

ZauBer – Materials of the Future from Old Mines

The challenges posed by the many geopolitical upheavals of the last years, as well as the need to find new ways of extracting raw materials and securing the raw material base for domestic industry, have long remained without any significant echo in Europe. Deep-rooted in relevant speeches and discussions is the awareness that mining per se is something dirty that causes lasting damage to the environment. The discussion about old mining with all its environmentally relevant facets overlooks the core issue of mining activity: the provision of raw materials. When mining activities

cease, this is inevitably accompanied by the dismantling of the mining facilities. Mining becomes old mining, blessing becomes curse – but why? The aim of this article is to bring the image of mining and old mining operations into the present day and, using the example of the Rote Graben in Halsbrücke in the Freiberg mining area, to develop an understanding of why it is not the old mining operations themselves that are to blame for the environmental problems that have arisen from them, but the lack of ideas and concepts on how to deal with the challenges.

ZauBer – Zukunftsmaterialien aus dem Altbergbau

Die Herausforderungen durch eine Vielzahl an geopolitischen Umwälzungen der letzten Jahre sowie das Erfordernis, in der Sicherstellung der Rohstoffbasis für die heimische Industrie neue Wege zu gehen, sind in Europa lange ohne nennenswerten Widerhall geblieben. Tiefverwurzelt in einschlägigen Rede- und Diskussionsbeiträgen ist das Bewusstsein, dass Bergbau per se etwas Schmutziges wäre, das der Umwelt nachhaltigen Schaden zufüge. Die Diskussion um den Altbergbau mit all seinen umweltrelevanten Facetten übersieht jedoch das Kernthema der Aktivität Bergbau: die Bereitstellung von Rohstoffen. Mit Einstellung

bergbaulicher Aktivitäten geht zwangsläufig die Demontage der Bergwerksanlagen einher. Aus Bergbau wird Altbergbau, aus Segen wird Fluch – aber warum? Dieser Beitrag hat zum Ziel, das Bild vom Bergbau und Altbergbau in die heutige Zeit zu rücken und am Beispiel des Roten Grabens in Halsbrücke im Freiburger Revier ein Verständnis dafür zu entwickeln, warum nicht der Altbergbau an sich Schuld trägt an den Umweltproblemen, die daraus hervorgegangen sind, sondern die Ideen- und Konzeptionslosigkeit wie mit den Herausforderungen umgegangen wird.

Introduction

The challenges posed by the many geopolitical upheavals of the last 15 years, as well as the need to find new ways of extracting raw materials and securing the raw material base for domestic industry, have long remained without any significant echo in Europe. Deep-rooted in relevant speeches and discussions is the awareness that mining per se is something dirty that causes lasting damage to the environment. This not only shows ignorance of new and further technological developments, it also reveals a frightening ignorance of global progress in this sector. Nevertheless, the fairy tale of dirty old mines can still be used to score points, at the latest when the issue of environmental protection is brought to light.

It is undisputed that environmental protection has an important place in today's industrial society, and it is also undisputed that mining has contributed and continues to contribute.

However, the discussion about old mining with all its environmentally relevant facets overlooks the core issue of mining activity: the provision of raw materials. When mining activities cease, e.g.,

Einführung

Die Herausforderungen durch die Vielzahl an geopolitischen Umwälzungen der letzten 15 Jahre sowie das Erfordernis in der Rohstoffgewinnung, in der Sicherstellung der Rohstoffbasis für die heimische Industrie neue Wege zu gehen, sind in Europa lange ohne nennenswerten Widerhall geblieben. Tiefverwurzelt in einschlägigen Rede- und Diskussionsbeiträgen ist das Bewusstsein, dass Bergbau per se etwas Schmutziges wäre, das der Umwelt nachhaltigen Schaden zufüge. Dies zeugt nicht nur von Ignoranz gegenüber technologischen Neu- und Weiterentwicklungen, es offenbart auch eine erschreckende Unkenntnis vom weltweiten Fortschritt in diesem Sektor. Gleichwohl lässt sich mit der Mär vom schmutzigen Altbergbau noch immer punkten, spätestens wenn das Thema Umweltschutz zutage gefördert wird.

Unbestritten ist, dass der Umweltschutz einen wichtigen Platz in der heutigen Industriegesellschaft einnimmt, und unstrittig ist auch, dass der Bergbau seinen Teil dazu beigetragen hat und nach wie vor beiträgt.

when a deposit is exhausted or further extraction is simply unprofitable, this is inevitably accompanied by the dismantling of the mining facilities. Mining becomes old mining, blessing becomes curse – but why? In the final analysis, it is not a particularly innovative approach if, as soon as the last shift is completed, environmental concerns are immediately substituted for the actual goal of mining. Of course, it is undisputed that old mine workings release metals into the mine waters through the effects of atmospheric oxygen, water and microbial activity, including elements of the periodic table known as harmful metals. However, it is also undisputed that the tunnels have an important function in the water balance of the mine. And it is also indisputable that old mines are often used to get rid of unwelcome residues that are not part of the mining process, the later discovery of which is often blamed on mining.

It is also indisputable that old mining operations naturally represent a challenge for environmental protection and that rehabilitation and preservation measures require dedicated technical and specialised knowledge. What is missing in the whole discussion, however, is the question of whether the legacies of old mining might not have an inherent potential for use. Just as today's mining is viewed through the eyes of past decades and centuries, measures concerning old mines are also approached with the expertise of times long past.

The aim of this article is to bring the image of mining and old mining operations into the present day and, using the example of the Rote Graben in Halsbrücke in the Freiberg mining area, to develop an understanding of why it is not the old mining operations themselves that are to blame for the environmental problems that have arisen from them, but the lack of ideas and concepts on how to deal with the challenges. The potential is immense, because the legacy of old mining is not a regional issue limited to the Freiberg mining area, it is of global importance. For this reason, this contribution is deliberately intended to work towards understanding the issue of old mining as an opportunity, as a perspective on the basis of which we can manage to re-conceive the mining legacy as a source of raw materials and develop new concepts on how to deal with old mining in a positive sense and even do more for environmental protection than lamenting the current circumstances can achieve.

Old mining – the misunderstanding of the contaminated site

The "Rote Graben" (RG) (English: Red Ditch), an artificial watercourse dating back to the 17th century, is located below the foot of the Davidschacht flushing dump development site. It serves to drain various mines and mobilises metals from flooded mine workings due to the action of atmospheric oxygen and microorganisms. At the same time, the rock in place weathers into sandy-clayey sludge, which is discharged with the mine water (Figure 1a). The mine water is heavily contaminated with heavy metals, including cadmium (Cd) as a priority hazardous substance under the EU Water Framework Directive, as well as aluminium (Al), arsenic (As) and zinc (Zn), which are discharged into the river Freiburger Mulde via several outlets. Due to lack of maintenance, the RG is now heavily silted. The current estimated sludge volume is about 13,000 m³. Efficient, ecological and economic solutions to this challenge must be found in a timely manner. There is a general

Die Diskussion um den Altbergbau mit all seinen umweltrelevanten Facetten übersieht jedoch das Kernthema der Aktivität Bergbau: die Bereitstellung von Rohstoffen. Mit Einstellung bergbaulicher Aktivitäten, z. B. wenn ein Vorkommen ausgeerzt ist oder die weitere Förderung unrentabel, geht zwangsläufig die Demontage der Bergwerksanlagen einher. Aus Bergbau wird Altbergbau, aus Segen wird Fluch – aber warum? Es ist letztlich eine von nicht besonderer Innovationsfreude zeugende Herangehensweise, wenn, kaum dass die letzte Schicht ausgefahren ist, sofort Umweltbedenken das eigentliche Ziel des Bergbaus substituieren. Natürlich ist es unstrittig, dass alte Stollen durch die Einwirkung von Luftsauerstoff, Wasser und mikrobieller Aktivität Metalle in die Grubenwässer abgeben, darunter auch als Schadmetalle bezeichnete Elemente des Periodensystems. Unstrittig ist aber auch, dass die Stollen eine wichtige Funktion im Wasserhaushalt des Grubengebäudes haben. Und unstrittig ist auch, dass der Altbergbau gern genutzt wird, um sich unliebsamer bergfremder Reststoffe zu entledigen, deren späteres Zutagetreten dann gern dem Bergbau angelastet wird.

Unstrittig ist darüber hinaus, dass Altbergbau natürlich eine Herausforderung für den Umweltschutz darstellt, dass Sanierungs- und Verwahrungsmaßnahmen dezidiertes Fach- und Spezialwissen benötigen. Zu vermissen aber ist in der ganzen Diskussion die Frage, ob den Hinterlassenschaften des Altbergbaus nicht vielleicht ein Nutzungspotential innewohnt. Denn genauso wie der heutige Bergbau gern mit den Augen vergangener Jahrzehnte und Jahrhunderte betrachtet wird, werden auch Maßnahmen, die den Altbergbau betreffen, mit dem Fachwissen längst vergangener Zeiten angegangen.

Dieser Beitrag hat zum Ziel, das Bild vom Bergbau und Altbergbau in die heutige Zeit zu rücken und am Beispiel des Roten Grabens in Halsbrücke im Freiburger Revier ein Verständnis dafür zu entwickeln, warum nicht der Altbergbau an sich Schuld trägt an den Umweltproblemen, die daraus hervorgegangen sind, sondern die Ideen- und Konzeptionslosigkeit, wie mit den Herausforderungen umgegangen wird. Das Potential ist immens, denn die Hinterlassenschaften des Altbergbaus sind kein regionales, auf das Freiburger Revier beschränktes Thema, es ist weltweit von Bedeutung. Aus diesem Grund soll dieser Beitrag bewusst darauf hinwirken, das Thema Altbergbau als Chance zu begreifen, als eine Perspektive, auf Grundlage derer wir es schaffen können, die bergbaulichen Altlasten als Rohstoffquelle neu zu begreifen und neue Konzepte zu entwickeln, wie zielführend in einem positiven Sinne mit dem Altbergbau umgegangen und sogar noch mehr für den Umweltschutz getan werden kann als es das Beklagen der gegenwärtigen Umstände zu leisten vermag.

Altbergbau – das Missverständnis von der Altlast

Unterhalb des Fußbereichs des Entwicklungsstandorts Spülhalde Davidschacht befindet sich der „Rote Graben“ (RG), ein künstlich angelegter Wasserlauf aus dem 17. Jahrhundert. Dieser dient der Entwässerung verschiedener Gruben und mobilisiert infolge des Hinzutretens von Luftsauerstoff und Mikroorganismen Metalle aus gefluteten Grubenbauen. Gleichzeitig verwittert anstehendes Gestein zu sandig-tonigen Schlämmen, die mit dem Grubenwasser ausgetragen werden (Bild 1a). Das Grubenwasser ist sehr stark mit Schwermetallen, darunter Cadmium (Cd) als prioritär gefährlicher Stoff nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie, sowie Aluminium (Al), Arsen (As) und Zink (Zn) verunreinigt, welche über mehrere Abschlüsse der Freiberg-



Fig. 1. a) The iron hydroxide slurry gave the Roter Graben its name. b) Overflowing Roter Graben near Tuttendorf below the Fuchsmühlenweg.
 Bild 1. a) Die Eisenhydroxidschlämme gaben dem Roten Graben seinen Namen. b) Überlaufender Roter Graben bei Tuttendorf unterhalb des Fuchsmühlenwegs. Photos/Fotos: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, mit freundlicher Genehmigung.

consensus that this is a legacy of the old mining industry, i. e., a contaminated site. However, the question remains unanswered in this context as to whether this view is still valid today or whether, in view of new methods and technologies, old mining does not have potential for the future.

Future topic of old mine workings

The need for action at old mining sites is indisputable. The underground cavities collect water which, as described above, is enriched with various elements in different ways. Often, complex iron hydroxide slurries (IHS) precipitate already in the mine, brought to light by the transport effect of the water.

At the RG, the immediate need for action arises from the fact that the sludge absorption capacity of the hydraulic structure is exhausted and significant amounts of sludge enter the swale during heavy rainfall events (Figure 1b).

There is no universal solution for (IHS). The IHS concept of the Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) as the rehabilitation agency of the East German lignite mining industry provides for a preferred sequence, which is largely transferable to ore mining:

1. Avoidance, which is not possible due to the circumstances.
2. Recovery, which only opens up in special cases due to the previous requirements.
3. Flushing, which encounters considerable acceptance problems from the public and also requires corresponding flushing space.
4. This leaves only landfilling when landfill space is scarce, although the prerequisite for this is the establishment of a landfill capability.

Consequently, an economically and ecologically sensible utilisation of the sludge has not yet been achieved in practice.

Raw materials, not contaminated sites

The solution lies in the joint processing of dewatered mine sludge with iron-containing slags from a regional smelter for

ger Mulde zugeführt werden. Durch fehlende Unterhaltung ist der RG nunmehr stark verschlammmt. Die derzeit geschätzte Schlammmenge beläuft sich auf ca. 13.000 m³. Für diese Herausforderung müssen zeitnah effiziente, ökologische und ökonomische Lösungen gefunden werden. Allgemein herrscht Konsens, dass es sich um eine Hinterlassenschaft des Altbergbaus, mithin also eine Altlast handelt. Unbeantwortet bleibt in diesem Zusammenhang jedoch die Frage, ob diese Sichtweise in der heutigen Zeit noch zutreffend ist oder ob dem Altbergbau angesichts neuer Methodiken und Technologien nicht doch ein Zukunftspotential innewohnt.

Zukunftsthema Altbergbau

Der Handlungsbedarf an Altbergbaustandorten ist unstrittig. Die untertägigen Hohlräume sammeln Wasser, das wie oben beschrieben auf unterschiedliche Weise mit verschiedenen Elementen angereichert ist. Oftmals fallen bereits im Berg komplexe Eisenhydroxidschlämme (EHS) aus, die durch die Transportwirkung des Wassers zutage gefördert werden.

Am RG ergibt sich die unmittelbare Notwendigkeit zum Handeln aus dem Umstand, dass die Schlammaufnahmekapazität des Wasserbauwerks erschöpft ist und bei Starkregenereignissen signifikante Schlammengen in die Mulde geraten (Bild 1b).

Für (EHS) gibt es keine allgemeingültige Lösung. Das EHS-Konzept der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) als Sanierungsträger des ostdeutschen Braunkohlenbergbaus sieht dafür eine bevorzugte Reihenfolge vor, welche in großen Teilen auf den Erzbergbau übertragbar ist:

1. Vermeidung, welche aufgrund der Gegebenheiten nicht möglich ist.
2. Verwertung, welche sich aufgrund der bisherigen Anforderungen nur in Sonderfällen eröffnet.
3. Verspülung, welche auf erhebliche Akzeptanzprobleme der Öffentlichkeit stößt und auch entsprechenden Verspülraum benötigt.
4. Damit verbleibt nur Deponierung bei knappem Deponieraum, wobei die Voraussetzung dafür jedoch die Herstellung einer Deponiefähigkeit ist.

the extraction of raw materials and the generation of elution-stable geopolymers for use as special building materials. A simple chemical analysis shows how effective this approach can be. According to this analysis, the IHS consists of 30 to 45 % iron (Fe), 2.5 to 5 % Zn, ~0.1 % copper (Cu), 10 to 15 % Al as well as variable amounts of quartz and silicate components in the dry substance. Heavy metal impurities with As, lead (Pb) and Cd total ~0.5 to 1.0 %.

The focus here is primarily on the recovery of the valuable substances contained: Fe, Zn and Cu were recovered from the sludge by >80 % yield in the laboratory through smelting. During the subsequent technical conversion, the pollutants As, Pb and Cd are removed via the electrostatic precipitator in accordance with the applicable emission control regulations. The stabilisation of the Al- and Si-containing residues takes place in the form of geopolymers, i. e., novel elution-stable building materials in which possible heavy metal contaminants are immobilised for geological periods of time. The aim is to make a future-oriented and sustainable contribution to environmentally relevant issues in the field of mine water and sludge, which can be scaled up internationally by regional partners and which integrates public acceptance. In this way, alternatives for disposal, conservation of landfill space, reduction of CO₂ emissions and ecological improvements for flora and fauna are to be achieved.

What was previously understood by contaminated sites, should be, truly spoken, conceived of as raw materials that can be extracted and recycled sensibly and economically if the right approach is taken. In view of the EU Water Framework Directive with its obligation to treat mining water, a significant contribution can be made at an early stage to meet official requirements. In addition, landfill areas can be conserved through a technology for the utilisation of mine sludge.

The technical work is centred on a test container below the David shaft tailing dump, which combines mining and tailings leachates. The mobile plant is used and operated directly at the site in a real environment. The modular design allows the sludge to be dewatered, the filtrate water to be treated using membrane technology and concentrate treatment and, based on this, valuable and building materials to be recovered.

This potential was recognised by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), which is why this project is being funded with roughly 1 M€ as part of the WIR! – rECOMine funding measure.

Products

As a result of this sludge treatment, various marketable products are generated. This point of view is crucial for understanding the approach described here: A cost-intensive situation is inverted into an income-producing profit situation. This makes the message unmistakable: Post-mining environmental protection in old mines is not necessarily cost-intensive if it is approached with the methods of mining and its downstream trades. Translated into today's world, this means that old mining can be a business case.

The first product is obtained when the mine sludge is pressed: pure water. Any suspended and turbid matter remaining after the filter press is completely removed by membrane filtration. Nano-

Folglich ist eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Verwertung der Schlämme in der Praxis bisher nicht gelungen.

Rohstoffe, nicht Altlasten

Der Lösungsansatz liegt in der gemeinsamen Verarbeitung von entwässerten Grubenschlämmen mit eisenhaltigen Schlacken eines regionalen Hüttenbetriebs zur Gewinnung enthaltener Rohstoffe und Generierung elutionsstabiler Geopolymere für den Einsatz als Spezialbaustoffe. Wie zielführend dieser Weg sein kann, zeigt eine einfache chemische Analyse, derzufolge der EHS in der Trockensubstanz zu 30 bis 45 % aus Eisen (Fe), 2,5 bis 5 % aus Zn, ~0,1 % aus Kupfer (Cu), 10 bis 15 % aus Al sowie aus variablen Mengen Quarz und silikatischen Anteilen besteht. Schwermetallverunreinigungen mit As, Blei (Pb) und Cd liegen in Summe bei ~0,5 bis 1,0 %.

Dabei steht vor allem die Gewinnung enthaltener Wertstoffe im Fokus: Fe, Zn und Cu ließen sich im Labor durch Coverhüttung zu >80 % aus dem Schlamm gewinnen. Bei der späteren technischen Umsetzung werden die Schadstoffe As, Pb und Cd über den Elektrofilter gemäß geltenden Immissionsschutzregelungen entfernt. Die Stabilisierung der Al- und Si-haltigen Reste erfolgt in Form von Geopolymeren, d. h. neuartigen elutionsstabilen Baustoffen, in denen eventuelle Schwermetallverunreinigungen auf geologische Zeiträume immobilisiert sind. Das Ziel ist ein zukunftsorientierter und nachhaltiger Beitrag für umweltrelevante Fragestellungen im Bereich Grubenwässer und -schlämme, welcher von regionalen Partnern international skaliert werden kann und die öffentliche Akzeptanz mit integriert. So sollen Alternativen zur Entsorgung, Schonung von Deponieraum, Reduktion von CO₂-Emissionen und ökologische Verbesserungen für Flora und Fauna erreicht werden.

Was bis dato unter Altlasten verstanden wurde, sind Rohstoffe, die sich bei richtiger Vorgehensweise sinnvoll und wirtschaftlich gewinnen und verwerten lassen. Im Hinblick auf die EU-Wasser-rahmenrichtlinie mit der Verpflichtung der Behandlung von Bergbauwässern kann so frühzeitig ein wesentlicher Beitrag geliefert werden, um behördliche Vorgaben zu erfüllen. Durch eine Technologie zur Nutzung der Grubenschlämme können zudem Deponeflächen geschont werden.

Im Zentrum der technischen Arbeiten steht ein Versuchskontainer unterhalb des Entwicklungsstandorts Spülhalde David-schacht, welcher Bergbau- und Haldensickerwässer in sich vereinigt. Die mobile Anlage wird direkt am Standort in Realumgebung eingesetzt und betrieben. Der modulare Aufbau ermöglicht ein Entwässern der Schlämme, die Behandlung des Filtratwassers mittels Membrantechnologie und Konzentratbehandlung sowie darauf aufbauend eine Wert- und Baustoffgewinnung.

Dieses Potential wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) erkannt, weswegen dieses Vorhaben im Rahmen der Fördermaßnahme WIR! – rECOMine mit knapp 1 Mio. € gefördert wird.

Produkte

Als Ergebnis dieser Schlammbehandlung werden verschiedene marktfähige Produkte generiert. Diese Sichtweise ist maßgeblich für das Verständnis des hier beschriebenen Ansatzes: Es wird eine kostenintensive Situation in eine ertragsliefernde Gewinnsituation invertiert. Damit ist auch die Botschaft unmissverständlich: Nachsorgender Umweltschutz im Altbergbau ist nicht zwingend kosten-

filtration membranes are used for this purpose, which also largely retain the metal ions dissolved in the water. The residues are combined with the sludge.

The second product series are the metals Fe and Zn. They can be obtained from the smelting of the sludge obtained during sludge dewatering. The environmentally relevant metals As, Pb and Cd are volatile under these conditions and are removed from the waste gas stream according to the state of the art, so that this environmental problem has been solved in an easy way.

The third product is a geopolymer. The slag is finally converted to geopolymer. This is where the know-how developed at the Institute of Technical Chemistry at the TU Bergakademie Freiberg comes into play, which makes it possible to convert even residual materials into geopolymers.

Geopolymers

Geopolymers are inorganic calcium-free binders based on silicon and aluminium oxide. The prefix “geo” is emblematic of the mineral inorganic raw materials used. As inorganic polymers, they are free of plastic and benefit from the properties of real polymers. These very properties set them apart from classic binders such as cement, because they harden quickly, set without shrinkage and have high compressive strengths. Due to their structure and composition, they are non-flammable, but temperature-resistant and dimensionally stable, and they show increased resistance to all inorganic and organic acids except hydrofluoric acid. They are largely stable against leaching. As a binder (“cold cement”) they are therefore superior to concrete. Geopolymers can be foamed and have competitive insulating properties with polystyrene (Figure 2).

In addition to the recyclability of residual materials, the advantage over classic cement or concrete lies in the absence of emissions. Worldwide, 4.1 bn t/a of cement are produced, making the cement industry one of the most important single emitters of the climate-relevant CO₂, accounting for ~8% of global anthropogenic CO₂ emissions. Geopolymers are thus a climate-

intensiv, wenn er mit den Methoden des Bergbaus und seiner nachgeschalteten Gewerke angegangen wird. Übersetzt in die heutige Zeit heißt dies, dass Altbergbau ein Business Case sein kann.

Das erste Produkt wird beim Abpressen des Grubenschlammes erhalten: Reinwasser. Die nach der Filterpresse eventuell verbleibenden Schweb- und Trübstoffe werden über eine Membranfiltration restlos entfernt. Dabei kommen Nanofiltrationsmembranen zum Einsatz, die auch den weitgehenden Rückhalt der im Wasser gelösten Metallionen leistet. Die Rückstände werden mit dem Schlamm vereinigt.

Die zweite Produktserie sind die Metalle Fe und Zn. Sie können aus der Verhüttung der bei der Schlammentwässerung erhaltenen Schlämme erhalten werden. Die umweltrelevanten Metalle As, Pb und Cd sind unter diesen Bedingungen flüchtig und werden nach Stand der Technik aus dem Abgasstrom entfernt, sodass dieses Umweltproblem auf leichte Weise gelöst worden ist.

Das dritte Produkt ist ein Geopolymer. Die Schlacke wird abschließend auf Geopolymer umgearbeitet. Hier kommt das am Institut für Technische Chemie der TU Bergakademie Freiberg entwickelte Know-how zum Einsatz, mit dem es möglich ist, auch Reststoffe in Geopolymere umzusetzen.

Geopolymere

Geopolymere sind anorganische calciumfreie Bindemittel auf Basis von Silicium- und Aluminiumoxid. Die Vorsilbe „Geo“ steht sinnbildlich für die verwendeten mineralischen anorganischen Ausgangsstoffe. Als anorganische Polymere sind sie frei von Plastik und profitieren von den Eigenschaften echter Polymere. Eben diese Eigenschaften heben sie von klassischen Bindemitteln wie Zement ab, denn sie sind schnell erhärtend, binden schrumpffrei ab und weisen hohe Druckfestigkeiten auf. Aufgrund ihrer Struktur und Zusammensetzung sind sie nicht brennbar, dafür temperaturbeständig und formstabil, und sie zeigen gegenüber allen anorganischen und organischen Säuren außer Flusssäure eine erhöhte Beständigkeit auf. Sie sind weitestgehend gegen Auslaugung stabil. Als Bindemittel („Kalter Zement“) sind sie Beton deswegen



Fig. 2. Properties of geopolymers.

Bild 2. Eigenschaften von Geopolymeren. Source/Quelle: TUBAF, Institut für Technische Chemie

friendly alternative to cement. They can be produced easily and cost-effectively at ambient conditions with little effort. The use of secondary raw materials avoids expensive primary raw materials and mining interventions in nature. They also avoid energy-intensive manufacturing processes such as the high-temperature thermal activation of cement clinker at 1,450 °C. Because of this, geopolymers have significant potential for the energy and raw material transition, but also for environmental protection. Geopolymers based on residual materials are no more expensive than classic concrete and are fully recyclable.

Technical advantages are their significantly higher temperature stability, which is why they tolerate much wider temperature ranges in use. And they offer safety: In the event of fire, there is no cracking or spalling. They do not contain lime, which makes them highly resistant to chemicals and corrosive conditions (Figure 3). They can develop compressive strengths comparable to high-strength concrete after just one day. Their rapid setting behaviour makes them suitable for mass production of precast elements. Leaching-sensitive ingredients, such as those contained in commercially available cement, are firmly chemically bound in the geopolymer and are thus stable against leaching. In this way, old mining has a special potential for innovation, because if the mining sludge is utilised in a consistent manner, considerable economic benefits can be derived from the seemingly worthless residues of old mining fields, and mining once again fulfils its purpose of supplying society with raw materials, even decades after a mine has been abandoned.

Education

In addition to obtaining marketable products from the residues of old mining, a particular concern of the ZauBer project is to actively involve the public. The aim is to raise awareness of the obligations and opportunities arising from the application of new technologies to old mining and to further develop the heritage of the World Heritage Region Erzgebirge/Krušnohoří with regard to new future technologies. This can only be done with very well-trained, motivated people, which is why the public is actively involved from the beginning, e.g., in the form of a special exhibition in a prominent place in Terra Mineralia museum in Freiberg. In addition to excursions for schools and kindergartens, exhibi-

überlegen. Geopolymere lassen sich schäumen und besitzen gegenüber Polystyrol kompetitive Dämmeigenschaften (Bild 2).

Der Vorteil gegenüber klassischem Zement bzw. Beton liegt neben der Verwertbarkeit von Reststoffen in der Emissionsfreiheit. Weltweit werden 4.1 Mrd. t/a Zement hergestellt, wodurch die Zementindustrie mit ~8% der weltweiten anthropogenen CO₂-Emissionen einer der wichtigsten Einzelemittenten für das klimarelevante CO₂ ist. Geopolymere sind damit eine klimaschonende Alternative gegenüber Zement. Sie lassen sich mit geringem Aufwand leicht und kostengünstig bei Umgebungsbedingungen herstellen. Die Verwendung von Sekundärrohstoffen vermeidet teure Primärrohstoffe und bergbauliche Eingriffe in die Natur. Sie vermeiden auch die energieintensiven Herstellprozesse wie die thermische Hochtemperaturaktivierung von Zementklinker bei 1.450 °C. Aufgrund dessen besitzen Geopolymere bedeutendes Potential für die Energie- und Rohstoffwende, aber auch für den Umweltschutz. Auf Reststoffen basierende Geopolymere sind nicht teurer als klassischer Beton und sind vollständig recyclingfähig.

Technische Vorteile bietet ihre bedeutend höhere Temperaturstabilität, weswegen sie im Einsatz wesentlich größere Temperaturbandbreiten tolerieren. Und sie bieten Sicherheit: Im Brandfall kommt es zu keinen Rissbildungen und Abplatzungen. Sie enthalten keinen Kalk, was sie in hohem Maß widerstandsfähig gegenüber Chemikalien und korrosiven Bedingungen macht (Bild 3). Sie können bereits nach einem Tag vergleichbare Druckfestigkeiten wie hochfester Beton entwickeln. Durch ihr schnelles Abbindeverhalten sind sie somit für die Massenproduktion von Fertigteilen geeignet. Laugungssensitive Inhaltsstoffe, wie sie im handelsüblichen Zement enthalten sind, werden im Geopolymer chemisch fest eingebunden und sind somit stabil gegen Auslaugung. Auf diese Weise wohnt dem Altbergbau ein besonderes Innovationspotential inne, denn bei folgerichtiger Verwertung der Grubenschlämme läßt sich aus den scheinbar wertlosen Rückständen alter Grubenfelder erheblicher wirtschaftlicher Nutzen ziehen und der Bergbau wird einmal mehr seiner Bestimmung gerecht, die Gesellschaft mit Rohstoffen zu versorgen und sei es Jahrzehnte nach Aufgabe eines Bergwerks.

Bildung

Neben der Gewinnung marktfähiger Produkte aus den Rückständen des Altbergbaus ist es ein besonderes Anliegen des Projekts



Fig. 3. Application spectrum of geopolymers.

Bild 3. Anwendungsspektrum von Geopolymeren. Source/Quelle: TUBAF, Institut für Technische Chemie

tions and lectures will be organised and the project results will be published scientifically and in popular science. The main aim is to attract school graduates for training or studies in these fields. As mentioned at the beginning, the rehabilitation and preservation of old mines require just as much specialised knowledge as the new approach to the use and utilisation of old mining residues described here.

Summary

The aim of the current project is to develop technologies for the eternal consequences of mining with the active involvement of the population in the World Heritage Region Erzgebirge/Krušnohoří in future issues. An awareness is to be created for (local) mining and raw material extraction as well as the inherent potential of mining residues for the supply of tomorrow and to generate new jobs. With social acceptance, the developed processes can be applied in the future through the modular, mobile plant design not only for water solution tunnels in Saxony, but also for the treatment of iron-containing residues from lignite mining in Lusatia and other regions. Last but not least, similar materials or products from old mining operations in Germany can be tested and validated under these aspects.

In this way, old mine workings contribute to the global goals of protecting the climate and resources in the form of marketable, innovative products made from mine sludge. The legacy of Saxon mining, thus inverts from a problem case to a new raw material extraction concept with great potential, which has already gained nationwide attention.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Federal Ministry of Education and Research for funding the project "ZauBer" (FKZ 03WIR1908A) as part of the WIR! project rECOMine.

Authors / Autoren

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Martin Bertau, Martin Reiber M.Sc., Institut für Technische Chemie, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg

ZauBer, die Öffentlichkeit aktiv einzubinden. Ziel ist ein Bewusstsein für die Verpflichtungen und die Chancen, die sich aus einer Anwendung neuer Technologien auf den Altbergbau ergeben und das Erbe der Welterberegion Erzgebirge/Krušnohoří in Hinblick auf neue Zukunftstechnologien weiterzuentwickeln. Dies kann nur mit sehr gut ausgebildeten, motivierten Personen erfolgen, weswegen die Öffentlichkeit von Beginn an aktiv einbezogen wird, z. B. in Form einer Sonderausstellung an prominenter Stelle in der Freiburger Terra Mineralia. Neben Exkursionsangeboten für Schulen und Kindergärten werden Ausstellungen und Vorträge organisiert und die Projektergebnisse wissenschaftlich und populärwissenschaftlich veröffentlicht. Dabei sollen besonders auch Schulabsolventen für eine Ausbildung oder ein Studium in diesen Bereichen gewonnen werden. Denn gerade wie zu Beginn angesprochen, die Sanierung und die Verwertung des Altbergbaus verlangen ebenso dezidiertes Spezialwissen wie die hier beschriebene neue Herangehensweise einer Nutzung und Verwertung altbergbaulicher Rückstände.

Zusammenfassung

Das Ziel des laufenden Projekts ist die Entwicklung von Technologien für Ewigkeitsfolgen des Bergbaus unter aktiver Einbindung der Bevölkerung in der Welterberegion Erzgebirge/Krušnohoří in Zukunftsfragen. Angestrebt wird, ein Bewusstsein für (heimischen) Bergbau und Rohstoffgewinnung sowie das Bergbaurückständen innewohnende Potential für die Versorgung von Morgen zu schaffen und neue Arbeitsplätze zu generieren. Mit gesellschaftlicher Akzeptanz können die entwickelten Verfahren durch das modulare, mobile Anlagendesign zukünftig nicht nur für Wasserlösestellen in Sachsen, sondern auch für die Behandlung eisenhaltiger Rückstände aus dem Braunkohlenbergbau in der Lausitz und weiteren Regionen angewendet werden. Nicht zuletzt können ähnliche Materialien oder Produkte aus dem bundesdeutschen Altbergbau unter diesen Gesichtspunkten getestet und validiert werden.

Auf diese Weise trägt der Altbergbau im Sinne der Zukunftssicherung in Form marktfähiger, innovativer Produkte aus Grubenschlämme zu den weltweiten Zielen der Schonung von Klima und Ressourcen bei. Die Hinterlassenschaften des sächsischen Bergbaus, invertieren sich so vom Problemfall zu einem neuen Rohstoffgewinnungskonzept mit großem Potential, das bereits bundesweit Aufmerksamkeit gewonnen hat.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Projekts „ZauBer“ (FKZ 03WIR 1908A) im Rahmen des WIR!-Vorhabens rECOMine.