George Barakos
Helmut Mischo

Setting the REE Industry-Specific Criteria and their Significant Role in the Viability of Rare Earth Underground Mining Projects

To evaluate the feasibility of a future underground mining operation is a complex problem in itself, with several different parameters to be accounted for and evaluated to secure investment decisions over the viability of any potential underground mining project. This procedure gets even more complicated when it comes to exploiting rare earth deposits. Various concerns are expressed regarding the environmental impacts that an underground mining operation may cause due to the radioactivity of the rare earth elements during mining and in waste treatment. Furthermore, the fragile market and the diversified supply and demand of the different rare earth elements can significantly affect the viability of such a venture, among other factors. This paper deals with the definition and classification of the specific criteria that govern the REE mining industry. Moreover, a thorough investigation is made of how these criteria can determine not only the selection of the underground mining method to be applied, but also of the impact that they may have to the overall feasibility of any given potential project.
This paper was presented by George Barakos at the conference of the Society of Mining Professors (SOMP) on 24th June 2015 at the TU Bergakademie Freiberg, Germany.

Festlegung der für die SEE-Industrie spezifischen Kriterien und ihre bedeutende Rolle bei der Durchführbarkeit von Tiefbauprojekten für seltene Erden

Die Bewertung der Machbarkeit eines zukünftigen Tiefbauprojekts ist ein komplexes Problem, da eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter betrachtet und bewertet werden muss, um Investitionsentscheidungen hinsichtlich der Durchführbarkeit eines jeden potentiellen Tiefbauprojekts zu rechtfertigen. Dieses Verfahren ist jedoch noch komplizierter, wenn es um die Erschließung von Lagerstätten seltener Erden geht. Immer wieder werden Bedenken bezüglich der Umweltbelastungen geäußert, die der untertägige Abbau von seltenen Erdelementen (SEE) durch Radioaktivität im Zuge der Gewinnung und Bergeentsorgung hervorrufen könnte. Darüber hinaus können u.a. der fragile Markt und die unterschiedliche Angebots- und Nachfragesituation bei den einzelnen seltenen Erdelementen die Durchführbarkeit eines solchen Projekts stark beeinflussen. Dieser Beitrag befasst sich mit der Definition und Klassifizierung von spezifischen Kriterien, die dem SEE-Bergbau zugrunde liegen. Darüber hinaus wird im Detail diskutiert, wie diese Kriterien nicht nur die Auswahl der geeigneten untertägigen Abbauverfahren bestimmen, sondern auch deren mögliche Auswirkungen auf die Durchführbarkeit eines potentiellen Projekts.
Dieser Beitrag wurde von George Barakos anlässlich der Konferenz der Society of Mining Professors (SOMP) am 24. Juni 2015 an der TU Bergakademie Freiberg vorgestellt.

Introduction

The continuously growing demand for rare earth elements (REEs), in combination with the market crisis of 2009 and the price spike of 2011, have initiated a treasure hunt for new rare earth deposits all over the world in recent years. This has led to the discovery of numerous rare earth deposits that could consequently evolve into potential surface or underground mining projects.

Einführung

Die ständig wachsende Nachfrage nach seltenen Erdelementen (SEE) zusammen mit der Marktkrise 2009 und dem Preishoch 2011 haben in den letzten Jahren weltweit eine wahre Schatzsuche nach neuen Lagerstätten seltener Erden ausgelöst. Das hat zur Entdeckung zahlreicher solcher Lagerstätten geführt, woraus sich potentielle Tagebau- und Tiefbaubauprojekte entwickeln könnten.

The history of REE mining can be classified into three periods:
1. Monazite-placers,
2. Mountain Pass and
3. Chinese era.

China has been leading the market over the last 30 years due to the geological advantage of holding more than half of the world's known REE reserves that are economically advantageous as well, in terms of mine development. China has also developed the intellectual capital needed for the development of the REE industry which the rest of the world is still lacking and it will take years until the Chinese skills level can be reached, let alone that in underground mining operations the level of expertise demanded will be even higher. Yet, a fourth, new era may begin and new rare earth projects may be developed.

Nevertheless, there are some special issues that govern rare earths, unlike other common ores, such as the environmental consequences that may result from their mining and processing. China represents the most typical example of this, as lax environmental laws and standards have led to extended pollution of the areas that rare earth mines develop (1,2).

Furthermore, the balance between the demand and the natural abundance of the individual rare earth elements in the ores is a significant issue for the industry, known as the balance problem and it can be considered more important than the availability of rare earth resources itself (3). The fragile REE-market, in combination with the social arguments and insufficient legislation are equally important factors for the REE industry.

All these criteria combined do not only affect the feasibility of mining operations in terms of selecting a proper mining method, but can also determine the overall viability of potential rare earth underground mining projects.

Traditional Evaluation Methods and Standardized Criteria in the Global Mining Industry

Selecting the appropriate mining method requires the consideration of many single factors. Such a procedure is even more sophisticated when it is applied to underground mining operations. Several approaches, both linguistic and numerical, have been presented in the past regarding the selection process of mining methods for common ores. Most of the schemes focus on determining the proper underground mining method, since there are so many possible choices and the process is far more complicated (4).

Boshkov and Wright (5) introduced one of the first mining method selection tools, developed specifically for underground mining operations. This tool was based on a qualitative classification system using general descriptions of the thickness, dip and strength of the ore. Morrison (6) took another approach by dividing the underground mining methods into three basic groups: (a) rigid pillar support, (b) controlled subsidence, and (c) caving. By considering ore width, support type and strain energy accumulation, this tool is based on choosing one method over another to the final selection.

Laubscher (7) presented a selection procedure based on a rock mass classification system of his own for an appropriate mass underground mining method. He primarily focused on cavability,

Die Geschichte des SEE-Bergbaus kann in drei Perioden unterteilt werden:
1. Monazitseifen,
2. Mountain Pass-Ära und
3. Chinesische Ära.

China ist seit über 30 Jahren führend in diesem Markt, da es den geologischen Vorteil hat, über mehr als die Hälfte der bekannten und zu wirtschaftlichen Bedingungen abbaubaren SEE-Ressourcen weltweit zu verfügen. Außerdem findet man in China das nötige „intellektuelle Kapital", um diese SEE-Industrie zu entwickeln. Der Rest der Welt hat hier noch Nachholbedarf und es wird Jahre dauern, um das Fachwissen der Chinesen zu erreichen, insbesondere im Bereich des Tiefbaus, wo ein noch größeres Maß an Expertise erforderlich ist. Dennoch könnte eine vierte, neue Ära beginnen, in der neue Seltenerdprojekte entwickelt werden.

Allerdings gibt es einige spezielle Fragen, die, in noch stärkerem Maße als bei den gängigen Erzen, für seltene Erdlagerstätten relevant sind, wie beispielsweise die Auswirkungen, die Abbau und Weiterverarbeitung auf die Umwelt haben können. China ist hierfür das Beispiel schlechthin, denn lasche Umweltgesetze und -normen haben zu weitreichender Verschmutzung der Regionen geführt, in denen seltene Erden abgebaut werden (1,2).

Hinzu kommt, dass das Gleichgewicht zwischen Nachfrage und natürlichem Vorkommen einzelner SEE in den Gemengeerzen ein Hauptproblem für die Industrie darstellt, bekannt als das „Gleichgewichtsproblem", das von größerer Bedeutung ist als die Verfügbarkeit von Ressourcen seltener Erden an sich.(3). Der fragile SEE-Markt in Verbindung mit sozioökonomischen Argumenten und einer unzureichenden Gesetzgebung ist ebenfalls ein maßgeblicher Faktor für die SEE-Industrie.

All diese Kriterien zusammen beeinflussen nicht nur die Machbarkeit von Bergbauaktivitäten im Hinblick auf die Auswahl eines geeigneten Abbauverfahrens, sondern können auch für die technisch-technologische und wirtschaftliche Durchführbarkeit eines potentiellen Tiefbauprojekts für seltene Erden insgesamt ausschlaggebend sein.

Traditionelle Bewertungsmethoden und standardisierte Kriterien im internationalen Bergbau

Die Auswahl des geeigneten Abbauverfahrens bedarf der Betrachtung vieler Einzelfaktoren. Ein solches Vorgehen ist umso anspruchsvoller, wenn es sich um eine Tiefbaugrube handelt. In der Vergangenheit sind verschiedene – sowohl linguistische als auch numerische – Ansätze für Auswahlprozesse von Abbauverfahren gängiger Erze vorgestellt worden. Die meisten konzentrieren sich nur auf die Bestimmung des geeignetsten Abbauverfahrens, in den Fällen, in denen es eine Anzahl möglicher Optionen gibt. Aber der eigentliche Auswahlprozess selbst ist noch weit komplizierter (4).

Boshkov und Wright (5) haben eines der ersten Instrumente zur Auswahl von Abbauverfahren speziell für den Tiefbau entwickelt und eingeführt. Dieses Instrument basiert auf einem qualitativen Klassifizierungssystem und verwendet allgemeine Beschreibungen von Mächtigkeit, Einfallen und Festigkeit des Erzes. Morrison (6) verfolgte einen anderen Ansatz, indem er die Verfahren für den untertägigen Abbau in drei Hauptgruppen der Dachbehandlung unterteilte: (a) Pfeilerbau, (b) planmäßige Absenkung und (c)

comparing block caving to stoping. Nicholas (8) came up with a quantitative analysis via a numerical ranking of the suitability of mining methods to given characteristics. By adding up the values of each method, engineers choose two or three mining methods that have the highest overall positive ranking in a given case and then analyze them economically to come to a final decision. Hartman (9) brought out a qualitative method, similar to that proposed by Boshkov and Wright. He put forward a selection chart based on the geometry of the deposit and the ground conditions of the ore zone.

Miller-Tait et al. (10) presented a modified scheme of Nicholas' system and developed the UBC mining method selection tool that represents typical Canadian mining design practices. Many researchers in the recent years (11, 12, 13) have also introduced numerical methods and methodologies considering multi-decision making tools and analytical hierarchical processes. Finally, Hartman and Mutmansky (14) proposed a total of 36 criteria classified in six main groups to analyze the Underground Mining Method Selection (UMMS) problem in details.

However, none of these approaches has taken into consideration the special boundary conditions that govern mining operations on rare earth element deposits. Thus a need is created to develop a new overall assessment tool for rare earth mining projects in order to add the REE-Industry specific criteria and evaluate them together with the standardized specifications that determine the viability of such investments.

REE-Mining Industry Specific Criteria

A first description has been made of the special factors that govern rare earth mining in general. In deeper analysis, the REE-Mining Industry specific criteria could be divided into four major subcategories:

1.) Economic,
2.) environmental,
3.) sociopolitical and
4.) technical.

All of the above characteristics, either individually or combined, can predetermine the mining method to be applied as well as the viability of any future rare earth underground mining project and the according investment decisions to be made.

Economic Criteria

Besides the usual economical evaluations that are made for all underground mining case studies, rare earths implement some special boundary conditions as well. The small and opaque market of REEs deters big mining companies from getting involved, so China currently holds more than 90 % of the global production. The rest of the world is dependent on the Chinese government's export policies and despite the calls to create a centralized Rare Earth Element Exchange, the situation remains unclear.

Notwithstanding the fact that the prices are stable for the time being, the crisis of 2009, the price spike of 2011and the rapid decline in prices again indicate the fragility of the REE market. It is difficult to estimate future REE prices and therefore, future cash flows for the economic evaluation of REE projects.

Parallel to the exploration burst, fruitful efforts have been

Bruchbau. Durch die Betrachtung der Gangmächtigkeit des Erzes, des Ausbautyps und der Spannungsanreicherung basiert dieses Instrument darauf, aus jeweils zwei Verfahren das besser geeignete auszuwählen und so fortzufahren bis schlussendlich das beste ermittelt worden ist.

Laubscher (7) hat einen Auswahlprozess für ein geeignetes untertägiges Abbauverfahren vorgestellt, das auf dem von ihm selbst erstellten Gebirgsklassifizierungssystem beruht. Er legt den Schwerpunkt in erster Linie auf das Bruchverhalten und vergleicht Blockbruchbau und Strossenbau. Nicholas (8) legte eine quantitative Analyse vor, in der mit Hilfe einer numerischen Rangfolge die Eignung von Abbauverfahren bei gegebenen Eigenschaften dargestellt wurde. Durch das Addieren der Werte für jedes Verfahren wählen Ingenieure zwei oder drei Abbauverfahren aus, die unter technisch-technologischen Gesichtspunkten das beste Gesamtergebnis für einen gegebenen Einsatzfall erreicht haben, und analysieren dann deren Wirtschaftlichkeit, um zu einer endgültigen Entscheidung zu kommen. Hartman (9) stellte eine qualitative Methode vor, ähnlich zu Boshkov und Wright, mit einer Auswahltabelle, basierend auf der Geometrie der Lagerstätte und den Gebirgsverhältnissen der jeweiligen Erzzone.

Miller-Tait und andere (10) präsentierten ein abgeändertes Schema des Systems von Nicholas und entwickelten das UBC (Universität von British Columbia) Instrument zur Auswahl von Abbauverfahren, das die für den kanadischen Bergbau typische Planungspraxis widerspiegelt. Zahlreiche weitere Forscher haben in den zurückliegenden Jahren (11, 12, 13) numerische Methoden und Methodologien vorgestellt, die auf multi-kriteriellen Entscheidungshilfen und analytischen, hierarchischen Prozessen basieren. Schlussendlich haben Hartman und Mutmansky (14) insgesamt 36 Kriterien vorgeschlagen, unterteilt in sechs Hauptgruppen, um das Problem der Auswahl von untertägigen Abbauverfahren im Detail zu analysieren.

Allerdings hat keiner dieser Ansätze die besonderen Grenzbedingungen betrachtet, die den Abbau von Lagerstätten seltener Erdelemente definieren. Daher besteht die Notwendigkeit, ein neues Bewertungsinstrument für Bergbauprojekte im Bereich seltener Erden zu entwickeln, das die spezifischen Kriterien der SEE-Industrie berücksichtigt und diese zusammen mit den standardisierten Spezifikationen evaluiert, die die Durchführbarkeit derartiger Investitionen bestimmen.

Spezifische Kriterien der SEE-Bergbauindustrie

Es ist bereits eine erste Beschreibung der besonderen Faktoren erfolgt, die den Abbau von seltenen Erden im Allgemeinen bestimmen. Im Zuge einer tiefer gehenden Analyse kann man die für die SEE-Bergbauindustrie spezifischen Kriterien in vier Hauptgruppen unterteilen:

1.) wirtschaftliche Kriterien,
2.) Umweltkriterien,
3.) soziopolitische Kriterien und
4.) technische Kriterien.

All diese Kriterien, einzeln oder in Kombination, können sowohl das anzuwendende Abbauverfahren als auch die Durchführbarkeit eines zukünftigen Tiefbauprojekts für seltene Erden und die damit verbundenen Investitionsentscheidungen vorbestimmen.

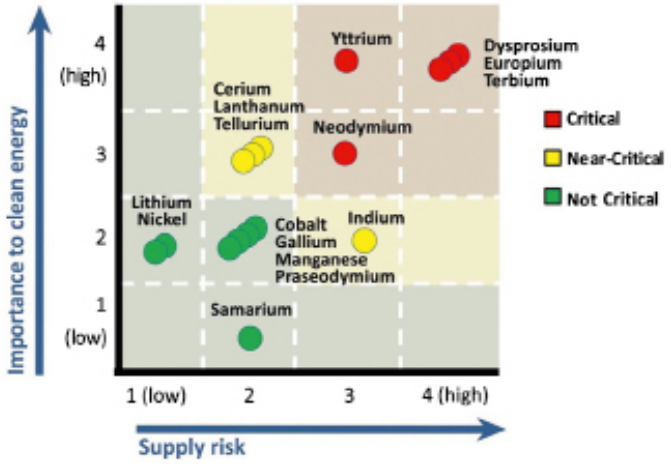

Fig. 1. Short-term criticality matrix (16)
Bild 1. Matrix der kurzfristigen Kritikalität (16)

made to bring new non-Chinese resources into production; Mountain Pass mine in the USA and the Mount Weld mine in Australia have already launched operations. Nevertheless, these projects are not enough to balance the supply needs for rare earths and more mining projects have to get on track. But the main issue regards the viability of such investments, since there are no reliable estimates on the costs of mining and processing operations for rare earths, let alone the fact that rare earth underground mining procedures can be more costly. It should be mentioned that there are no current active rare earth underground mining projects to provide knowledge and experience, whilst just a few potential underground mines are about to being launched. But even if this knowledge existed, the challenge of Chinese low-cost labor and manipulation of the global market and prices would still exist, thus posing barriers difficult to cross.

Illegal mining and smuggling of rare earths is also an issue of major importance, especially in China, as it keeps prices low and depletes resources more quickly, thus causing supply problems for the Chinese industry. China's tolerance of illegal mining is quickly diminishing and the government is taking actions to deal with this issue by clamping down on illegal mining and reducing export quotas.

The global annual production of rare earth elements for the year 2014 was estimated at 110,000 t according to the United States Geological Survey (15), although these numbers are not accurate. In any case, these figures do not give any indication of the supply of individual rare earth elements. Admittedly, REEs are not present in equal amounts in the REE ores. Following the rule of the increasing atomic number Z, they are generally divided into the Light Rare Earth Elements (LREEs) and the Heavy Rare Earth Elements (HREEs) with the HREEs being much less abundant. Another classification of rare earth elements divides them into critical and non-critical REEs, taking into consideration the perspective of their individual supply and demand, as well as the cruciality of their applications and end uses (Figure 1).

A perfect match between demand and supply of REEs would be ideal, yet the existing balance problem is significant enough to terminate any prospects of mining even before getting started.

The presence of several – if not all – of the REEs together in

Wirtschaftliche Kriterien

Neben den in der Bergbauplanung gängigen wirtschaftlichen Bewertungen, die für alle Fallstudien im Untertagebergbau durchgeführt werden, liegen bei seltenen Erden besondere Grenzbedingungen vor. Der SEE-Markt ist klein und aufgrund seiner Vielschichtigkeit undurchsichtig, was dazu führt, dass in der Vergangenheit große Bergbauunternehmen vor dem Einstieg in diesen Markt zurückschreckten. Zurzeit hält China einen Anteil von mehr als 90 % der Weltproduktion. Der Rest der Welt ist abhängig von der Exportpolitik der chinesischen Regierung und trotz der Forderung nach Schaffung eines zentralen Börsenplatzes für SEE bleibt die Situation weiter unklar.

Zwar sind die Preise gegenwärtig relativ stabil, aber die Krise im Jahr 2009, das Preishoch im Jahr 2011 und der rasante Preisrückgang danach machen deutlich, wie fragil der SEE-Markt ist. Es ist schwierig, zukünftige SEE-Preise und damit auch zukünftigen Cash-Flow für die wirtschaftliche Bewertung von SEE-Projekten einzuschätzen.

Parallel zur Erkundungswelle sind erfolgreiche Bemühungen gestartet worden, bekannte Ressourcen außerhalb Chinas zu erschließen. Die Bergwerke Mountain Pass in den USA und Mount Weld in Australien haben bereits wieder mit dem Abbau begonnen. Dennoch reichen diese Projekte nicht aus, den erwarteten Bedarf an seltenen Erden zu decken, so dass weitere Bergbauprojekte auf den Weg gebracht werden müssen. Das Hauptproblem jedoch liegt in der Durchführbarkeit dieser Investitionen, da es keine zuverlässigen Kostenschätzungen für Abbau und Aufbereitung von seltenen Erden gibt, ganz abgesehen davon, dass insbesondere die adaptierten Gewinnungsverfahren für den untertägigen Abbau kostenintensiv sein können. Es ist zu erwähnen, dass es derzeit keine laufenden aktiven Tiefbauprojekte für seltene Erden gibt, aus denen man Wissen und Erfahrung schöpfen könnte. Es gibt nur einige wenige potentielle Untertagebergwerke, die sich in der Planungsphase befinden. Aber selbst wenn ein entsprechendes Wissen zugänglich wäre, würden Chinas niedrige Arbeitskosten und die Manipulation des globalen Marktes und der Preise immer noch schwer zu überwindende Hindernisse darstellen.

Illegaler Abbau und das Schmuggeln seltener Erden sind aktuell ebenfalls ein ernstes Problem und machen Vorhersagen schwierig, besonders in China, da die Preise dadurch niedrig bleiben und die Ressourcen sich schneller erschöpfen, was bereits jetzt zu Lieferengpässen für die chinesische Industrie führt. Chinas Toleranz gegenüber illegalem Abbau schwindet zusehends und die Regierung ergreift Maßnahmen, um diesem Problem durch strengeres Vorgehen gegen illegalen Abbau und die Absenkung von Exportquoten zu begegnen.

Die globale Jahresproduktion von seltenen Erden für das Jahr 2014 wurde vom United States Geological Survey (15), auf 110.000 t geschätzt, aber diese Zahlen sind aufgrund der schwierigen Datenlage nicht ganz präzise. Auch geben sie keinerlei Aufschluss darüber, wie es mit der Verfügbarkeit einzelner SEE aussieht. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der SEE-Gehalt in verschiedenen Erzen nicht identisch ist. Gemäß der Regel der steigenden Ordnungszahl Z unterscheidet man leichte seltene Erdelemente (LREE) und schwere seltene Erdelemente (HREE), wobei die Anzahl der bekannten Vorkommen von HREE deutlich geringer ist. Eine andere Klassifizierung von SEE unterteilt in kri-

REE-bearing geological formations is in random concentrations which raises issues as far as their mining and extraction are concerned. If the REEs in higher demand have a lower abundance within these geological formations, the minimum quantity that needs to be mined, processed and separated must be at least the amount required for these critical applications. As a consequence, elements of higher abundance and lower criticality will be produced in larger than required quantities and due to the surpluses they will have to be stockpiled, thus increasing the costs of mining, processing and storing.

The continuous evolution in applications and alternation of end uses of the single REEs leads to a consequent change in their individual demand. This means practically that the market can change fast enough to make a balance very difficult, if not impossible, to achieve.

Currently, neodymium (Nd) is driving the demand for LREEs due to its application in magnets (17). HREEs are generally less abundant and are thus produced in fewer quantities. Their market is primarily driven by dysprosium (Dy) and secondarily by europium (Eu) and terbium (Tb) that are also critical for magnets among other applications. All of the above mentioned elements, including yttrium (Y), form the group of the critical REEs (Figure 1).

Environmental Criteria

The economic terms concern both surface and underground mining of rare earths with the difference lying on the fact that underground operations deterministically cost more. Almost similarly, the environmental considerations are similar up to a point but generally differ between surface and underground mining operations. Maybe the most significant environmental issue that creates concerns to the REE-industry is the generation of pollutants from the processing of rare earth elements and the use of reagents. This paper, however, focuses on the impacts caused by excavations, notably in underground mining.

One of the most controversial issues in rare earth underground mining is the presence of radioactive elements in REE-bearing minerals, primarily thorium (Th) and uranium (U), while rare earths themselves have naturally radioactive isotopes as well. The content of naturally occurring radioactive materials (NORMs) in rare earth geological formations may vary from insignificant to higher concentrations, enough to attract regulations (18) and require particular attention and close monitoring during underground mining. In some cases, uranium can be exploited as a by-product, thus increasing the economic capability of an REE mining project. However, REE-deposits have a Th-tenor rather than a U-tenor and thorium is more of a problem as it is not currently utilized for power generation, even though it has long been regarded as both, a useful nuclear fuel and a way to get rid of this kind of waste (19). Radioactivity can be a problem to surface mining as well, yet it is not of equal importance as in underground mining activities, where the remarkable dust production and the potential transfer of radioactive particles within the mine atmosphere, increase the risk of contamination. The most attention is focused on radon (Rn), as it is the only gaseous product of the primordial uranium and thorium decay chains and thus can easily migrate into the underground mine atmos-

tische und unkritische SEE und betrachtet dabei sowohl ihre individuelle Angebots- und Nachfragesituation als auch die Relevanz ihrer Anwendungen und Endnutzungen (Bild 1).

Die vollständige Übereinstimmung von Angebot und Nachfrage bei den SEE wäre der Idealfall, aber das existierende Gleichgewichtsproblem kann bereits im Vorfeld die Aussicht auf einen Abbau zunichte machen, noch bevor er begonnen hat.

Einige, wenn nicht alle SEE sind in SEE-führenden geologischen Formationen in willkürlichen Konzentrationen vorhanden, was naturgemäß erheblichen Einfluss auf Abbau und Extraktion hat. Wenn stärker nachgefragte SEE in geologischen Formationen nur geringfügig vorhanden sind, muss die abzubauende, aufzubereitende und abzuscheidende Mindestmenge an dem gewünschten Element wenigstens den Bedarf für diese kritischen Anwendungen decken. Die Konsequenz ist, dass Elemente, die in größerem Umfang vorhanden sind und deren Kritikalität niedriger ist, in Mengen abgebaut werden, die über den Bedarf hinausgehen. Die Überproduktion muss aufgehaldet werden und die Kosten für Abbau, Aufbereitung und Lagerung steigen entsprechend bzw. bei einem Angebot im freien Markt aufgrund eines Überangebots wird dies zu erheblichen Turbulenzen führen.

Die kontinuierliche schnelle Weiterentwicklung von Anwendungen und die wechselnde Endnutzung einzelner SEE in schnellem Generationswechsel führen als Konsequenz zu Veränderungen in der Nachfrage für diese Elemente. Das bedeutet praktisch, dass der Markt sich so schnell verändern kann, dass es sehr schwierig, wenn nicht unmöglich ist, ein Gleichgewicht herbeizuführen.

In der jüngeren Vergangenheit fachte Neodym (Nd) durch seine Verwendung in Magneten (17) die Nachfrage nach LREE an. HREE treten i.A. weniger häufig auf und werden daher nur in geringeren Mengen produziert. Ihr Markt wird primär von Dysprosium (Dy) und sekundär von Europium (Eu) und Terbium (Tb) getrieben, die neben anderen Anwendungen ebenfalls kritisch für Magnete sind. Alle vorstehend genannten Elemente, einschließlich Yttrium, bilden die Gruppe der kritischen SEE (Bild 1).

Umweltkriterien

Die o.g. wirtschaftlichen Randbedingungen betreffen sowohl den Tagebau als auch den Tiefbau auf seltene Erden mit dem Unterschied, dass der Tiefbau deterministisch kostspieliger ist. Ähnliches gilt bis zu einem bestimmten Punkt auch für die umweltspezifischen Erwägungen, wobei es aber auch hier signifikante Unterschiede zwischen Tagebau und Tiefbau gibt. Das vielleicht größte Umweltproblem, mit dem die SEE-Industrie zu kämpfen hat, ist die Entstehung von Schad- und Reststoffen bei der Verarbeitung von SEE und durch die bei der Aufbereitung eingesetzten Reagenzien. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich jedoch auf die Auswirkungen der Gewinnungstätigkeit insbesondere beim Tiefbau.

Eine der kontroversesten Fragen bei SEE ist das Vorhandensein von Radioaktivität in den SEE-führenden Mineralien, in erster Linie Thorium (Th) und Uran (U), wobei auch die seltenen Erden an sich natürliche radioaktive Isotope aufweisen. Der Gehalt an natürlich vorkommendem radioaktivem Material (NORM) in geologischen Formationen von seltenen Erden kann in der Konzentration von unbedeutend bis hoch variieren, so dass gesetzliche Regelungen (18) sowie besondere Sorgfalt und eine genaue Überwachung

phere as well as into groundwater (20). Radon is closely related to lung cancer found in mine workers, while it can also have severe impact on the surrounding eco-system of an underground mining plant.

Another factor that is interconnecting with the presence of NORMs as well as that of toxic compounds from the processing of REEs, regards the treatment and disposal of tailings. This relates to both surface and underground mining operations, as far as the surrounding geo-environmental balance is concerned. If there is no bank to protect the large amount of tailings, the risk of environmental contamination increases significantly. Moreover, waste disposal can be a problem when applying underground mining methods that implement backfilling with own tailings that are radioactive. It should be noted here that issues can also arise when the mining method implied requires the long-term residence of highly fragmented blasted ore in the stopes or when in-situ leaching methods are applied in "breaking down" ore blocks underground, thus creating possible sources for high radon and acid concentration levels.

The radioactive wastes from REE mining and milling operations are not the same as waste containing special nuclear materials that are associated with the production of enriched radioactive materials generated by nuclear fuel cycle facilities or disposed of by nuclear power plants. The principal issue at rare earth mining and milling sites is the volume of wastes containing NORMs that are produced and have to be managed. In all cases, special evaluations have to be made to confine radon emanation into the air and the spreading of radioactive pollutants and/or leaching liquids into the groundwater, thus maintaining a safe underground mining environment (20).

Sociopolitical Criteria

It is a common secret that a mining operation always raises social and political considerations due to its potential impacts on the environment and to the local societies. Additionally, in the case of REE-Mining, the extended contamination effects and health impacts of rare earth mining and processing in China have already prejudiced governments and people against any rare earth mining development and processing, despite the fact that the public engagement experience on this industry sector is relatively limited outside China (1). The danger of exposure to radiation can act as a deterrent for both the authorities and the local societies involved, even when the actual risk of contamination is low due to insignificant concentrations of NORMs in rare earth deposits, or when the actual contamination is minimized due to sufficient safety measures and precaution techniques. Such an apprehension often results to political reluctance as well, when it comes to taking important decisions for allowing mining development in the REE-Industry.

Although the contribution of REEs towards developing a "green economy" can be cited as a potential positive impact, arguments, reservations and suspicions highlight the so called NIMBY Syndrome – "Not in my Back Yard" – thus making rare earth mining unwelcome to the majority of societies.

Therefore, one of the most important social criteria is the complexity of acquiring a mining license to begin a rare earth mining operation. Establishing a rare earth element processing

während der untertägigen Gewinnung erforderlich sind. In einigen Fällen kann Uran als Nebenprodukt gewonnen werden, was die Wirtschaftlichkeit eines SEE-Bergbauprojekts erhöht. Jedoch tritt in den SEE-Lagerstätten häufiger Thorium als Uran auf. Thorium ist bezüglich seiner Marktfähigkeit eher problematisch, da es momentan nicht in der Kerntechnik für die Stromerzeugung genutzt wird (19). Radioaktivität kann auch im Tagebau ein Problem sein, aber nicht in gleichem Maße wie im Tiefbau, wo die beachtliche Staubentwicklung und der potentielle Transfer von radioaktiven Partikeln in die Grubenwetter das Risiko der Kontaminierung erhöhen. Größte Aufmerksamkeit gilt dem Radon (Rn), da es das einzige gasförmige Produkt der primordialen Uran- und Thorium-Zerfallsreihe ist und somit leicht sowohl in die Grubenwetter als auch in das Grundwasser (20) entweichen kann. Radon wird in engen Zusammenhang mit Lungenkrebs bei Bergleuten gebracht, kann aber auch schwerwiegende Auswirkungen auf das Ökosystem haben, das das Untertagebergwerk umgibt.

Ein weiterer Faktor, der mit dem Vorhandensein von NORM und toxischen Verbindungen aus der Verarbeitung von SEE zusammenhängt, ist die Behandlung und Entsorgung von Abfällen. Bezüglich des umgebenden geoökologischen Gleichgewichts gilt das sowohl für den Tagebau als auch für den Tiefbau. Ohne ordnungsgemäß angelegte Halden und Schlammteiche für große Mengen an Bergen und Aufbereitungsabgängen steigt das Risiko der Umweltkontamination erheblich. Darüber hinaus kann hier die Bergewirtschaft ein Problem bei untertägigen Abbauverfahren darstellen, welche die Verfüllung mit NORM-haltigem Eigenversatz vorsieht. Es ist darauf hinzuweisen, dass weitere Probleme auftreten können, wenn das angewandte Abbauverfahren vorgibt, dass stark zerkleinertes, gesprengtes Erz langfristig in den Abbaustößen verbleibt oder In-situ-Laugungsmethoden bei im Bruchbau gewonnenen Erzblöcken angewandt wird, so dass mögliche Quellen für hohe Radon- und Säurekonzentrationen entstehen.

Das Hauptthema beim Abbau seltener Erden und bei der Zerkleinerung sind Volumenströme an NORM enthaltenden Abgängen, die produziert werden und behandelt werden müssen. In allen Fällen müssen besondere Bewertungen durchgeführt werden, um die Radonemanation in die Grubenwetter und die Ausbreitung von radioaktiven Schadstoffen und/oder Laugen in das Grundwasser einzudämmen, so dass ein sicheres Arbeitsumfeld erhalten bleibt (20).

Soziopolitische Kriterien

Es ist kein Geheimnis, dass Bergbauaktivitäten aufgrund der möglichen Folgen für die Umwelt und die lokale Bevölkerung immer soziale und politische Betrachtungen auslösen. Hinzu kommt im Fall des SEE-Bergbaus, dass die weitreichenden Kontaminierungseffekte und gesundheitlichen Auswirkungen des Abbaus und der Aufbereitung von seltenen Erden in China dazu geführt haben, dass Regierungen und Gesellschaft bereits voreingenommen gegenüber jeder Entwicklung des Abbaus und der Verarbeitung von seltenen Erden sind. Und das, obwohl die Erfahrungen bezüglich des Umgangs der Öffentlichkeit mit diesem Industriesektor außerhalb Chinas relativ begrenzt sind (1). Die Gefahr möglicher Strahlenexposition kann sowohl die Behörden als auch die lokale Bevölkerung abschrecken, selbst wenn das tatsächliche Kontaminationsrisiko aufgrund unbedeutender NORM-Konzentrationen

Fig. 2. The main EU environmental legislation relating to mining and beneficiation
Bild 2. Die wichtigste EU Umweltgesetzgebung im Bereich Bergbau und Aufbereitung
Source/Quelle: www.eurare.eu

plant is an even more difficult procedure though, sometimes even impossible. This alone is a fact that raises issues for the mining industry of REEs as well, since many processing plants are built quite close to the mining sites in terms of sustainability of the overall projects. A rather strict legislation may prohibit the development of such projects, while on the contrary, inadequate or no legislation may create a legal vacuum where no mining and/or processing license can be acquired.

Several countries worldwide, including the European Union (EU), do not have direct legislation for rare earth mining and mining site management. The EU is using instead a variety of legislation (Figure 2) including the Mining Waste Directive – 2006/21/EC (21). This has a direct influence on mining permits since the tailings are often disposed on site, either on surface or underground.

Another criterion that could be placed in the social-political category is the lack of experience in rare earth mining outside of China in general and rare earth underground mining all around the world more specifically. When the mining activities were shut down not only the mines were lost, but in the course of the action also know-how and specialized personnel. This kind of vulnerability reinforces concerns and arguments regarding the capability of the REE-industry to avoid environmental pollution with detrimental effects on local societies. Moreover the lack of experienced staff to work in rare earth underground mines undoubtedly increases the potential risk of exposure to radiation and the possibility of both the mining site and the surrounding environment to be subjected to extended contamination.

Technical Criteria

The above described three categories of criteria follow the widely used approach of the triple-bottom-line (TBL), also referred to as the "three pillars of sustainability" (Figure 3). However, these factors can be evaluated on a common ground of technical aspects, without which it is difficult to examine and determine the overall viability of a rare earth underground mining project. The assessment of the technical criteria in rare earth underground mining can set or change the impacts of the operations in terms of minimizing them to a level that can meet the environmental, economic, social and legislative requirements.

in den Lagerstätten seltener Erden niedrig oder weil die tatsächliche Kontaminierung durch ausreichende Sicherheitsmaßnahmen und Vorsorgetechniken auf ein Minimum reduziert ist. Derartige Befürchtungen führen häufig auch zu politischer Zurückhaltung, wenn es darum geht, wichtige Entscheidungen zu Gunsten von Entwicklungen im SEE-Bergbau zu treffen.

Obwohl der Beitrag von SEE zur Entwicklung von Hochtechnologien einer „grünen Wirtschaft" als potentiell positiv bezeichnet werden kann, spiegeln Argumente, Vorbehalte und Argwohn oft das sogenannte NIMBY-Syndrom "Not in my Back Yard" (Sankt-Florians-Prinzip) wieder und so kommt es, dass der Abbau von seltenen Erden von einem Großteil der Bevölkerung nicht befürwortet wird.

Daher ist eines der wichtigsten sozialen Kriterien die Komplexität des Erwerbs von Schürflizenzen, um mit dem Abbau von seltenen Erden beginnen zu können. Die Errichtung einer SEE-Aufbereitungsanlage ist sogar ein noch schwierigeres Unterfangen und manchmal gänzlich unmöglich. Das allein wirft Fragen für den SEE-Bergbau auf, da viele Aufbereitungsanlagen im Sinne der Nachhaltigkeit des Gesamtprojekts in direkter Nachbarschaft zu den Bergbaubetrieben errichtet werden. Eine eher strenge Gesetzgebung könnte die Entwicklung solcher Projekte verhindern, während im Gegenzug eine unzureichende oder keine Gesetzgebung ein rechtliches Vakuum schaffen würde, in dem keine Schürf- bzw. Verarbeitungslizenzen erworben werden können.

Weltweit haben mehrere Länder, und auch die Europäische Union (EU), keine direkte Gesetzgebung im Bezug auf seltene Erden und die Bewirtschaftung ihrer Abbaustätten. Die EU verwendet stattdessen eine Vielzahl von Gesetzestexten (Bild 2) einschließlich der Richtlinie über bergbauliche Abfälle – 2006/21/EC (21). Das hat direkten Einfluss auf die Bergbaukonzessionen, da die Abfälle häufig vor Ort entweder übertage oder untertage entsorgt werden.

Ein weiteres Kriterium, das sich in die sozialpolitische Kategorie einordnen lässt, ist der Mangel an Erfahrungen mit dem Abbau seltener Erden außerhalb Chinas im Allgemeinen und dem Untertageabbau seltener Erden weltweit im Besonderen. Durch den Ausstieg aus dem Bergbau ist vielerorts nicht nur die Zugänglichkeit zu den Lagerstätten verloren gegangen, sondern im gleichen Zug sind Expertise und spezialisierte Arbeitskräfte weggefallen. Das schafft Angriffsfläche und verstärkt Vorbehalte und Bedenken bezüglich der Fähigkeit der SEE-Industrie, Umweltverschmutzung zu Lasten der lokalen Bevölkerung zu vermeiden. Darüber hinaus verstärkt der Mangel an erfahrenen Bergleuten im Abbau von seltenen Erden untertage zweifellos das Risiko einer Strahlenbelastung und die Möglichkeit, sowohl die Abbaustätte als auch die Umgebung einer weitreichenden Kontaminierung auszusetzen.

Technische Kriterien

Die zuvor beschriebenen drei Kategorien von Kriterien folgen dem weitverbreiteten Triple-Bottom-Line-Ansatz, auch als die „Drei Säulen der Nachhaltigkeit" bekannt. (Bild 3). Dabei können diese Faktoren auf einer gemeinsamen Grundlage technischer Aspekte bewertet werden, ohne die es schwierig wäre, die Gesamtdurchführbarkeit eines Tiefbauprojekts für seltene Erden zu prüfen und zu bestimmen. Die Bewertung der technischen Kriterien für den Untertageabbau seltener Erden kann die Folgen des Abbaube-

Fig. 3. The triple-bottom-line (TBL) in REE mining
Bild 3. Die Triple-Bottom-Line (TBL) im SEE-Bergbau

The separation of rare earth elements remains the primary technical issue for the REE-industry worldwide and engineers are currently focusing on managing the processing and cost effective extraction of the individual REEs. Despite the fact that this technical criterion is not directly related to rare earth mining, it can influence the excavation activities as well as the production rate and consequently the selection of the proper mining method, the cash flow and thus the viability of the overall underground mining project. Furthermore, the variable composition of rare earth deposits – referred to as the "Balance problem" – makes these ores very attractive for selective mining to meet the required production targets of the individual REEs. All of the above criteria may dictate the application of specific selective mining methods, possibly different from those that the common UMMS tools would indicate.

Furthermore, the variation in commodity prices of the individual rare earth elements can determine the choice of the underground mining method, as well as the production rate and the selectivity in mining operations. A rare earth deposit essentially consisting of critical REEs in economically significant concentrations could be assessed more easily for potential exploitation.

Another important technical criterion that governs rare earth underground mining regards to the safety measures and techniques that have to be implemented in order to confine radiation in a rare earth underground mine. Engineers have to evaluate and apply special ventilation and dust-fight techniques during mining, transporting and processing of the ore (20). Sometimes it is necessary to thoroughly evaluate or even exclude from potential application specific underground mining methods that are labor intensive or require the long-term residence of the ore in-situ. Especially methods that require backfilling with own tailings should be evaluated with respect to the radioactivity that is emitted from the backfill material and specific safety measures should be taken.

Summarizing, these REE-technical boundary conditions can in turn affect other established criteria that rule underground mining operations in general.

triebs ermitteln oder ändern, um sie so zu minimieren, dass sie den umweltspezifischen, wirtschaftlichen, sozialen und gesetzgeberischen Anforderungen entsprechen.

Die Abscheidung von SEE bleibt das primäre technische Thema für die globale SEE-Industrie und Ingenieure konzentrieren sich gegenwärtig auf das Beherrschen der Weiterverarbeitung und eine kosteneffiziente Extraktion der einzelnen SEE. Obwohl dieses technische Kriterium sich nicht direkt auf den Abbau seltener Erden bezieht, kann es sowohl die Gewinnungstätigkeit als auch die Ausbringungsleistung beeinflussen und demzufolge die Auswahl des geeigneten Abbauverfahrens, den Cash-Flow und damit die Machbarkeit des gesamten Untertageprojekts. Hinzu kommt, dass das Gleichgewichtsproblem von seltenen Erden diese Erze für einen selektiven Abbau sehr attraktiv macht, so dass die erforderlichen Produktionsziele für die individuellen SEE erreicht werden können. Alle vorgenannten Kriterien können die Anwendung spezifischer selektiver Abbauverfahren diktieren, die möglicherweise von denen abweichen, welche die allgemeinen Instrumente zur Auswahl von untertägigen Abbauverfahren nahelegen würden.

Außerdem können die Schwankungen der Rohstoffpreise für die einzelnen SEE sowohl die Wahl der untertägigen Abbauverfahren als auch die Ausbringungsleistung und die Selektivität im Abbaubetrieb bestimmen. Eine Lagerstätte, die im Wesentlichen ein Vorkommen von kritischen SEE in wirtschaftlich bedeutsamen Konzentrationen aufweist, kann so eher als potentiell erschließungswürdig bewertet werden.

Ein weiteres wichtiges technisches Kriterium, das den Untertageabbau von seltenen Erden bestimmt, bezieht sich auf Sicherheitsmaßnahmen und einzusetzende Verfahren zur Begrenzung der Strahlung. Ingenieure müssen spezielle, auch aus dem Uranbergbau bekannte Bewetterungs- und Staubbekämpfungstechniken während des Abbaus, des Transports und der Aufbereitung des Erzes bewerten und anwenden (20). In der Regel müssen mehrere spezifische untertägige Abbaumethoden bewertet oder sogar von potentiellen Anwendungen ausgeschlossen werden, wenn sie zu arbeitsintensiv sind oder dazu führen, dass das Erz langfristig in-situ verbleiben muss. Insbesondere Methoden, die die Verfüllung mit eigenen Aufbereitungsabgängen erfordern, müssen im Hinblick auf die Strahlenbelastung, die das Versatzmaterial emittiert, evaluiert und spezifische Sicherheitsmaßnahmen ergriffen werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass diese SEE-technischen Grenzbedingungen im Umkehrschluss auch die anderen Kriterien beeinflussen, die den Untertageabbau i.A. bestimmen.

Einfluss der SEE-Kriterien auf den Tiefbaubetrieb

Alle beschriebenen Faktoren können, einzeln oder in Kombination, die Durchführbarkeit bergbaulicher Aktivitäten bei seltenen Erden beeinflussen. Oft können zwei oder mehrere im selben Projekt evaluierte Kriterien in ihrer Einflussnahme konkurrieren; dann müssen die Planer Faktoren entsprechend wichten. In jedem Fall kann die Auswirkung der SEE-Kriterien, wie in den folgenden Beispielen beschrieben, erheblich sein.

Während des Preishochs im Jahr 2011 hatten die Perspektiven einer wirtschaftlichen Erschließung von SEE-Lagerstätten zu einer wahren Erkundungswelle geführt. Bei derart hohen Preisen konn-

Influence of the REE-Criteria on the Underground Mining Operations

All the factors described can affect, separately or combined, the viability of rare earth mining operations. Often two or more criteria evaluated in the same project, may counter to which has the biggest influence, thus the engineers have to decide which factor is more important. In any case, the effect of the REE-criteria can be significant, as seen in the examples described below.

During the price spike of 2011 the perspectives of profitable exploitation of rare earth element deposits led to a burst in exploration. Indeed, with such high prices, even low grade deposits or potential projects with high capital and operational costs could become sustainable. The spike was followed by a quick drop of the prices though, forcing many investors to reconsider their planning and realize that the viability of a rare earth mining project is a difficult problem to deal with.

The balance problem, as it is described in this paper among other studies, can have a major impact to the viability of REE underground mining projects as well. The variation on demand and therefore the prices of the individual rare earth elements may determine to a large extent whether a deposit has the perspectives to be profitably exploited or not. A HREE enriched deposit for instance has perspectives for bigger cost ranges and thus higher capital and operational costs can be assumed. A characteristic example is the HREE carbonatite deposit in Lofdal, Namibia, where the exploration has revealed a deposit with high concentrations of yttrium and dysprosium (22). Yet, the lack of infrastructure as well as water and power supplies in the area have raised issues and difficulties due to high cost estimations. But despite these assessments, this mining project has big perspectives of being launched.

Environmental factors can also have a great influence on the viability of any REE underground mining project. Problems may arise not only in the initial evaluation stage but also in the middle of mining and processing activities. The most typical example of such a case is the closure of Mountain Pass plant in California, USA (1). In 1998 the chemical processing of rare earths stopped after a series of wastewater leaks containing radioactive waste. Thus, the mine was forced to terminate its activities in 2002 in response to both environmental restrictions and lower prices of rare earth elements.

Mining activities in Mountain Pass have been restored since 2012, however, this incident gave China the opportunity of taking the lead and dominating the REE industry over the last two decades. Nevertheless, lax legislation and lack of sufficient protection measures resulted in a big environmental disaster. The Chinese authorities are now taking action to remediate the area surrounding the rare earth mines. This, in turn, has caused a reduced production in China during the last three years, triggering reduced export quotas, and thus more problems on the already dubious global REE market (1).

Environmental concerns combined with strict regulations in Australia were the reasons that led Lynas Corporation to build the Lynas Advanced Materials Plant (LAMP) in Kuantan, Malaysia, where they ship the REE concentrates that have been mined in Mount Weld in Australia. The specific mine has clearly a lower impact than Bayan Obo (China) and Mountain Pass (USA) and far

ten sogar geringhaltige Lagerstätten oder potentielle Projekte mit hohen Kapital- oder Betriebskosten konkurrenzfähig werden. Aber auf das Preishoch folgte ein rasanter Preissturz, so dass sich viele Investoren gezwungen sahen, ihre Planungen zu überdenken und zu erkennen, dass die Durchführbarkeit eines Bergbauprojekts für seltene Erden eine schwer zu lösende Aufgabe ist.

Das Gleichgewichtsproblem, wie in diesem Beitrag und in anderen Studien beschrieben, kann ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Durchführbarkeit eines SEE-Tiefbauprojekts haben. Die Schwankungen bei der Nachfrage und damit auch bei den Preisen der einzelnen SEE können in hohem Maße bestimmen, ob eine Lagerstätte die Perspektive hat, wirtschaftlich erschlossen zu werden oder nicht. Eine mit HREE angereicherte Lagerstätte z. B. weist perspektivisch eine größere Kostentoleranz auf, so dass von höheren Kapital- und Betriebskosten ausgegangen werden kann. Ein charakteristisches Beispiel ist die HREE Karbonatit-Lagerstätte in Lofdal, Namibia, wo Erkundungstätigkeiten ein Vorkommen mit hohen Yttrium- und Dysprosiumkonzentrationen ergaben (22). Jedoch haben die mangelnde Infrastruktur und fehlende Wasser- und Stromversorgung in dieser Gegend viele Probleme hinsichtlich hoher Kostenabschätzungen aufgezeigt. Trotzdem hat dieses Bergbauprojekt gute Aussichten, realisiert zu werden.

Umweltfaktoren können ebenfalls einen großen Einfluss auf die Durchführbarkeit eines SEE-Tiefbauprojekts haben. Probleme treten nicht nur während der anfänglichen Evaluierungsphase auf, sondern auch, wenn die Abbau- und Aufbereitungsaktivitäten schon in vollem Gange sind. Typisches Beispiel für einen derartigen Fall ist die Schließung der Mountain Pass-Anlage in Kalifornien, USA (1). Im Jahr 1998 wurde die chemische Aufbereitung der seltenen Erden nach einer Reihe von Leckagen des mit radioaktiver Fracht kontaminierten Abwassers gestoppt. So musste der Bergbaubetrieb im Jahr 2002 gestundet werden, sowohl wegen der verursachten Umweltschäden als auch aufgrund niedrigerer Preise für SEE.

Der Bergbaubetrieb in Mountain Pass wurde zwar im Jahr 2012 wieder aufgenommen, aber der geschilderte Zwischenfall gab China in der Zwischenzeit die Gelegenheit, die Marktführerschaft zu ergreifen und die SEE-Industrie über die beiden letzten Jahrzehnte zu dominieren. Die lasche Gesetzgebung, nicht ausreichende Kontrolle und unzureichende Schutzmaßnahmen haben dort jedoch zu einer immensen Umweltkatastrophe geführt. Die chinesischen Behörden ergreifen jetzt Maßnahmen zur Sanierung der direkten Umgebung der Seltenerdbergwerke. Das wiederum hat in den letzten drei Jahren zu einem Produktionsrückgang in China und damit zu gesunkenen Exportquoten geführt, was noch mehr Probleme für den an sich schon prekären SEE-Markt mit sich gebracht hat (1).

Umweltbedenken einhergehend mit einer strengen Gesetzgebung in Australien haben die Lynas Corporation veranlasst, die Lynas Advanced Materials Plant (LAMP) in Kuantan, Malaysia zu bauen, wohin die im australischen Mount Weld abgebauten SEE-Konzentrate transportiert werden. Dieses Bergwerk führt eindeutig zu geringeren Belastungen als Bayan Obo (China) und Mountain Pass (USA) und Strahlungsraten, die weit unterhalb derjenigen beim Abbau von hochwertigem Uran liegen (1). Das Unternehmen beschloss, den Standort zur Weiterverarbeitung in Malaysia zu errichten.

more below radiation concerns than emanation rates from high grade uranium operations (1). The company has decided to situate the site in Malaysia.

This has led to international activism and claims of environmental and social injustice. This case could easily be described with the NIMBY-syndrome from the sides of both countries involved; Australia and Malaysia. It has also created concerns and suspicions on whether the strict environmental regulations in developed countries force many mining companies, with the blessings of the authorities, to build their processing plants to developing countries where the legislation is more lax.

Conclusions

The rare earth elements are not named after their actual rareness; on the contrary they can be found almost everywhere. Yet, the particular geological conditions that promote their concentration to levels of attracting economic exploitation are rare (23). Moreover, the notable boundary conditions and requirements that are described thoroughly in this paper have to be considered when evaluating the perspectives of a rare earth underground mining operation.

Setting up an underground mining plant is a huge investment and once the mining method has been selected and applied, it is almost impossible to change it. Thus, the mining method selection process is crucial to the sustainability of any given REE project. Therefore the REE specific parameters must be evaluated on equal terms with all the other important criteria.

Common mining method selection tools based on computational processes can adopt some of the REE industry-specific criteria, yet there is no established assessment methodology that can take into account the REE market situation or the social and legislative prerequisites that will permit the development of an REE underground mining project and ensure its viability.

The underground mining industry of rare earths is in deep waters due to the fragile overall situation and the lack of intellectual capital and practical experience. Relevant practices in similar underground mining operations, e.g. in uranium deposits, can assist to better understand and evaluate some of the risks and boundary conditions. Nevertheless, dealing with rare earth elements is a far more complicated situation that requires special attention.

The REE criteria brought forward in this paper should be combined with the other parameters already well established in previous studies and in literature in order to build an overall assessment tool for future rare earth underground mining projects. This tool shall contribute to the optimization of the selection process of the proper underground mining method and also help investors to take accurate and secure decisions on if and when such investments should be made. It should also take into account the social and environmental considerations that are made due to bad practices of the past.

Das hat zu internationalen Protesten geführt, die umweltpolitische und soziale Ungerechtigkeit anprangern. Dieser Fall könnte einmal mehr als NIMBY-Syndrom seitens der beiden beteiligten Länder Australien und Malaysia bezeichnet werden. Auch sind die Befürchtung und der Verdacht entstanden, dass strenge Umweltvorschriften in Industrieländern Bergbauunternehmen dazu zwingen, mit Genehmigung der Behörden ihre Weiterverarbeitungsanlagen in Entwicklungsländern zu errichten, in denen die Gesetzgebung lascher ist.

Schlussbetrachtung

Die seltenen Erdelemente sind nicht nach ihrer tatsächlichen Seltenheit benannt. Im Gegenteil, man kann sie fast überall finden, jedoch selten unter geologischen Bedingungen, die ihre Konzentration für eine wirtschaftliche Gewinnung attraktiv machen (23). Zudem müssen die Grenzbedingungen und Anforderungen, die in diesem Beitrag diskutiert wurden, bei der Bewertung von Perspektiven für einen Untertageabbau von seltenen Erden berücksichtigt werden.

Das Errichten einer Tiefbaugrube ist eine Großinvestition. Hinzu kommt, dass, wenn das Abbauverfahren erst einmal ausgewählt ist und angewandt wird, eine nachträgliche Änderung fast unmöglich ist. Daher ist der Auswahlprozess des Abbauverfahrens so entscheidend für die Nachhaltigkeit eines SEE-Projekts und SEE-spezifische Parameter müssen in gleichem Maße wie alle anderen wichtigen Kriterien in die Bewertung einfließen.

Die gängigen Instrumente zur Auswahl der Abbauverfahren basieren auf Berechnungsprozessen und können einige der für die SEE-Industrie spezifischen Kriterien aufgreifen. Dennoch gibt es bislang keine etablierte Bewertungsmethodologie, welche die SEE-Marktsituation oder soziale und gesetzliche Vorgaben berücksichtigt – Faktoren, die die Entwicklung eines SEE-Tiefbauprojekts erst ermöglichen und seine Durchführbarkeit sicherstellen.

Der Tiefbau auf seltene Erden befindet sich aufgrund der fragilen Gesamtsituation und dem Mangel an intellektuellem Kapital und praktischer Erfahrung in schwierigem Fahrwasser. Relevante Praxis bei ähnlichen Tiefbauaktivitäten, z. B. bei Uran-Lagerstätten, kann hilfreich sein, um einige der Risiken und Grenzbedingungen besser zu verstehen und zu evaluieren. Trotzdem ist der Umgang mit seltenen Erden deutlich komplizierter und erfordert besondere Lösungsansätze.

Die in diesem Beitrag vorgestellten SEE-Kriterien sollten mit den bereits in früheren Untersuchungen und in der Fachliteratur gut etablierten anderen Parametern kombiniert werden, um zu einem Gesamtbewertungsinstrument für den zukünftigen Untertageabbau von seltenen Erden zu gelangen. Dieses Instrument sollte zur Optimierung des Auswahlprozesses der geeigneten untertägigen Abbauverfahren beitragen und den Investoren helfen, akkurate und gesicherte Entscheidungen darüber zu treffen, ob und wann solche Investitionen durchgeführt werden sollten. Es sollte auch die sozialen Erwägungen und Umweltbetrachtungen berücksichtigen, die aus schlechten Praktiken der Vergangenheit resultieren.

References / Quellenverzeichnis

(1) Ali, S. H. 2014: Social and environmental impact of the rare earth industries. Resources, 3(1), 123-134. doi: 10.3390/resources3010123

(2) Xu, L. F. and Liu, M. L. 1999: Impact of rare-earth mining on the environment and the effects of ecological recovery measures on soils. Remediation and Management of Degraded Lands, CRC Press, pp 103-110.

(3) Binnemans, K., Jones, P. T., Van Acker, K., Blanpain, B., Mishra, B. and Apelian, D. 2013: Rare-Earth Economics: The Balance Problem. Journal of the Minerals, Metals & Materials, 65(7), pp 846-848.

(4) Nicholas, D.E. 1992: Selection Procedure. SME Mining Engineering Handbook, Second Edition, SME, pp 2090-2106.

(5) Boshkov, S. H. and Wright, F. D. 1973: Basic and parametric criteria in the selection, design and development of underground mining systems. SME Mining Engineering Handbook, SME-AIME, 12.2-12.13.

(6) Morrison, R. G. K. 1976: A philosophy of ground control. McGill University, Montreal, Canada.

(7) Laubscher, D. H. 1981: Selection of mass underground mining methods. Design and operation of caving and sublevel stoping mines, SME-AIME, pp 23-38.

(8) Nicholas, D.E. 1981: Selection Procedure - A numerical approach design and operation of caving and sublevel stoping. SME, Inc. Port City Press, pp 39-53.

(9) Hartman, H. L. 1987: Introductory Mining Engineering, 1st Edition, John Wiley, New York.

(10) Miller-Tait, L., Pakalnis, R. and Poulin, R. 1995: UBC mining method selection. Mine Planning and Equipment Selection, Balkerma, Netherlands, pp 163-168.

(11) Alpay, S. and Yavuz, M. 2009: Underground mining method selection by decision making tools. Tunneling and Underground Space Technology, 24, pp 173-184.

(12) Azadeh, A., Osanloo, M. and Ataei, M. 2010: A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique. Applied Soft Computing, 10, pp 1040-1061.

(13) Ataei, M., Shahsavany, H. and Mikaeil, R. 2013: Monte Carlo Analytic Hierarchy Process (MAHP) approach to selection of optimum mining method. Int. Journal of Mining Science and Technology, 23, pp 573-578.

(14) Hartman, H. L. and Mutmansky, J.M. 2002: Introductory Mining Engineering. 2nd Edition, John Wiley, New York.

(15) United States Geological Survey 2015: Mineral Commodity Summaries 2015, USGS.

(16) Bauer, D., Diamond, D., Li, J., McKittrick, M., Sandalow, D. and Telleen, P. 2011: Critical Materials Strategy, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

(17) Goonan, T. G. 2011: Rare earth elements-end use and recyclability. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, pp 2011-5094, retrieved from: http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/.

(18) Pillai, P. M. B. 2007: Naturally occurring radioactive material (NORM) in the extraction and processing of rare earths. Proceedings of an Inter. Symposium on NORM, Vienna, Austria, Inter. Atomic Energy Agency, pp 197-221.

(19) Kamei, T. 2012: Recent research of thorium molten-salt reactor from a sustainability viewpoint. Sustainability, 4, pp 2399-2418.

(20) Barakos, G., Mischo, H. and Gutzmer, J. 2014: Assessments of boundary conditions and requirements for rare earth underground mining due to the presence of NORMs. Proceedings of the 1st Inter. Conference on European Rare Earth Resources, Milos, Greece, Heliotopos Conferences, pp 132-139.

(21) Keith-Roach, M., Grendfelt, B., Hoglund, L.O., Kousa, A., Pohjolainen, E., Magistrati, P., Aggelatou, V., Olivieri, N. and Ferrari, A. 2014: Legislation and best practice in the emerging European rare earth element industry. Proceedings of the 1st Inter. Conference on European Rare Earth Resources, Milos, Greece, Heliotopos Conferences, pp 116-122.

(22) Wall, F., Niku-Paavola, V., Storey, C., Muller, A., & Jeffries, T. 2008: Xenotime-(Y) from carbonatite dykes at Lofdal, Namibia: Unusually low LREE:HREE ratio in carbonatite, and the first dating of xenotime overgrowths on zircon. The Canadian Mineralogist, 46, pp861-877. doi: 10.3749/canmin.46.4.861.

(23) McLellan, B. C., Corder, G. D., Golev, A. and Ali, S. H. 2014: Sustainability of the Rare Earths Industry. Procedia Environmental Sciences, 20, pp 280-287. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.035.

Authors / Autoren

George Barakos, Helmholtz Institut Freiberg
für Ressourcentechnologie
Helmut Mischo, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland