente, aber auch umweltverträgliche Methoden, um die Reststoffe, beispielsweise aus der Gewinnung von Metallrohstoffen wie Kupfer, Nickel, Mangan, Blei und Zink, wiederaufzubereiten.

Zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Wiederaufbereitung von Bergbau- bzw. Aufbereitungsrückständen wird von den Bergwerksbetreibern in der Regel im ersten Schritt eine Machbarkeitsstudie (Pre-Feasibility-Studie) angefertigt. Diese kann in Form eines "Competent Persons' Report" von einem Beratungsunternehmen durchgeführt werden und beinhaltet eine Projektbeschreibung mit Rechtsrahmen und geologischer Situation, mineralogisch-geochemische Daten von Proben und Bohrkernen, ein geologisches Modell des Haldenkörpers, eine Klassifikation der Erzressourcen und -reserven, Ergebnisse von Testarbeiten zur Aufbereitung und zur Metallurgie und eine generelle Projektbewertung. Je nach Größe der Halde wird fallweise von den örtlichen Behörden auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung gefordert.

Im Vorfeld solch einer Studie wird vom Eigentümer in der Regel eine geochemisch-mineralogische Haldenanalyse vorgenommen, um ein definiertes Bild der Halde zu erlangen. Hierfür ist eine systematische Sondierung und Beprobung un-

framework and geological situation. This is done together with the evaluation of the mineralogical and geochemical data of samples and drill cores, a geological model of the tailings body, a classification of the resources and reserves, results of reprocessing test works and metallurgy yield, concluding with a general project assessment. The local authorities may also require an environmental impact assessment (EIA), depending on the size of the facility involved.

Before such a study is carried out, an internal evaluation of the geochemistry, mineralogy and other characteristics of the deposit will of course be carried out by the owner of the deposit, in order to obtain a defined image of the facility. A systematic programme of sampling and drilling, is essential to obtain a three-dimensional model of the tailings body that identifies its different layers, enrichment zones and metal variations along with its mineralogical-geochemical properties. This information is crucial for any subsequent selective mining and extraction activities.

Cost models and empirical values can also be used for making preliminary economic assessments at a very early exploration stage (6). The economic feasibility of a reprocessing project can be determined using standardised cost models that can be adapted to the specific features and demands of the tailings facility in question (7). Necessary investments for required mineral processing facilities, e.g., magnetic separation, flotation, leaching, etc., and for the obligatory infrastructure, such as access roads, transport equipment, water and energy supply, if not still present on site. In this way, it will be possible to produce estimates of capital expenditures (CAPEX) as well as of the operational expenditures (OPEX).

### **Mining residues reprocessing activities at the BGR**

Germany is almost completely dependent on imports, regarding its need for metallic raw materials (except recycled metallic resources). In addition to other raw materials activities the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hanover, has been involved in a number of tailings projects both in Germany and abroad for many years. They are aimed to improving raw materials efficiency and securing sustainable supply by developing diversified supply chains for German industry. These ventures entail economic evaluations, ecological studies and the development of innovative, environmental-friendly and cost efficient processing technologies for mining residues.

The German Mineral Resources Agency DERA – a department of the BGR – is currently carrying out three international cooperation projects outlined below, focusing on secondary mining, in resource-rich countries. These operations comprise an economic assessment of reprocessing of copper tailings in Chile, the extraction of cobalt and nickel from stockpiles at nickel-laterite mines in Brazil and processing of platinum ores and tailings in South Africa.

### **Assessment and reprocessing tests of copper mine tailings in Chile**

Chile currently produces around 5.7 Mt of copper a year, making it by far the largest copper producer in the world. Because of the low copper content of Chilean ores, which averages 0.5 to 1%, around 99% of the ore are deposited as tailings. After many decades of

erlässlich. Auf diesem Weg erhält man ein dreidimensionales Modell des Haldenkörpers mit seinen Schichtungen, Anreicherungs-zonen und Wertmetallvariationen sowie den mineralogisch-geochemischen Charakteristika, die für einen späteren selektiven Abbau unerlässlich sind.

Für erste ökonomische Bewertungen in einem sehr frühen Stadium der Exploration können auch Kostenmodelle oder Erfahrungswerte verwendet werden (6). Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Wiederaufbereitung erfolgt durch standardisierte Kostenmodelle, die an die Besonderheiten und Anforderungen der jeweiligen Tailings angepasst werden (7). Berücksichtigt werden die benötigten Investitionen in erforderliche Aufbereitungsanlagen, z.B. Magnetscheidung, Flotation, Laugung etc., sowie in die benötigte Infrastruktur wie Zufahrtswege, Transport, Wasser- und Energieversorgung, wenn noch nicht vorhanden. So ist man in der Lage, Kapitalinvestitionen (Capital Expenditures – CAPEX) wie auch die Kosten für den laufenden Betrieb (Operation Expenditures – OPEX) abzuschätzen.

### **Haldenprojekte der BGR**

Deutschland ist in der Versorgung mit metallischen Rohstoffen – abgesehen vom Recycling – zu nahezu 100% von Importen abhängig. Hinsichtlich einer verbesserten Rohstoffeffizienz, aber auch einer nachhaltigen Rohstoffversorgung mit diversifizierten Lieferketten für die deutsche Industrie bearbeitet die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, seit vielen Jahren – neben anderen rohstoffspezifischen Projekten – eine Reihe von „Haldenprojekten“ im In- und Ausland. Diese beschäftigen sich mit der ökonomischen Bewertung, mit ökologischen Fragestellungen und der Entwicklung von innovativen, umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Aufbereitungstechnologien für Bergbaureststoffe.

Im Folgenden werden drei internationale Kooperationsprojekte in ressourcenreichen Ländern mit Schwerpunkt Sekundärbergbau vorgestellt, die von der Deutschen Rohstoffagentur DERA, einer Facheinheit der BGR, derzeit durchgeführt werden. Es handelt sich um die ökonomische Bewertung und Wiederaufbereitung von Tailings aus der Kupfergewinnung in Chile, um die Extraktion von Kobalt und Nickel aus Vorrathshalden in Nickel-Laterit-Bergwerken in Brasilien sowie um die Aufbereitung von Platinerzen und -halden in Südafrika.

### **Bewertung und Aufbereitung von Kupferhalden in Chile**

Chile ist mit einer derzeitigen Jahresproduktion von etwa 5,7 Mio. t Kupfer mit Abstand der weltweit größte Kupferproduzent. Aufgrund der geringen Kupfergehalte in den chilenischen Erzen von durchschnittlich 0,5 bis 1%, betragen die Reststoffe aus der Kupfergewinnung ca. 99% des geförderterten Erzes. Nach vielen Jahrzehnten des Kupferbergbaus wird das Gesamtvolumen der chilenischen Kupferhalden mit ca. 11 Mrd. t angegeben (8). Landesweit werden große Anstrengungen unternommen, diese immensen Materialmengen hinsichtlich der Restgehalte an Kupfer und teilweise auch Gold, Molybdän, Kobalt etc. neu zu bewerten und wiederaufzubereiten. Auch Seltene Erden-Elemente werden in Chile immer wieder diskutiert, ihr Gehalt in den Tailings ist jedoch sehr gering und der berechnete Wertinhalt in den 11 Mrd. t sagt nichts über die tatsächliche Ausbringbarkeit aus.

copper mining, Chile's copper tailings facilities are now estimated to contain around 11 bn t of material (8). Great efforts are under way throughout the country to reassess and reprocess this huge quantity of waste with the goal of recovering residual copper and possibly additional amounts of gold, molybdenum and cobalt, as well as other valuable minerals. Rare-earth elements (REE) are also on the agenda again in Chile, though the grades in the tailings are very low and the calculated REE content in the 11 bn t of waste is no indicator of the actual recoverability.

The BGR is currently collaborating with the Chilean Geological Service SERNAGEOMIN on a project aimed at the economic evaluation of small to medium-sized copper tailings facilities – up to about 10 Mt – at different locations in the north of the country. This collaboration, which commenced in 2016, is part of an ongoing German-Chilean resources partnership. Twelve such facilities have already been systematically investigated (Figure 3) and three of these have been selected for a programme of detailed sampling and analysis followed by a series of processing tests that were carried out in Germany. One of the waste facilities has already been the subject of more in-depth laboratory experiments, involving leaching and the subsequent extraction of the dissolved copper from the leaching liquors, and an economic estimation has also been undertaken (6). For more on this see pages 578 to 580 in this issue.

The initial exploration work involved drilling to a maximum depth of 10 m. Partially also with a device allowing in-situ element measurements in order to obtain a quick overview of the different layers making up the body of the tip and to locate any enrichment zones. This method was also used to target samples for subsequent laboratory analysis and additionally to develop strategies for the subsequent selective extraction of the tailings in question. As the tailings material mainly comprises fine-grained flotation residues no further comminution (grinding) would be required for the reprocessing step. This also leads to a significant cost reduction of some 30 to 50% compared to the processing of newly mined ores, where crushing and milling consume a high amount of energy. In the case of one tailing with 2 Mt of material, the metal grade was found to be in the region of 0.5% Cu and, moreover, economically viable quantities of iron were also confirmed.

Altogether, some 500 kg of tailings samples were sent to Germany. After geochemical analysis, various processing tests were carried out using density separation, magnetic separation,

Im Rahmen einer deutsch-chilenischen Rohstoffpartnerschaft betreibt die BGR seit 2016, gemeinsam mit dem chilenischen Geologischen Dienst SERNAGEOMIN, ein Projekt zur wirtschaftlichen Bewertung von kleinen bis mittelgroßen Kupferhalden – bis ca. 10 Mio. t – an unterschiedlichen Betriebsstandorten in Nord-Chile. Insgesamt wurden zwölf solcher Kupferhalden systematisch untersucht (Bild 3). Drei Haldenkörper sind für detaillierte Beprobungen, zu weiteren Analysen und für anschließende Aufbereitungstests in Deutschland ausgewählt worden. Bei einer Halde wurden anschließend umfangreichere Laborexperimente, von der Laugung bis zur Extraktion von gelöstem Kupfer aus den Laugungslösungen, durchgeführt und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgenommen (6). Siehe dazu auch die Seiten 578 bis 580 in dieser Ausgabe.

Zur anfänglichen Exploration wurden Bohrungen von bis zu 10 m Tiefe abgeteuft, teils mit In-situ-Elementmessungen, um einen schnellen Überblick der Schichtungen im Haldenkörper zu gewinnen und Anreicherungszone zu lokalisieren. Mit dieser Methode werden auch gezielt Proben für weitere Laboranalysen genommen und überdies Strategien für einen späteren selektiven Abbau dieser Halden erarbeitet. Beim Haldenmaterial handelt es sich überwiegend um feinkörnige Flotationsrückstände, sodass für die Wiederaufbereitung eine weitere Zerkleinerung des Materials (mahlen) nicht nötig ist. Dies bedeutet auch eine erhebliche Kostenreduzierung von ca. 30 bis 50% gegenüber der Aufbereitung frischer Erze, aufgrund der hohen Energiekosten für die Gesteinsmühlen. Die Metallgehalte bewegen sich um 0,5% Cu und überdies wurden noch wirtschaftliche Gehalte an Eisen nachgewiesen.

Insgesamt etwa 500 kg Haldenproben wurden für geochemische Untersuchungen und Aufbereitungstests nach Deutschland geschickt. Nach den geochemischen Analysen wurden Aufbereitungsversuche mittels Dichtesortierung, Magnetscheidung, Flotation und Laugung durchgeführt sowie Massenbilanzierungen vorgenommen (Bild 4). Allerdings erwies sich die Flotation bei verschiedenen Halden als nur bedingt hilfreich, da das Material bereits einmal flotiert wurde und die einfach anzureichernden Minerale schon extrahiert wurden. Dennoch lag das Ausbringen mit Werten zwischen 60 und 70% in einem vertretbaren Rahmen für eine Halde mit geringen Gehalten, allerdings war es nicht möglich, ein marktfähiges Vorkonzentrat zu produzieren. Bei detaillierten Haldenuntersuchungen wurde deutlich, dass Kupfer in Taltal hauptsächlich in oxydischer Form vorliegt. Daher sind Laugungsversuche mit 5%iger Schwefelsäure durchgeführt worden, die zu einem Lösungsausbringen von ca. 80% führten. Die relativ hoch konzentrierte Schwefelsäure wurde gewählt, um ein maximales Ausbringen zu erreichen. Im nächsten Schritt wurde das Ausbringen des gelösten Kupfers aus der Lösung getestet. Durch die geringen Cu-Gehalte von nur 700 mg/l in der Lösung scheiterten Versuche der Solvent Extraktion und daher sind Ionenaustauscher-Harze eingesetzt worden. Mit dieser Methode konnte praktisch das gesamte Kupfer aus der Lösung gewonnen werden, mit geringen Verlusten lediglich bei der Reinigung der Lösung von Al-Fe-Hydroxiden.



Fig. 3. Sampling at a copper tailings storage facility near Ovalle (Chile).  
Bild 3. Beprobte Kupfer-Halde (Tailing) nahe Ovalle/Chile. Photo/Foto: BGR

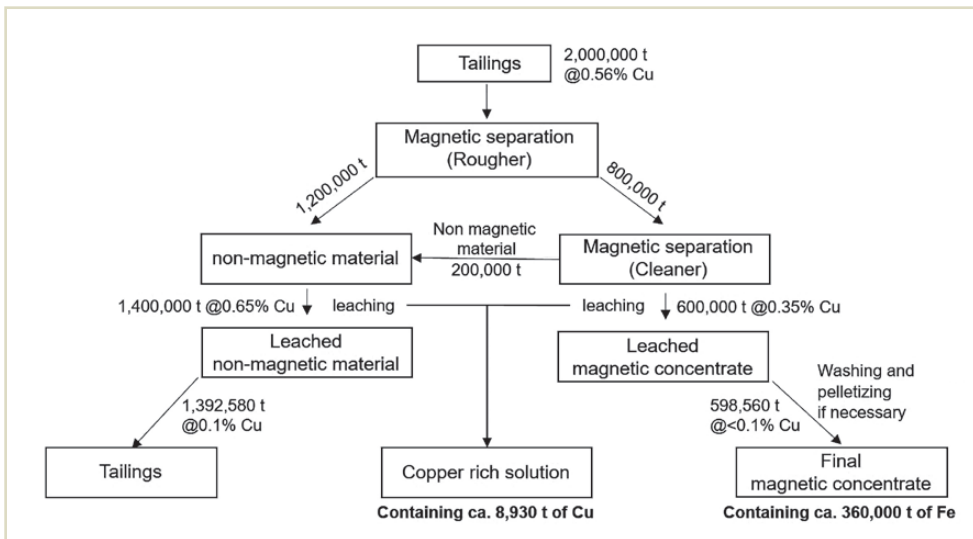


Fig. 4. Processing flow-sheet as used and tested at the Taltal tailings storage facility, with mass balancing, based on 2 Mt of waste material. The method involved a combination of the magnetic separation and chemical leaching of the magnetic and non-magnetic mineral fractions. Bild 4. Aufbereitungsschema, angewendet und getestet in der Halde von Taltal, mit Massenbilanzierung, ausgehend von 2 Mio. t Haldenmaterial. Die Methode beinhaltet eine Kombination von Magnetabscheidung und chemischer Laugung der magnetischen und nicht-magnetischen Mineralfraktionen. Source/Quelle: BGR

flotation and leaching, along with mass balancing (Figure 4). The flotation tests were in fact only of limited success at the tailings samples as the material had already undergone flotation and most minerals that could readily be concentrated had already been extracted. Nevertheless, recoveries of between 60 and 70 % indicated that the extraction rate was reasonable for a tailings facility with a low copper grade. However, it was not possible to produce a marketable pre-concentrate with sufficient Cu grade. In-depth investigations of the facility showed that at the Taltal processing facility the copper was mainly present in the form of oxide minerals. Leaching tests with 5 % sulphuric acid were carried out, resulting in a leaching recovery of around 80%. The relatively high concentration of the sulphuric acid was chosen in order to demonstrate a maximum of recoverable copper. The next step was to test the reextraction of dissolved copper from the liquor. As the solvent extraction tests failed due to the low Cu content of just 700 mg/l in the solution, the decision was taken to use ion-exchange resins. With this technique, almost the complete copper from the solution could be extracted. The only loss occurred when the solution was being purified of Al-Fe hydroxides.

Cost structures were derived both from the test data for the ion-exchange experiments and from cost models adjusted to tailings from the processing of primary ores. Both cost models indicated economically feasible processes. The relatively high grade of valuable metal and the good recovery serve as the basis for the commercial viability of the method.

One of the particular features of some of the deposits, which stretch from Taltal in the north via Copiapó to La Serena in the south, is their high iron content in the form of magnetite. This mineral is currently only extracted at one mine (Minera Candelaria). At all the other mines, the magnetite is dumped in the tailings ponds. As the iron grade in the Taltal tailings is over 25 %, the extraction of iron would add an economic potential. Moreover, the recovery of iron would significantly contribute towards reducing the overall volume of the tailings facility.

Several tailings facilities – particularly those associated with vein deposits between Ovalle and Copiapó – also contain a substantial amount (5 to 20 %) of pyrite and this mineral has a cor-

Sowohl von den Versuchsdaten der Ionenaustauscher-Experimente, als auch von den, an die Tailings angepassten Kostenmodellen aus der Aufbereitung von Primärerzen, konnten Kostenstrukturen abgeleitet werden, die eine wirtschaftliche Machbarkeit andeuteten. Das sehr gute Ausbringen der Wertmetalle in den Versuchen unterstrich zudem die Wirtschaftlichkeit der Methode.

Eine Besonderheit von einigen Lagerstätten, die sich von Taltal im Norden, über Copiapó bis nach La Serena im Süden erstrecken, sind die hohen Eisengehalte in Form von Magnetit. Dieser wird im Moment nur in einem Bergwerk (Minera Candelaria) gewonnen. Bei allen anderen Bergwerken gelangt der Magnetit in die Tailingsbecken. Da die Eisengehalte in Candelaria bei über 25 % liegen, wäre hier bei einer Eisenextraktion ein zusätzliches wirtschaftliches Potential gegeben. Zudem würde bei der Gewinnung des Eisens das Gesamtvolumen der Tailings deutlich verringert werden.

Einige Kupferhalden – hauptsächlich die Ganglagerstätten zwischen Ovalle und Copiapó – beinhalten auch bedeutende Gehalte (5 bis 20 %) an Pyrit, die ein entsprechend hohes Säurebildungspotential aufweisen. Aufbereitungstests haben gezeigt, dass eine Flotation des Pyrits möglich ist und mit einem Ausbringen von deutlich über 70 % gerechnet werden kann. Zusätzlich kann der Pyrit Nickel und Kobalt enthalten. Die Flotation würde also nicht nur ein Umweltproblem aufgreifen, sodass Tailings ohne ein Säurebildungspotential und damit ohne Gefährdung des Grundwassers abgelagert werden können. Dies bietet auch die Möglichkeit, weitere Wertstoffe aus dem Pyrit zu gewinnen. Idealerweise würde dies natürlich nicht erst nach der Ablagerung, sondern unmittelbar nach der Flotation des Kupferkonzentrats geschehen.

Schon in den 2000er Jahren hat die Firma Nueva Pudahuel – ca. 10 km südöstlich des Flughafens von Santiago de Chile – im Rahmen der Schließung ihrer Anlage ein neues Verfahren zur Restgewinnung des löslichen Kupfers eingeführt. Ca. 20 Mio. t gelaugtes Erz wurden abgedeckt, um einen weiteren Zutritt von Regenwasser zu verhindern (Bild 5). Das weiterhin austretende Wasser wurde aufgefangen und bei zu geringem Kupfergehalt erneut in die Halden eingeleitet. War der Gehalt ausreichend hoch,



Fig. 5. Covered leaching heaps (leaching of oxidic ores) with collection ponds for the solution in the background. The facility is located west of Santiago de Chile (Lo Aguirre).

Bild 5. Abgedeckte Laugungshalde (Laugung oxidischer Erze) mit Auffangbecken der Lösung im Hintergrund westlich von Santiago de Chile (Lo Aguirre). Photo/Foto: DERA

respondingly high acid potential. Processing tests have shown that more than 70% of the pyrite can be recovered into a flotation concentrate. The pyrite can also contain cobalt and nickel. Flotation would therefore not only help to tackle an environmental problem, in that the tailings could be stored without their acidification potential, and hence without posing a threat to the groundwater, but would also provide an opportunity for recovering other valuable substances from the pyrite. Ideally, of course, this would not be done after the deposition, but would take place immediately after the flotation of the copper concentrate.

In the first decade of this century the Nueva Pudahuel company, which operates about 10 km south-east of Santiago de Chile airport, introduced a new technique for the recovery of soluble copper during the closure of the mine. As part of the closure, some 20 Mt of leached ore were covered in order to prevent any further infiltration of rainwater (Figure 5). Any further discharge of water was collected and, if its copper content was too low, was fed back into the heaps. When the copper content was sufficiently high, the solution was further enriched in evaporation ponds and finally cemented with iron scrap. By 2010, this operation had recovered more than 2,500 t of copper from the covered leaching residues. While only making a small contribution to the global market, more than 10 M US\$ of income were generated that could be used for the ongoing closure measures. However, similar projects are only conceivable and feasible if a basal sealing with a drainage system is already in place beneath the facility.

### Extracting cobalt and nickel from deposited nickel laterite stockpiles in Brazil

Due to the high and rising demand for battery raw materials like nickel and cobalt, particularly for e-mobility purposes, worldwide efforts are made to discover new supply options for these metals. A particular case in point is cobalt, with nearly 70% of global supplies currently coming from politically unstable countries such as the Democratic Republic of Congo (DRC) and Zambia. Brazil is one of the world's most important producers of nickel and has considerable reserves of this metal, mainly in the form of nickel laterites, which also have economic cobalt grades. However, Brazil is currently not producing cobalt on an industrial scale and the

wurde die Lösung in Verdunstungsbecken weiter angereichert und anschließend zementiert. Auf diese Weise wurden bis zum Jahr 2010 über 2.500 t Cu aus den abgedeckten Halden gewonnen. Ein kleiner Beitrag für den Weltmarkt, aber immerhin über 10 Mio. US-\$, die für die laufenden Schließungsmaßnahmen verwendet werden konnten. Ähnliche Projekte sind allerdings nur dann denkbar und durchführbar, wenn unterhalb der Halden bereits eine Abdichtung mit Drainage existiert.

### Gewinnung von Kobalt und Nickel aus Nickel-Lateriten in Brasilien

Aufgrund der hohen und stetig steigenden Nachfrage an Batterierohstoffen wie Nickel und Kobalt, besonders für die Elektromobilität, werden weltweit neue Liefermöglichkeiten für

diese Materialien gesucht. Insbesondere Kobalt wird zum großen Teil – derzeit zu rd. 70% – in politisch instabilen Ländern wie der Demokratischen Republik Kongo (DRC) oder in Sambia produziert. Brasilien ist einer der weltweit wichtigsten Nickel-Produzenten und verfügt über beträchtliche Nickel-Reserven, zum größten Teil in Form von Nickel-Lateriten, welche auch wirtschaftliche Gehalte an Kobalt aufweisen. Derzeit wird in Brasilien jedoch kein Kobalt industriell gewonnen und die Kobalt-haltigen Formationen werden als Stockpiles in den Nickelbergwerken, d.h. in den Tagebaubetrieben zwischengelagert (Bild 6).

Bei Lateriten handelt es sich um Verwitterungslagerstätten infolge lang andauernder tropischer Verwitterung, die in Limonit (Fe-reich, Co-haltig) und darunter liegend Saprolith (Ni-Erz) unterteilt werden. Nickel wird vorwiegend aus dem Saprolith pyrometallurgisch gewonnen (verhüttet). In einigen Betrieben werden niedriggradige saprolithische Erze zusätzlich mit hydrometallurgischen Verfahren, d.h. mit konventioneller Säurelaugung (Hochdrucklaugung, oder einer Kombination aus Röstung und Laugung, dem sogenannten Caron-Prozess) weiterverarbeitet. Limonitische Erze müssen aufgrund ihrer hohen Eisengehalte immer hydrometallurgisch aufbereitet werden.

In einem Kooperationsprojekt der BGR mit dem brasilianischen Geologischen Dienst (CPRM), dem brasilianischen Zentrum für Aufbereitungstechnik (CETEM) sowie den Firmen Brazilian Nickel (BRN) und Anglo American Nickel werden biologische Laugungsverfahren entwickelt, die speziell für die Extraktion von Kobalt und Nickel sowie von weiteren Metallen wie Scandium, Kupfer und Vanadium aus limonitischen und ferner auch aus saprolithischen Erzen geeignet sind. Für die Experimente wird limonitisches und saprolithisches Probenmaterial aus den Tagebauen Barro Alto (Anglo American) und Piauí (BRN) sowie aus dem Explorationsprojekt Jacaré (Anglo American) verwendet.

Die Bio-Hydrometallurgie oder Biolaugung gilt als besonders umweltverträglich, da im Gegensatz zu konventionellen Laugungsverfahren der Säure- und der Wasserverbrauch, wie auch der Energieeinsatz sehr gering sind. Bei der Biolaugung lösen Mikroorganismen chemische Reaktionen (Redoxreaktionen) auf der Oberfläche der Erzminerale aus und gewinnen damit Energie, z.B. durch die Reduktion von Oxidmineralen, welche dabei gelöst

cobalt-bearing formations are stored as stockpiles around the nickel mines (Figure 6).

Nickel laterites are deposits formed by deep tropical weathering that can be subdivided into limonite (Fe-rich, Co bearing) and underlying saprolite (Ni ore). Nickel is mainly extracted from the saprolite by pyrometallurgical processing (smelting). At some operations, low-grade saprolitic ore is also processed using hydrometallurgical methods, i.e. by conventional acid leaching (high-pressure leaching or a combination of roasting and leaching, known as the Caron process). Because of their high iron content, limonitic ores must be processed hydrometallurgically.

In a cooperation project between BGR, the Brazilian Geological Survey (CPRM), the Brazilian Centre for Mineral Technology (CETEM) as well as the companies Brazilian Nickel (BRN) and Anglo American Nickel, a bio-hydrometallurgical method is developed to process limonitic and saprolitic ores. This bacteria mediated leaching technology is particularly suitable for the extraction of cobalt and nickel, as well as other metals such as scandium, copper and vanadium. The experiments are carried out using limonitic and saprolitic samples taken from the opencast mines at Barro Alto (Anglo American) and Piauí (BRN), as well as from the Jacaré exploration project (Anglo American).

Bio-hydrometallurgy, or simply bioleaching, is especially eco-friendly due to the fact that unlike conventional leaching processes the energy and water consumption is very low, combined with a drastically reduced use of acid. Bioleaching is a process whereby microorganisms trigger chemical reactions (redox reactions) on the surface of the ore minerals to extract energy, e.g., by the reduction of oxide minerals, which are then dissolved and the metals are released, e.g. (9, 10, 11). As much as 95% of the metals can be dissolved by this method.

The aim of this microbial dissolution process is the selective extraction of the valuable metals, especially of cobalt, with the lowest possible dissociation of iron oxides, as high iron contents disturb the subsequent processing steps, as iron again has to be removed from the solution. In order to achieve this selective leaching process, various different microorganisms (aerobic and anaerobic) are tested under variable conditions (pH, temperature).

In the ongoing leaching process, a metal-laden solution (pregnant leach solution - PLS) is produced, from which the excess iron first has to be removed. Then the metals nickel, cobalt, scandium and copper are recovered using solvent extraction, or ion exchange and precipitation.

The selected bacteria primarily work in the temperature range between 30 and 45 °C, at pH values of 1.5 to 2.5 and under atmospheric pressure. This process has a relatively low energy requirement. The disadvantage of bioleaching is the relative inertia and slowness of the reaction compared to high-pressure leaching. However, constant temperature monitoring and the adjustment of the chemical environment (pH value) can significantly increase the reaction kinetic and the bacteria reproduction rate. Achieving improvements of this kind is one of the project's key objectives.



*Fig. 6. Stockpiles of limonitic ore at the Barro Alto opencast nickel mine operated by Anglo American Nickel in Goiás/Brazil. // Bild 6. Vorratshalden (Stockpiles) von limonitischem Erz im Nickel-Tagebau Barro Alto von Anglo American Nickel in Goiás/Brasilien. Photo/Foto: DERA*

und die Metalle freigesetzt werden, z.B. (9, 10, 11). Bis zu 95% der Wertmetalle gehen so in Lösung.

Ziel dieses mikrobiellen Lösungsverfahrens ist die selektive Extraktion der Wertmetalle, insbesondere von Kobalt, bei möglichst geringer Dissoziation von Eisenoxiden, da hohe Eisengehalte die weiteren Prozessschritte erschweren und Eisen wieder aus der Lösung entfernt werden muss. Für diese selektive Laugung werden unterschiedliche Mikroorganismen (aerob, anaerob) unter variablen Bedingungen (pH, Temperatur) getestet.

Im fortschreitenden Laugungsprozess wird eine metallhaltige Lösung (pregnant leach solution – PLS) produziert, aus welcher zunächst das überschüssige Eisen entfernt werden muss. Anschließend werden mittels Lösungsextraktion, oder des Ionenaustauschs und der Präzipitation die Metalle Nickel, Kobalt, Scandium und Kupfer gewonnen.

Vornehmlich arbeiten die ausgewählten Bakterien im Temperaturbereich zwischen 30 und 45 °C, bei pH-Werten von 1,5 bis 2,5 und unter atmosphärischem Druck. Demzufolge ist für den Betrieb ein vergleichsweise geringer Energieaufwand bzw. die langsame Kinetik erforderlich. Nachteil der Biolaugung ist die relative Trägheit der Reaktion im Gegensatz zur Hochdrucklaugung. Allerdings können durch die ständige Temperaturkontrolle und durch eine Anpassung des chemischen Milieus (pH-Wert) die Reaktionsgeschwindigkeit wie auch die Teilungsraten der Bakterien signifikant erhöht werden. Diese Optimierung stellt eine der zentralen Aufgaben des Projekts dar.

Im Labor wurden Tanklaugungen in Bioreaktoren sowie Haufenlaugungen in Laborsäulen simuliert. Nach erfolgreichen Versuchsreihen werden die Ergebnisse der Biolaugungs-Experimente in einen größeren technischen Maßstab, mit Probenvolumen bis mehrere 100 kg, bis hin zum Pilotmaßstab (bis 1 t Probenvolumen) überführt. Angestrebt wird eine In-situ-Laugung (Haufenlaugung), welche sich, im Gegensatz zu einer Tanklaugung, deutlich günstiger durchführen lässt (Capex und Opex).

### **Aufbereitung von Platinerzen und -halden in Südafrika**

In Südafrika arbeiten einige der lokal ansässigen Unternehmen bereits seit mehreren Jahren erfolgreich an der Wiederaufbereitung von Platinhalden sowie von Halden aus der Chromitaufbereitung



Laboratory experiments were conducted in bioreactors to simulate tank leaching and in laboratory columns for the simulation of heap leaching. Following a successful series of tests the results of the bioleaching experiments will be transferred to a larger technical scale, with sampling volumes of as much as several 100 kg, and then on to a pilot plant (sampling volume of up to 1 t). The aim is to achieve an in-situ leaching process (heap leaching) that can be carried out under much more favourable economic conditions (CAPEX and OPEX) than tank leaching.

### Processing of platinum ores and tailings in South Africa

In South Africa, some of the locally based companies have been working successfully for several years on the reprocessing of platinum tailings and residues from chromite processing operations in order to extract platinum group metals (PGMs resp. PGEs). South Africa has a substantial secondary resource potential of PGMs, which significantly exceed the current annual PGM production of the country's mining industry (12).

A number of South African PGM mines obtain in total million tonnes of near-surface oxidised ores that have been weathered to a depth of 50 m by meteoric water, altering then mineralogy. The PGM content of these oxidised ore can be compared to that of pristine ores, range between 3 and 4 ppm. However, oxidised PGM minerals are much more difficult to concentrate than fresh sulphide minerals. The Mogalakwena mine, the world's largest PGM opencast mine, operated by Anglo American Platinum in the northern Bushveld complex, has already deposited around 8 Mt of these oxidised ores (Figure 7). Low-grade sulphide PGM ores are also stockpiled at this site, though these are of limited economic viability. In view of the current increased demand for PGMs, which are needed for new technologies such as catalysing hydrogen or synthetic fuels among other applications, the BGR has been carrying out research projects in the past in order to develop efficient processing methods for these ores and various techniques have already been tested in Germany.

As these oxide ores cannot be processed using conventional methods such as flotation, the metals have to be dissolved and separated hydrometallurgically by leaching. The BGR has developed various hydrometallurgical techniques and has already tested them to assess their economic feasibility and ecological impact. The first of these research initiatives involved a series of tests with organic solvents (biological components such as siderophores), followed by further experiments with inorganic solvents, an acid-salt mixture (two-brine leaching or 2B leaching), which is suitable for dissolving the ores and chloritising the PGMs and other valuable metals. The high cost of the siderophores makes the organic processing method uneconomical, while the application of the 2B method, on the other hand, left behind too much acid in the residues.

Microbial experiments on the processing of PGM ores, which are comparable to experiments on laterites (see above), are currently being carried out at the BGR and at Technische Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF).



Fig. 7. The Mogalakwena opencast PGM mine operated by Anglo American Platinum in the Limpopo Province/South Africa, with stockpiles and dumps visible in the upper background. // Bild 7. Der Mogalakwena-PGM-Tagebau von Anglo American Platinum mit Stockpiles und Dumps (im Hintergrund, oben) in der Limpopo-Provinz/Südafrika. Photo/Foto: DERA

für die sekundäre Produktion von Platingruppenmetallen (PGM bzw. PGE). Südafrika besitzt ein beträchtliches sekundäres Ressourcenpotential an PGM, welches die derzeitige jährliche südafrikanische Bergwerksproduktion der PGM erheblich übersteigt (12).

Überdies lagern in einigen südafrikanischen PGM-Bergwerken insgesamt mehrere Millionen Tonnen oberflächennaher oxidiertes Erze, welche bis zu einer Tiefe von 50 m durch meteorische Wässer verwittert und somit mineralogisch verändert sind. Die Wertstoffinhalte dieser oxidierten PGM-Erze sind mit den frischen Erzen vergleichbar und liegen bei ca. 3 bis 4 ppm PGE, allerdings sind oxidierte PGM-Mineraler wesentlich schlechter ausbringbar als Sulfidminerale. Allein im Bergwerk Mogalakwena von Anglo American Platinum, dem größten PGM-Tagebau der Welt, im nördlichen Bushveld-Komplex, wurden bereits ca. 8 Mio. t solcher oxidierten Erze angehäuft (Bild 7). Darüber hinaus sind dort auch niedriggradige sulfidische („frische“) PGM-Erze bevorratet, welche nur eingeschränkt wirtschaftlich aufbereitet werden können. Aufgrund der derzeitigen erhöhten Nachfrage an PGM, beispielsweise für neuartige Technologien wie dem Katalysieren von Wasserstoff oder von synthetischen Kraftstoffen, forscht die BGR seit einigen Jahren an einer effizienten Aufbereitungsmethode für diese Erztypen und es wurden bereits diverse Verfahren in Deutschland erprobt.

Da Oxidminerale, wie sie in diesen Erzen in besonders hohen Gehalten vorkommen, nicht mit herkömmlichen Methoden aufbereitet werden können, z.B. durch Flotation, müssen die Wertmetalle hydrometallurgisch, also mit Laugungsverfahren gelöst werden. Hierzu wurden in der Vergangenheit an der BGR unterschiedliche Methoden entwickelt und hinsichtlich ihrer technischen Durchführbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit und ihren ökologischen Auswirkungen getestet. Die ersten Forschungsansätze beinhalteten Versuchsreihen mit organischen Lösungsmitteln, sogenannten Siderophoren (biologische Komponenten) und anschließende weitere Experimente mit anorganischen Mitteln, einem Säure-Salz-Gemisch („two-brine-leaching“, bzw. „2B-Laugung“), welches zur Lösung der Erze und zur Chloritisierung der Wertmetalle PGM und Gold geeignet ist. Die organische Aufbereitungsmethode erwies sich aufgrund der hohen Kosten für die

## Conclusions

Residues are an unavoidable product of the mining industry and their amount is growing continuously with increasing raw materials production. There is little or no precise data available on the quantities of mining residues that have accumulated around the world. Tailings facilities are extremely complex systems and they have to be planned, constructed, operated, managed and monitored in a responsible way to serve as safe storage installations for generations. Companies and governments are responsible for developing and implementing appropriate sustainability concepts for tailings facilities. International standards have already been defined in this area.

The secondary processing of mining residues and tailings facilities, which allows the contained valuable raw materials to be recovered and used, is beneficial and in some cases commercially profitable. Operations of this kind generally require extensive exploration work, which entails a certain financial investment. A systematic economic assessment of the target facility is essential if the reprocessing operation is to be a success. There is no doubt that by applying innovative and advanced technologies for the processing of mining residues, an important contribution can be made to a resource efficiency and a sustainable raw materials supply.

Siderophoren als unwirtschaftlich. Bei der zB-Methode ist wiederum die Menge an Säure-Rückständen zu hoch.

Derzeit werden an der BGR sowie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) mikrobielle Experimente zur Aufbereitung der PGM-Erze durchgeführt, vergleichbar mit den Experimenten an den Lateriten (s.o.).

## Fazit

Bergbaureststoffe sind unvermeidlich und wachsen mit steigender Rohstoffproduktion stetig an. Genaue Daten zu den Volumina der weltweit produzierten Bergbauhalden sind kaum verfügbar. Halden sind äußerst komplexe Systeme, die einer verantwortungsvollen Planung, Konstruktion und Überwachung sowie einem verantwortungsvollen Betrieb und Management bedürfen, um diese über Generationen sicher zu lagern. Für die Erarbeitung entsprechender Nachhaltigkeitskonzepte und deren Anwendung sind die Unternehmen, aber auch die Regierungen verantwortlich. Hierfür wurden bereits internationale Standards definiert.

Eine sekundäre Wiederaufbereitung der Haldenmaterialien und somit eine Nutzbarmachung der enthaltenen Rohstoffe ist erwünscht und in einigen Fällen wirtschaftlich sinnvoll. Dafür sind in der Regel umfangreiche Explorationsarbeiten erforderlich, welche mit finanziellen Vorleistungen verbunden sind und letztendlich ist eine systematische ökonomische Bewertung der wiederaufzubereitenden Halden unerlässlich. So können Bergbaureststoffe, insbesondere mit innovativen und fortschrittlichen Aufbereitungstechnologien, durchaus einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz und zu einer nachhaltigen Rohstoffversorgung leisten.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) USGS (2016): USGS Mineral Commodity Summaries 2016. [www.usgs.gov/centers/nmic/mineralcommodity-summaries](http://www.usgs.gov/centers/nmic/mineralcommodity-summaries)
- (2) Mudd, G. M. (2020): Personal communication April 2020. In: Oberle et al., 2020. ICMM, UN.
- (3) Global Tailings Portal (2021): <https://tailings.grida.no/disclosures> (as of 2021/10/27).
- (4) ICCM, UN, OPRI (2019): Global Tailings Review <https://globaltailingsreview.org/>
- (5) Oberle, B.; Brereton, D.; Mihaylova, A. (eds.) (2020): Towards Zero Harm: A Compendium of Papers prepared for the Global Tailings Review. St. Gallen, Switzerland.
- (6) Wellmer, F.-W. (2008): Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? In: Zeitschrift deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften 159 (4), pp. 575–590.
- (7) Drobe, M.; Haubrich, F.; Gajardo, M.; Marbler, H. (2021): Processing Tests, Adjusted Cost Models and the Economies of Reprocessing Copper Mine Tailings in Chile. *Metals* 2021; 11, 103. <https://doi.org/10.3390/met11010103>
- (8) Haldenkataster SERNAGEOMIN – Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (actualización 10-08-2020): [www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/](http://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/)
- (9) du Plessis, C. A.; Slabbert, W.; Hallberg, K. B.; Johnson, D. B. (2011): Ferredox: A biohydrometallurgical processing concept for limonitic nickel laterites. *Hydrometallurgy* 2011; 109: pp. 221–229.
- (10) Johnson, D. B.; Grail, B. M.; Hallberg, K. B. (2013): A new direction for biomining: Extraction of metals by reductive dissolution of oxidized ores. *Minerals* 2013; 3: pp. 49–58.
- (11) Schippers, A.; Breuker, A.; Blazejak, A.; Bosecker, K.; Kock, D.; Wright, T. L. (2010): The biogeochemistry and microbiology of sulfidic mine waste and bioleaching dumps and heaps, and novel Fe (II)-oxidizing bacteria. *Hydrometallurgy* 2010; 104: pp. 342–350.
- (12) Buchholz, P.; Foya, S. (2015) (eds.): Investor's and Procurement Guide South Africa Part 2: Fluorspar, Chromite, Platinum Group Elements. In: DERA Rohstoffinformationen 22: 120 pp., Berlin.

## Authors / Autoren

Dr. Herwig Marbler, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin, Dr. Malte Drobe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover