

## Low Carbon – High Damage? Renewable Energies and Rare Earth Elements

Achieving the goals of the Paris Climate Agreement limiting the global temperature increase to 1.5 °C will require massive investment in renewable energy. The transition to a decarbonized energy system will lead to a huge increase in demand for minerals, especially metals, rare earth elements (REE) and lithium, making the energy sector a major force in commodity markets. More mining is necessary than ever. The world mining production will increase the risk of high damages if the minerals will not be mined as sustainable as possible. Especially mining and processing REE to

build permanent magnets for wind turbines and generators for electric vehicles are causing significant environmental challenges at the beginning of the supply chain. Mining REE is highly toxic. The source minerals of REE can contain the radioactive elements thorium and uranium, among others. And the more is mined the higher will be the volume of radioactive waste from the separation of the elements. The paper describes the side effects of a rapidly growing industry that needs more sustainable business models to avoid risks or even disasters.

## Weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen – mehr Umweltschäden? Erneuerbare Energien und Seltene Erden

Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C zu erreichen, sind massive Investitionen in erneuerbare Energien erforderlich. Der Übergang zu einem dekarbonisierten Energiesystem wird zu einem enormen Anstieg der Nachfrage nach Mineralien führen, insbesondere nach Metallen, Seltenen Erden (SEE) und Lithium, wodurch der Energiesektor zu einer wichtigen Kraft auf den Rohstoffmärkten wird. Mehr Bergbau als je zuvor wird erforderlich sein. Die weltweite Bergbauproduktion wird das Risiko großer Schäden erhöhen, wenn die Mineralien nicht so nachhaltig wie möglich abgebaut werden. Insbesondere der Abbau und die

Verarbeitung von Seltenen Erden zur Herstellung von Permanentmagneten für Windturbinen und Generatoren für Elektrofahrzeuge stellt bereits am Anfang der Lieferkette eine große Herausforderung für die Umwelt dar. Der Abbau von Seltenen Erden ist hochgiftig. Die Ausgangsminerale von SEE können u. a. die radioaktiven Elemente Thorium und Uran enthalten. Je mehr abgebaut wird, desto mehr radioaktive Abfälle fallen bei der Trennung der Elemente an. Dieser Artikel beschreibt die Nebenwirkungen einer schnell wachsenden Industrie, die nachhaltigere Geschäftsmodelle benötigt, um Risiken oder gar Katastrophen zu vermeiden.

### 1 Introduction

In the net-zero emissions scenario, electricity becomes the new linchpin of the global energy system, providing more than half of total final consumption and two-thirds of useful energy by 2050. Total electricity generation expects to grow by 3.3%/a to 2050, faster than global economic growth over the period. Annual capacity additions from all renewables quadruple from 290 GW in 2021 to around 1,200 GW in 2030. As renewables reach over 60% of total generation in 2030, no new unabated coal-fired power plants are needed. Annual nuclear capacity additions to 2050 are almost four times the recent historical average (1).

An energy system powered by renewable energy technologies is fundamentally different from one powered by traditional hydrocarbon resources (2). More minerals and metals, e.g., are needed to build solar PV and wind farms than to build fossil fuel plants at

### 1 Einleitung

Im Netto-Null-Emissionsszenario wird Strom zum neuen Dreh- und Angelpunkt des globalen Energiesystems und deckt bis 2050 mehr als die Hälfte des gesamten Endverbrauchs und zwei Drittel der Nutzenergie. Die gesamte Stromerzeugung soll bis 2050 um 3,3%/a wachsen und damit schneller als das weltweite Wirtschaftswachstum in diesem Zeitraum. Der jährliche Kapazitätzuwachs aller erneuerbaren Energien vervierfacht sich von 290 GW im Jahr 2021 auf rd. 1.200 GW im Jahr 2030. Da die erneuerbaren Energien im Jahr 2030 einen Anteil von über 60% an der Gesamterzeugung erreichen, werden voraussichtlich keine neuen Kohlekraftwerke benötigt. Der jährliche Zubau an Kernkraftwerkskapazität bis 2050 ist fast viermal so hoch wie der jüngste historische Durchschnitt (1).

Ein Energiesystem, das mit erneuerbaren Energietechnologien betrieben wird, unterscheidet sich grundlegend von einem, das mit

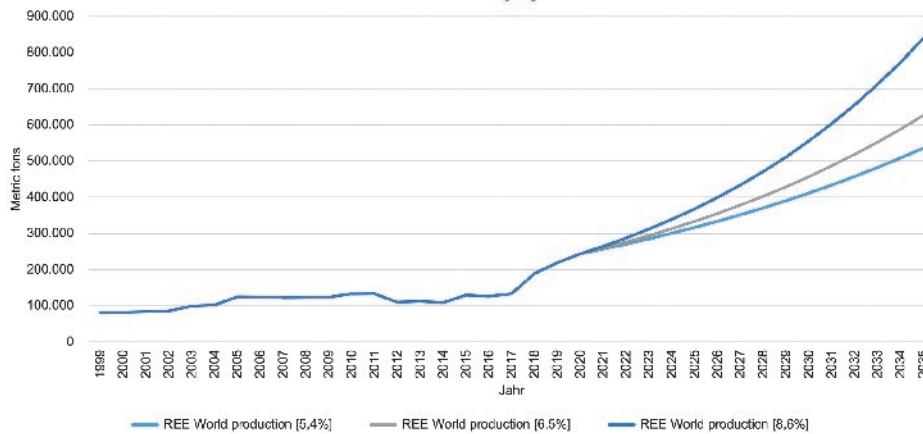


Fig. 1. Demand forecasts for rare earth elements at different average growth rates.

Bild 1. Nachfrageprognosen für Seltenerdelemente bei unterschiedlichen durchschnittlichen Zuwachsraten. Source/Quelle: Drusche

traditionellen Kohlenwasserstoffressourcen betrieben wird (2). Beispielsweise erfordert der Bau von Photovoltaikanlagen und Windparks mehr Mineralien und Metalle als Anlagen auf Basis fossiler Brennstoffe. Eine Windkraftanlage an Land benötigt neunmal mehr Bodenschätze als ein Gaskraftwerk. Stromnetze benötigen enorme Mengen an Kupfer und Aluminium. Laut dem Bericht über Rohstoffe für strategische Technologien und Sektoren der Europäischen Union (EU) könnte sich die Nachfrage nach einigen Seltenerdmetallen, die in Permanentmagneten für Elektrofahrzeuge, digitale Technologien oder Windgeneratoren verwendet werden, bis 2050 verzehnfachen (Bild 1) (3).

same capacity. An onshore wind turbine park requires nine times more mineral resources than a gas-fired power plant while producing the same amount of energy. Electricity grids require huge amounts of copper and aluminum. According to the European Union's Report on Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors, the demand for some rare earth metals used in permanent magnets for electric vehicles, digital technologies or wind generators could increase tenfold by 2050 (Figure 1) (3).

## 2 Risks of unsustainable mining for renewable energy

What emissions and waste are generated to produce renewable energy? It is necessary to look at the entire value chain, from extraction to production, including waste generation and recycling, in order to identify opportunities and risks of sustainable energy technologies. Inevitably, there is an environmental issue with renewable energy that has received little attention because most of its raw materials come from China, Myanmar, Vietnam, Malaysia, and Australia.

Unsustainable rare earth mining practices are in the spotlight for a long time, e. g., in Myanmar on the border to China (4). Myanmar has been able to increase annual production to an average of 24,000 t over the past five years (5). This production volume made Myanmar the world's fourth-largest producer of rare earths.

Of particular interest in Myanmar are dysprosium and terbium, the two most valuable heavy rare earth metals (6). Their main area of application is high-performance permanent magnets, which are needed to manufacture motors and generators for electric vehicles and wind turbines.

The elements, extracted using a process known as in-situ leaching, are in high demand as China's central government has stepped up its efforts to clean up the rare earths industry in recent years. Despite rising global demand, mines have been closed because of severely restricted regulations in Jiangxi province (Figure 2).

The process of in situ leaching is extremely critical from an environmental point of view. Large areas of soil are infiltrated with the leaching solution (ammonium sul-

## 2 Risiken eines nicht nachhaltigen Bergbaus für die erneuerbaren Energien

Welche Emissionen und Abfälle fallen an, um diese Metalle herzustellen? Die Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette vom Abbau bis zum Produkt und inklusive der Abfälle ist notwendig, um Aspekte von nachhaltigen Energietechnologien zu erkennen. Zwangsläufig ergibt sich eine bislang wenig beachtete Umweltproblematik der erneuerbaren Energien, deren Rohstoffe zum größten Teil aus China, Myanmar, Vietnam, Malaysia und Australien stammen.

Nicht nachhaltige Abbaupraktiken von Seltenen Erden stehen immer wieder im Fokus der Berichterstattung, z. B. an der Landesgrenze zwischen Myanmar und China (4). Myanmar konnte in den letzten fünf Jahren die jährliche Produktion auf durchschnittlich 24.000 t steigern (5). Mit diesem Produktionsvolumen wurde Myanmar zum weltweit viertgrößten Produzenten von Seltenen Erden. In Myanmar ist der Abbau von Dysprosium und Terbium, den beiden wertvollsten schweren Seltenerdmetallen, von besonderem



Fig. 2. In situ leaching at an rare earth mine in Myanmar near the Chinese border. Bild 2. In-situ-Laugung auf einem Seltenerd-Bergwerk in Myanmar nahe der Grenze nach China. Photo/Foto: Global Witness

phate). During the leaching process, the leaching solution, and an altered soil environment (low pH) can activate toxic heavy metals such as lead and zinc in the soil. Heavy metal contamination of soils is serious, and their accumulation has also been observed in surface and groundwater (7, 8). The use of environmentally friendly production methods, such as the use of biotechnological methods (bioleaching), unfortunately does not take place, although these alternatives are available (9).

Against the background that the recycling of rare earth elements (REE) from end-of-life (EoL) products is less than 1% on a global scale and can be described as “lost by design” (10, 11, 12), the questions are justified whether renewable forms of energy are truly sustainable and the term “clean energy production” is correct.

Like the use of nuclear energy in the past, there will be a shift in the problem areas in terms of time and space. Given that the production of REE increasingly generates more emissions and waste, this issue is becoming more and more relevant.

### 3 Rare earth elements and radioactivity

Renewable energy technologies will be an important growth driver for the REE industry. Global demand for rare earth permanent magnets for wind turbines and hybrid and electric vehicles continues to grow (Figure 3). Wind turbines require neodymium-iron-boron permanent magnets, which contain significant amounts of the REEs neodymium, praseodymium and dysprosium. For today’s wind turbines with permanent magnet generators, the average specific demand for neodymium is 0.2 t/MW (13). The demand for neodymium in wind turbines is forecast to be between 9,000 and 13,000 t in 2040 (14). In 2018, the global demand for neodymium for wind turbines was still 2,430 t (15).

Since 2011, the raw material criticality of rare earths has become particularly relevant, given the market turbulence and price developments and the resulting supply risk (12). In addition to market issues, other aspects must be considered, e.g., regarding the value of the deposits containing REE. Some of the deposits are described as high grade or high volume. However, this does not necessarily mean that they will be commercially successful.

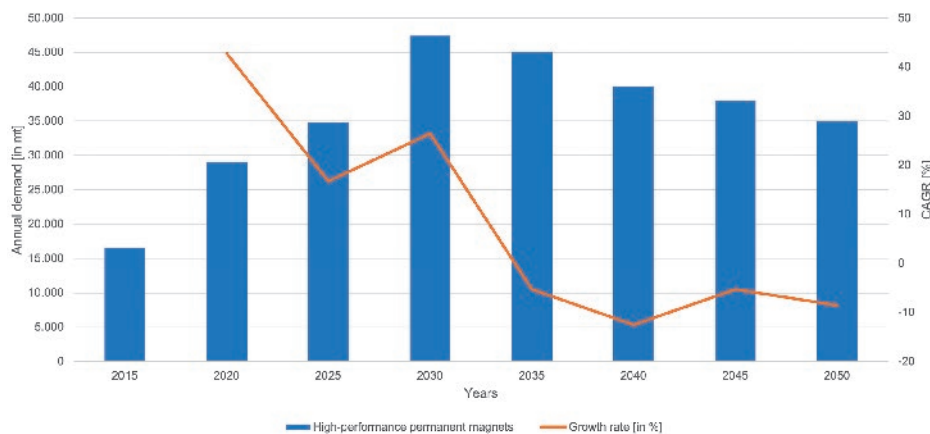


Fig. 3. Demand for high-performance permanent magnets in wind power generators.  
Bild 3. Nachfrage nach Hochleistungs-Permanentmagneten in Windkraftgeneratoren.  
Source/Quelle: Drusche

Interesse (6). Ihr Hauptanwendungsgebiet sind Hochleistungs-Permanentmagnete, die zur Herstellung von Motoren und Generatoren für Elektrofahrzeuge und Windkraftanlagen benötigt werden.

Die mit Hilfe der sogenannten In-Situ-Laugung gewonnenen Elemente sind sehr begehrt, weil die chinesische Zentralregierung, trotz des weltweit steigenden Bedarfs, in den letzten Jahren ihre Bemühungen zur Sanierung der Seltenerdindustrie verstärkte und den Abbau in der Provinz Jiangxi stark limitierte – Bergwerke wurden geschlossen (Bild 2).

Das Verfahren der In-Situ-Laugung ist vom ökologischen Standpunkt aus äußerst kritisch zu bewerten. Große Bodenbereiche werden mit der Laugungslösung (Ammoniumsulfat) durchsetzt. Während des Auslaugungsprozesses können die Laugungslösung und ein verändertes Bodenmilieu (niedrige pH-Werte) toxische Schwermetalle wie Blei und Zink im Boden aktivieren. Die Schwermetallverschmutzung in den Böden ist gravierend, und ihre Anreicherung wurde auch im Oberflächen- und Grundwasser beobachtet (7, 8). Der Einsatz umweltverträglicher Produktionsmethoden, wie beispielsweise der Einsatz biotechnologischer Methoden (Biolaugung) erfolgt leider nicht, obwohl Alternativen vorhanden sind (9).

Vor dem Hintergrund, dass das Recycling von Seltenen Erden aus End-of-Life-Produkten (EoL) weltweit weniger als 1% beträgt und als "lost by design" bezeichnet werden kann (10, 11, 12), stellt sich die Frage, ob erneuerbare Energieformen wirklich nachhaltig sind und ob der Begriff „saubere Energieerzeugung“ gerechtfertigt ist.

Wie bei der Kernenergie ist auch hier eine zeitliche und räumliche Verschiebung der Problemfelder zu beobachten. Vor dem Hintergrund, dass bei der Produktion von Seltenerdelementen (SEE) zunehmend mehr Emissionen und Abfälle anfallen, gewinnt diese Problematik an Relevanz.

### 3 Seltenerdelemente und Radioaktivität

Die erneuerbaren Energietechnologien werden ein wichtiger Wachstumstreiber für die SEE-Industrie sein. Weltweit steigt der Bedarf an seltenerdhaltigen Permanentmagneten für Windkraftanlagen und Hybrid- sowie Elektrofahrzeuge weiter an (Bild 3). Windkraftanlagen benötigen Neodym-Eisen-Bor-Permanent-

magnete, welche wesentliche Mengen der SEE Neodym, Praseodym und Dysprosium beinhalten. Für heutige Windkraftanlagen mit permanenterregten Generatoren liegt der mittlere spezifische Bedarf von Neodym bei 0,2 t/MW (13). Der Bedarf für Neodym in Windkraftanlagen wird gemäß Prognosen im Jahr 2040 zwischen 9.000 und 13.000 t liegen (14). Im Jahr 2018 lag der weltweite Bedarf an Neodym für Windkraftanlagen noch bei 2.430 t (15).

Seit dem Jahr 2011 mit den Marktturbulenzen und Preisentwicklungen und dem resultierenden Versorgungsrisiko besitzt die Rohstoffkritikalität der SEE eine besondere Relevanz. Neben Marktfragen sind noch weitere Aspekte zu berücksichtigen, z. B. in Bezug auf den Wert der La-



One of the most controversial issues in REE is the presence of radioactivity in REE-bearing minerals, primarily thorium and uranium, although the REE themselves also have natural radioactive isotopes. Practically, the processing of monazite for rare earth production will produce a significant amount of thorium that needs to be managed safely to prevent the public concern and environmental impacts. According to an article published by the Chinese Rare Earth Society, the production of one ton of REE can also produce one ton of radioactive residue (16).

The content of naturally occurring radioactive material (NORM) in geological formations of REE can vary from insignificant to high concentrations, requiring legislation and special care and close monitoring during extraction. The mining, separation, treatment and disposal of radioactive materials can result in high additional costs as well as risks to health and the environment (17). In practice, to avoid regulations and liabilities, ore deposits with low concentrations of radioactive elements are preferred. Long term REE mining is in need for careful assessment to find a sustainable balance between viable mining and environmental (18).

In addition to the destruction of the natural environment, there are significant health impacts. The high levels of thorium oxide associated with REE have been known for some time (19, 20). The parent mineral monazite typically contains 3.5 to 10% thorium oxide and 0.1 to 0.4% uranium oxide. Thorium or thorium oxide should not be underestimated because of its radioactivity and toxicity. The ionizing radiation (decay type:  $\alpha$ ,  $\gamma$ ) can cause considerable damage to the organism when inhaled. With a specific activity of approximately 7,150 Bq/g and a half-life  $T_{1/2}$  of 14.05 Ma, thorium oxide is no longer classified as low-level waste (LLW) but as intermediate-level waste (ILW) by the International Atomic Energy Agency (IAEA). Waste with a radioactivity of 1,010 to 1,015 Bq/m<sup>3</sup> is called intermediate level waste or ILW.

#### 4 Waste and emissions

World production of REE in 2021 was approximately 280,000 t (Figure 4). Although the volume of mining is still small compared to iron and steel (1.9 bn t of crude steel) and copper (around 20 Mt), there is a growing need to limit emissions from the production of these minerals, as they are also associated with increasing emission potentials (21, 22).

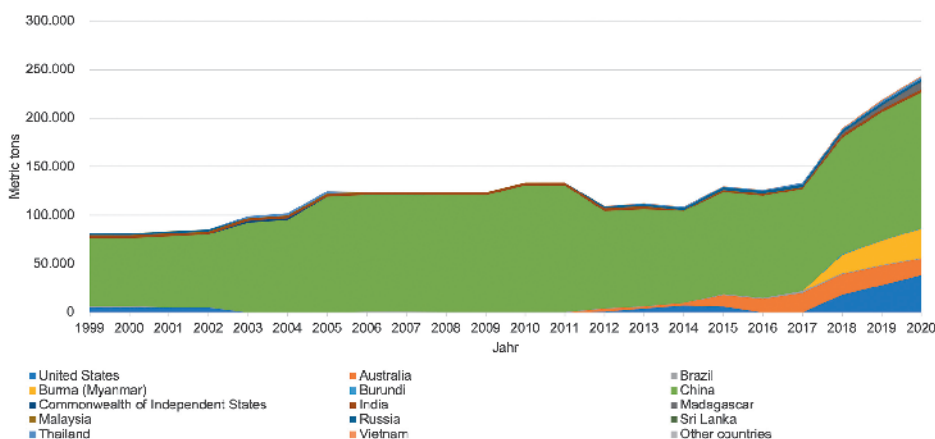


Fig. 4. Development of global rare earth elements production.

Bild 4. Entwicklung der weltweiten Seltenerdelemente-Produktion. Source/Quelle: Drusche

gerstätten, welche SEE beinhalten. Einige der Lagerstätten sind als hochgradig oder großvolumig gekennzeichnet. Dies bedeutet jedoch nicht unbedingt, dass sie kommerziellen Erfolg haben werden.

Eine der kontroversesten Fragen bei SEE ist das Vorhandensein von Radioaktivität in den SEE-führenden Mineralien, in erster Linie Thorium und Uran, wobei auch die SEE an sich natürliche radioaktive Isotope aufweisen. Bei der Aufbereitung von Monazit zur Gewinnung von separierten Seltenen Erden fallen erhebliche Mengen Thorium an, die sicher gehandhabt werden müssen, um die Öffentlichkeit nicht zu beunruhigen und die Umwelt nicht zu belasten. Nach einem Artikel der Chinesischen Gesellschaft für Seltene Erden kann bei der Produktion einer Tonne SEE auch eine Tonne radioaktiver Rückstände anfallen (16).

Der Gehalt an natürlich vorkommendem radioaktivem Material (NORM) in geologischen Formationen von SEE kann in der Konzentration von unbedeutend bis hoch variieren, sodass gesetzliche Regelungen sowie besondere Sorgfalt und eine genaue Überwachung während der Gewinnung erforderlich sind. Der Abbau, die Trennung, die Behandlung und die Entsorgung radioaktiver Stoffe kann zu hohen Zusatzkosten sowie zu Risiken für Gesundheit und Umwelt führen (17). Um Vorschriften und Verbindlichkeiten zu vermeiden, werden Erzvorkommen mit geringen Konzentrationen radioaktiver Elemente bevorzugt. Entscheidend für den SEE-Bergbau ist die Voraussetzung einer sorgfältigen Bewertung, um die goldene Mitte zwischen lebensfähigem Bergbau und Umweltschutz zu finden (18).

Neben der Zerstörung der natürlichen Lebensgrundlagen treten erhebliche gesundheitliche Auswirkungen auf. Die hohen Anteile an Thoriumoxid, welche mit SEE assoziiert werden, sind bereits länger bekannt. (19, 20). Das Ausgangsmineral Monazit enthält typischerweise 3,5 bis 10% Thoriumoxid und 0,1 bis 0,4% Uranoxid. Thorium bzw. Thoriumoxid ist wegen der Radioaktivität und Toxizität nicht zu unterschätzen. Die ionisierende Strahlung (Zerfallsart:  $\alpha$ ,  $\gamma$ ) kann bei Inhalation erhebliche Schäden im Organismus anrichten. Mit einer spezifischen Aktivität des Thoriumoxids von ca. 7.150 Bq/g und seiner Halbwertszeit  $T_{1/2}$  von 14,05 Ma fällt es laut IAEA-Einstufung nicht mehr unter Low Level Waste (LLW), sondern unter Intermediate Level Waste (ILW). Abfall mit einer Radioaktivität von 1.010 bis 1.015 Bq/m<sup>3</sup> wird als Intermediate Level Waste oder auch mittelradioaktiver Abfall bezeichnet. ILW muss wie jeder andere mittelradioaktive Abfall behandelt werden.

#### 4 Abfälle und Emissionen

Die Weltproduktion der SEE belief sich 2021 auf rd. 280.000 t/a (Bild 4). Auch wenn die Abbaumenge im Vergleich zu Eisen und Stahl (1,9 Mrd. t Rohstahl) und Kupfer (rd. 20 Mio. t) noch gering ist, besteht eine wachsende Notwendigkeit, die Emissionen aus der Produktion dieser Mineralstoffe zu begrenzen, da auch diese mit zunehmenden Emissionspotentialen verbunden sind (21, 22).

Berichte zu den Problematiken um das Abfallmanagement bei der Aufbereitung der Seltenen Erden am Standort

Reports on the waste management problems associated with the processing of rare earths at the Kuantan site of the Australian company Lynas Rare Earths Ltd. in Malaysia illustrate the importance of material flow management. Lynas claims to be an ethically and environmentally responsible producer of rare earths and the only producer of separated rare earths outside China (23).

The REE concentrates produced at Mount Weld in Western Australia are shipped to Kuantan/Malaysia. The Uranium and thorium grades of 11 ppm and 630 ppm, respectively, are in the upper range compared to other global deposits (24). There, processing continues by separating and segregating the REE concentrates from excess material. This process only generates more than 90,000 m<sup>3</sup>/a of radioactive waste. According to Lynas Rare Earth Ltd., the commercial use of the recycled waste, e. g., as building materials, will reduce the solid residues. However, there are concerns that recycled building materials may be contaminated or radioactive (25). Another consideration for the company is to dilute the waste to a thorium concentration of less than 500 ppm, which is the maximum concentration allowed by international standards for the material to be disposed of without restrictions. The plan is to process 220,000 t/a of waste using the “solution by dilution” approach (26). Environmental scientists see this as a poor solution.

Dumping is not an alternative for environmental reasons and to protect the population and workers (27). The creation of a toxic legacy site adds an unjustified burden to the current generation of people and future generations. Schüler et al. (28) cite the example of the Inner Mongolia Baotou Steel Union or China Northern Rare Earth mining company in their study, where REE are extracted as a by-product of iron ore. Data collected shows processing residues of 150 Mt (28). Additionally, there are approximately 300 abandoned rare earth mines, 191 Mt of waste slag residues and tailings, and a contaminated forest area of 97 km<sup>2</sup> in Ganzhou/China. It should take the government 70 years and cost around 4.9 bn € to restore the environment (29).



Fig. 5. Tailings ponds used in rare earth mining contain a variety of toxic chemicals and radioactive elements.

Bild 5. Absetzbecken bei der Gewinnung von Seltenen Erden enthalten eine Vielzahl von toxischen Chemikalien und radioaktiven Elementen.  
Photo/Foto: Kevnmh/Wikimedia Commons

Kuantan/Malaysia der australischen Lynas Rare Earth Ltd. zeigen die hohe Relevanz des Stoffstrommanagements. Lynas ist nach eigenen Aussagen ein ethisch und ökologisch verantwortungsbewusster Hersteller von Seltenen Erden und der einzige Hersteller von separierten Seltenen Erden außerhalb Chinas (23).

Die in Mount Weld in Westaustralien produzierten SEE-Konzentrate werden nach Kuantan verschifft. Die Uran- und Thoriumgehalte von 11 bzw. 630 ppm liegen im Vergleich zu anderen Lagerstätten weltweit im oberen Bereich (24). Dort wird die Aufbereitung fortgesetzt, indem die SEE-Konzentrate von überflüssigem Material getrennt und separiert werden. Bei dem Prozess entstehen mehr als 90.000 m<sup>3</sup>/a radioaktive Abfälle. Eine Reduzierung der festen Reststoffe soll laut der Lynas Rare Earth Ltd. durch die kommerzielle Nutzung der recycelten Abfälle, z. B. als Baustoffe erreicht werden. Allerdings gibt es demgegenüber Bedenken, da recyceltes Baumaterial kontaminiert bzw. radioaktiv sein könnte (25). Eine weitere Überlegung des Unternehmens besteht darin, den Abfall auf eine Thorium-Konzentration von weniger als 500 ppm zu verdünnen, welche die maximale Konzentration darstellt, die nach internationalen Standards für das zu entsorgende Material ohne Einschränkungen zulässig ist. Jährlich sollen 220.000 t Abfall nach dem Konzept der „Lösung durch Verdünnung“ verarbeitet werden (26). Umweltwissenschaftler halten dies für eine schlechte Lösung.

Die Verklappung ist aus Gründen des Umweltschutzes und zum Schutz der Bevölkerung und der Arbeiter keine Alternative (27). Die Schaffung einer toxischen Altlast ist eine ungerechtfertigte Belastung für die heutige Generation und künftige Generationen. Bereits Schüler et al. (28) führen in ihrer Studie als Beispiel das Bergbauunternehmen Inner Mongolia Baotou Steel Union bzw. China Northern Rare Earth an, in der SEE als Kuppelprodukt des Eisenerzes gewonnen werden. Die Aufbereitungsrückstände belaufen sich in dem Fall auf 150 Mio. t (28). Kürzlich wurde berichtet, dass es in Ganzhou/China etwa 300 stillgelegte Seltenerdbergwerke gibt, die 191 Mio. t Schlacke- und Aufbereitungsrückstände hinterlassen haben. Das kontaminierte Waldgebiet hat eine Fläche von 97 km<sup>2</sup>. Die chinesische Regierung rechnet damit, dass es 70 Jahre dauern und ca. 4,9 Mrd. € kosten wird, die Umwelt zu sanieren (29).

Absetzbecken enthalten erhebliche Mengen an Thorium, das zusammen mit dem bei der Aufbereitung entstehenden Staub das Grundwasser und die Luft massiv belasten kann (30). Die hierdurch entstehende Luftverschmutzung – vor allem durch Staubeentwicklung – kann abhängig von der physikalisch-chemischen Zusammensetzung hautreizend, giftig oder krebserregend sein. Die weitläufigen Absetzbecken enthalten eine Vielzahl von toxischen Chemikalien und radioaktive Elemente (Bild 5). Aufgrund dieser Belastungen könnte die Sterblichkeitsrate durch Lungenkrebs deutlich erhöht werden. Durch mangelnde Vorkehrungen können giftige Stoffe in die Flüsse, das Grundwasser und den Boden dringen und so die Gesundheit der lokalen Bevölkerung beeinträchtigen. Folgen einer derartigen kontinuierlichen Vergiftung sind u. a. Diabetes, Osteoporose sowie Brust- und Atemungsprobleme (31).

## 5 Verwendung radioaktiver Abfälle

Der Gehalt an radioaktiven Elementen muss aus vorgenannten Gründen detailliert betrachtet werden, da er sich einerseits auf die Umwelt auswirkt und einen direkten Einfluss auf die Bewohner in den Abbaugebieten hat, und andererseits einen verantwort-

Tailings ponds contain significant amounts of thorium, which, together with the dust generated during processing, can massively pollute groundwater and air (30). The resulting air pollution – especially due to dust – can be irritating to the skin, toxic or carcinogenic, depending on its physico-chemical composition. The extensive tailings ponds contain a variety of toxic chemicals and radioactive elements (Figure 5). These exposures can significantly increase the mortality rate from lung cancer. In the absence of precautions, toxic substances can leach into rivers, groundwater and soil, affecting the health of the local population. Consequences of such continuous poisoning include diabetes, osteoporosis and chest and respiratory problems (31).

## 5 Reuse of radioactive waste

For the reasons outlined above, the level of radioactive elements needs to be considered in detail, as it on the one hand has an impact on the environment and a direct influence on the inhabitants of the mining areas, and on the other hand requires responsible mining of the valuable minerals in an economically and environmentally sound manner. Due to the increasing transparency of value chains and the resulting stakeholder awareness of environmental and social issues, these aspects have the potential to become the strongest lever for more future sustainable business models in REE mining.

Current potential applications for thorium and thorium oxide are in welding electrodes, lamp construction, light bulb envelopes, alloys and optical lenses. A study by TH Georg Agricola University in Bochum/Germany has looked at sustainable uses for thorium and thorium oxide, with a view to achieving a true industrial symbiosis within the framework of company networks (32).

Currently, there is renewed interest in using thorium as a fuel source in nuclear technologies because thorium is more abundant than uranium (33). Thorium is considered a viable alternative to produce nuclear energy because it is an efficient fissile material that produces less unwanted waste than uranium. Government-supported projects on thorium-based nuclear power in China, India, Norway, USA and United Kingdom, e.g., could benefit from thorium extracted from REE processing (34, 35).

In addition, the thorium isotope 232 ( $^{90}\text{Th}232$ ) is on average 3.5 times more abundant than uranium in the rocks of the Earth's crust. Global thorium resources are estimated at 6.4 Mt (5, 36). The world's economically recoverable thorium is estimated at around 2.61 Mt, with Australia and the USA leading the way with 489,000 and 400,000 t respectively. The European economies Turkey and Norway have 344,000 and 132,000 t respectively of thorium (35).

Due to its – in comparison to uranium – short-lived radioactive waste (max. 300 years) and the high efficiency of thorium fuel elements, it has advantages over uranium (37). The use of thorium in the nuclear fuel cycle as a complement to the uranium/plutonium cycle also shows potential for improving the medium-term usage of nuclear energy and its side effects. However, its widespread use requires large quantities of uranium 233, too, which is only available when thorium is used with "classical" uranium/plutonium fuels (38).

In the longer term, the potential introduction of advanced reactor systems could provide an opportunity to realize the full benefits of a closed thorium and uranium 233 fuel cycle in dedicated breeder reactors currently at the design study stage.

tungsvollen Abbau der wertvollen Mineralien auf wirtschaftliche und umweltfreundliche Weise voraussetzt. Aufgrund der zunehmenden Transparenz der Wertschöpfungsketten und des daraus resultierenden Bewusstseins der Stakeholder für ökologische und soziale Belange haben diese Aspekte das Potential, zum stärksten Hebel für zukünftige nachhaltige Geschäftsmodelle zu werden.

Die aktuell möglichen Anwendungsgebiete für Thorium bzw. Thoriumoxid liegen momentan in Schweißelektroden, Lampenbau, Glühstrümpfen, Legierungen und insbesondere optischen Linsen. In einer Untersuchung der Technischen Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, wurden nachhaltigkeitsorientierte Verwendungen für Thorium bzw. Thoriumoxid überprüft, um eine wirkliche industrielle Symbiose im Rahmen von Unternehmensnetzwerken zu erzielen (32).

Gegenwärtig gibt es ein erneutes Interesse an der Verwendung von Thorium als Brennstoffquelle in der Kerntechnik, da es in größeren Mengen als Uran vorkommt (33). Technisch gesehen ist Thorium eine zukunftsfähige Alternative, da es ein effizientes Spaltmaterial ist, das weniger unerwünschte Abfallprodukte als Uran erzeugt und das Interesse für die SEE erweitert. So könnten z.B. staatlich geförderte Projekte zur thoriumbasierten Kernkraft in China, Indien, Norwegen, den USA und dem Vereinigten Königreich von Thorium profitieren, das bei der SEE-Verarbeitung gewonnen wird (34, 35).

Zudem kommt das Thoriumisotop 232 ( $^{90}\text{Th}232$ ) in den Gesteinen der Erdkruste durchschnittlich 3,5-mal häufiger vor als Uran; die weltweiten Thoriumressourcen werden auf 6,4 Mio. t geschätzt (5, 36). Die wirtschaftlich gewinnbaren Thoriumvorräte der Welt werden auf etwa 2,61 Mio. t geschätzt, wobei Australien und die USA mit 489.000 bzw. 400.000 t führend sind. Die europäischen Volkswirtschaften Türkei und Norwegen verfügen über 344.000 bzw. 132.000 t Thorium (35).

Durch seine kurzlebigen radioaktiven Abfälle (max. 300 Jahre) sowie der hohen Wirkungsgrade der Thorium-Brennelemente hat es Vorteile gegenüber Uran (37). Die Verwendung von Thorium im Kernbrennstoffkreislauf als Ergänzung zum Uran/Plutonium-Kreislauf zeigt zudem Potential zur Verbesserung der mittelfristigen Flexibilität der Kernenergie und ihrer langfristigen Nachhaltigkeit. Damit es jedoch auf breiter Skala einsetzbar ist, wird eine große Menge Uran 233 benötigt, welches nur verfügbar ist, wenn Thorium zusammen mit „klassischen“ Uran-/Plutonium-Brennstoffen verwendet wird (38).

Längerfristig könnte die potentielle Einführung fortgeschrittener Reaktorsysteme eine Gelegenheit bieten, die vollen Vorteile eines geschlossenen Thorium- und  $^{233}\text{U}$ -Brennstoffkreislaufs in speziellen Brüterreaktoren, die sich derzeit in der Phase der Designstudie befinden, zu realisieren.

Für eine nachhaltige Energieerzeugung stellt die Kernenergie neben den erneuerbaren Energieformen Wind, Solar und Wasserkraft, eine weitere  $\text{CO}_2$ -arme Energieform dar. Ein kompletter Wechsel zu Wind und Solar kann nur mit ausreichenden Speichermöglichkeiten sichergestellt werden. Ökobilanzen verdeutlichen, dass die  $\text{CO}_2\text{eq}$ -Emissionen der Kernenergie und der Windenergie über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur Gasenergie um den Faktor 5 geringer sind (39).

Laut einer vergleichenden Studie zur Ermittlung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen der gängigsten Kraftwerkstypen emittiert ein Kohle-



Nuclear power is another low-carbon form of energy, alongside the renewable forms of wind, solar and hydro. A complete switch to renewable energy can only be achieved with sufficient storage or back-up capacity. Life cycle assessments show that the CO<sub>2</sub>eq emissions of nuclear and wind energy over the entire life cycle are a factor of 5 lower than those of gas energy (39).

According to a comparative study to determine the CO<sub>2</sub> emissions of the most common types of power plant a coal-fired power plant emits approximately 950 g/kWh of CO<sub>2</sub>, while a nuclear power plant emits approximately 30 g/kWh. According to the source, not only the operation, but also the entire life cycle of the plants, including all production steps, was considered (40). Further studies show that the overall radiation exposure from the use of the rare earth metals neodymium and praseodymium in wind turbines is lower to much lower than that from nuclear power (41) but it is still significant and cannot be ignored in the "political arena".

Using thorium as a source material, reactors could be built to meet future energy needs. High potential is attributed to nuclear energy production with so-called "Generation IV" reactor concepts, in particular the liquid salt reactor or molten salt reactor (MSR) technologies (42, 43). Innovations in reactor technology promise lower costs, improved passive safety, faster construction times, smaller absolute size, more flexible siting and the ability to use nuclear waste as fuel. However, these designs are less proven and supply chains for many of their components have not yet been developed (43). However, the future development of world energy requirements could open up the possibility of realizing the processing and marketing of thorium, especially for smaller MSR reactor applications, in a strategic time horizon (44).

## 6 Discussion and summary

It can be assumed that the use of renewable energy will enable more environmentally friendly energy production through decarbonization, which is also urgently needed in view of population growth.

The rapid development of today's society, accompanied by an increasing demand for energy and environmentally friendly high technology, requires ever greater access to REEs. As the demand for these elements increases, so does the amount of waste, by-products and residues generated during the various stages of their production. All of this leads to increasing pollution of the environment and all its components. As a result, elevated concentrations of uranium and thorium have been detected in air, water and biota.

However, the demand for a substantial contribution to climate protection by the EU based on renewable energy technologies is only possible if the raw materials, in this specific case rare earths, are mined responsibly and their by-products are used. Key challenges for responsible mining include growing waste issues, managing environmental externalities, integrating technological innovation and providing net social benefits to project affected communities. The use of environmentally sound production methods, the fulfilment of all reclamation tasks as an integral part of mining and the consideration and reduction of indirect costs/externalities is a compelling necessity (45, 46). Internalizing costs of harmful effects will be an incentive for the mining industry to improve its sustainability performance.

kraftwerk ca. 950 g CO<sub>2</sub>/kWh, ein Kernkraftwerk ca. 30 g/kWh. Nach Angaben der Quelle wurde nicht nur der Betrieb, sondern der gesamte Lebenszyklus der Anlagen einschließlich aller Produktionsschritte betrachtet (40). Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Strahlenbelastung, die durch die Verwendung der Seltenerdmetalle Neodym und Praseodym in Windkraftanlagen entsteht, in der Summe niedriger bis sehr viel niedriger als jene ist, die durch Atomstrom verursacht wird (41), aber sie ist dennoch von Bedeutung und kann in der „politischen Arena“ nicht ignoriert werden.

Mit Thorium als Ausgangsmaterial können Reaktoren gebaut werden, die den zukünftigen Energiebedarf decken. Hohes Potential wird der nuklearen Energieerzeugung mit Reaktorkonzepten der „Generation IV“, insbesondere den Technologien des Flüssigsalzreaktors bzw. des Molten-Salt-Reaktors (MSR), zugeschrieben (42, 43). Innovationen in der Reaktortechnologie versprechen niedrigere Kosten, verbesserte passive Sicherheit, kürzere Bauzeiten, geringere absolute Größe, flexiblere Standortwahl und die Möglichkeit, nuklearen Abfall als Brennstoff zu verwenden. Diese Konzepte sind jedoch weniger erprobt und die Lieferketten für viele ihrer Komponenten sind noch nicht entwickelt (43). Die zukünftige Entwicklung des Weltenergiebedarfs könnte jedoch die Möglichkeit eröffnen, die Aufbereitung und Vermarktung von Thorium, insbesondere für kleinere MSR-Reaktoranwendungen, in einem strategischen Zeithorizont zu realisieren (44).

## 6 Diskussion und Zusammenfassung

Es ist davon auszugehen, dass durch den Einsatz erneuerbarer Energien eine umweltfreundlichere Energieerzeugung durch Dekarbonisierung möglich und angesichts des Bevölkerungswachstums auch dringend erforderlich ist.

Die rasante Entwicklung der heutigen Gesellschaft, die mit einer steigenden Nachfrage nach Energie und umweltfreundlicher Hochtechnologie einhergeht, erfordert einen erweiterten Zugang zu den SEE. In dem Maß, wie die Nachfrage nach diesen Elementen steigt, wächst auch die Menge an Abfällen, Nebenprodukten und Rückständen, die in den verschiedenen Phasen ihrer Herstellung anfallen. All dies führt zu einer zunehmenden Verschmutzung der Umwelt und aller ihrer Bestandteile. Infolgedessen wurden erhöhte Konzentrationen von Uran und Thorium in Luft, Wasser, Flora und Fauna festgestellt.

Die Forderung nach einem substanziellen Beitrag zum Klimaschutz der EU-Taxonomie auf Basis erneuerbarer Energietechnologien ist jedoch nur möglich, wenn die Rohstoffe, im konkreten Fall die Seltenen Erden, verantwortungsvoll abgebaut und ihre Nebenprodukte genutzt werden. Zu den wichtigsten Herausforderungen für einen verantwortungsvollen Bergbau gehören die zunehmende Abfallproblematik, die Bewältigung externer Umweltauswirkungen, die Integration technologischer Innovationen und die Schaffung eines sozialen Nettonutzens für die von den Projekten betroffenen Gemeinden. Der Einsatz umweltverträglicher Produktionsmethoden, die Erfüllung aller Rekultivierungsaufgaben als integraler Bestandteil des Bergbaus und die Berücksichtigung und Reduzierung indirekter Kosten/Externalitäten ist eine zwingende Notwendigkeit (45, 46). Die Internalisierung der Kosten für schädliche Auswirkungen muss ein Anreiz für die Bergbauindustrie sein, ihre Nachhaltigkeitsleistung zu verbessern.

The permanent stock or the renewal and the development of wealth in a closed system with limited availability of resources is made possible by the circular economy through an economic approach in which the materials and energy used are not removed from the economic process as residues or waste but are fed back into the production or consumption process (47, 48).

The reuse of thorium, which is a by-product of REE production, should be considered for this reason a necessary option for the future. In addition to the deposit and the resulting opportunities for long-term primary energy production independent of solar and wind, thorium has the potential to increase the fuel content for the nuclear chain reaction, thus reducing the amount of waste for the same amount of energy produced compared to uranium. The demand for a clean, safe and affordable source of nuclear energy will influence the growth of the thorium market (49). The thorium market is expected to grow at a compound annual rate of 4% from 2021 to 2028.

As described above, thorium can be successfully returned to the economic cycle. If this does not happen, if the (radioactive) waste is not used but diluted, the intended environmental objectives will not be achieved. Utilization should take place under the aspect of energy and resource efficiency. A circular approach, circular business models could directly meet two environmental objectives of the EU: pollution prevention and control and the transition to a circular economy.

Der dauerhafte Bestand bzw. die Erneuerung und die Entwicklung von Wohlstand in einem geschlossenen System mit begrenzter Ressourcenverfügbarkeit ermöglicht die Kreislaufwirtschaft durch einen ökonomischen Ansatz, bei dem die eingesetzten Materialien und Energien nicht als Rückstände oder Abfälle aus dem Wirtschaftsprozess entfernt, sondern in den Produktions- oder Konsumprozess zurückgeführt werden (47, 48).

Die Wiederverwendung von Thorium, das als Nebenprodukt bei der Produktion von SEE anfällt, sollte deshalb als eine notwendige Option für die Zukunft angesehen werden. Neben dem Vorkommen und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten für eine langfristige, von Sonne und Wind unabhängige Primärenergieerzeugung hat Thorium das Potential, den Brennstoffanteil für die nukleare Kettenreaktion zu erhöhen und damit die Abfallmenge für die gleiche erzeugte Energiemenge zu verringern. Die Nachfrage nach einer sauberen, sicheren und erschwinglichen Kernenergiequelle wird einen Einfluss auf das Wachstum des Thoriummarkts haben (49). Es wird erwartet, dass die Größe des Thoriummarkts im Zeitraum von 2021 bis 2028 mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 4% zunimmt.

Wie oben beschrieben, kann Thorium erfolgreich in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Geschieht dies nicht, werden die (radioaktiven) Abfälle nicht genutzt, sondern verdünnt, werden die angestrebten Umweltziele nicht erreicht. Die Nutzung sollte somit unter dem Aspekt der Energie- und Ressourceneffizienz erfolgen. Eine zirkuläre Handlungsweise, zirkuläre Geschäftsmodelle könnten zwei der sechs Umweltziele der EU-Taxonomie direkt erfüllen: Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung und Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) International Energy Agency (2022): World Energy Outlook. Paris/Frankreich: IEA Publications International Energy Agency.
- (2) International Energy Agency (2021b): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris/Frankreich: International Energy Agency.
- (3) European Commission (2020): Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study. Luxembourg: European Union.
- (4) Global Witness (2023): Myanmar's poisoned mountains. Von The toxic rare earth mining industry at the heart of the global green energy transition: [www.globalwitness.org/en/campaigns/natural-resource-governance/myanmars-poisoned-mountains/](http://www.globalwitness.org/en/campaigns/natural-resource-governance/myanmars-poisoned-mountains/). Abgerufen 19. Februar 2023.
- (5) U.S. Geological Survey (2023): Mineral Commodity Summaries, January 2022. Von Thorium: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-thorium.pdf>. Abgerufen 30. Januar 2023.
- (6) Krishnamurthy, N.; Gupta, C. (2016): Extractive Metallurgy of Rare Earths. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- (7) Zhang, Q. et al. (2020): Ammonia nitrogen sources and pollution along soil profiles in an in-situ leaching rare earth ore. Environmental Pollution.
- (8) Andritschke, N. (2023): Springer Professional – Umwelt | Interview | Online-Artikel. Von „China behauptet seine Marktmacht bei Seltenen Erden“: [www.springerprofessional.de/umwelt/ressource/-china-behauptet-seine-marktmacht-bei-seltenen-erden-/16296906](http://www.springerprofessional.de/umwelt/ressource/-china-behauptet-seine-marktmacht-bei-seltenen-erden-/16296906). Abgerufen 19. Februar 2023.
- (9) Hopfe, S.; Flemming, K.; Lehmann, F.; Möckel, R.; Kutschke, S.; Pollmann, K. (2017): Leaching of rare earth elements from fluorescent powder using the tea fungus Kombucha. In: Waste Management, S. 211 – 221.
- (10) Chen, J.; Gao, J. (2016): Ionic Liquids in the Context of Rare Earth Separation and Utilization. In: J. Chen, Application of Ionic Liquids on Rare Earth Green Separation and Utilization (S. 3-20). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- (11) International Energy Agency (2021a): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – World Energy Outlook Special Report. Paris/Frankreich: International Energy Agency.
- (12) European Commission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. Brussels: European Commission.
- (13) Wuppertal Institut (2014): KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- (14) Drusche, O. (Mai 2022): Untersuchungen an Bewertungssystemen für nachhaltigkeitsorientierte Geschäftsmodelle im Seltenerdelemente-Rohstoffsektor. Dissertation. Freiberg/Sachsen: TU Bergakademie Freiberg.
- (15) Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Tercero Espinoza, L. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).



- (16) Hurst, C. (2010): China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Potomac/Fort Leavenworth: Institute for the Analysis of Global Security (IAGS).
- (17) Yin, X.; Martineau, C.; Demers, I.; Basiliako, N.; Fenton, N. J. (12. März 2021): The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada. In: *Environmental Reviews*, pp 354–377. doi:10.1139/er-2020-0115.
- (18) Barakos, G.; Gutzmer, J.; Mischo, H. (2016): Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. In: *Journal of Sustainable Mining*, pp 26–35. doi:10.1016/j.jsm.2016.05.002.
- (19) Al-Areqi, W. M.; Zainul Bahri, C.; Majid, A. A.; Sarmani, S. (6. April 2016): Separation and Radiological Impact Assessment of Thorium in Malaysian Monazite Processing. In: *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, pp 770–776.
- (20) Neukirchen, F.; Ries, G. (2016): *Die Welt der Rohstoffe*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- (21) Azevedo, M. et al. (2022): The raw-materials challenge: How the metals and mining sector will be at the core of enabling the energy transition. London, Wrocław, Zürich, Johannesburg, New York, Hong Kong: McKinsey & Company.
- (22) U.S. Geological Survey (2021): *Mineral commodity summaries 2021*: U.S. Geological Survey, 200 p. Reston, Virginia. doi:10.3133/mcs2021.
- (23) Lynas Rare Earths Ltd. (2023). Von <https://lynasrareearths.com/>. Abgerufen 1. Februar 2023.
- (24) Kooroshy, J.; Tukker, A.; Walton, A. (2015): Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options. ERECON.
- (25) Rüttinger, L.; Treimer, R.; Tiess, G.; Griestop, L.; Schüler, F.; Wittrock, J. (2014): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung Seltener Erden in Mount Weld, Australien und der Raffination in Kuantan, Malaysia. Berlin: adelphi, S. 11–12.
- (26) Findeiß, M.; Schäffer, A. (2017): Fate and Environmental Impact of Thorium Residues During Rare Earth Processing. In: *Journal of Sustainable Metallurgy* (3), pp 179–189. doi:10.1007/s40831-016-0083-3.
- (27) Kamei, T. (27. September 2012): Recent Research of Thorium Molten-Salt Reactor from a Sustainability Viewpoint. In: *Sustainability*, pp 2399–2418. doi:10.3390/su4102399.
- (28) Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C. (2011): Study on Rare Earths and their Recycling. Darmstadt: Öko-Institut e. V.
- (29) Wu, L. (2023): *Rehabilitation and Ecological Restoration at Nonferrous Mine Sites*. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy (BGRIMM).
- (30) Patel, K. S.; Sharma, S.; Maity, J. P.; Martín-Ramos, P.; Fiket, Ž.; Bhattacharya, P.; Zhu, Y. (2023): Occurrence of uranium, thorium and rare earth elements in the environment: A review. *Frontiers in Environmental Science*.
- (31) Rüttinger, L.; Treimer, R.; Tiess, G.; Griestop, L.; Schüler, F.; Wittrock, J. (2014): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung Seltener Erden in Bayan Obo, China. Berlin: adelphi, S. 8.
- (32) Müller, G. (2020): Analyse möglicher Anwendungsfälle und Prozesse zur Aufbereitung von Thorium aus brasilianischem Monazit. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum. Unveröffentlicht.
- (33) Jordan, B. W.; Eggert, R. G.; Dixon, B. W.; Carlsen, B. W. (2015): Thorium: Crustal abundance, joint production, and economic availability. In: *Resources Policy*, pp 81–93.
- (34) McNulty, T.; Hazen, N.; Park, S. (21. März 2022): Processing the ores of rare earth elements. In: *MRS Bulletin*, pp 258–266. doi:10.1557/s43577-022-00288-4.
- (35) Rhodes, C. J. (6. Juni 2013): Current Commentary: Thorium-based nuclear power. In: *Science Progress*, pp 200–209. doi:10.3184/003685013X13692248406405.
- (36) Osterhage, W.; Frey, H. (2022): *Transformation radioaktiver Abfälle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- (37) Kausch, P.; Bertau, M.; Gutzmer, J.; Matschullat, J. (2014): *Strategische Rohstoffe – Risikoversorge*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- (38) Green Facts (2019): *Green Facts – Facts on Health and the Environment*. Kann Thorium zu einer Alternative für Kernbrennstoff werden? <https://www.greenfacts.org/de/thorium-kernbrennstoff/index.htm>. Abgerufen 29. Oktober 2019.
- (39) Stagl, S. (2020): Die Taxonomie-Verordnung und Kernenergie unter Berücksichtigung der DNSH-Kriterien: eine Literaturstudie. Wien: Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- (40) Spiegel (2023): Statista. Ausstoß von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Stromkraftwerke nach Kraftwerktyp: <https://de-statista-com.ezproxy.fh-muenster.de/statistik/daten/studie/38910/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-nach-kraftwerk/?locale=de>. Abgerufen 7. April 2023.
- (41) Schmidt, G. (März 2015): Gleich und gleich? Die Strahlenbilanz von Wind- und Atomkraft. (Ö.-I. e.V., Hrsg.) *eco@work*, S. 18.
- (42) Allibert, M.; Aufiero, M.; Brovchenko, M.; Delpech, S.; Ghetta, V.; Heuer, D.; Merle-Lucotte, E. (2016): Molten salt fast reactors. In: Piro, I. L.: *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, pp 157–188. Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-08-100149-3.00007-0.
- (43) Cramer, C.; Lacivita, B.; Laws, J.; Malik, M. N.; Olynyk, G. (2023): What will it take for nuclear power to meet the climate challenge? Columbus, Atlanta, Boston, Houston, Toronto: McKinsey & Company.
- (44) Piro, I. L.; Duffey, R. B.; Kirillov, P. L.; Panchal, R. (2016): Introduction: a survey of the status of electricity generation in the world. In: Piro, I. L.: *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, pp 1–34. Amsterdam: Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-08-100149-3.00001-X.
- (45) Drebenstedt, C. (2019): Responsible mining approach for sustainable development – research concept and solutions. In: *Journal of Engineering Sciences and Innovation* (2), pp 197–218.
- (46) Schneider, N. R. (2020): *Ecopreneurship – Business practices for a sustainable future*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.
- (47) Drusche, O.; Krause, S.; Kretschmann, J.; Mischo, H.; Ayres da Silva, A. L. (30. November 2021): Business Models for Sustainability. In: *Ökologisches Wirtschaften*, 36(4), S. 43–50. doi:10.14512/OEW360443.
- (48) Makhathini, T. P.; Bwapwa, J. K.; Mtsweni, S. (31. Januar 2023): Various Options for Mining and Metallurgical Waste in the Circular Economy: A Review. In: *Sustainability*, pp 1–21. doi:10.3390/su15032518.
- (49) Data Bridge Market Research. (2023): *Materials & Packaging. Global Thorium Market – Industry Trends and Forecast to 2028*: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-thorium-market>. Abgerufen 29. Januar 2023.

#### Authors / Autoren

Dr.-Ing. Olaf Drusche, Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, Prof. Dr. rer. pol. Jürgen Kretschmann, RWTH Aachen University, Aachen