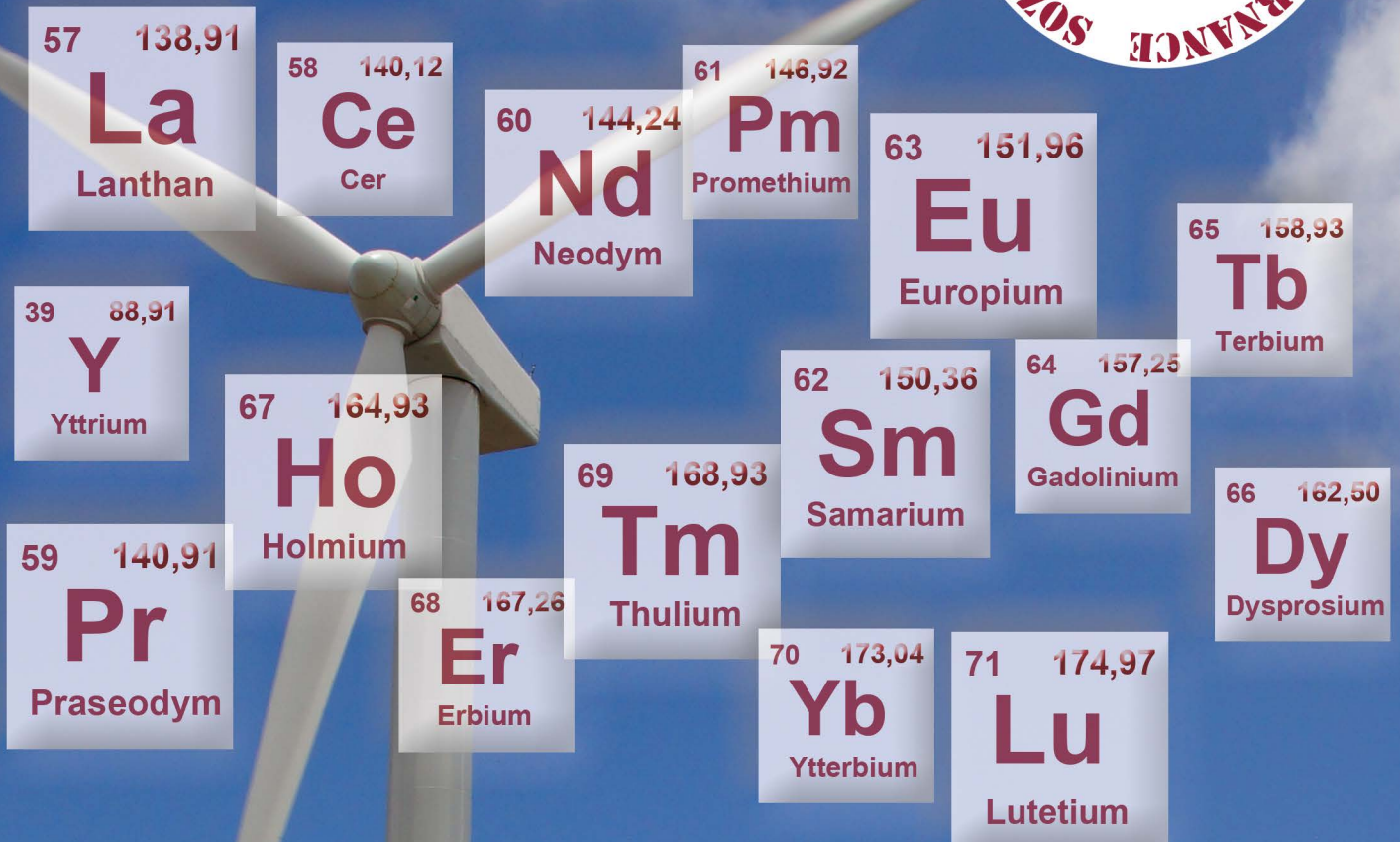
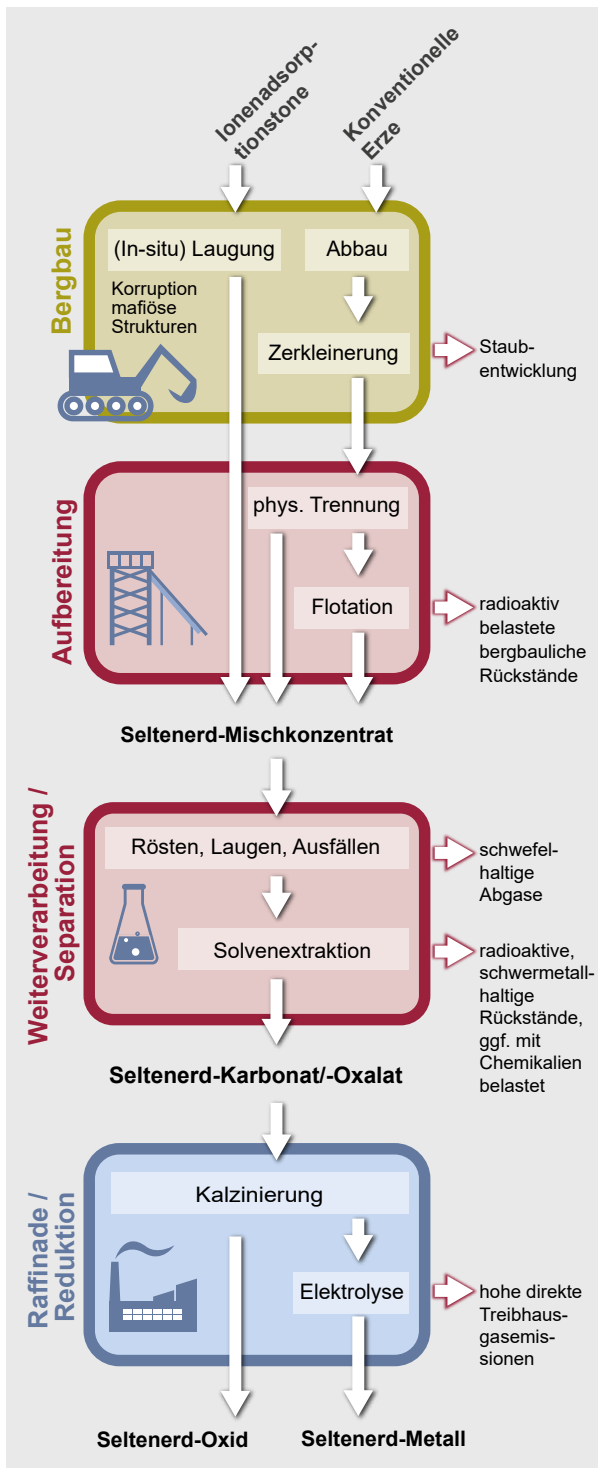


Seltene Erden

Informationen zur Nachhaltigkeit



AUF EINEN BLICK



- Seltene Erden (SE) sind unverzichtbare Rohstoffe für die Energiewende mit stark steigendem Bedarf, da sie z. B. in Permanentmagneten für Elektromotoren und die Turbinen von Windkraftanlagen verwendet werden.
- Die Weltbergwerksförderung 2020 betrug 214.000 t SE-Oxid. Der chinesische Marktanteil lag bei 57 %, bei der SE-Raffinadeproduktion bei 85 %.
- In Zusammenhang mit der illegalen SE-Gewinnung in China sind neben signifikanten Umweltschäden Korruption und mafiose Strukturen zu beobachten.
- China reduziert mit der Konsolidierung des nationalen SE-Marktes die illegale Gewinnung drastisch von 120.000 t SEO in 2011 auf unter 10.000 t SEO in 2020.
- Die In-situ-Laugung von Ionenadsorptionstonen hat, bei effizienten und verantwortungsvollen Einsatz der Laugungssubstanzen, großes Potenzial die Umweltauswirkungen der SE-Gewinnung zu reduzieren.
- Die größten Umweltauswirkungen der SE-Gewinnung entstehen bei der Separation durch die aufwändige, mehrstufige Solvent-Extraktion, bei der u. a. radioaktive Rückstände entstehen.
- Proteste in Malaysia gegen die Weiterverarbeitung von Seltenerdkonzentraten aus Australien, insb. aufgrund der dabei anfallenden radioaktiven Reststoffe, verdeutlichen die Diskussion des „burden shiftings“.
- Das Recycling von SE spielt für die globale Versorgung aufgrund niedriger Sammelquoten und komplexen Aufbereitungsverfahren derzeit keine Rolle.

Abb. 1: Vereinfachte Zusammenfassung der Gewinnungs- und Verarbeitungsschritte von Seltenerden (SE) bis zum einzelnen SE-Metall-Oxid mit den aus Nachhaltigkeitsperspektive gravierendsten Auswirkungen.

INHALT

1	Relevanz von seltenen Erden	S. 3
2	Von der Lagerstätte zum Metall	S. 4
3	Recycling	S. 8
4	Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus	S. 9
5	Nachhaltigkeitsaspekte der Weiterverarbeitung	S. 14
6	Quellennachweis	S. 18

1 RELEVANZ VON SELTENEN ERDEN

Als Seltene Erden (SE) werden die 14 Elemente der Lanthanoide sowie Yttrium bezeichnet. Sie werden in die häufigeren leichten SE (LSE) wie Lanthan (La), Cer (Ce) oder Neodym (Nd) und die selteneren und aufwändiger zu produzierenden schweren SE (SSE) wie Dysprosium (Dy) unterschieden (Abb. 2). SE haben eine vielfältige Anwendung und sind aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften bei den derzeit relativ niedrigen Preisen nur schwer substituierbar.

Erstmals mengenmäßig bedeutsam eingesetzt wurden sie ab den 1950er Jahren als Katalysatoren in der Petrochemie (hauptsächlich La) und der Informationstechnik (u. a. Europium (Eu) als roter Leuchtstoff in Farbfernsehern). Eine wichtige heutige Verwendung von SE sind, neben dem Einsatz als Katalysatoren, in Polituren

(hauptsächlich Ce) und in der Metallurgie (Ce, La), ihr Einsatz in Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB-)Permanentmagneten, die dank des Zusatzes von 1 – 8 % Dy hitzebeständig werden (der durchschnittliche Nd-Anteil beträgt 30 %; [1]). Insbesondere für die Energiewende spielen Nd und Dy in den Generatoren großer Offshore-Windkraftanlagen und – mengenmäßig am bedeutendsten – in Elektromotoren z. B. für die Automobilindustrie eine entscheidende Rolle. Der Bedarf insbesondere an diesen SE-Metallen wird bis 2030 mit einer jährlichen Wachstumsrate von durchschnittlich 6 % steigen, der Gesamtbedarf von derzeit 131.000 t SEO auf 188.300 t SEO zunehmen (Abb. 2) [2].

Aufgrund Chinas marktbeherrschender Stellung, vom Bergbau über die Weiterverarbeitung zu Zwischenprodukten und reinen Metallen bis hin zu NdFeB-Magneten und verbunden mit temporären Exportverboten, werden SE von der Europäischen Kommission aktuell als die

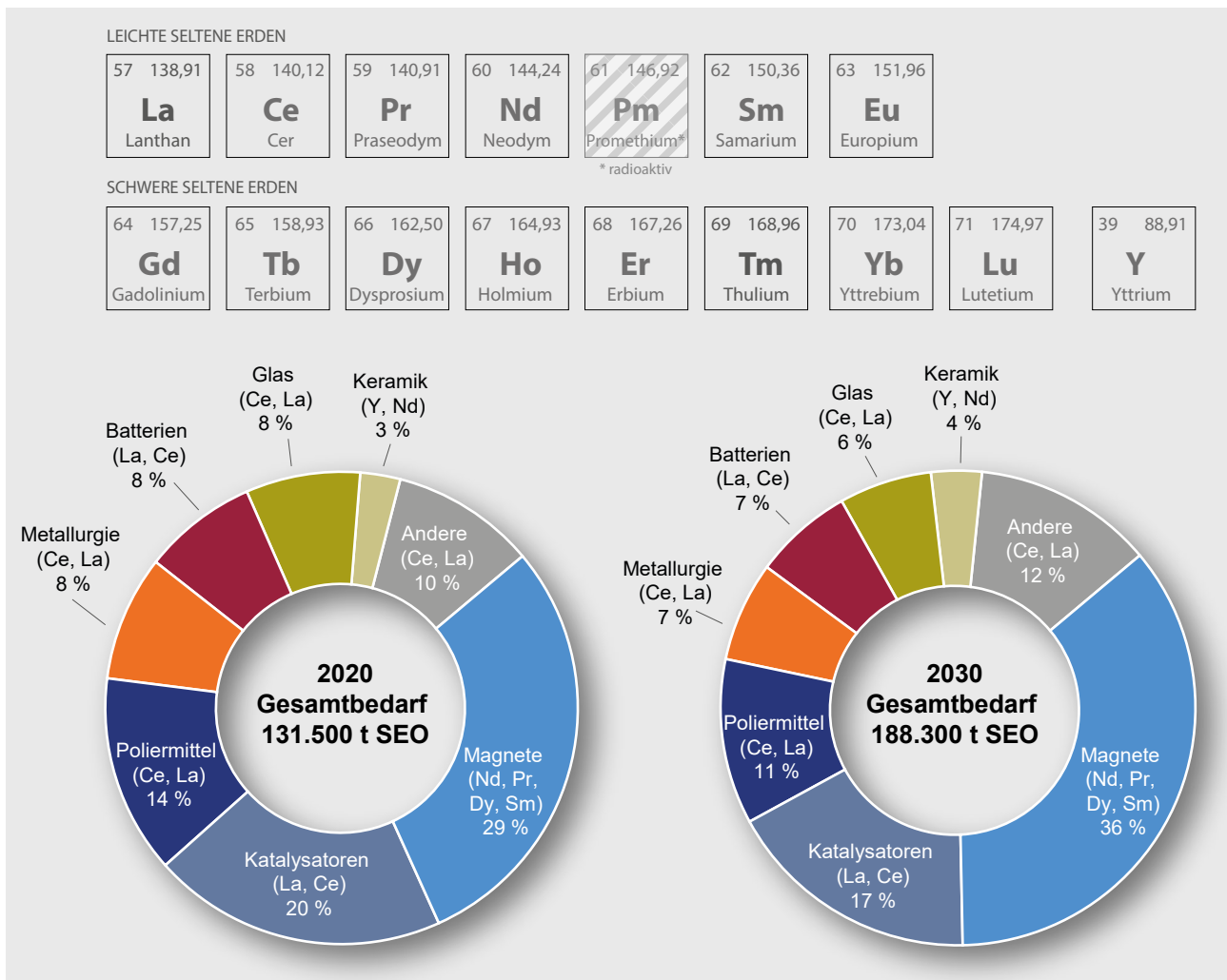


Abb. 2: Oben: Darstellung der Lanthanoide und Yttrium sowie deren Einteilung in leichte und schwere Seltene Erden. Unten: Gesamtbedarf von SEO im Jahr 2020 und prognostizierter Bedarf im Jahr 2030, dargestellt nach Verwendung in %. In den Klammern sind die für die entsprechende Anwendung jeweils wichtigsten SE-Elemente in absteigender Reihenfolge genannt. (Daten/Quelle [2]).

Rohstoffe mit dem höchsten Versorgungsrisiko eingestuft. Vor diesem Hintergrund haben mehrere westliche Industrieinitiativen wie die European Raw Material Alliance (ERMA) zum Ziel, die Abhängigkeit von China zu reduzieren [3]. Auch im derzeit bestehenden Handelskonflikt zwischen China und den USA stehen SE, auch aufgrund der für die Rüstungsindustrie strategischen Bedeutung (Verwendung z. B. in Radar- und Waffensystemen), im Fokus. Eine von China unabhängige Produktion von SE wird auch von amerikanischer Seite angestrebt, ist aber aufgrund der großen Herausforderungen bei der Weiterverarbeitung – neben den technischen sind es vor allem auch die ökologischen – nicht trivial. Nichtsdestotrotz liegen hier aus Nachhaltigkeits-sicht auch Chancen mit technischen Innovationen eine ökologisch verträglichere Produktion zu ermöglichen.

2 VON DER LAGERSTÄTTE ZUM METALL

2.1 Geologie

Anders als es ihr Name suggeriert, sind die meisten Seltenerdelemente nicht selten – die durchschnittliche Anreicherung in der Erdkruste ist ähnlich zu Kupfer – allerdings sind die SE seltener in abbauwürdigen Vorkommen konzentriert. Eine Vielzahl komplexer SE-haltiger Minerale (~245 Silikate, Oxide, Karbonate und Phosphate) sind bekannt. Wirtschaftlich bedeutend sind derzeit allerdings hauptsächlich das Karbonatmineral Bastnäsit sowie die Phosphatminerale Monazit und Xenotim, für die etablierte Aufbereitungsprozesse vorhanden sind. Die SE-Elemente (Lanthanoide) treten dabei, in unterschiedlicher Zusammensetzung, immer gemeinsam auf und sind mit radioaktiven Elementen (Uran (U) und Thorium (Th)) assoziiert.

Die Zusammensetzung der SE-Lagerstätten ist stark unterschiedlich, mit einer insgesamt deutlich größeren Häufigkeit der leichten SE (LSE; >90 %) wie Nd gegenüber den schweren SE (SSE) wie Dy. Da der absolute Bedarf von einigen SE größer ist (insb. der von Nd und Dy in Magneten) als von anderen, die SE aber nur gemeinsam gewonnen werden können, kommt es zu einem relativen Ungleichgewicht zwischen Angebot (verhältnismäßig groß bei LSE wie La und Ce) und Nachfrage (verstärkt nach Nd und Dy).

Lagerstätten mit SE-Erzen finden sich in unterschiedlichen geologischen Gegebenheiten. Die für die derzeitige Versorgung bedeutendsten SE-Lagerstätten sind Karbonatit-Intrusionen (z. B. Bayan Obo und Maoni-

ping in China, Mt. Weld in Australien, Mountain Pass in den USA) mit den SE-Hauptwertmineralen Bastnäsit und Monazit. Ein weiterer Lagerstättentyp, der wesentlich zur derzeitigen Versorgung insb. mit SSE beiträgt, sind Ionenaustauschminerale. Sie treten weltweit nur in wenigen, durch starke Verwitterung geprägte Regionen auf (überwiegend Südostasien) und stehen in erster Linie in Südchina im Abbau. Die SE-Elemente sind hier an den Oberflächen der Tone adsorbiert, von denen sie über Laugung relativ einfach gewonnen werden können. Darüber hinaus sind sie nur in geringem Umfang mit radioaktiven Elementen assoziiert.

Monazit und Xenotim kommen hauptsächlich in sogenannten Seifenlagerstätten vor. Dabei handelt es sich um Lagerstätten, bei denen Schwerminerale durch Ablagerung in Sedimenten angereichert wurden. Sie sind in der Regel mit hohen U- und Th-Konzentrationen verbunden (besonders Monazit). SE-haltige Schwermineralsande stehen global in Abbau, allerdings werden die SE-Minerale aus diesen Lagerstätten meist nicht mitgewonnen.

Auch zahlreiche bekannte peralkaline Lagerstätten haben große Potenziale insb. auch an SSE mit einer oft verhältnismäßig geringen Radioaktivität (z. B. in Schweden, Grönland, Kanada, Australien; vgl. Abb. 4). Sie können derzeit u. a. aufgrund der komplexen Aufbereitung allerdings nicht wirtschaftlich gewonnen werden. Der einzige aktive Abbau von peralkalinen Magmatiten findet derzeit in Lovozerskoye, Russland, statt. SE-Anreicherungen können darüber hinaus in Phosphoriten und hydrothermalen Ganglagerstätten auftreten.

2.2 Bergbau und Aufbereitung

Die Weltbergwerksförderung 2020 betrug 214.000 t SE-Oxid (SEO; einheitliche Angabe in Oxide; diese sind ein Raffinadeprodukt und eine Vorstufe für die Weiterverarbeitung in komplexere Produkte), wovon 57 % in China gewonnen wurden. Hinzu kommen knapp 10.000 t aus illegaler chinesischer Produktion [2]. Rund 70 % der globalen SEO-Produktion stammen aus Karbonatiten bzw. dessen Verwitterungsprodukten [4]. Ihre bergbauliche Gewinnung findet überwiegend in industriellen Tagebauen statt. Mit derzeit ca. 69.400 t SEO pro Jahr bzw. 32 % der Weltproduktion in 2020 ist die Karbonatitlagerstätte Bayan Obo (Innere Mongolei, China) der mit Abstand größte SE-Produzent, wobei die SE Beiprodukte der Eisenerzgewinnung sind. Die Erze werden zur Anreicherung zu einem Bastnäsit- (56 % SEO) bzw. Monazit-Konzentrat (34 % SEO) in das rund 150 km entfernte Baotou transportiert [5]. In Bayan Obo erfolgt die Gewinnung als Beiprodukt der (Niob-)

Eisenerzproduktion. Es wird dabei konventionelle Bergbautechnik mit Bohren, Sprengen und Verladen eingesetzt. Nach dem Brechen und Mahlen auf eine Fraktion < 150 µm sowie einer optionalen Magnetscheidung (für Erze aus Bayan Obo zur Abtrennung von Eisen- und untergeordnet, Nioboxid), erfolgt eine mehrstufige Flotation zur Herstellung eines SE-Mineralkonzentrates (Bastnäsit und Monazit) [5,6,7].

Im Jahr 2019 wurden Erze mit 17.613 t SEO-Inhalt aus dem Mt. Weld Bergwerk in Australien in Malaysia verarbeitet, die Produktion in 2020 lag nach Schätzungen von Roskill [2] trotz Pandemie-bedingter Produktionsausfälle von April bis Juni bei knapp 24.000 t SEO. Die Gewinnung erfolgt über einfaches Abgraben mit Baggern aus einer bis zu 70 m mächtigen Lateritzone, einem stark verwitterten Karbonatit, in dem sich sekundäre Phosphat-Mineralen (insb. Monazit) angereichert haben. Die Aufbereitung bis zum SE-Mineralkonzentrat (hauptsächlich Monazit) erfolgt nach dem oben beschriebenen Prozess vor Ort (Abb. 3).

Nach mehrfachen Stundungen aufgrund von Problemen mit den Umweltauflagen produziert das Mt. Pass Bergwerk in den USA seit 2018 SE-Konzentrate aus Bastnäsit. Der SEO-Inhalt der Konzentrate lag nach 26.750 t in 2019 bei schätzungsweise 39.200 t in 2020 [2]. Im Gegensatz zur früheren Produktion wird das SE-Konzentrat derzeit nicht mehr vor Ort zu SEO verarbeitet, sondern wird zur Weiterverarbeitung nach China exportiert. Nach Bestrebungen des Betreibers MP Minerals Ltd. und auf Druck der US-Regierung soll die Weiterverarbeitung mit niedrigeren Kosten und geringerer Umweltbelastung bis 2022 wieder in den USA erfolgen.

Aus Ionenadsorptionstonen in Südchina und Myanmar stammen rund 16 % der globalen SEO-Gewinnung (~35.000 t in 2020). Hinzu kamen vor 2018 schätzungsweise weitere 40.000 – 150.000 t SEO pro Jahr, die von rund 200 kleinen Abbaustellen in Südchina illegal/inoffiziell aus Ionenadsorptionstonen gewonnen wurden [8]. Aufgrund der Konsolidierung des SE-Marktes in China und der strikteren Umsetzung von Kontrollen ist der illegal produzierte Anteil in 2020 auf unter 10 % der Gesamtproduktion zurückgegangen (nach >30 % in den Vorjahren, zu ~75 % aus Ionenadsorptionstonen [2]). Die Tone sind verhältnismäßig stark mit SSE angereichert und tragen somit zu einem sehr großen Anteil zur Marktdeckung von bspw. Dy bei. Seit 2017 wurden in Myanmar an der Grenze zu China große Mengen an Seltenerdkonzentraten hauptsächlich aus Ionenadsorptionstonen gewonnen, die zur Weiterverarbeitung nach China gebracht wurden (~15.000 t SEO in 2018, 20.500 t SEO in 2019 und 19.000 t SEO in 2020;



Abb. 3: Oben: Bergbauliche Gewinnung von Laterit (verwitterter Karbonatit) im Mt. Weld Bergwerk, Australien. Unten: Zum Mt. Weld Standort zugehörige Aufbereitungsinfrastruktur, hier: Flotationsanlagen (© BGR).

die Gesamtexporte liegen teils noch deutlich darüber [2]). Über die genaue Herkunft und die Nachhaltigkeit der Gewinnung ist nur wenig bekannt, auch über ein „Waschen“ von eigentlich in China illegal abgebauten SE wird berichtet (vgl. 4.3). Aufgrund der wechselnden Import- und Exportverbote schwanken zudem die jährlichen Produktionszahlen von Myanmar immens. Myanmar hat bspw. Ende 2019 den Export von SE-Konzentraten mit Verweis auf Umweltverschmutzungen und Konflikte im Zusammenhang mit dem nicht regulierten Abbau untersagt, nachdem China den Import bereits vorher für vier Monate gestoppt hatte. Da der Zugang der nationalen Behörden in einigen (Grenz-)Regionen wie dem Kachin-Staat oder dem de-facto autonomen Wa-Staat (Teil des Shan-Staates an der chinesischen Grenze) allerdings nicht gegeben ist, werden solche Verbote mutmaßlich nicht beachtet.

Generell ist die SE-Gewinnung aus Ionenadsorptionstonen aufgrund des hohen Anteils schwerer SE und der verhältnismäßig einfachen Gewinnung sehr lukrativ und zieht somit viele illegal agierende Bergleute an, unterstützt von Lokalpolitikern. Die Erzeugung eines hochgradigen SE-Konzentrates (bis 90 %) erfolgt mittels Ammoniumsulfat entweder über Haufen- bzw.

Tank-Laugung, nachdem das Erz der entsprechenden Lagerstättenbereiche abgetragen wurde, oder über die In-situ-Laugung. Diese ist theoretisch umweltfreundlicher. Voraussetzung ist allerdings, dass die Laugungsreagenzien wieder aufgefangen und wiederverwendet werden, was häufig nicht in ausreichendem Maße geschieht. Folge ist u. a. eine Eutrophierung der Böden, die für angrenzende Gewässer problematisch ist.

Der industrielle Abbau von Schwermineralseifen, die u. a. Monazit und Xenotim enthalten, welche als Beiprodukt gewonnen werden können, erfolgt über eine Vielzahl von Gewinnungsgeräten, z. B. über Eimerkettenbagger, die Aufkonzentration über Dichte- und Schwerentrennung, sowie über eine Magnetscheidung. Monazit-Gewinnung aus Seifen mit einer jährlichen Produktion <1.500 t SEO-Inhalt findet derzeit in einer Vielzahl von Ländern statt (u. a. USA, Australien, Vietnam, Thailand, Malaysia, Mosambik, Südafrika und

Brasilien). Größte Produzenten aus Schwermineralseifen in 2020 mit rund 3.000 t SEO-Inhalt waren Indien und Madagaskar.

Die Ressourcen von Seltenen Erden betragen mehr als das 1.000-fache der derzeitigen Jahresproduktion und sind somit deutlich höher als bei allen anderen wirtschaftsstrategischen Metallen (interne Berechnung der BGR). Allerdings findet ein Abbau in Ländern mit großen Ressourcen, wie in Brasilien (22 Mio. t SEO-Inhalt) oder Russland (12 Mio. t) [9], derzeit nur sehr begrenzt oder gar nicht statt. Problematisch ist in erster Linie die Wirtschaftlichkeit von neuen Seltenerd-Projekten, da insb. die benötigten Anlagen für die Weiterverarbeitung sehr komplex und somit kostenintensiv sind (s. u.). Niedrige Weltmarktpreise und Umweltbedenken verhindern darüber hinaus, dass eines der zahlreichen gut explorierten Seltenerd-Projekte außerhalb Chinas (vgl. Abb. 4) in Produktion geht.

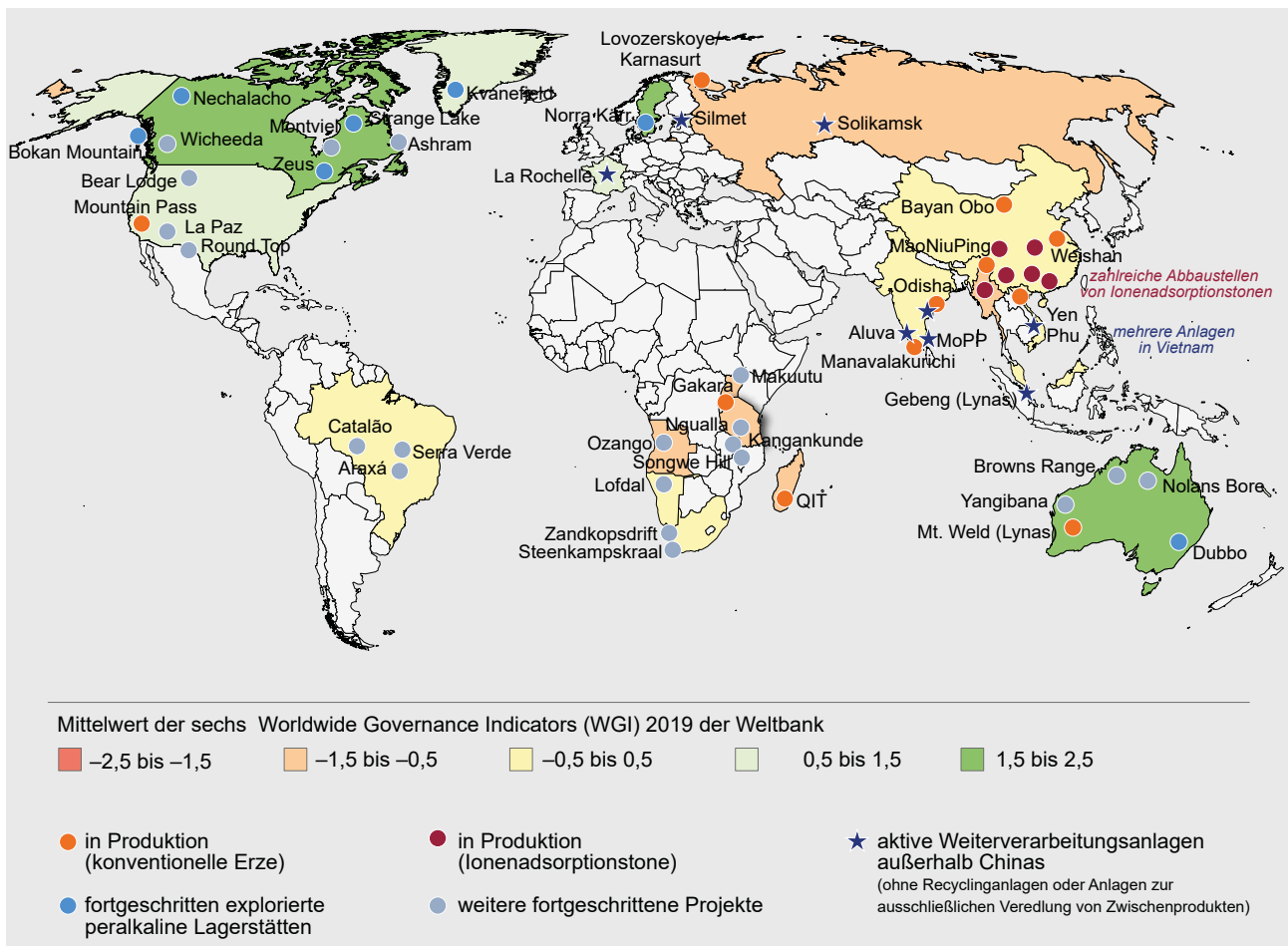


Abb. 4: Produzierende Seltenerd-Bergwerke und bedeutende aktive Weiterverarbeitungsanlagen sowie ausgewählte fortgeschrittene Projekte außerhalb Chinas. Die hinterlegten Farben geben die Bewertung der Regierungsführung in den entsprechenden Staaten wieder, die über den Mittelwert der Worldwide Governance Indicators (WGI) der Weltbank ermittelt wurden. Peralkaline Lagerstätten sind aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für eine potenziell umweltfreundlichere Gewinnung (siehe Text) gesondert gelistet (blau). Das Gebiet der (teilweise illegalen) SE-Gewinnung aus Ionenadsorptionstone in China ist rot schraffiert. Die zahlreichen Schwerminerallagerstätten, in denen nur kleine Mengen SE-haltiger Monazit als Beiprodukt gewonnen werden (insb. in Australien, SO-Asien, Afrika und Brasilien) sind nicht dargestellt. Verändert nach LANGKAU und ERDMANN (2020).

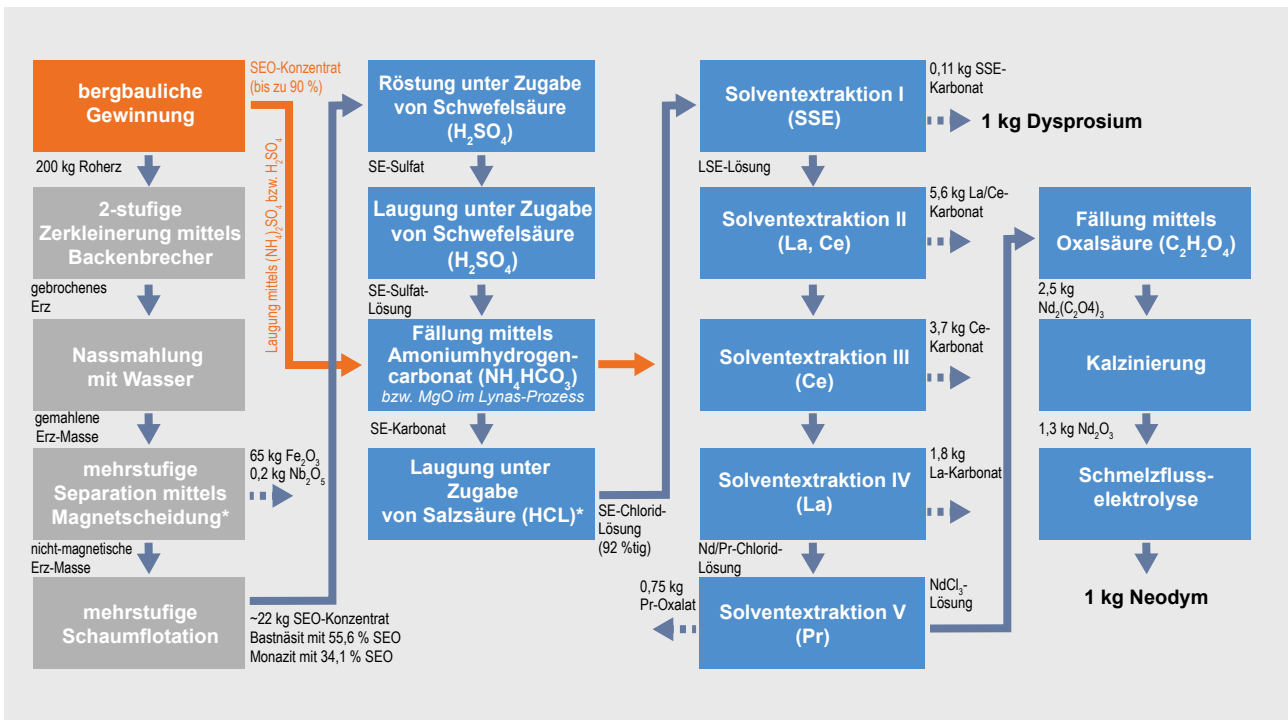


Abb. 5: Prozessschema für die Herstellung von 1 kg Neodym. Die Werte beziehen sich auf die bergbauliche Gewinnung in Bayan Obo und die Weiterverarbeitung in Baotou (China; vereinfachte Massenbilanz basierend auf Literaturdaten für Wertstoffinhalt und Ausbringen). Für die Herstellung von Dysprosium sind weitere, hier nicht aufgeführte Prozessschritte nötig (hauptsächlich für Konzentrate aus Ionenadsorptionstonen relevant). Der Herstellungsprozess von Lynas in Mt. Weld (Australien) bzw. Kuantan (Malaysia) folgt demselben Schema (die mit * markierten Prozessschritte finden hier nicht statt). Bei der Laugung von Ionenadsorptionstonen (orange) sind keine weiteren Aufbereitungsschritte nötig, die grundlegenden Schritte der Weiterverarbeitung sind in der Regel vergleichbar (ggf. sind einzelne Prozessschritte modular angepasst). Verändert nach [5] und [7].

2.3 Weiterverarbeitung

Die Weiterverarbeitung von SE-Konzentraten aus Bastnäsit und Monazit (hier dargestellt für die weltweit bedeutendsten Anlagen in Baotou, China) bzw. aus Ionenadsorptionstonen ist für die meisten grundlegenden Prozessschritte vergleichbar [5, 11] (vgl. Abb.5). Allerdings ist davon auszugehen, dass sich Details der Prozessschritte sowie Effizienz des Einsatzes der Bedarfsmittel in den insgesamt rund 60 chinesischen Weiterverarbeitungsanlagen (davon 50 aktiv) deutlich unterscheiden, allein aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung der Erze.

Das SE-Konzentrat wird getrocknet, anschließend unter Zugabe von Schwefelsäure geröstet („acid roasting“) und dann mit Schwefelsäure aufgeschlüsselt. Die gelösten SE werden mit Ammoniumhydrogencarbonat (NH_4HCO_3) aus der Lauge gefällt und nachfolgend gewaschen und getrocknet. Bei den direkt gelaugten Ionenadsorptionstonen erfolgt die SE-Fällung aus der Lauge mittels NH_4HCO_3 oder Oxalsäure [10]. In einer erneuten Laugung werden die Fällungsprodukte über Zugabe von Salzsäure in eine Chlorid-Lösung mit 92 % SEO-Anteil für die nachfolgende Trennung mittels Sol-

ventextraktion überführt. Die einzelnen SE können dann mit organischen Lösungsmitteln selektiv abgetrennt werden. Dabei müssen mindestens zwölf Extraktionsschritte für jedes SE-Element durchgeführt werden [6]. Potenzielle Verunreinigungen wie Fe oder Th erfordern zusätzliche aufwändige Reinigungsverfahren. Am Ende können so SEO mit einer Reinheit von 99,99 % erzeugt werden.

Für die Herstellung eines reinen SE-Metalls, bspw. Nd oder Dy für die Magnetproduktion, wird nachfolgend die Schmelzflusselektrolyse eingesetzt. Während die Laugungs- und Separationsschritte zur Erzeugung von SE-Oxiden, -Karbonaten, -Chloriden, -Fluoriden oder anderen Verbindungen global durchgeführt werden (wenn auch von China dominiert; s. u.), findet die Elektrolyse zur Reduktion der SEO und zur Herstellung von SE-Metallen derzeit bis auf wenige Ausnahmen ausschließlich in China statt. Nur in Japan, nach China mit der größten SE-Nachfrage und mit einer global bedeutenden Industrie von SE-haltigen Produkten, und in Südostasien (teilweise von japanischen Unternehmen betriebene Anlagen z. B. in Vietnam von Shin-Etsu Chemical) werden SE-Vorprodukte zu hochreinen Oxiden und Legierungen raffiniert. Das britische Unterneh-

men Less Common Metals stellt mit der Produktion von SE-Metallen und Magnetlegierungen (Jahreskapazität ~1.400 t SE-Legierungen für NdFeB-Magnete [2]) in Cheshire, NW-England, eine Besonderheit auf dem sonst dominierenden asiatischen Markt dar.

Die größte und bedeutendste Weiterverarbeitungsanlage für SE-Konzentrate außerhalb Chinas ist die Lynas Advanced Materials Plant in Kuantan, Malaysia, die LSEO aus den SE-Konzentraten von Mt. Weld in Australien herstellt (vgl. Abb. 9 in 5.2). Weitere größere SE-Weiterverarbeitungsanlagen für die Herstellung von SE-Oxiden, -Karbonaten, -Chloriden, -Fluoriden oder anderen Verbindungen befinden sich in Indien (Aluva und MoPP von Indian Rare Earth Ltd. sowie Odisha Rare Earths von Toyota Tsusho Material), Vietnam (drei Anlagen von Vietnam Rare Earths JSC, Vietnam Rare Earth Company und der Thaiduong Gruppe, die auch die Yen Phu Grube betreibt) und Russland (Solikamsk Magnesium Works) sowie in Estland (Silmet von Neo Performance Materials Ltd.) und Frankreich (La Rochelle von Solvay S.A.; Abb. 4).

Generell sind für neu zu errichtende SE-Weiterverarbeitungsanlagen enorme Investitionen für die oben beschriebenen aufwändigen Prozessschritte nötig, was eine wirtschaftlich darstellbare SE-Gewinnung erschwert oder verhindert. Hinzu kommen die für eine Genehmigung kritischen Umweltaspekte, in erster Linie der ordnungsgemäße Umgang mit den teilweise radioaktiven Abfällen.

3 RECYCLING

Neben den positiven ökologischen Aspekten der meisten Recyclingmethoden wie der Vermeidung von radioaktiven Abfällen und der generellen Erhöhung der Ressourceneffizienz, kann eine Rückgewinnung von SE außerhalb Chinas dazu beitragen, die Importabhängigkeit Deutschlands von China zu reduzieren. Derzeit werden in Europa lediglich 3 % der Gesamtnachfrage nach LSE bzw. 8 % nach SSE aus dem Recycling gedeckt [3], die zudem zumindest teilweise aus China stammen. Neben technischen Schwierigkeiten stellen insbesondere die dissipative Verteilung in den unterschiedlichen Anwendungen und die geringe Gesamtmenge bzw. die niedrige Rücklaufquote die größten Herausforderungen für ein wirtschaftliches Recycling dar. SE-haltige Magnete, für die ein Recycling am ehesten wirtschaftlich ist, fallen bisher nur in kleinen Mengen, hauptsächlich von Festplatten und Lautsprechern sowie von Produktionsabfällen der Magnetproduktion an (derzeit z. B. nur 150 t pro Jahr Neodym-Eisen-Bor-haltige Produktions-

und Konsumentenabfälle in Europa [11]). Die gesammelten Magnetabfälle werden in der Regel nach China, Japan, Vietnam und die Philippinen verkauft, wo die meisten industriellen Recyclingverfahren zur Verfügung stehen (in China gab es jahrelang ein Importverbot von SE-Schrotten, das im Jahr 2021 vsl. wieder aufgehoben wird). Die Anlage auf den Philippinen wird von dem deutschen Recyclingunternehmen RockLink GmbH betrieben (die Muttergesellschaft sitzt in Hongkong) und für das Recycling von SE-Magneten zur Erzeugung eines SE-Mischoxids genutzt. Das Material wird zur Weiterverarbeitung nach China verkauft.

Bei dem Recycling von NiMH-Akkumulatoren, für die es eine verhältnismäßig hohe Rücklaufquote gibt, gehen die SE bei den derzeit angewendeten Verfahren oft in der Schlacke verloren, da das Recycling auf die Rückgewinnung von Nickel, Eisen und Kobalt ausgerichtet ist. Größere Bedeutung hat derzeit insb. das Recycling von Leuchtstoffen aus Altlampen, die einen hohen Anteil an schweren Seltenen Erden aufweisen. Allerdings ist die wirtschaftliche Wiedergewinnung der SE auch hierbei herausfordernd. So musste der Chemiekonzern Solvay S.A. das Leuchtstoffrecycling in seinen französischen Anlagen Saint Fons und La Rochelle aus betriebswirtschaftlichen Gründen einstellen [2]. Solvay verfügt mit seinen Anlagen aber weiterhin über das Potenzial, beim SE Recycling aktiv zu werden.

In zahlreichen weiteren Ländern wird die Wiederverwertung von Seltenen Erden vorangetrieben (z. B. von Omega Resources in Quebec, Kanada). Derzeit sind aber nur wenige Unternehmen außerhalb Chinas über den Bau einer Pilotanlage hinausgekommen (s. o.). Mit der stark zunehmenden Verwendung von SE-haltigen Hochleistungspermanentmagneten, in erster Linie in Elektromotoren und Turbinen von Windkraftanlagen, wird zukünftig eine größere Menge SE-reicher Komponenten dem Recyclingmarkt zur Verfügung stehen. Die jährlich in Europa zur Verfügung stehende Rücklaufmenge von NdFeB wird allerdings erst ab 2033 1000 t deutlich übersteigen, bis 2040 aber auf knapp 5.000 steigen, was einer Recyclingrate von gut 20 % entsprechen würde [11].

Für die Wiedergewinnung der SE aus Magneten sind verschiedene Prozessvarianten möglich, deren Vor- und Nachteile in Tabelle 1 dargestellt sind. Aus Perspektive der Nachhaltigkeit besteht ein elementarer Vorteil des SE-Recyclings darin, dass in erster Linie die SE-Elemente bzw. Legierungen wiedergewonnen würden, die auch tatsächlich benötigt werden (z. B. Nd und Dy aus Altmagneten zur Herstellung neuer Magnete). Im Bergbau werden hingegen zwangsläufig auch die SE-Elemente mitgewonnen, für die kein oder nur wenig Bedarf besteht.

ab. 1: Vor- und Nachteile der unterschiedlichen potenziellen Recyclingmethoden für Seltene Erden. Verändert nach [12]

Recyclingmethode	Vorteile	Nachteile
Direkte Wiederverwendung der Magnete	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr geringer Energiebedarf • Keine Chemikalien nötig • Kein Abfall 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur für leicht zugängliche Magnetkomponenten wie aus Windturbinen und größeren Elektromotoren geeignet • Händische Demontage nötig • Stoffströme derzeit zu gering
Wiederaufbereitung von Legierungen zu Magneten mittels Wasserstoff-Versprödung	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Energiebedarf • Kein Abfall • Gut für Magnete aus Festplatten geeignet (da ähnliche Zusammensetzung über langen Zeitraum) 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Variationen in den Abfallströmen möglich • Nicht anwendbar bei oxidierten Magneten
Hydrometallurgische Methoden (elementspezifische Rückgewinnung)	<ul style="list-style-type: none"> • Etablierte Methode der Erzaufbereitung (gleicher Prozess) • Im Prinzip für alle Magnetzusammensetzungen anwendbar • Für oxidierte und nicht oxidierte Legierungen geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Aufwand (analoge Prozessschritte wie bei der Erzaufbereitung) • Hoher Chemikalienbedarf • Große Abwassermenge
Pyrometallurgische Methoden (elementspezifische Rückgewinnung)	<ul style="list-style-type: none"> • Im Prinzip für alle Magnetzusammensetzungen anwendbar • Kein Abwasser • Weniger Prozessschritte als bei der Hydrometallurgie • Direktschmelzverfahren für Erzeugung von Vorlegierungen • Erzeugung von SE-Metallen mittels Flüssigmetallextraktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hoher Energiebedarf • Direktschmelzverfahren und Flüssigmetallextraktion können nicht bei oxidierten Magneten angewendet werden • Das Elektroschlack-Umschmelzverfahren verursacht große Mengen fester Abfälle
Gasphasenextraktion (elementspezifische Rückgewinnung)	<ul style="list-style-type: none"> • Im Prinzip für alle Magnetzusammensetzungen anwendbar • Für oxidierte und nicht oxidierte Legierungen geeignet • Kein Abwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Chlorgasverbrauch • Das bei dem Prozess entstehende Aluminiumchlorid weist eine hohe Korrosivität auf

4 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DES BERGBAUS

Bei den Nachhaltigkeitsaspekten muss zwischen den unterschiedlichen Lagerstättentypen unterschieden werden, auf den der SE-Bergbau erfolgt. Mit einem Beitrag von rund 70 % zur globalen SE-Produktion sind Karbonatite, die in großen Bergwerken gewonnen werden (insb. in China, Australien und den USA), die bedeutendsten konventionellen Erze. Allerdings werden in diesen Lagerstätten bevorzugt LSE produziert. SSE stammen hauptsächlich aus kleineren, teils illegal betriebenen Ionenaabsorptionston-Lagerstätten in Südostasien (in erster Linie Südchina). Zudem werden SE weltweit aus Schwermineralsanden gewonnen, wobei

die radioaktiven Begleitelemente für die Nachhaltigkeitsbetrachtung am bedeutendsten sind.

4.1 Umwelt

Flächennutzung und Rekultivierung

Die im Vergleich zu Massenrohstoffen wie Eisenerz und Kupfer geringe jährliche Fördermenge resultiert in einem absolut betrachtet geringen Flächenverbrauch durch den Bergbau auf SE. Relativ betrachtet, bezogen auf die Jahresproduktion (in t), kennzeichnet die SE-Gewinnung teilweise allerdings einen hohen Flächenverbrauch. Zum einen liegt dies an den niedrigen SE-Inhalten (<0,2 Gew. %) im Zusammenspiel mit ineffizienten Abbaumethoden bei Ionenaabsorptionstonen, zum anderen

an der bevorzugten Gewinnung im Tagebau. Dies verursacht große Abraumengen (Verhältnis vom Abraum zum Erz, z. B. durchschnittlich 8:1 in dem Bergwerk Mt. Pass der wiederum Fläche benötigt, weitere Umweltrisiken mit sich bringt und somit besondere Sicherungsmaßnahmen erfordert. Insbesondere die weltgrößte SE-Lagerstätte Bayan Obo hat einen immensen Flächenbedarf (Abb. 6). Auch wenn dieser in Zusammenhang mit der Eisenerzgewinnung steht, ist die SE-Gewinnung mittlerweile der finanzielle Treiber für die Produktion, sodass dieser bei einer in der quantitativen ökologischen Bewertung üblichen ökonomischen Allokation ein großer Teil des Flächenbedarfs zugeschrieben werden kann (81,5 % nach [13]). Das Hauptabbaugebiet und das östliche Bergwerk erstrecken sich jeweils über ca. 1,5 km², der SEO-Anteil liegt bei rund 6 %. Das in 2006 eröffnete westliche Abbaugebiet umfasst sogar über 5,5 km², weist mit 1,2 – 3,0 % SEO [2] allerdings geringere SE-Gehalte auf und wird hauptsächlich zur Eisenerzgewinnung genutzt [14] (Abb. 6). Die Abraumhalden von Bayan Obo umfassen 11 km² [15]. Auch wenn der lokale Flächenbedarf sehr groß ist, muss beachtet werden, dass in Bayan Obo mit knapp 70.000 t SEO rund 38 % der globalen Bergwerksförderung zur Verfügung gestellt werden und damit der Flächenbedarf im Vergleich zu anderen SE-Gruben oder dem Bergbau auf andere Rohstoffe wie Kupfer nicht gravierend abweicht.

Ionenadsorptionstone werden für die Halden- und Tanklaugung flächendeckend abgetragen. Hierbei erfolgt ein großflächiger Eingriff in den Naturraum, der eine umfassende Renaturierung erfordern würde, was aber

häufig, insb. bei der illegalen Gewinnung (s. o.) nicht erfolgt (Abb. 7). Zudem ist die Kontamination der Böden mit Prozesschemikalien in einigen Gebieten so groß, dass selbst resistente Pflanzen nicht gedeihen [2].

Die mittlerweile dominierende In-situ Laugung von Ionenadsorptionstone weist generell einen drei bis fünffach geringeren Volumenverbrauch auf (~1,1 m³ Tonvolumen werden pro kg SE-Konzentrat benötigt [17]), wobei sich die Bergbaufläche der größten chinesischen Lagerstätten wie Longnan (Jiangxi Provinz) oder Gupo Mountain (Hunan Provinz) immer noch über 35 bzw. 50 km² erstrecken [18]. Zudem wird bei den primitiveren Verfahren die gesamte Deckschicht auf einer Gesamtfläche von 5.000 – 10.000 m² entfernt, um die Ammoniumsulfatlösung direkt auf die Tonschicht sprühen zu können. Die für dieses Verfahren nötigen Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 70 – 80 cm werden in einem 5 x 5 m Raster auf 1,5 – 6 m abgeteuf. Die SE-Konzentrate werden direkt aus den Bohrlöchern geschöpft. Bei unsachgemäßer Anwendung insb. im Rahmen der illegalen Gewinnung kommt es neben der Bodendegradation und der Verunreinigung des Grundwassers (s. u.) immer wieder zu Erdbeben (über 100 wurden in der Ganzhou Region in China gemeldet [19]). Modernere Verfahren, die aber noch verhältnismäßig selten angewendet werden, benötigen weniger und kleinere Bohrlöcher, da hier die Laugungslösung nicht in den Bohrlöchern, sondern in einem Auffangbecken gesammelt werden [20] (Abb. 8). Hier muss auch die Vegetationsdeckschicht nur punktuell abgetragen werden. Allerdings muss die Lagerstätte für diesen



Abb. 6: Satellitenaufnahme von Bayan Obo, Innere Mongolei, China. Die Gesamtfläche des Bergbauareals umfasst 18 x 2 – 3 km. Die in 2006 eröffnete westliche Abbaufläche weist mit 1,2 – 3,0 % SEO deutlich geringere SE-Gehalte als die östl. und Hauptabbaufläche (~6 % SEO; [2]) auf (© Google Earth).

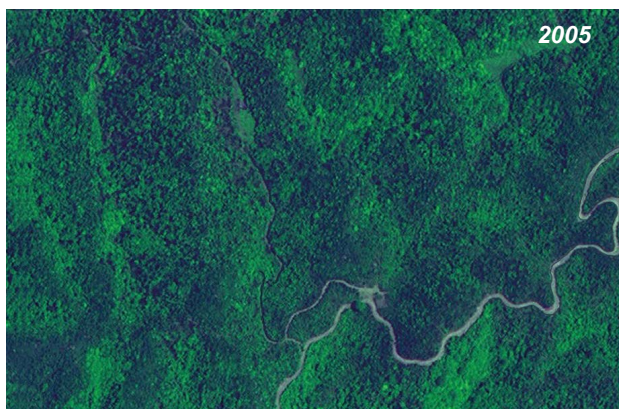


Abb. 7: Flächeninanspruchnahme einer Ionenadsorptionstonlagerstätte in Ganzhou, Jiangxi Provinz, China zwischen 2005 und 2009 (verändert nach [16]).

Prozess eine gewisse Topographie aufweisen, damit die Laugungslösung an den niedrigeren Punkten aufgefangen werden kann.

Wasserbedarf

Daten zum Wasserbedarf liegen meist nur für den Gesamtprozess für die Herstellung von SEO vor. Generell ist der Wasserverbrauch für die bergbauliche Gewinnung deutlich geringer als für die Aufbereitung von Bastnäsit und Monazit zum SE-Konzentrat [21] (s. u.). Nichtsdestotrotz wird der Wasserbedarf des Mountain Pass Bergwerks für eine Senkung des Grundwasserspiegels um 30 m verantwortlich gemacht [22]. Die Anlage hat die Ressourceneffizienz nach der Wiedereröffnung 2009 (s. o.) jedoch deutlich erhöht. So können rund 2/3 des eingesetzten Wassers, ebenso wie ein Großteil der Prozesschemikalien, durch Entwässerungsmaßnahmen der Rückstände wiedergewonnen werden. Der Verbrauch der Frischwassermenge konnte im Vergleich zu 2002 um 90 % reduziert werden.

Bei Ionenadsorptionstonen wird im Anschluss an die Laugung mit Ammoniumsulfat eine große Menge Frischwasser benötigt, um die SE-haltige Lösung herauszuwaschen (Abb. 8). Insgesamt (inkl. Weiterverarbeitung) wird für die Herstellung von 1 kg SEO aus Ionenadsorptionstonen mit durchschnittlich 2.300 l mehr als dreimal so viel Wasser benötigt wie für die Herstellung von 1 kg SEO aus Bastnäsit und Monazit in Bayan Obo/Baotou (700 l) [13].

Bergbauliche Rückstände und Abwasser

Vor der Schließung im Jahr 2002 wurden in dem SE-Bergwerk Mountain Pass (USA) über 3.000 l salzhaltige, radioaktive Abwasser pro Minute in unzureichend abgedichtete Absatzbecken entsorgt. Aus undichten Pipelines austretende Schadstoffe waren der Hauptgrund für die (vorübergehende) Schließung (s. o.). Heute gehört das Bergwerk Mountain Pass mit einem größtenteils

geschlossenen Wasserkreislauf zu den Positivbeispielen der SE-Gewinnung [23].

Bei der In-situ Laugung von Ionenadsorptionstonen werden je nach Lagerstättengröße rund 450 m³ Laugungslösung mit 2 – 5 % Ammoniumsulfat pro Tag in den Untergrund injiziert. Bei ineffizienter Rückgewinnung besteht die Gefahr der Grundwasserverunreinigung. Je nach Betreiber wird von einer Rückgewinnungsquote von 50 – 85 % ausgegangen [13]. So wurden aufgrund unsachgemäßer Handhabung der Laugungslösung im umgebenen Grundwasser erhöhte Konzentrationen von Sulfat (>5.000 mg/l; Grenzwert nach deutscher Trinkwasserverordnung 250 mg/l) und Ammoniak (> 150 mg/l; Grenzwert 0,5 mg Ammonium/l) nachgewiesen [15]. Die Abwässer weisen je nach Reinigungsmaßnahmen durchschnittlich 300 mg/l Ammoniak, ohne Behandlung bis zu 4.000 mg/l auf [13]. Allein in der südchinesischen Stadt Ganzhou wurden über 300 stillgelegte SE-Gewinnungsstätten mit 191 Mio. t bergbaulicher Rückstände in Form von kontaminierten Böden registriert [24].

Durch Vergesellschaftung der SE mit Radionukliden, insb. Uran und Thorium, z. B. 320 mg Th pro kg Gestein in Bayan Obo [14], sind die bergbaulichen Rückstände (10 Mio. t jährlich in Bayan Obo) je nach Lagerstättentyp radioaktiv belastet.

Da in Bayan Obo bereits seit 1957 Bergbau betrieben wird, das Ausbringen bis 2005 aber unter 10 % lag (heute bei rund 60 %), gibt es noch ein großes SE-Potenzial in den älteren Halden [25].

Energie und Emissionen

Auf die bergbauliche Gewinnung bis zur Herstellung eines Konzentrates entfallen weniger als 10 % des Gesamtenergiebedarfs der SEO-Erzeugung und somit auch nur ein geringer Teil der Emission von Treibhausgasen. So werden beispielsweise pro t SEO aus Bayan Obo rund 2,4 t CO₂-Äquivalente im Bergbau und



Abb. 8: Auffangbecken der In-situ-Laugung von Ionenadsorptionstonen in Südchina ([20]; Foto von Alain Rollat, mit freundlicher Genehmigung).

37 t CO₂-Äquivalente bei der Weiterverarbeitung emittiert [26], Lynas Corp. gibt die CO₂-Emissionen für den Gesamtprozess bis zum SEO mit 30 t CO₂ pro t SEO an [27]. Neben dem Energiebedarf der Maschinen und Fahrzeuge beim Abbau liegt der hauptsächlich Verbrauch (rund 2/3) bei der Zerkleinerung der Erze für die Konzentrat-Herstellung (0,11 – 0,28 GJ pro t Erz in Bayan Obo [28]). Lynas gibt den Gesamtenergiebedarf für sein Mt. Weld Bergwerk mit 670.000 GJ zwischen Juli 2019 und Juni 2020 an [2]. Unter Berücksichtigung der Produktion (rund 20.000 t SEO), des durchschnittlichen SEO-Inhaltes der Erze (5,4 %) sowie des Ausbringens (~70 %) liegt der Bedarf pro Tonne gefördertem Erz bei rund 1,27 GJ. In dem Bergwerk Mountain Pass konnte der Strombedarf nach Betreiberangaben dank umfangreichen Energieeffizienzmaßnahmen um 70 % gesenkt werden. Bei der Laugung von Ionenadsorptionstonen wird Energie hauptsächlich für Bohrungen und Pumpen benötigt. Der Energiebedarf ist hier im Vergleich zur Gewinnung aus Festgestein, wo eine energieaufwändige Zerkleinerung notwendig ist, wesentlich niedriger.

Die Abbaumethodik der SE-Gewinnung aus Festgestein im Tagebau mit Bohren, Sprengen, Verladen und Transportieren hat ein großes Staubpotenzial. Dieses wird in ariden Gebieten wie in Bayan Obo in der Inneren Mongolei, China, noch verstärkt, wo auch aufgrund fehlender Sprinkleranlagen, 0,8 kg Staub pro t bewegten Gesteins entstehen [7]. Aufgrund der geringen Vegetation und technischer Versäumnisse sind die Halden oft unzureichend abgedeckt, was eine massive Staubentwicklung bedingen kann. Die Stäube weisen erhöhte Gehalte an Quecksilber, Arsen, Blei, Fluoride, Uran, Thorium und Asbestmineralen auf. Auch die großflächige Abtragung der Deckschicht bei Ionenadsorptionstonen weist sowohl im Zuge des Prozesses als auch in dem Verbleib vegetationsfreier Flächen ein erhöhtes Potenzial zur Staubentwicklung auf.

4.2 Soziale und ökonomische Aspekte

Aufgrund der global betrachtet relativ geringen Fördermenge und der Konzentration des (industriellen) Bergbaus auf wenige Standorte (vgl. Abb. 4) hat der SE-Bergbau nur auf lokaler Ebene soziale und sozio-ökonomische Effekte. In Australien, das größte Förderland außerhalb Chinas, spielt die SE-Gewinnung im Vergleich zu anderen Bergbauprodukten nur eine untergeordnete Rolle und auch die Anzahl der Beschäftigten in dem Mt. Weld Bergwerk ist für ein industrialisiertes Land unbedeutend.

Verschiedene (allerdings unbestätigte) Quellen berichten von einer deutlich erhöhten Sterberate aufgrund von Lungenkrebs bei Bergarbeitern in Bayan Obo, China. Die Bergarbeiter in der Region sind einer chinesischen Studie zufolge einer zusätzlichen jährlichen radioaktiven Belastung von 0,24 bis 0,7 Millisievert (mSv) ausgesetzt, die Bevölkerung in Bayan Obo zusätzlich 0,044 mSv pro Jahr [14]. Dieser Wert relativiert sich allerdings, wenn man bedenkt, dass die natürliche Strahlenexposition beispielsweise in Deutschland bei rund 2,4 mSv pro Jahr liegt. Die Gesundheitsgefahr besteht mutmaßlich in den schwermetallhaltigen, teils radioaktiven, lungengängigen Stäuben, die im Produktionsprozess entstehen.

Der Abbau von Monazit aus Schwermineralseifen birgt u. a. durch die verhältnismäßig hohe Strahlenbelastung des Abraums erhöhtes Konfliktpotenzial. So wird eine weitere Expansion des Bergbaus in Kerala, Indien, aufgrund von zahlreichen Protesten möglicherweise verhindert [2].

Der teilweise illegal betriebene Laugungsbergbau auf Ionenadsorptionstonen in Südchina ist eine wichtige Einnahmequelle für viele Bergleute, birgt aber auch ein erhöhtes Konfliktpotenzial. Zum einen aufgrund der oben beschriebenen Umweltauswirkungen, zum anderen wird von mafösen Strukturen bei der Gewinnung mit bewaffneten Sicherheitskräften und Zusammenarbeit mit korrupten lokalen Parteifunktionären berichtet [23]. Durch die Umsetzung radikaler Maßnahmen durch die chinesische Zentralregierung konnte die illegale Gewinnung aktuell deutlich eingedämmt werden (siehe 4.3). Illegaler Abbau von Ionenadsorptionstonen, u. a. zur Finanzierung von bewaffneten Gruppen, wird zudem aus Myanmar berichtet (s. u.).

4.3 Governance

Insbesondere aufgrund der hohen Länderkonzentration der bergbaulichen Gewinnung und der noch stärkeren Konzentration bei der Weiterverarbeitung aus China gelten Seltene Erden als Rohstoff mit dem größten Versorgungsrisiko [3]. Die Regierungsführung in China auf Basis der Worldwide Governance Indicators (WGI) der Weltbank wird als mäßig kritisch eingeschätzt [29] (vgl. Abb. 4). Das „Natural Resource Governance Institute“ bewertet die staatliche und industrielle Kontrolle des Rohstoffsektors in China als „schwach“, insb. bei den Indikatoren Wertrealisierung, Ertragsmanagement und Schaffung eines förderlichen Umfelds für die Gewinnung. Hier bezieht sich die Bewertung allerdings in erster Linie auf den Kohlebergbau. In den nach China bedeutenden SE-Förderländern Australien und USA wird die Regierungsführung als unkritisch eingestuft, während die WGI für Indien, Russland und Myanmar negativer ist. Die peralkalinen SE-Reserven und Ressourcen, bei deren Gewinnung eine verhältnismäßig geringe radioaktive Belastung anfallen würde, liegen mit Blick auf die WGI in unkritischen Staaten (vgl. Abb. 4).

Ausufernde Überkapazitäten für die Weiterverarbeitung von Seltenen Erden (die Kapazität der 58 Weiterverarbeitungsanlagen lag im Jahr 2020 bei 307.000 t SEO bei einer offiziellen Bergbauquote von 140.200 t SEO [2]) sind bzw. waren der Treiber für eine massive illegale bergbauliche Gewinnung, insbesondere der werthaltigen SSE aus Ionenadsorptionstonen. Daher strebt die chinesische Regierung eine weitreichende Konsolidierung des chinesischen SE-Marktes an. Im Zuge dessen wurden über eine Quotenregelung die Produktionsrechte an lediglich sechs SE-Konzerne in China aufgeteilt. Die Kapazität für die Weiterverarbeitung (auch für Importe von SE-Konzentraten) soll dabei auf 200.000 t SEO pro Jahr zurückgefahren werden (hauptsächlich durch die Stilllegung von veralteten Anlagen), sodass bei einer Quote von 140.000 t für die bergbauliche Gewinnung nur noch Spielraum für die Verarbeitung von SE-Konzentrat-Importen bleibt. Die zwischen den 6 Unternehmen aufgeteilte offizielle Weiterverarbeitungsquote liegt sogar bei nur 135.000 t SEO pro Jahr. Diese Maßnahme zielt hauptsächlich darauf ab, die Umweltschäden, die bei der illegalen Gewinnung aus Ionenadsorptionstonen in Südchina entstehen, einzudämmen. Eine effektive Umsetzung der Konsolidierung des chinesischen SE-Marktes ist der größte Hebel, um die Umweltauswirkungen der SE-Gewinnung zu reduzieren [4]. Dass diese Maßnahmen weiterhin nötig sind, zeigen aktuelle Berichte über wiederholte Verstöße gegen die Umweltgesetzgebungen z. B. durch einen der sechs großen SE-Konzerne (Chinalco/Aluminium Corp. of China), dem ein mangelhaftes Umweltmanagement

u. a. im Umgang mit den festen Abfällen sowie der Betrieb technisch veralteter und illegaler Produktionsanlagen vorgeworfen wird [30]. Auf der anderen Seite zeigen Berichte in chinesischen Medien [31,32], dass von dem verantwortlichen Umweltministerium (Ministry of Ecology and Environment (MEE)) verstärkt durchgegriffen wird, u. a. auch gegen China Minmetals Corp., einem weiteren großen Staatsbetrieb mit einer der sechs SE-Lizenzen, der wiederholt gegen Auflagen verstoßen hat. So haben laut Presseberichten Inspektoren des MEE im Rahmen des 2016 angestoßenen Umweltschutzprogrammes bis September 2020 über 6.000 Beschwerden in Zusammenhang mit der SE-Gewinnung bearbeitet, 6,85 Mio. USD Strafzahlungen verhängt und 30 Personen in Gewahrsam genommen [30]. Die seit 2017 stark steigenden chinesischen Importe von SE-Konzentraten aus dem benachbarten Myanmar (vgl. 2.2) werden, zumindest teilweise, neben der offiziellen Quote in den angrenzenden südchinesischen Provinzen weiterverarbeitet. Es wird auch vermutet, dass illegal in China abgebaute SE erst nach Myanmar exportiert werden, um anschließend „gewaschen“ wieder importiert zu werden, was den sprunghaften Anstieg der Exporte Myanmars erklären würde. Die Regierung in Myanmar hat in einigen Grenzregionen wie in dem Kachin-Staat oder dem autonomen Wa-Staat (Teil des Shan-Staates) keinen oder nur begrenzten Einfluss und somit auch keine Kontrolle über die u. a. dort stattfindende SE-Produktion. Da die Erlöse des SE-Exports nach China mutmaßlich auch zur Konfliktfinanzierung eingesetzt werden [33] (ähnlich wie bei der Zinn-Gewinnung im Wa-Staat [34]), ist der Bezug von SE-Konzentraten aus Myanmar aus Nachhaltigkeitssicht als problematisch einzustufen. Die Auswirkungen der politischen Unruhen im Zuge des Militärputsches Anfang 2021 sind noch nicht absehbar, haben aber potenziell Auswirkung auf die globale Versorgung mit SSE [33].

Derzeit gibt es keinen umfassenden internationalen Nachhaltigkeitsstandard für die SE-Branche. Der auf globaler Ebene dominierende chinesische SE-Sektor, der Hauptadressat für ein Zertifizierungssystem wäre, ist geprägt von geringer Transparenz. Nur wenige Maßnahmen wie die Veröffentlichung der Namen aller offiziellen SE-Produktionsanlagen sowie das System der „Special Invoices“ zur Eindämmung der illegalen Abbauproduktionen haben sich bewährt und werden großflächig in China von den dafür lizenzierten SE-Unternehmen umgesetzt. Private (illegale) Betreiber können somit keine offizielle Rechnung mehr ausstellen. Ansonsten werden Nachhaltigkeitszertifizierungen bisher ausschließlich auf bilateraler Ebene in der Beziehung Lieferant-Kunde durchgeführt, auch wenn geforderte Zertifizierungen wie z. B. EcoVadis

(<https://ecovadis.com/de/>) in China an ihre Grenzen bzgl. Transparenz stoßen.

Die Canadian Standards Association (CSA Group) strebt die Entwicklung eines ISO-Standards (ISO/TC 298) für den Herkunftsnachweis und die Nachverfolgbarkeit von SE-Produkten an [35], in erster Linie um die Verwendung von illegal produzierten SE-Konzentraten und Metallen zu unterbinden. Dies erweist sich aber auf dem komplexen, von vielen Akteuren geprägten SE-Markt als schwierig. Zudem wird die für den ISO-Standard eingesetzte Arbeitsgruppe von China dominiert, das die Absicht verfolgt, chinesische Standards zur Grundlage für die internationalen Standards zu machen.

Das im 13. Fünfjahresplan verankerte chinesische Green Mines Programm für einen nachhaltigeren Bergbau beinhaltet neun Branchenstandards, darunter die "Spezifikation für den Bau von Green Mines der Nicht-eisenmetallindustrie". SE-Bergwerke werden nach derzeitigen Erkenntnissen trotz hunderter Modell- und Demonstrationsprojekte allerdings nicht adressiert und laut Branchenexperten dient das Programm eher als Feigenblatt für den chinesischen Bergbau im internationalen Wettbewerb.

Nichtsdestotrotz wachsen die Anforderungen von internationalen Downstream-Akteuren an Transparenz und Nachhaltigkeit in der SE-Lieferkette und der Druck auf chinesische SE-Unternehmen, nach einheitlichen Standards zu produzieren, nimmt zu. In diesem Zuge soll in China, gesteuert von der Chinesischen Handelskammer der Metall-, Mineralien- und Chemieimporteure und -exporteure (CCCMC) im Auftrag bzw. unter Duldung der relevanten Ministerien ein SE-Standard unter Einbeziehung der sechs großen SE-Staatsunternehmen aufgebaut werden. CCCMC will mit der Standardentwicklung auch internationalen Standardinitiativen zuvorkommen, damit der Druck zur Standardeinhaltung nicht vom Ausland kommt (siehe auch 5.3).

5 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DER WEITERVERARBEITUNG

5.1 Umwelt

Die bedeutendsten Weiterverarbeitungsanlagen in China befinden sich in Baotou (14 von insgesamt 50 aktiven Anlagen), in denen die Erze der weltgrößten SE-Lagerstätte Bayan Obo aufbereitet und weiterverarbeitet werden. Zudem befinden sich zahlreiche Weiterverarbeitungsanlagen in Südchina, in denen auch die

SE-Konzentrate aus Ionenadsorptionstonen separiert werden. Die wichtigste SE-Weiterverarbeitungsanlage außerhalb Chinas liegt in Kuantan, Malaysia, wo die SE-Konzentrate des australischen Mt. Weld-Bergwerks zu SEO weiterverarbeitet werden.

Wasserbedarf, Abwasser und feste Rückstände

Aufgrund der aufwändigen, mehrstufigen Weiterverarbeitung der SE-Konzentrate (vgl. Abb. 5), ist der Wasserbedarf im Vergleich zu vielen anderen Metallen sehr hoch. Besonders intensiv ist der Wasserverbrauch beim Waschen nach dem Rösten. Der durchschnittliche Gesamtwasserbedarf (inkl. bergbauliche Gewinnung) für die Herstellung von 1 kg SEE liegt bei 700 l in Bayan Obo/Baotou, hochgerechnet auf stark nachgefragte und dementsprechend teurere SEE wie Nd sogar bei 1.230 Liter pro kg für den Gesamtprozess, wovon ein Großteil auf die Weiterverarbeitung entfällt [13,36].

Die weltgrößte SE-Produktionsstätte Baotou in der Inneren Mongolei, China, liegt in einem ariden Gebiet. Als Wasserquelle für die SE-Weiterverarbeitung dient der Gelbe Fluss, der zweitgrößte Fluss Chinas. Die zentrale Absetzanlage nimmt eine Fläche von 10 km² ein und der mehrschichtige Damm des Absatzbeckens ist rund 30 m hoch [37].

Bei der Weiterverarbeitung von SE-Konzentraten können bei Verwendung von konventioneller Technik pro t produzierter SEO 200 m³ säurehaltiger Abwässer, 2.000 t Schlamm und 1,4 t feste radioaktive Abfälle entstehen [38,39]. In über 50 Jahren Betriebsdauer sind so 160 Millionen t fester Abfälle und 17,5 Millionen m³ Abwässer entstanden [37]. Die festen Abfälle (1,4 t pro t SEO) enthalten neben Uran das insb. in Monazit enthaltene, aber nicht gewonnene Thorium (Durchschnittsgehalt in den Tailings 5 Gew. % [15]) und übersteigen mit 80.000 – 200.000 Bq/kg z. T. die Radioaktivität von als schwach radioaktiv einzustufendem Abfall. In den Abwässern sind zudem Schwefelsäure sowie Flusssäure enthalten, die im Weiterverarbeitungsprozess verwendet werden. Mit der Umsetzung von strengeren Umweltauflagen im Zuge der Konsolidierung des chinesischen SE-Marktes wird erwartet, dass neue Technologien eingesetzt werden, die die säurehaltigen Abwässer soweit wie möglich im Kreislauf führen und den Eintrag in die Absetzanlage reduzieren. Ob und mit welchem Erfolg diese Maßnahmen umgesetzt werden, ist nicht bekannt.

Aufgrund der hohen Verdunstungsrate unter den ariden klimatischen Verhältnissen der Inneren Mongolei erhöht sich die Konzentration der in den Abwässern gelösten Feststoffe immer weiter. Studien deuten darauf hin, dass die Basis der Absetzanlage durchlässig für Sicker-

wasser ist und es somit zu einer dauerhaften Kontamination des 10 km südlich gelegenen Gelben Flusses kommen könnte [7]. Um einem Überlauf vorzubeugen, wird darüber hinaus berichtet, dass temporär Abwasser aus dem Absatzbecken direkt in den Gelben Fluss geleitet wurde. Sorgen über massive Umweltschäden bei einem Dammbbruch, der eine weitreichende Kontamination des Gelben Flusses zur Folge hätte, wurden auch von lokalen Behördenvertretern geäußert [37]. Es wird angenommen, dass die strengeren Umweltauflagen zu einer Verbesserung der Situation beigetragen haben, Nachweise hierfür liegen aber nicht vor.

Mit Blick auf die SE-Weiterverarbeitungsanlage in Kuantan, Malaysia, wurde 2012 kurz nach der Eröffnung von einer malaysischen Bürgerinitiative die Emission von blei-, arsen- und salzhaltigen Abwässern in einen Fluss angeprangert [40]. Generell besteht während der Monsunzeit eine erhöhte Überschwemmungsgefahr von Rückständen und damit das Risiko von Austritten der Gefahrstoffe. Besondere Sicherheitsstandards sind in erster Linie für die Lagerung des sogenannten „Water-Leach-Purification-Waste“ nötig, ein Eisenphosphat, von dem jährlich 91.600 m³ anfallen und das als „Naturally Occurring Radioactive Material“ (NORM) eingestuft wird. Laut dem Betreiber Lynas Rare Earth Ltd. hat das Material die gleiche (verhältnismäßig geringe) Radioaktivität (6 Bq/g) wie die Erzkonzentrate und das umfassende Umwelt-Monitoring des nationalen Atomic Energy Licensing Board (AELB) zeige keine Zunahme in der Hintergrundstrahlung [41]. Die International Atomic Energy Agency (IAEA) hält die Risiken für Natur und Bevölkerung für relativ gering [42]. Nichtsdestotrotz wird Lynas bis 2025 die ersten Stufen der Weiterverarbeitung (Cracking und Laugung) auf politischen Druck nach Kalgoorlie in Westaustralien rund 300 km von dem Mt. Weld Bergwerk entfernt verlegen.

In Bukit Merah, Perak, Malaysia sind bereits zwischen 1975 und 1994, ausgehend von der SE-Gewinnung aus Monazit- und Xenotim-führenden Beiprodukten der regionalen Zinnseifen, größere Mengen radioaktiver Reststoffe angefallen (2.250 t pro Jahr mit 328 t ThO₂ und 13 t UO₂), die aufgrund eines unzureichenden Abfallmanagements des Betreibers Asian Rare Earth, bei dem die japanische Firma Mitsubishi Kasei Hauptaktionär war), zu einem der größten Sanierungsfälle für radioaktiven Abfall in Südostasien geworden sind [23] (siehe auch 5.2.).

Energiebedarf und Treibhausgase

Die mehrstufige Separation und Reduktion der SE hat einen enormen Energiebedarf, der auch deutlich über dem Bedarf des Abbaus und der Aufbereitung liegt. So werden für Bergbau und Aufbereitung in Bayan Obo für

1 t SE-Inhalt 6 GJ benötigt (in Mountain Pass sind es nur 1,7 GJ), für die Solventextraktion 16 – 23 GJ und für die abschließende Reduktion mittels Elektrolyse sogar 38 – 48 GJ [28]. Die mit der Weiterverarbeitung verbundenen CO₂-Emissionen in Bayan Obo liegen bei rund 38 t je t SEO [26], auch bedingt durch die hauptsächlich aus Kohle bereitgestellte Energie in China. Im Vergleich: die Produktion von 1 t Kupfer verursacht im Durchschnitt eine CO₂-Emission von 2,6 t, hat aber im Vergleich zu Nd auch nur rund ein Zehntel des Wertes.

Auch wenn der Energiebedarf für die Produktion von SE-Metallen hoch ist, ist ihre Produktion aufgrund der schlechten Substituierbarkeit unerlässlich. Da sie insbesondere in Offshore-Windkraftanlagen und Elektromotoren zum Einsatz kommen, überwiegt auf den gesamten Lebenszyklus gesehen ihr positiver Beitrag zur Energiewende. Dennoch sollte mit Blick auf den stark steigenden Bedarf eine energieeffizientere und klimaschonendere Gewinnung angestrebt werden.

Weitere Emissionen

Pro Tonne in Baotou produzierten SEO können bis zu 63.000 m³ Abgase entstehen (Kohlenmonoxid, Schwefeldi- und trioxid [38]). Freigesetzte Aerosole enthalten Schwefel- und Flusssäure. Eine effiziente Filteranlage war lange Zeit nicht vorhanden, es ist aber davon auszugehen, dass im Zuge der chinesischen Konsolidierung des SE-Marktes die Auflagen für die verbleibenden SE-Anlagen eine Aufrüstung der Technologie vorsehen. Generell sind für eine Senkung der irreversiblen Verluste bei der Weiterverarbeitung und somit einer Erhöhung der sogenannten Exergie-Effizienz alternative Technologien insb. für das Rösten und die Fällung erstrebenswert [43]. Auch das in Baotou angesiedelte weltgrößte Institut zur SE-Forschung arbeitet an Innovationen zur Effizienzsteigerung. Es ist allerdings nicht bekannt, in welchem Umfang mittlerweile neue, effizientere Technologien eingesetzt werden.

5.2 Soziale und ökonomische Aspekte

Langanhaltende soziale Konflikte in Zusammenhang mit der Weiterverarbeitung von SE-Konzentraten gibt es in Kuantan, Malaysia, aufgrund der radioaktiven Rückstände des 2012 aufgenommenen Betriebes der Anlage (Abb. 9). Bereits vor der Eröffnung bildete sich die Bürgerinitiative SMSL (Save Malaysia, Stop Lynas) und in Kuantan kam es zu Protesten von rund 6.000 Bürgern. Kurz nach Inbetriebnahme protestierten nach SMSL Angaben 20.000 Menschen in Kuala Lumpur gegen die Anlage und Ende 2013 wurden von SMSL 1,3 Mio. Unterschriften gegen einen Weiterbetrieb gesammelt. Nach langen politischen Diskussionen wurde

2019 dem lokalen Betreiber Lynas Rare Earth Ltd. von den malaysischen Behörden eine Frist zur Problemlösung, wie mit den Rückständen umgegangen werden soll, gesetzt, andernfalls sollte die Konzession entzogen werden. Auch wurde eine Rückführung der radioaktiven Reststoffe in das Herkunftsland Australien (die zu verarbeitenden Konzentrate stammen aus dem Mt. Weld Bergwerk) ins Spiel gebracht, was von der australischen Regierung vehement abgelehnt wurde, aber auch nach der Basler Konvention, die den Export radioaktiver Abfälle untersagt, nicht möglich wäre. Im Gegensatz zu den Betreibern der chinesischen SE-Anlagen bietet Lynas Zugang zum Umwelt-Monitoring seiner Weiterverarbeitungsanlage in Kuantan, die von einer malaysischen Kontrollstelle (AELB) überwacht wird [41]. Inzwischen plant Lynas eine SE-Anlage für die ersten Schritte der Weiterverarbeitung in Kalgoorlie, Australien, knapp 300 km südwestlich des Mt. Weld Bergwerks.

Auf der anderen Seite konnte auch aufgrund der SE-Weiterverarbeitung von Lynas ein moderner Industrie-

park in Kuantan weiter etabliert werden, der Beschäftigung in die Region brachte.

Baotou in der Inneren Mongolei gehört nach einer Erhebung von 2012 durch die Erträge der Rohstoffgewinnung zu den 20 wohlhabendsten Städten Chinas. Die weltweit größte SE-Aufbereitungs- und Weiterverarbeitungsanlage hat Arbeitsplätze im Bergbau sowie der Weiterverarbeitung und einen vergleichsweise hohen Lebensstandard in der Region geschaffen. Allerdings gelten die positiven Effekte nicht für die angrenzende Landwirtschaft. Das Umweltbüro in Baotou stellte 2002 fest, dass aufgrund erhöhter Werte von Sulfat, Chlorid und Fluorid in den Brunnen und erhöhter Strahlungswerte in der Umgebung das direkt am westlichen Rand des Absatzbeckens von Baotou gelegene Dorf Dalahai nicht für menschliches Leben geeignet sei [15]. Die landwirtschaftlichen Erträge der umliegenden Felder sanken bereits seit den 1970er Jahren und liegen auch heute deutlich unter der üblichen Produktionsmenge bzw. werfen gar keinen Ertrag mehr ab. Bei den Nutztieren wird von Mutationen und Vergiftungen berichtet [37].



Abb. 9: Lynas Advanced Materials Plant in Kuantan, Malaysia. Anlage zur Fällung der Seltene Erden (© BGR).

Das Dorf Xinguang Sancun nördlich der Absetzanlage haben innerhalb von zehn Jahren 2.800 der 3.000 Bewohner verlassen. Erst später wurden aus einem Kompensationsfond zwar Wohnblöcke für Umsiedlungsmaßnahmen errichtet, diese standen aufgrund von Unstimmigkeiten mit der Bevölkerung zur Kostenbeteiligung allerdings leer [37]. Auch wenn die mittlerweile umfassende chinesische Umweltgesetzgebung das „polluter pays principle“ vorsieht, gibt es für betroffene Bürger keinen effektiven Beschwerdemechanismus, um die jeweiligen Interessen geltend zu machen.

5.3 Governance

Im Zuge der Konsolidierung des chinesischen SE-Marktes werden die Weiterverarbeitungskapazitäten in China von staatlicher Seite drastisch reduziert (vgl. 4.3). Wie aktuelle Fälle von Umweltverschmutzung und illegal errichteten Weiterverarbeitungsanlagen selbst eines großen und für die SE-Gewinnung lizenzierten Staatsbetriebes zeigen (Chinalco/Aluminium Corp. of China; vgl. 4.3. [30]), ist die konsequente Überwachung und Sanktionierung von staatlichen Kontrollbehörden elementar für eine nachhaltige Ausrichtung des chinesischen SE-Marktes aber auch für ein „Level Playing Field“ bei der globalen SE-Produktion.

Die unter 5.2 beschriebene Handhabung der Reststoffe in Kuantan, Malaysia, sowie vorherigen Probleme in Malaysia (Bukit Merah) beleuchtet das Problem des „burden shifting“ bzw. des „pollution export“ aus Industrienationen in Länder mit geringeren Umweltstandards (so wie es lange auch für China galt und teilweise noch gilt) und einer oft einhergehenden schwächeren Regierungsführung (vgl. Abb. 4). Globale Nachhaltigkeitsinitiativen mit freiwilligen oder verpflichtenden ökologischen und sozialen Standards wurden größtenteils ausgehend von Unternehmensinitiativen aus westlichen Ländern etabliert. Auch wenn sie inzwischen globale Verbreitung haben, spielen sie in China, dem Hauptproduzenten von SE, bisher kaum eine Rolle. Nachhaltigkeitszertifizierungen werden, wenn überhaupt, nur auf bilateraler Ebene in der Beziehung Lieferant-Kunde durchgeführt.

Allerdings ist auch in China ein Umdenken zu beobachten. So ist beispielsweise Xiamen Tungsten Co., Ltd (XTC), eines der sechs großen Staatsunternehmen mit einer SE-Förder- und Weiterverarbeitungsquote, Mitglied der Responsible Minerals Initiative (RMI). Auch wenn hier der Hauptgrund in der (erzwungenen) Zertifizierung für die Wolfram-Produktion liegt (im Zuge der EU-Konfliktmineralienverordnung bzw. dem US Dodd-Franc-Act), wird darüber hinaus auf internationale Anforderungen nach Transparenz und Nachhaltigkeit

auch im SE-Sektor reagiert. So soll ein SE-Standard unter Einbeziehung der sechs großen SE-Staatsunternehmen aufgebaut werden, der neben dem Bergbau (vgl. 4.3) auch die weiterverarbeitenden Betriebe einschließen würde. Changting Golden Dragon, einziger SE-Weiterverarbeitungsbetrieb der XTC-Gruppe und Produzent von Rohmagneten, ist zudem Mitglied der westlichen Rare Earth Industry Association (s. u.).

Über die vom süddeutschen Magnethersteller Brugger GmbH angestoßene FairMagnet Initiative (www.fair-magnet.org) wurde ein unabhängiges, nicht-kommerzielles Siegel für die Einhaltung ökologischer, ökonomischer und sozialer Standards entlang der gesamten Lieferkette von Rohmagneten eingeführt. Die Einhaltung nachhaltiger Produktionsbedingungen bei der Verarbeitung von Seltenen Erden in China steht dabei im Fokus. Während einige Betriebe von SE-Verarbeitern bereits zertifiziert wurden, ist der Bezug von nachhaltig produzierten SE-Metallen bisher noch nicht von der Zertifizierung abgedeckt (siehe 4.3).

Mitte 2019 wurde auf Initiative des European Institute of Innovation and Technology (EIT) Raw Materials die Rare Earth Industry Association (REIA) gegründet. Sie hat zum Ziel, die globale SE-Industrie zu repräsentieren und die Nachhaltigkeit der SE-Produktion über eine neu zu schaffende Stoffstromdatenbank (Life Cycle Inventory database) zu dokumentieren. Diese soll Grundlage für einen quantifizierbaren, einheitlichen SE-Standard werden. Inwieweit der dominierende chinesische Markt bei dieser Initiative abgebildet werden kann, bleibt abzuwarten.

Im Zuge der Erstellung der Liste der kritischen Rohstoffe für die EU 2020 durch die europäische Kommission, in der die Versorgungssicherheit mit SE auf Grund der starken Marktkonzentration insb. bei der Weiterverarbeitung auf China wiederholt als kritisch eingestuft wird, wurde als Maßnahme für belastbare Wertschöpfungsketten die „European Raw Materials Alliance“ (ERMA) ins Leben gerufen [3]. Hierbei handelt es sich um eine von der Industrie geleitete Rohstoffallianz mit dem Ziel, die SE-Wertschöpfungskette zu diversifizieren. Im Rahmen von ERMA sollen darüber hinaus Standards und Zertifizierungssysteme für die nachhaltige Produktion von SE-Magneten definiert werden.

6 QUELLENNACHWEIS

- [1] GLÖSER-CHAHOU, S., KÜHN, A., TERCERO ESPINOZA, L.A. (2016): Globale Verwendungsstrukturen der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium: Eine szenariobasierte Analyse der Auswirkung der Diffusion der Elektromobilität auf den Bedarf an Seltenen Erden (No. S05/2016). Working Paper Sustainability and Innovation. – Karlsruhe: Fraunhofer ISI. <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-404012.html> [Stand 24.02.2021].
- [2] ROSKILL (2021): Rare Earths: Outlook to 2030. Twentieth Edition. – London, 479 S.
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2020): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. – Brüssel. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10435-2020-INIT/de/pdf> [Stand 24.02.2021].
- [4] LANGKAU, S., ERDMANN, M. (2020): Environmental impacts of future rare earth supply for magnet applications: a prospective LCA study. – Journal of Industrial Ecology, 1-17. <https://doi.org/10.1111/jiec.13090>.
- [5] MARX, J., SCHREIBER, A., ZAPP, P., WALACHOWICZ, F. (2018): Comparative life cycle assessment of Nd-FeB permanent magnet production from different rare earth deposits. – ACS sustainable chemistry & engineering, 6 (5), 5858-5867. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04165>.
- [6] SPRECHER, B., XIAO, Y., WALTON, A., SPEIGHT, J., HARRIS, R., KLEIJN, R., VISSER, G., KRAMER, G.J. (2014): Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets. – Environmental science & technology, 48(7), 3951-3958. <https://doi.org/10.1021/es404596q>.
- [7] SCHREIBER, A., MARX, J., ZAPP, P., HAKE, J.F., VOSSENKAUL, D., FRIEDRICH, B. (2016): Environmental impacts of rare earth mining and separation based on eudialyte: a new European way. – Resources, 5(4), 32. <https://doi.org/10.3390/resources5040032>
- [8] SCHÜLER-ZHOU, Y. (2018): Chinas Rohstoffpolitik für Seltene Erden. – Commodity Top News 57, BGR. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/57_china_seltene_erden.pdf?blob=publicationFile [Stand 24.02.2021].
- [9] U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2020): Mineral commodity summaries 2020. – U.S. Geological Survey, 200 S. <https://doi.org/10.3133/mcs2020>
- [10] VOSSENKAUL, D., STOLTZ, N.B., MEYER, F.M., FRIEDRICH, B. (2015): Extraction of rare earth elements from non-Chinese ion adsorption clays. – In Proceedings of European Metallurgical Conference (EMC) 703-715.
- [11] REIMER, M.V., SCHENK-MATHES, H.Y., HOFFMANN, M.F., ELWERT, T. (2018): Recycling Decisions in 2020, 2030, and 2040 - When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU? – Metals, 8(11), 867. <https://doi.org/10.3390/met8110867>.
- [12] BINNEMANS K, JONES PT, BLANPAIN B, VAN GERVEN T, YANG Y, WALTON A, BUCHERT M. (2013) Recycling of rare earths: a critical review. Journal of cleaner production, 51, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
- [13] LEE, J., WEN, Z. (2017): Rare earths from mines to metals: comparing environmental impacts from China's main production pathways. – Journal of Industrial Ecology, 21(5), 1277-1290. <https://doi.org/10.1111/jiec.12491>.
- [14] QIFAN, W., HUA, L., CHENGHUI, M., SHUNPING, Z., XINHUA, Z., SHENGQING, X., HONGYAN, W. (2010): The use and management of NORM residues in processing Bayan Obo ores in China. – In: Naturally Occurring Radioactive Material (Norm VI) – Proceedings of an International Symposium, Marrakech, Morocco, 22.-26.03.2010. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1497_web.pdf [Stand 24.02.2021].
- [15] HUANG, X., ZHANG, G., PAN, A., CHEN, F., ZHENG, C. (2016): Protecting the environment and public health from rare earth mining. – Earth's Future, 4(11), 532-535. <https://doi.org/10.1002/2016EF000424>.
- [16] Guo, W. (2012): The rare earth development can no longer overdraw ecological cost [环保核查推进稀土行业整合]. – China Environment News, July 2. China Environmental Press, Beijing. www.cenews.com.cn/ztbd1/xtkf/201207/t20120705_720203.html [Stand 24.02.2021].
- [17] VAHIDI, E., NAVARRO, J., ZHAO, F. (2016): An initial life cycle assessment of rare earth oxides production from ion-adsorption clays. – Resources, Conservation and Recycling, 113, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.006>.

- [18] WALL, F., PELL, R. (2020): Responsible sourcing of rare earths: Exploration-stage intervention including life cycle assessment. – Chapter 317. In: Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Vol. 58. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2020.10.001>.
- [19] PACKEY, D.J., KINGSNORTH, D. (2016): The impact of unregulated ionic clay rare earth mining in China. – Resources Policy, 48, 112-116. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.03.003>.
- [20] WALL, F., ROLLAT, A., PELL, R.S. (2017): Responsible sourcing of critical metals. – Elements, 13(5), 313-318. <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.313>.
- [21] KOLTUN, P., THARUMARAJAH, A. (2014): Life cycle impact of rare earth elements. – International Scholarly Research Notices, 2014. <https://downloads.hindawi.com/archive/2014/907536.pdf> [Stand 24.02.2021].
- [22] RÜTTINGER, L., TREIMER, R., TIESS, G., GRIESTOP, L., SCHÜLER, F., WITTRÖCK, J. (2014): Fallstudie zu den Umwelt- und Sozialauswirkungen der Gewinnung Seltener Erden in Mountain Pass, USA. – Adelphi, Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/umsoress_fallstudie_seltene_erden_usa_mountainpass.pdf [Stand 24.02.2021].
- [23] MARSCHALL, L., HOLDINGHAUSEN, H. (2018): Seltene Erden – Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters. – Oekom Verlag, München, 191 S.
- [24] CHINA WATER RISK (2016): RARE EARTHS: SHADES OF GREY - Can China Continue To Fuel Our Global Clean & Smart Future. – China Water Risk 2016, 63 S. <https://chinawaterrisk.org/wp-content/uploads/2016/08/China-Water-Risk-Report-Rare-Earths-Shades-Of-Grey-2016-Eng.pdf> [Stand 24.02.2021].
- [25] SCHÜLER, D., BUCHERT, M., LIU, R., DITTRICH, S., MERZ, C. (2011): Study on rare earths and their recycling. – Öko-Institut, Darmstadt. <https://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf> [Stand 24.02.2021].
- [26] ZHOU, B.L., LI, Z.X., ZHAO, Y.Q., WANG, S.Q. (2016): The life cycle assessment of rare earth oxides production in Bayan Obo. – Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 39(4), 832-839.
- [27] LYNAS CORP. LTD. (2019): Sustainability Report 2019. – Lynas Corporation Limited, 24. S. <https://www.lynascorp.com/wp-content/uploads/2019/09/LYC-Sustainability-Report-2019.pdf> [Stand 24.02.2021].
- [28] PEIRÓ, L.T., MÉNDEZ, G.V. (2013): Material and energy requirement for rare earth production. – JOM, 65 (10), 1327-1340. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0719-8>.
- [29] WORLD BANK (2020): Worldwide Governance Indicators. – Interactive Database. <https://info.worldbank.org/governance/wgi/> [Stand 24.02.2021].
- [30] REUTERS (2020): China accuses Chinalco rare earth unit of breaking pollution regulations. – Reuters online by Min Zhang and David Stanway, 24.09.2020. <https://www.reuters.com/article/china-environment-chinalco/china-accuses-chinalco-rare-earth-unit-of-breaking-pollution-regulations-idINL3N2GL0KH> [Stand 24.02.2021].
- [31] SMM NEWS (2020) 中铝广西稀土整改不到位 环境污染问题突出. Online, 25.09.2020. <https://news.smm.cn/news/101277213> [Stand 24.02.2021].
- [32] BJ NEWS (2020) 中央环保督察再次进驻央企, 发现了什么问题? . Online, 24.09.2020. <http://www.bjnews.com.cn/news/2020/09/24/772239.html> [Stand 24.02.2021].
- [33] ASIA TIMES FINANCIAL (2021): Myanmar crisis poses risks to global rare earth supply chain. – Asia Times Financial online by Xiaojing Yang. <https://www.asiatimesfinancial.com/myanmar-crisis-poses-risks-to-global-rare-earth-supply-chain> [Stand 24.02.2021].
- [34] HEIMIG, C., SCHÜTTE, P., FRANKEN, G., KLEIN, C. (2019): Zinn aus Myanmar – ein Anwendungsbeispiel zur EU-Verordnung zur Sorgfaltspflicht in Rohstofflieferketten. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity Top News 61, Hannover. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/61_zinn_Myanmar.html [Stand 24.02.2021].
- [35] CSA GROUP (2018): Provenance and Traceability of Rare Earth Products. – Canadian Standards Association. https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA_Group_Rare_Earth_Research_Paper.pdf [Stand 24.02.2021].
- [36] HAQUE, N., HUGHES, A., LIM, S., VERNON, C. (2014): Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. – Resources, 3(4), 614-635. <https://doi.org/10.3390/resources3040614>.
- [37] WÜBBEKE, J. (2012): Bergbau in der Inneren Mongolei: Umweltverschmutzung und Konflikte. – Phil-

ippinenbüro im Asienhaus, Köln. http://www.asienhaus.de/public/archiv/bergbau-nr2_china.pdf [Stand 24.02.2021].

[38] CHINA DAILY (2009): Rare earth industry adjusts to slow market. – China Daily online by Li Jia-bao and Liu Jie, 07.09.2009. https://www.chinadaily.com.cn/bw/2009-09/07/content_8660849.htm [Stand 24.02.2021].

[39] BGS (2010): Rare Earth Elements. Mineral profile of the British Geological Survey. – British Geological Survey, 45 S. http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/12583/1/Rare_Earth_Elements_profile.pdf [Stand 24.02.2021].

[40] SCHMIDT, G. (2013): Description and critical environmental evaluation of the REE refining plant LAMP near Kuantan, Malaysia. – Öko-Institut, Darmstadt. <https://www.oeko.de/oekodoc/1628/2013-001-en.pdf> [Stand 24.02.2021].

[41] AELB (2020): Lynas Information. – Atomic Energy Licensing Board. <http://www.aelb.gov.my/malay/awam-maklumat-lynas.asp> [Stand 24.02.2021].

[42] IAEA (2014): Report of the International Post-Review Mission on the Radiation Safety Aspects of the Operation of a Rare Earth Processing Facility and Assessment of the Implementation of the 2011 Mission Recommendations. – International Atomic Energy Agency, Malaysia. <https://www.iaea.org/sites/default/files/lynas-report-20052015.pdf> [Stand 24.02.2021]

[43] FERNANDES, I.B., LLAMAS, A.A., REUTER, M.A. (2020): Simulation-Based Exergetic Analysis of Nd-FeB Permanent Magnet Production to Understand Large Systems. – JOM, 72(7), 2754-2769. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04185-6>.

IMPRESSUM

Herausgeber:

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe
Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit
Stilleweg 2
30655 Hannover

E-Mail: mineralische-rohstoffe@bgr.de
www.bgr.bund.de

Autor:

Martin Erdmann

Unter Mitarbeit von:

Harald Elsner, Gudrun Franken, Maren Liedtke,
Yun Schüler-Zhou

Layout:

Jolante Duba

Titelfoto:

© BGR

Stand:

März 2021

DOI:

10.25928/w8m6-cd09