

Aluminium

Informationen zur Nachhaltigkeit



13 26,98

Al

Aluminium

AUF EINEN BLICK

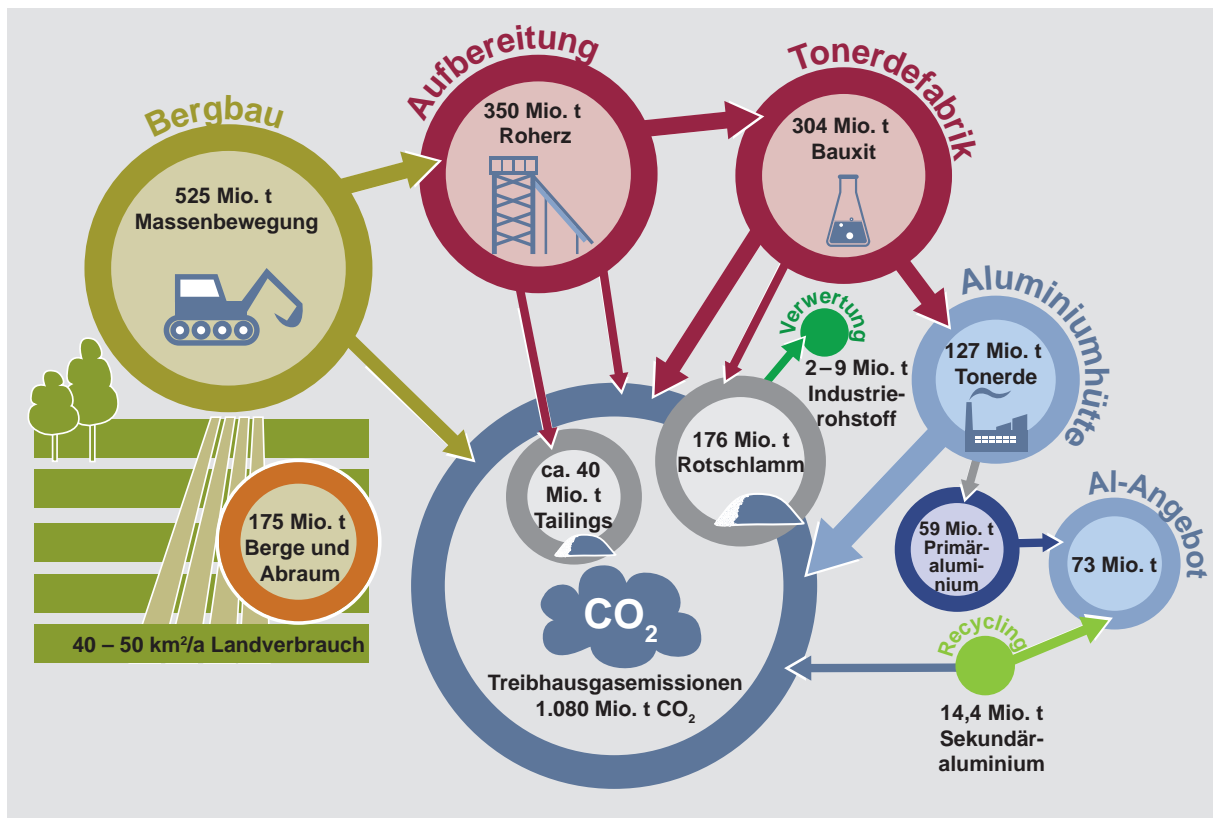


Abb. 1: Berechnete Massenströme in der Aluminiumproduktion und Hauptauswirkungen auf die Umwelt, Daten zu 2017 aus [1].

- Der größte Teil der Wertschöpfung des Aluminiums findet in der Weiterverarbeitung des Bauxiterzes und nicht im Bergbau statt. Die wichtigsten Bauxitproduzenten sind Australien, China und Guinea; die größten Primäraluminiumproduzenten China, Russland, Kanada und Indien.
- Bauxitlagerstätten haben eine geringe Mächtigkeit und eine flache Lagerung. Daher hat der Abbau einen großen spezifischen Flächenbedarf. Allerdings ist die Rekultivierung der abgebauten Fläche aus den gleichen Gründen relativ einfach.
- Die Aluminiumherstellung ist energetisch sehr aufwendig. Der tatsächliche Verbrauch an Primärenergie in der Produktionskette und somit auch die CO₂-Emissionen hängen vom Stand der verwendeten Technologie und im größeren Maße von dem zur Verfügung stehenden Primärenergiemix ab.
- Aluminiumrecycling spielt aufgrund der relativ niedrigen Energiekosten (nur 5% im Vergleich zu Primäraluminium) eine wichtige Rolle, jedoch steht das meiste in Fahrzeugen und Infrastruktur verbaute Aluminium noch nicht für das Recycling zur Verfügung.
- Konflikte um die Landnutzung bei laufenden oder geplanten Vorhaben werden aus Guinea, Brasilien, Indien, Ghana und Vietnam berichtet.
- In der Aluminium Stewardship Initiative (ASI) haben sich mehr als 100 Unternehmen der Wertschöpfungskette zu Nachhaltigkeitsstandards und deren Überprüfung verpflichtet.

INHALT

1. Relevanz von Aluminium	S. 3
2. Von der Lagerstätte zum Metall	S. 3
3. Recycling	S. 7
4. Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus	S. 7
5. Nachhaltigkeitsaspekte der Weiterverarbeitung	S. 11

1 RELEVANZ

Aluminium ist ein silbrig-weißes Leichtmetall, das aufgrund seiner Materialeigenschaften – hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, geringe Dichte, hohe Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, hohes Festigkeits-Gewicht-Verhältnis – in Deutschland vor allem im Bauwesen (15%), im Fahr- und Flugzeugbau (48%), im Bereich Maschinenbau und Elektrotechnik (14%) und als Verpackungsmaterial (10%) Verwendung findet [1]. Deutschland ist mit einem Verbrauch von 2,1 Mio. t weltweit nach China (33,3 Mio. t) und den USA (4,6 Mio. t) der drittgrößte Verbraucher an primärem Hüttenaluminium [2].

Das Leichtmetall Aluminium reduziert das Fahrzeuggewicht im Transportsektor. Ansonsten wäre der Entwicklungsstand unserer heutigen Flugzeugindustrie und des Luftverkehrs unmöglich zu erreichen. 100 Kilogramm weniger Gewicht eines Autos, so die Faustregel der Autokonstrukteure, vermindert den Verbrauch für 100 km Fahrstrecke um bis zu einen halben Liter Brennstoff, was einer Emissionseinsparung von rd. 11 g CO₂ pro km entspricht. Durch den Übergang von einer Stahlkarosserie auf eine Aluminiumkarosserie lassen sich ca. 150 kg Gewicht im Automobilbau einsparen [3]. Nach Angaben eines Automobilherstellers würde der erhöhte Energieeinsatz bei der Herstellung des Aluminiums nach etwa 60 – 80 Tsd. km Laufleistung durch die Kraftstoffeinsparung kompensiert, jedoch nur wenn der Einsatz von erneuerbaren oder CO₂-neutralen Energieträgern als Primärenergiequellen bei der Aluminiumerzeugung mitberücksichtigt würde.

Das Ausgangsgestein Bauxit wird nicht nur für die Aluminiumgewinnung, sondern auch für andere Zwecke, insbesondere Portlandzement, Stützmittel und die Feuerfestindustrie sowie Schleifmittel und Mineralwolle verwendet. In 2015 wurden weltweit für diese Zwecke rd. 12 Mio. t Bauxit eingesetzt.

2 VON DER LAGERSTÄTTE ZUM METALL

Die Gewinnung von Aluminium erfolgt aus dem Erz Bauxit, das zunächst gelaugt wird, um im Bayer-Verfahren den Rohstoff Aluminiumoxid, auch Tonerde genannt, zu produzieren. Die Tonerde wird anschließend in einer Primäraluminiumhütte durch eine Schmelzflusselektrolyse, dem sogenannten Hall-Héroult-Prozess, in reines Aluminium umgewandelt.

2.1 Geologie

Aluminium steht zwar an dritter Stelle in der Häufigkeitsreihe der am Aufbau der Erdkruste beteiligten Elemente, ist aber in primären Gesteinen nicht genügend angereichert, um aus diesen wirtschaftlich gewonnen zu werden. Erst durch eine Verwitterung des primären Gesteins kommt es zu einer Anreicherung des Aluminiums zu bauwürdigen Konzentrationen.

Bauxit ist ein residuales Gestein (Rückstandsgestein), das aus der Verwitterung verschiedener, zumeist magmatischer Gesteine, gebildet wurde. Diese Muttergesteine waren langen Phasen der Verwitterung (Millionen von Jahren) unter tropischen, subtropischen oder sehr feuchten gemäßigten Bedingungen ausgesetzt. 90% der bekannten weltweiten Bauxitvorkommen befinden sich heute an tropischen oder subtropischen Standorten.

Die größten Lagerstätten von Bauxit befinden sich in Mittel- und Südamerika, in Westafrika, insbesondere in Guinea, sowie in Indien, China, Vietnam und Australien. Einige Vorkommen sind auch aus dem Norden Russlands, dem Mittelmeerraum und in Saudi-Arabien bekannt.

Die derzeit geschätzte weltweite Bauxitressource beträgt mehr als 70 Mrd. Tonnen. Die größte Konzentration an Vorkommen liegt in Guinea, wo es nachgewiesene Ressourcen in Höhe von etwa 25 Mrd. Tonnen gibt [4]. Die Aluminiumgehalte in den Lagerstätten sind regional unterschiedlich verteilt. Die Lagerstätten in Indonesien und Australien haben einen Aluminiumoxid-Gehalt von durchschnittlich rd. 40%, in Amerika und der Karibik liegen die Gehalte bei rd. 48% und die höchsten Gehalte finden sich in Westafrika mit 53%. In Australien gibt es im Norden sehr reiche Bauxitlagerstätten, die hauptsächlich für den Export Bauxit produzieren. Die Lagerstätten im Süden Australiens hingegen sind eher zu den „armen“ Lagerstätten zu rechnen, die vorwiegend im eigenen Land verarbeitet werden. Der weltweite durchschnittliche Gehalt des metallurgischen – also für die Aluminiumgewinnung eingesetzten – Bauxits dürfte bei rd. 45% Aluminiumoxid liegen.

Die Aluminiumgehalte des Bauxiterzes sind ein maßgeblicher Faktor für den Aufwand (z. B. Energieaufwand), der bei der Weiterverarbeitung des Bauxits in einer Tonerdefabrik nötig ist, um daraus Tonerde zu produzieren. Daher werden nach Deutschland vor allem hochwertige Bauxiterze aus Guinea, Liberia oder Nordaustralien eingeführt. Prinzipiell sind bei den Lagerstättendistrikten die Karst-Bauxitdistrikte von den Laterit-Bauxitdistrikten zu unterscheiden (Abb. 2). Im

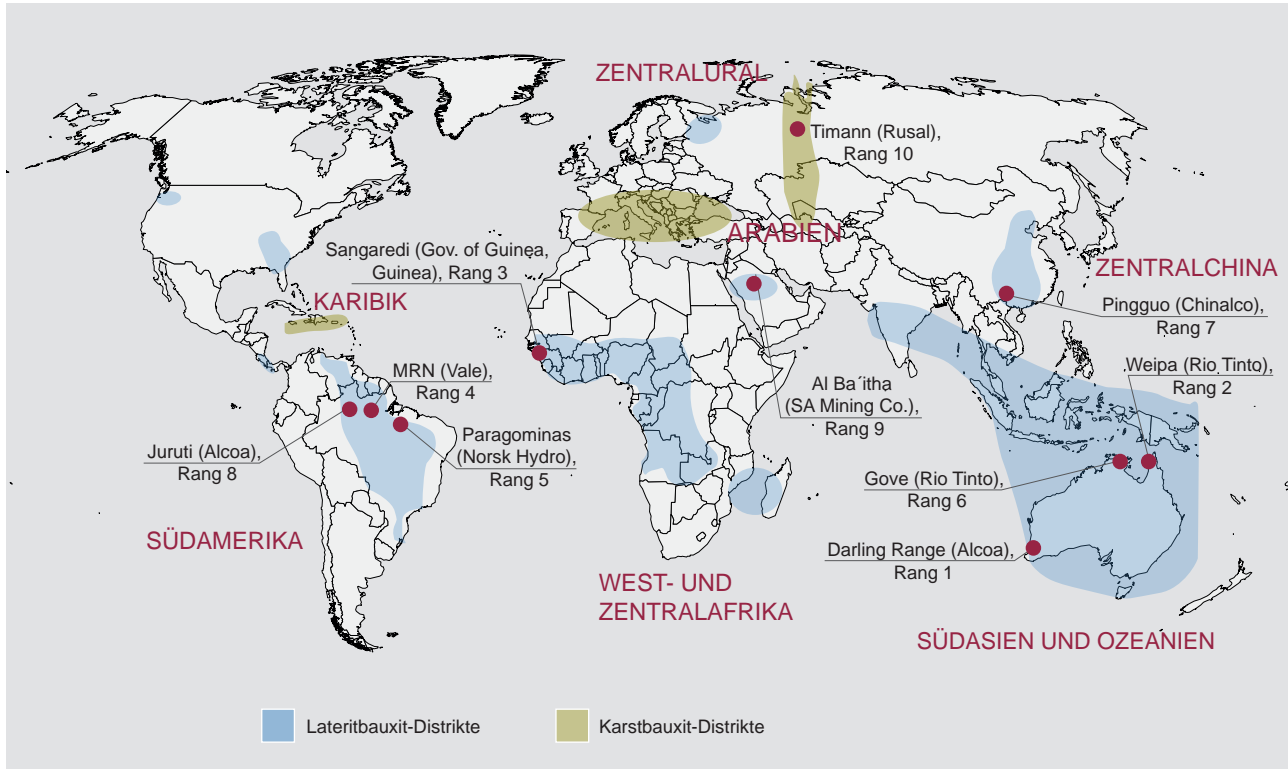


Abb. 2: Die 10 größten Bauxitproduzenten und Lage der Bauxitprovinzen und -distrikte, (modifiziert nach [17] und [19]).

Vergleich zu den lateritischen Lagerstätten sind die Karst-Bauxitlagerstätten in der Regel kleiner, weisen aber durch ihren höheren Aluminiumoxid-Gehalt ein günstigeres – da vermindertes – Bauxit-zu-Tonerde-Verhältnis auf. Langfristig hat sich der Anteil der Bauxitproduktion aus Karstlagerstätten, der 1996 noch bei rd. 20% der Gesamtproduktion lag, auf heute wenige Prozent verringert.

2.2 Bergbau und Aufbereitung

Viele Bauxitlagerstätten sind mit nur 0,5 bis 1 m Überdeckung oberflächennah und flach gelagert. Typische Mächtigkeiten von Bauxitlagerstätten liegen zwischen 2 und 10 m. Aufgrund der Lagerungsverhältnisse wird Bauxit fast ausschließlich im Tagebau gewonnen.

Der Bauxit vieler Lagerstätten kann ohne weitere Aufbereitung direkt als Roherz in Tonerde-Fabriken, auch Raffinerien genannt, verarbeitet werden. In einigen Fällen muss aber das Bauxiterz in einer Wäsche aufbereitet und durch das Entfernen von anhaftenden Tonen und silikatischen Knollen der Aluminiumoxid-Gehalt des Roherzes erhöht werden. Typischer Bauxit besteht zu ungefähr 45% aus Aluminiumoxiden. Daneben enthält Bauxit auch Eisen-, Silizium- und andere Minerale. Die mineralogische Zusammensetzung des Bauxits ist insofern von Bedeutung, als sie die Verfahrenstechnik

und die metallurgischen Ergebnisse bei der Tonerde-Produktion beeinflusst.

Im Jahr 2018 wurden weltweit 342,5 Mio. t Bauxit abgebaut, die zu 130,5 Mio. t Aluminiumoxid (Al_2O_3) weiterverarbeitet wurden. Daraus wurden 62,6 Mio. t Primäraluminium gewonnen. Das hieraus berechnete globale Verhältnis von Bauxit zu Tonerde zu Primäraluminium lautet 5,2 t Bauxit : 2,2 t Tonerde : 1 t Primäraluminium. Abweichungen von diesen Durchschnittswerten lassen sich durch die Variation in den Aluminiumoxidgehalten des Bauxits und der Tonerde sowie durch die Unterschiede in dem Ausbringen der metallurgischen Prozesse erklären.

In 2018 war Australien (96,5 Mio. t) der weltweit größte Bauxitproduzent, gefolgt von China (79 Mio. t) und Guinea (59,5 Mio. t) [2]. Die größten Tonerdeproduzenten sind China (69 Mio. t), Australien (20 Mio. t) und Brasilien (11 Mio. t). Zusammen stellten diese 3 Länder 2017 Dreiviertel der weltweit produzierten Tonerde her. 2017 war China (32 Mio. t) mit fast der Hälfte der Weltproduktion auch der größte Primäraluminiumproduzent, gefolgt von Russland (4 Mio. t), Kanada (3 Mio. t) und Indien (2 Mio. t) [4]. Obwohl die Nachfrage nach Aluminium stark zunimmt, reichen die bekannten Bauxitreserven aus, um den weltweiten Bedarf an Aluminium für viele Jahrhunderte zu decken.

Aluminium wird hauptsächlich von vertikal integrierten, spezialisierten Rohstoffkonzernen produziert, die international aufgestellt sind. „Vertikal integriert“ bedeutet, dass sowohl der Bauxitbergbau als auch die Weiterverarbeitung (Tonerde- und Aluminiumproduktion) unter der Kontrolle eines gemeinsamen Unternehmens stehen. Im Fall von Rio Tinto, South32 und Vale können das auch breiter aufgestellte Mischkonzerne sein, die Bergbau auf unterschiedliche Rohstoffe betreiben. Der Marktführer neben Rio Tinto ist der Konzern Alcoa, der nur auf die Aluminiumherstellung und -vermarktung spezialisiert ist. Es fällt auf, dass sich relativ viele der großen Aluminiumproduzenten weltweit in staatlicher Hand befinden bzw. Staaten hohe Aktienanteile an den Unternehmen halten. Zu diesen „Staats“-Unternehmen zählen RUSAL (aus Russland), Chinalco (aus China), NALCO (aus Indien), aber auch Norsk Hydro (Norwegen, 33% Staatsanteil). Ursache für die hohe staatliche Teilhabe in der Aluminiumindustrie ist zum einen eine traditionelle Verknüpfung des Staates mit dem strategischen Aluminiumsektor, zum anderen statt das Erfordernis von langfristig geplanten, hohen Investitionen, die vor allem auch die Energieinfrastruktur umfassen. Norsk Hydro ist u. a. auch Eigentümer des deutschen Primäraluminiumproduzenten Vereinigte Aluminium-Werke AG.

Bauxit (Gehalte $> 52\% \text{ Al}_2\text{O}_3$) als hochwertiger Rohstoff für die Feuerfestindustrie oder für die Nutzung als abrasives Medium kann im industrialisierten Kleinbergbau mit einer Produktionskapazität von ca. 10 kt – 200 kt pro Jahr gewonnen werden – dies ist z. B. in Guyana, Brasilien und Indien der Fall. Die Preise z. B. für gesinterten Bauxit können mehr als das 10-fache des Preises für metallurgischen Bauxit betragen und erlauben dadurch

auch dem Kleinbergbau eine profitable Produktion. Aufgrund des niedrigen Preises für metallurgischen Bauxit von rd. 30 – 45 USD/t ist der Kleinbergbau auf diesen Rohstoff in der Regel nicht lohnend, zumal die Bauxitgewinnung mit hohen Transportkosten verbunden ist. Der Anteil des Kleinbergbaus an der Bauxitgewinnung ist daher im globalen Maßstab zu vernachlässigen.

2.3 Weiterverarbeitung

Bei der Metallherstellung unterscheidet man Primäraluminium, auch Hüttenaluminium genannt, das aus Bauxit gewonnen wird, und Sekundäraluminium aus Aluminiumschrott. Die Herstellung von Primäraluminium aus dem Rohstoff Bauxit lässt sich in vier wesentliche Prozessschritte unterteilen: 1. Mahlung und Laugung, 2. Kalzinierung des Aluminiumhydroxids zum Aluminiumoxid, 3. Schmelzen der Tonerde und 4. Elektrolyse des geschmolzenen Aluminiumoxids und Trennung der flüssigen Aluminiumphase.

Die beiden ersten Prozessschritte finden in der sogenannten Raffinerie oder Tonerdefabrik statt (Abb. 3). Hier wird aus dem Roherz Bauxit die Tonerde (Aluminiumoxid) hergestellt. Dabei wird das gemahlene Bauxiterz unter Zugabe von heißer Natronlauge und Kalk in Druckbehältern bei Temperaturen zwischen 120 und 300 °C und Drücken von 40 – 200 bar gelaugt. Je höher die Temperatur und die Drücke sind, desto besser ist in der Regel das metallurgische Ausbringen an Aluminiumoxid, insbesondere bei schwer laugbaren Bauxitmineralen. Das Aluminium liegt als Natriumaluminat in der Lösung vor und wird anschließend durch eine Filtration von dem Laugungsrückstand (hauptsächlich

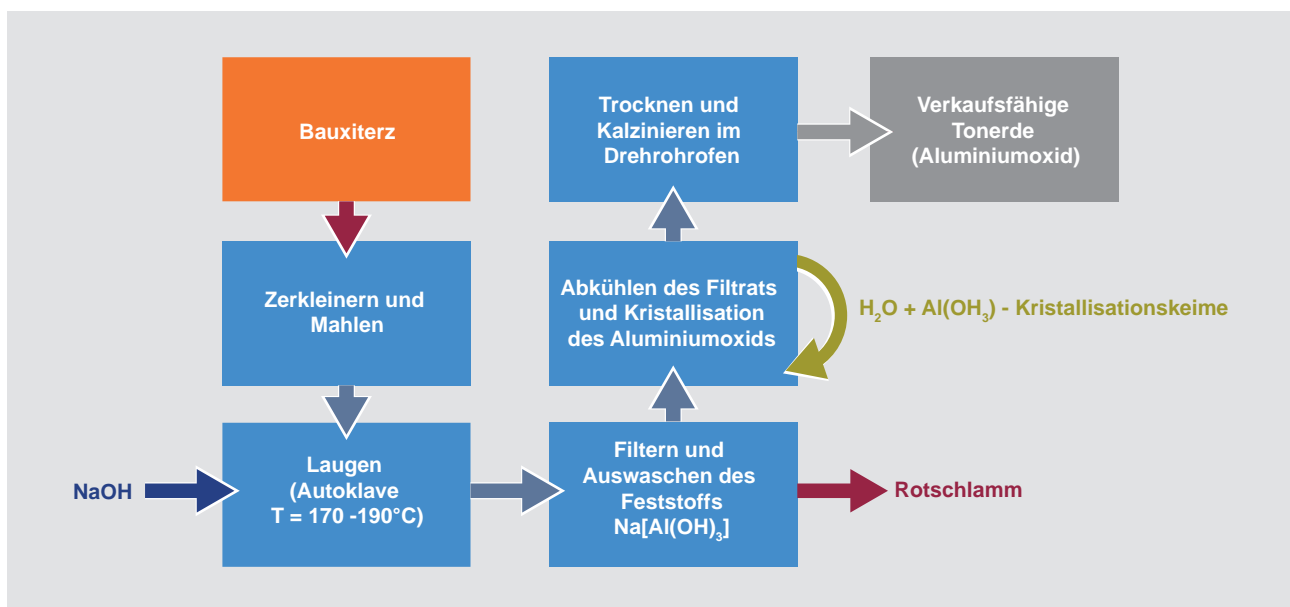


Abb. 3: Schema des Bayerprozesses (modifiziert nach [6]).

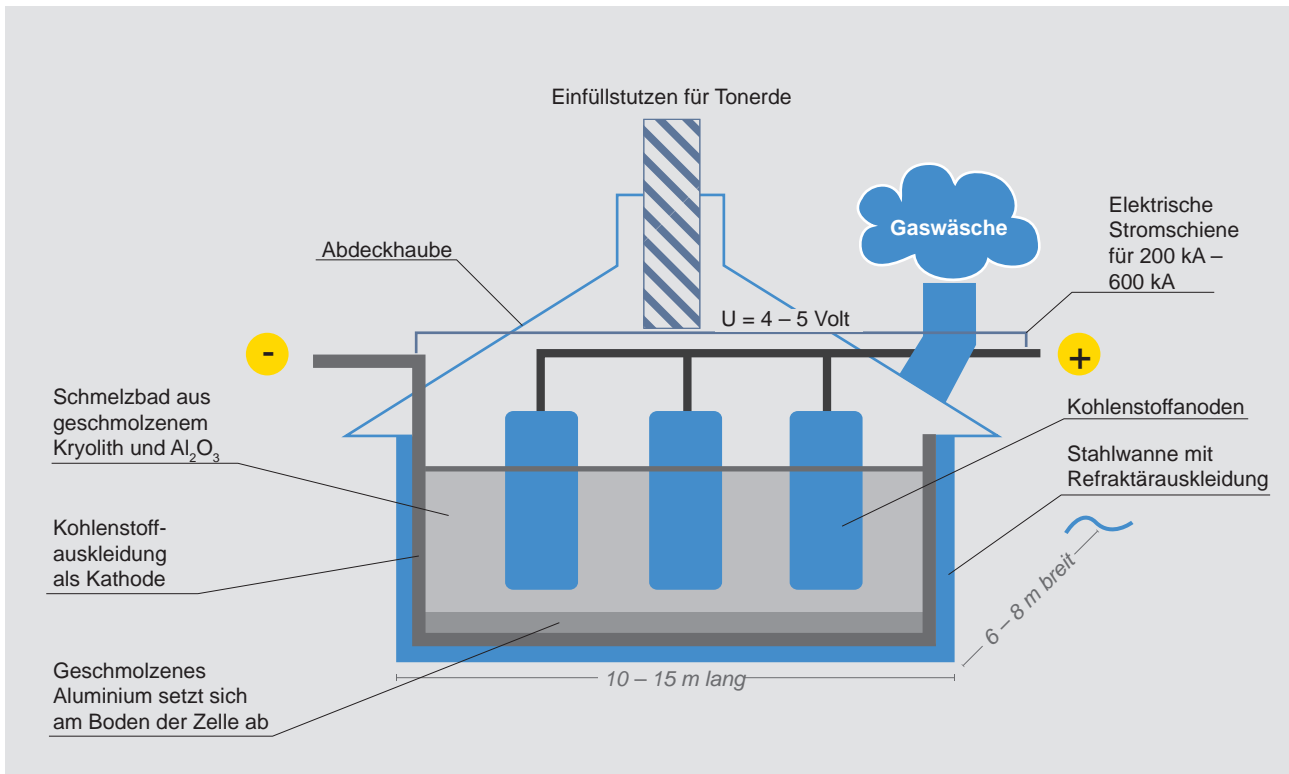


Abb. 4: Schema der Hall-Héroult-Zelle.

Eisenoxid, Kalzit und Silikate) getrennt. Der Laugungsrückstand wird ausgewaschen und nach Wasserentzug in einer Rotschlammdeponie abgelagert. Je nach Aluminiumgehalt des Bauxits fallen rund 0,5 – 1,5 t feste Abfallstoffe je Tonne produzierter Tonerde an. Das reine Aluminiumhydroxid wird ausgefällt und in einem Drehrohfen oder in einem Wirbelschichtreaktor bei Temperaturen von 1.200 – 1.300 °C zu Aluminiumoxid ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 99\%$) kalziniert. Diese sogenannte Tonerde bildet den Ausgangsstoff der Schmelzflusselektrolyse.

Für die industrielle Herstellung des Aluminiummetalls aus Tonerde wird der Hall-Héroult-Prozess eingesetzt (Abb. 4). In der ersten Prozessstufe der Verhüttung wird hierbei Tonerde in einem Schmelzbad aus Kryolith ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$) – einem fluorhaltigen Salz, das die Schmelztemperatur der Tonerde, die sonst bei über 2.000 °C läge, auf 950 – 970 °C reduziert – aufgeschmolzen.

Die elektrochemische Reduktion des geschmolzenen Aluminiumoxids zu Aluminium erfolgt in den Elektrolyseöfen (mit keramischen Werkstoffen und Kohlenstoff ausgekleidete Stahlwannen) durch das Anlegen einer Gleichspannung zwischen der aufliegenden Kohlenstoffanode und der Kohlenstoffkathode im Wannensboden. Diese Öfen sind in einer sogenannten „Potline“, die bis zu 300 Einzelöfen oder Zellen enthält, in elektrischer Serie zusammengeschlossen. Der Stromfluss – bis zu 300.000 Ampere – in der Zelle hat dabei einer-

seits den Zweck, die Wannentemperatur konstant bei 950 – 970 °C zu halten, und bewirkt zum anderen die elektrolytische Abscheidung des flüssigen Aluminiums am Wannensboden. Von dort wird das flüssige Aluminium abgesaugt und mit Spezialfahrzeugen zur Gießerei gebracht, wo es zu Gusslegierungen, Walzbarren und Pressbolzen gegossen wird. Die Anoden bestehen aus Petrolkoks und Teerpech und werden bei der Elektrolyse in einer Anodenreaktion aufgebraucht, wobei der durch die Schmelzbadreaktion aus dem Aluminiumoxid freigesetzte Sauerstoff mit dem Kohlenstoff der Anode zu Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) reagiert.

Man unterscheidet bezüglich der Ofentechnik zwischen der älteren Söderbergtechnologie – hier wird die Anodenmasse aufgrund der Wärmeabstrahlung in der Zelle während der Elektrolyse im Prozess kontinuierlich selbst gebrannt – sowie der neueren Prebaked-Technologie, bei der die Anoden separat vor dem Einsatz im Ofen gebrannt werden. Die Prebaked-Technologie bietet Vorteile auf dem Gebiet des Umweltschutzes sowie Energieeinsparungen im Prozess. Die Herstellung von Aluminium ist ein energieintensiver Prozess, der rund 1% der globalen Treibhausgasemissionen verursacht [5]. Im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch und dem Wartungsaufwand für die Ausrüstung bei der Tonerdeerzeugung sowie dem Energieverbrauch und den Fluoridemissionen im Hüttenprozess können die

heutzutage eingesetzten Technologien im Hinblick auf Effizienz und Nachhaltigkeit in 3 Kategorien eingeteilt und bewertet werden [6]. Allerdings besitzen alle diese Technologien in ihrem betriebswirtschaftlichen Kontext noch immer ihre Berechtigung.

- **Veraltet:** Laugung im Autoklav, Kalzinierung im Drehrohr, Elektrolyse in Zellen mit Söderberganoden

Energieverbrauch je t Al im Bayerprozess: 412 kWh Strom + 712 mN³ Erdgas; Energieverbrauch je t Al bei der Elektrolyse: 15.548 kWh Strom;

Diese Technik führt zu hohen gasförmigen Emissionen (CO₂, Fluorid, perfluorierte Kohlenwasserstoffe).

- **Fortschrittlich** (aber nicht verbreitet): Laugung im Rohrreaktor, Kalzinierung in der Wirbelschicht, Elektrolyse in Zellen mit vorgebackenen Anoden und neuester Zellentechnik

Energieverbrauch je t Al im Bayerprozess: 412 kWh Strom + 496 mN³ Erdgas; Energieverbrauch je t Al bei der Elektrolyse: 13.473 kWh Strom + 62 mN³ Erdgas;

Dies ist die derzeit fortschrittlichste Technologie mit den geringsten Emissionen.

- **Standard:** Laugung im Autoklav, Kalzinierung in der Wirbelschicht, Elektrolyse in Zellen mit vorgebackenen Anoden und älterer Zellentechnik.

Energieverbrauch je t Al im Bayerprozess: 412 kWh Strom + 672 mN³ Erdgas; Energieverbrauch je t Al bei der Elektrolyse: 14.273 kWh Strom + 62 mN³ Erdgas

Dies ist derzeit die Standardtechnologie.

Die fortschrittlichste Technologie spart demnach im Vergleich mit der schlechtesten rd. 20% Primärenergieeinsatz. Durch weitere konstruktive und operative Verbesserungen wird es insbesondere in neukonstruierten Elektrolysehallen möglich sein, den Stromverbrauch bei der Elektrolyse von derzeit ca. 13.200 kWh/t auf bis zu 11.200 kWh/t zu senken [7].

3 RECYCLING

Weltweit macht das Aluminiumrecycling rd. 30 – 40% der Gesamtverwendung aus [8]. Um eine Tonne Primäraluminium herzustellen, sind durchschnittlich rd. 15.700 kWh elektrische Energie erforderlich. Das Recycling benötigt nur etwa 5 Prozent der Energie der Primärgewinnung. Drei Viertel des gesamten jemals produzierten Aluminiums (seit den 1880er Jahren) ist immer noch im produktiven Einsatz [9]. In 2019 war dieser Bestand auf mehr als 700 Millionen Tonnen angewachsen [10]. Von dem produktiv genutzten Aluminium steckt jeweils ca. ein Drittel in Gebäuden (Fenster, Dächer, Verkleidungen usw.), im Transport (Automobil, Flugzeuge usw.) sowie in Maschinen und Kabeln.

Derzeit spielt Sekundäraluminium (recyceltes Aluminium) besonders in den großen Volkswirtschaften eine Rolle: von den insgesamt 14,4 Mio. t des globalen Angebots an Sekundäraluminium werden 43% in China und 25% in den USA eingesetzt, gefolgt von Japan (5,6%), Deutschland (5,3%) und Italien (5,1%). In Deutschland deckt es mehr als 1/3 des Verbrauchs, der aktuell ca. 2,1 Mio. t beträgt [4]. Der technische Aufwand für die Wiederverwertung von Aluminium ist aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur von 500 °C gering, so dass in vielen Entwicklungsländern auch eine kleinmaßstäbliche Wiederverwertung von Aluminium durchgeführt wird, die durch die globalen Statistiken jedoch nicht erfasst wird.

4 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DES BERGBAUS

Bei Aluminium, als wichtigstes Nichteisenmetall von der Produktionsmenge, bedeutet alleine die im Vergleich zu vielen anderen Metallen große benötigte jährliche Materialmenge einen entsprechenden Fußabdruck der Produktion. Nur für Eisen, Gold und Kupfer mit jeweils mehr als 2 Mrd. t wird eine noch größere Menge an Ausgangsmaterial eingesetzt. Für die Herstellung von 1 t Aluminium werden rd. 5 – 7 t Bauxit (feuchtes Roherz) und 3 t taubes Gestein oder Abraum gelöst und transportiert. Dies bedeutet, dass durchschnittlich 7 – 9 t feste Reststoffe in den verschiedenen Prozessen der Gewinnung und Extraktion für eine Tonne Hüttenaluminium anfallen.

4.1 Umweltaspekte

Flächenbedarf und bergbauliche Rückstände

Da die Bauxitlagerstätten meistens eine schichtförmige horizontale Ausprägung relativ geringer Mächtigkeit haben, ist ein großer flächenhafter Abbaufortschritt erforderlich, um eine hohe Produktionskapazität zu gewährleisten. So würde ein Tagebau mit einer durchschnittlichen Produktion von 2 Mio. t Bauxit im Jahr sowie einer angenommenen Lagerstättenmächtigkeit von durchschnittlich 5 m jährlich eine Abbaufläche von rd. 20 ha (etwa 40 Fußballfelder) alleine durch den Abbau des Erzes beanspruchen – ohne Berücksichtigung der Flächen für die erforderlichen Tagebauböschungen. Hinzu kämen noch weitere Flächen für die Zwischenlagerung des Abraums, für Produkthalden, die Transportwege und die Aufbereitung.

Im Durchschnitt wird durch den Bergbau etwas weniger als ein Quadratmeter Land in Anspruch genommen (einschließlich Straßen und Infrastruktur), um eine Tonne Aluminiummetall zu produzieren. Der jährliche weltweite Eingriff in unverbautes Land, der direkt oder indirekt mit dem Bauxitabbau zusammenhängt, wird auf etwa 40 bis 50 km² geschätzt.

Die zweitgrößte Bauxitmine der Welt, Weipa, die von dem Unternehmen Rio Tinto in Australien betrieben wird, hat eine Jahreskapazität von 31 Mio. t Bauxit (ca. 10 % der Weltproduktion) und Ressourcen in Höhe von 1,2 Mrd. t Bauxit mit rd. 2.600 km² Fläche. Seit der Inbetriebnahme (1964) bis 2012 wurden von dieser Konzessionsfläche 68 km² abgebaut. Eine ungefähr 4 km² große Fläche des abgebauten Landes wird derzeit jedes Jahr rekultiviert, was in etwa der jährlichen Abbaurate entspricht. Bis 2012 wurden mehr als 50 km² Land rekultiviert und neu bepflanzt.

Bauxitbergbau findet häufig in tropischen oder subtropischen Zonen statt, die teilweise arid sind, wie in Australien, oder ein sehr feuchtes Klima aufweisen, wie in Westafrika. Dies führt dazu, dass die Böden, die für die Rekultivierung zur Verfügung stehen, in der Regel sehr nährstoffarm sind und eine zielgerichtete Rekultivierung der abgebauten Flächen erschweren. In den tropischen Ländern führt jedoch eine natürliche Sukzession, begünstigt durch die hohen Niederschläge, relativ schnell wieder zu einem Wiederbewuchs der Abbaufläche. In der Regel wird dieser natürliche Wiederbewuchs durch betriebliche Maßnahmen unterstützt und ergänzt. „Best Practice“ ist die Verwendung der vor der eigentlichen Bauxitgewinnung abgetragenen und separat abgelagerten Bodenschichten als Substrat für die Vorbereitung der Rekultivierung, wobei die ursprüngliche Lagerung der Schichten beim Wiedereinbau möglichst

unverändert bleiben sollte. Eine wichtige Maßnahme bei der Rekultivierung von abgebauten Flächen ist das Abflachen der Randböschungen, so dass eine Erosionsstabilität gewährleistet werden kann.

Aufgrund der flachen oberflächennahen Vorkommen ist die Abraummenge, die vor der Entnahme des Bauxits im Durchschnitt bewegt werden muss, im Vergleich zu anderen metallischen Rohstoffen relativ gering und beträgt zwischen rd. 0,33 – 1,5 t Abraum je t Bauxit. Durch den flächenhaften Abbau ist es häufig möglich, den Abraum in den offenen Tagebauen zu versetzen und für die Rekultivierung zu nutzen. In den australischen Minen werden derzeit rd. 0,24 m² Fläche je Tonne Bauxit rekultiviert, was jährlich einer Fläche von rd. 20 km² entspricht [20].

Biodiversität

Die Rekultivierung kann häufig den ursprünglichen Zustand des Ökosystems nicht wiederherstellen, wie das Beispiel Weipa zeigt. Die Rehabilitation nach dem Bergbau in Weipa konnte den durch die Rodung verursachten Verlust des Lebensraums nur teilweise ausgleichen. 23 Jahre nach Beginn der Rekultivierungsmaßnahmen war noch ein deutlicher verbleibender Einfluss des Abbaus auf die biologische Vielfalt vorhanden, so dass z. B. ein Drittel der einheimischen Waldvögel noch immer fehlte [11].

In den Hauptabbauländern Guinea, Jamaika, Indien, Australien und Brasilien wird für den Bergbau auch teilweise Primärwald zerstört, was den Verlust von Biodiversität zur Folge hat. Es wird davon ausgegangen, dass rd. 20% der jährlich für den Bauxitabbau genutzten Fläche in tropischen Regenwäldern liegen [18].

Emissionen

Mineralischer Abfall: Durch die Bauxitwäsche, die allerdings nicht immer erforderlich ist, soll der Aluminiumgehalt des Bauxits gesteigert und reaktives Siliziumoxid, das den Reagenzienverbrauch in der Raffination vergrößern oder den Laugungsprozess stören würde, frühzeitig entfernt werden. Hierfür werden in der Regel nur hydromechanische Verfahren und Prozesse in der Wäsche eingesetzt. Als Abfall entsteht ein feinkörniger Schlamm, der in Schlammteichen abgelagert werden muss. Diese Schlämme, die sehr nährstoffarm sind und sich aus Tonen, Quarz und Bauxitmineralen zusammensetzen, können bis zu 15 % der bergbaulichen Gewinnung ausmachen. In Abhängigkeit von der Lage der Wäsche zum Bergbau werden die Schlämme entweder in der Nähe der Wäsche in Schlammbecken abgesetzt oder sie können zum Verfüllen der Tagebauöffnungen verwendet werden. Besondere Maßnahmen für den

Schutz des Grundwassers sind in beiden Fällen in der Regel nicht erforderlich.

Grundwasser

Da der Grundwasserspiegel meist unterhalb des Niveaus der oberflächennahen Bauxitablagerung liegt, ist eine Absenkung des Grundwasserspiegels für den Betrieb des Tagebaus in der Regel nicht erforderlich.

4.2 Soziale und sozioökonomische Bedeutung

Soziale und sozioökonomische Aspekte

In einigen Fällen ist durch den Abbau die Lebensgrundlage indigener Völker bedroht – wie z. B. im Fall des Bauxitbergbaus in den Niyamgiri-Bergen in Indien [12]. Auf jeden Fall ist es international anerkannter Standard, die indigenen Bevölkerungsgruppen als wichtige Interessengruppen in die Entscheidung über den Rohstoffabbau einzubeziehen. Dies wird z. B. in Australien weitgehend praktiziert. Im Norden Australiens produziert die Bauxitmine Gulkula, die von australischen Aborigines geführt wird und wo nur Aborigines arbeiten, jährlich rund 500.000 t Bauxit für den Aluminiumhersteller Rio Tinto.

Bei einigen Bauxitprojekten haben Anwohner, Umweltschützer und Nichtregierungsorganisationen Vorwürfe gegen die Betreiber vorgebracht. Zu den umstrittenen Projekten gehören u. a. das Projekt Sangaredi in Guinea, die Projekte Juruti (Alcoa) und Oriximina (Mineração Rio do Norte, MRN) in Brasilien, das UAIL-Projekt in Kashipur sowie der Aluminiumkomplex Nyamgiri-Vedanta in Orissa, beide in Indien gelegen, der geplante Bauxitabbau im Alew-Wald in Ghana sowie das Bauxitprojekt Tan Rai in Vietnam. In diesen Projekten geht der Streit vielfach um Landnutzungs- und Entschädigungsfragen sowie um mögliche Umweltauswirkungen. Die Umsiedlungsfrage als Konfliktgrund steht besonders in Indien im Vordergrund. Landnutzungskonflikte sind auch für den Bauxitdistrikt Boké in Guinea bekannt. Hier wird der Compagnie de Bauxites Guinée (CBG) vorgeworfen, keine Entschädigungen für enteignetes Land gezahlt zu haben.

Einnahmen

Einnahmen fallen auf unterschiedlichen Ebenen der Wertschöpfungskette an. Die Bauxitproduzenten sind häufig Teil eines vertikal integrierten Aluminiumherstellers, so dass in diesem Fall für die Bauxitproduktion keine Weltmarktpreise, sondern interne Verrechnungspreise bezahlt werden. Für Bauxit, der auf dem Weltmarkt angeboten wird, wird ein Tonnenpreis ab dem Erzlager des Bergwerks in Verhandlungen zwischen dem Produ-

zenten und dem Abnehmer bestimmt. Die Preise sind zum einen vom Wertstoffgehalt und zum anderen von den preismindernden Erzbestandteilen wie z. B. reaktives Siliziumoxid, Titan- und Eisenoxid und der Feuchtigkeit des Roherzes abhängig. Im Durchschnitt dürfte der aktuelle Preis bei rd. 30 – 45 USD/t ab Werk liegen. Hierzu addieren sich für den Abnehmer die Transportkosten, die von den Transportmitteln und den Transportentfernungen sowie der Anzahl der Massenumschläge abhängig sind.

Aus den Einnahmen der Bauxitproduktion werden auch Staatseinnahmen sowie die Einkünfte der Beschäftigten generiert. Beides sind Einnahmen, die direkt oder indirekt den Menschen vor Ort oder der Bevölkerung des Landes zu Gute kommen. Die Staatseinnahmen setzen sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen ist das die Förderabgabe, die bei Bauxit häufig tonnen- oder wertspezifisch berechnet wird, und zum anderen die Konzessionsgebühren, also die Gebühren, um überhaupt einen Abbau betreiben zu dürfen. Beide Einnahmen lassen sich häufig aus dem nationalen Berggesetz und seinen Nebengesetzen ableiten bzw. sind in Beiverordnungen festgeschrieben. Eine weitere Einnahmenquelle für den Staat sind die Unternehmenssteuern (z. B. auf Gewinn, Einkommen, Umsatz, Exporterlös, etc.), die sich aus dem Unternehmenssteuerrecht ergeben, aber auch die Lohnsteuer der Mitarbeiter. Alleine für den extraktiven Sektor im bauxitreichen Guinea fallen über 36 Arten von Steuern und Gebühren für den Staat an [13].

Die Beiträge aus der Aluminiumwertschöpfung für die Wirtschaft eines Landes können auf allen Ebenen beträchtlich sein. Der Produktionswert der Bauxitmine Weipa in Nordaustralien beträgt derzeit rd. 1,1 Mrd. USD. Davon wird dem australischen Staat rd. 10% als Steuern und Förderabgaben zugeführt. Die rund 1.400 Angestellten beziehen ca. 15% des Verkaufserlöses als Gehalt oder Lohn und stärken damit die Kaufkraft in der strukturarmen Region Nordaustraliens. Rio Tinto ist der größte regionale Arbeitgeber in Nordaustralien.

Der Anteil des Bergbaus am Bruttoinlandsprodukt von Guinea betrug 2014 rund 15%. Der Anteil des Bauxitbergbaus am BIP, über den Produktionswert berechnet, dürfte bei rd. 9% liegen. Auch hier dient der Bauxitabbau als Lokomotive für die einheimische Wirtschaftsentwicklung.

Im Falle der Bauxitexporte Guineas 2016 lag der durchschnittliche Preis bei 42 USD je Tonne Rohbauxit. Insgesamt wurden im selben Jahr 33 Mio. t Bauxit exportiert, was einen Gesamtwert von rund 1,4 Mrd. USD entsprach. Die effektiven Staatseinnahmen hieraus be-

liefen sich auf knapp 280 Mio. USD, was einem effektiven Steueranteil von rd. 20% entsprach [13].

4.3 Governance

Rund zwei Drittel der weltweiten Bergbauproduktion kommt aus Ländern mit mittlerer bis niedriger Bewertung der Governance (Worldwide Governance Indicators < 0,5; [14], Abb. 5), d. h. mit schwacher Regierungsführung oder aus Ländern mit autokratischen politischen Systemen. Auch der als Durchschnitt gebildete und nach der Länderproduktion an Bauxit gewichtete Resource Governance Index [15] liegt für den Bauxitbergbau bei einem Wert von 60, was genau der Grenze zwischen einer zufriedenstellenden und einer schwachen Rohstoffgovernance entspricht. Nur das von der Produktionsmenge führende Australien (rund 30% der Produktion) weist eine überdurchschnittlich gute Bewertung auf.

Der überwiegende Teil der Aluminiumindustrie ist international vernetzt und die Produzenten von Aluminium sind häufig vertikal voll integriert. Um einen vergleichbaren Standard insbesondere in den Nachhaltigkeitsas-

pekten bei der Aluminiumherstellung zu gewährleisten, haben sich fast alle namhaften Aluminiumproduzenten in der Aluminium Stewardship Initiative (ASI) zusammengeschlossen. Der ASI Performance Standard, nach dem sich Unternehmen der Wertschöpfungskette (vom Bergbau bis zum Recycling) zertifizieren lassen können, entspricht den internationalen Anforderungen an eine Zertifizierungsinitiative (ISEAL Code) und beinhaltet 59 Anforderungen aus den Bereichen Umwelt, Soziales sowie Unternehmensführung.

Seit dem Beginn des Programms 2017 ist ein starker Mitgliederzuwachs auf derzeit mehr als 100 Unternehmen zu verzeichnen. Mehr als 50 Zertifizierungen wurden bisher ausgestellt. Bezogen auf den Bergbau sind derzeit 8 Bergwerke, davon alle 5 in Australien sowie 3 in Brasilien, zertifiziert. Das entspricht insgesamt rund 30% der weltweiten Bauxitproduktion.

Fünf der zehn größten Bauxitproduzenten sind Mitglied im International Council on Mining and Metals (ICMM), einer internationalen Vereinigung großer Rohstoffproduzenten und damit der Einhaltung der 10 Nachhaltigkeitsprinzipien des ICMM verpflichtet. Ihre Produktion umfasst rund 40% der globalen Bauxitproduktion.

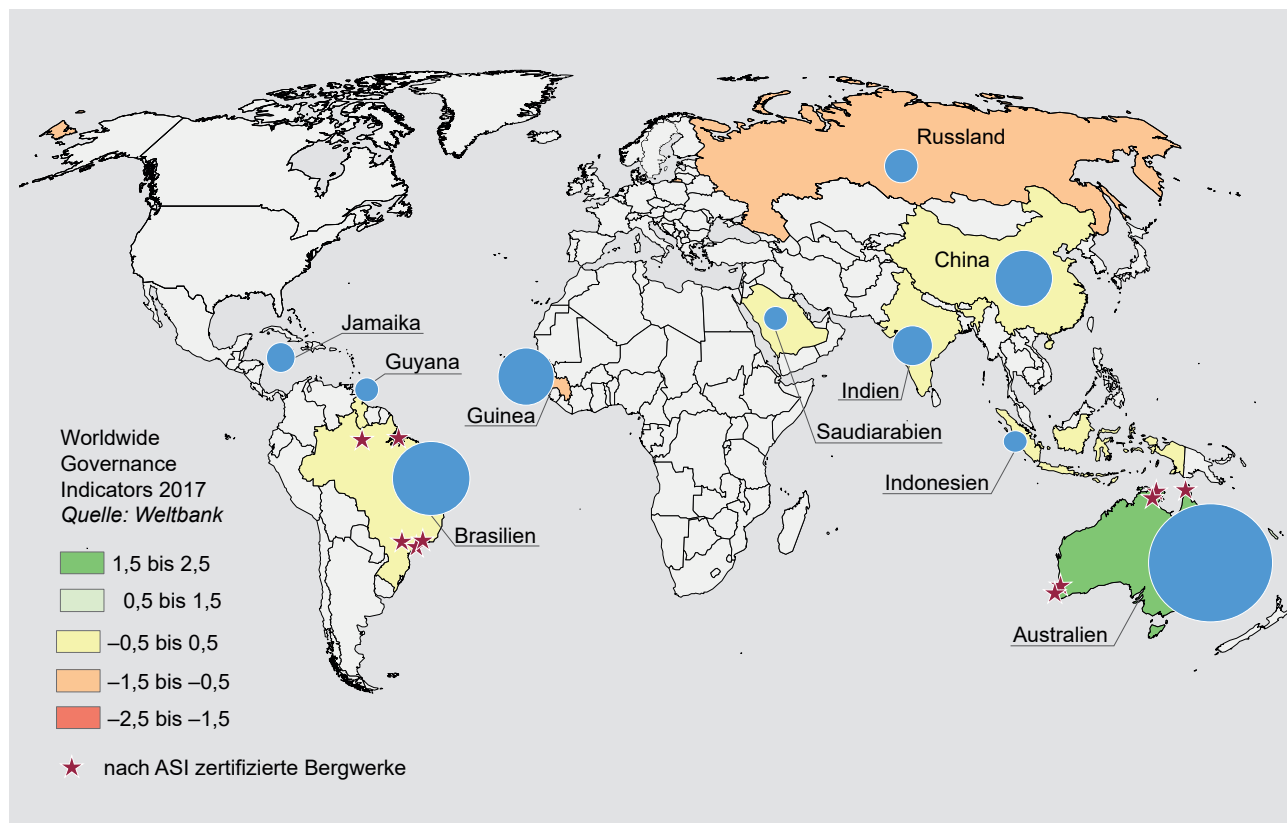


Abb. 5: Die 10 größten Bauxit produzierenden Länder (2018) und deren Governance Bewertung nach den World Governance Indicators (WGI, [14]) sowie Lage der von der Aluminium Stewardship Initiative (ASI) zertifizierten Bergwerke.

5 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DER WEITERVERARBEITUNG

Die Weiterverarbeitung des Bauxits zum Aluminiummetall erfolgt über zwei Stufen, die stark unterschiedliche Umweltauswirkungen aufweisen. In der ersten Stufe, der Tonerdefabrik, wird aus dem Bauxit die Tonerde extrahiert (Abb. 6). Hierbei werden große Mengen Natronlauge eingesetzt und der Laugungsrückstand muss entsorgt werden.

In der zweiten Stufe in der Aluminiumhütte wird in einer metallurgischen Elektrolyse die Tonerde aufgeschmolzen und zu Aluminium reduziert, was sehr energieaufwendig ist (Abb 7).

5.1 Umweltaspekte der Tonerde-Herstellung

Einsatzstoffe und Energie

Für die Erzeugung von einer Tonne Tonerde (Aluminiumoxid) werden aktuell rd. 2,4 t Bauxit, 85 – 100 kg Ätznatron, 50 kg gebrannter Kalk, 330 kg Brennstoffe (Kohle, Öl und Gas) sowie rd. 250 – 420 kWh elektrische Energie eingesetzt. Zusätzlich beträgt der durchschnittliche Wasserverbrauch im Bayer-Prozess 1,4 m³ je Tonne Tonerde [6, 16 und 17].

Der durchschnittliche spezifische Gesamtenergieverbrauch im Bayer-Prozess beträgt ca. 12 GJ pro Tonne Tonerde. Dieser Energiebedarf wird zu ca. 90 % über Brennstoffe – hauptsächlich Kohle und Erdgas – und zu ca. 10 % über Strom gedeckt. Bezogen auf den gesamten deutschen Primärenergieverbrauch läge der Energieverbrauch für die globale Tonerdeherstellung bei ca. 12 % dieses Wertes. Es ergeben sich durch den derzeit weltweit verwendeten Energiemix durchschnittliche CO₂-Emissionen von ca. 570 kg CO₂ pro t Tonerde. Dies entspricht in etwa 5 % der aktuellen Pro-Kopf-CO₂-Emission in Deutschland.

Rückstände

Die weltweite Produktion von Tonerde belief sich alleine im Jahr 2017 auf rund 127 Mio. Tonnen, was gleichzeitig zu einer Produktion von 155 – 175 Mio. Tonnen fester Prozessrückstände (Rotschlamm) führte, die in Schlammteichen oder Deponien sicher und umweltgerecht abgelagert werden mussten. Hauptproduzenten von Tonerde sind China (69 Mio. t) und Australien (20 Mio. t), gefolgt von Brasilien (11 Mio. t) und Indien (6 Mio. t). Ihrem Anteil an der Weltproduktion entsprechend werden in diesen Ländern die größten Mengen an Rotschlamm erzeugt. Für die Produktion von 1 t Tonerde werden je nach Erztyp zwischen 1,8 und 3,2 t



Abb. 6: Gladstone Tonerdefabrik in Australien, Foto: Rio Tinto.



Abb. 7: Straumsvig Aluminiumhütte auf Island, Foto: Rio Tinto.

Bauxit (trocken) eingesetzt, durchschnittlich rund 2,3 t. Je Tonne Tonerdeproduktion fallen entsprechend rd. 0,5 – 1,5 t Rotschlamm (durchschnittlich 0,7 t), bzw. auf die Tonne Hüttenaluminium bezogen, rd. 1 – 3 t Rotschlamm an. Im Laufe der Produktionsgeschichte des Aluminiums wurden weltweit bisher rd. 4 Mrd. t Rotschlamm abgelagert.

Das spezifische Rotschlammvolumen hängt in erster Linie von dem Aluminiumoxid-Gehalt des eingesetzten Bauxits ab. Dieser liegt zwischen 53 % für westafrikanischen und australischen Bauxit für den Export und rd. 38 % für Armerze aus Australien und Zentralasien. Eine gewisse Rolle spielt auch das Ausbringen des chemischen Aufschlusses in der Tonerdefabrik, welches typischer Weise zwischen 94 – 96 % liegt und vom Stand der verwendeten Technologie abhängt. In China, Russland und Australien muss aufgrund der relativ niedrigen Gehalte des eingesetzten Bauxits überproportional viel Rotschlamm je t Tonerde entsorgt werden. In Europa fällt aufgrund der relativ hohen Gehalte des eingesetzten Bauxits weniger Rotschlamm je t Tonerde an. Rotschlamm ist eine Mischung aus Sand und einer Siltfraktion (fast zu gleichen Teilen). Er besteht zum größten

Teil aus den unlöslichen Eisen- und Siliziumverunreinigungen des Bauxits und kann in geringen Mengen Natron und Karbonate, aber auch Spuren von Schwermetalle enthalten. Rotschlamm ist in Deutschland in die Deponieklasse 0 eingeordnet und damit ungefährlicher als Hausmüll (Klasse 1). Bei der Beurteilung der Gefährlichkeit einer Rotschlammdeponie lassen sich das Risiko eines physischen Kollapses der Deponiestruktur von dem Risiko einer chemischen Verschmutzung von Grundwasser und Böden mit Schwermetallen und Laugen unterscheiden. Die Rotschlammdeponien können beträchtliche Dimensionen annehmen. Eine Höhe von über 20 m und eine Speicherkapazität von über 10 Mio. m³ sind keine Seltenheit. Rotschlamm ist zu einem hohen Grad mit Wasser gesättigt. Für die Planung der Deponie muss entsprechend davon ausgegangen werden, dass der Rotschlamm selbst keine oder nur eine geringe Eigenfestigkeit aufweist. Rotschlammablagerungen müssen daher, wenn dem Schlamm nicht vorher Wasser entzogen wird, eingedämmt und der Untergrund der Deponie abgedichtet sein, um die physische Stabilität zu gewährleisten und Infiltration in den Untergrund zu vermeiden. Außerdem sollte das Wasser mit den gelösten Anteilen in den Laugungsprozess rezirkuliert werden.

Aufgrund der Verknappung von Ablagerungsräumen und steigenden Bedenken bei der Endlagerung von Rotschlamm wurde Mitte der 1980er Jahre das sogenannte Dry-Stacking-Verfahren eingeführt, das den Aufbau von höheren Deponien ermöglicht. Bei dieser Methode werden die Rückstände vor der Deponierung durch Hochleistungseindicker entwässert (auf ca. 48 – 55 % Feststoffgehalt) und anschließend in einer Weise gelagert, die das weitere Trocknen und Verfestigen ermöglicht.

Eine andere derzeit weit verbreitete Methode ist die Filtration, z. B. mit einem Vakuumfilter oder in einer Filterpresse, wobei ein Filterkuchen (typischerweise <30 % Restfeuchte) produziert wird. Der Kuchen wird mit Wasser oder Dampf gewaschen, um die Alkalinität vor dem Transport zur Deponie zu reduzieren. Die Trocknung des Rückstands durch Filtration ist aufgrund der niedrigeren Alkalinität, dem günstigeren Transport und der einfacheren Handhabbarkeit gegenüber dem Dry-Stacking Verfahren, dem Trübeinspülen in Teichen oder dem Einleiten ins Meer zu bevorzugen.

In Deutschland wird der Schlamm heutzutage in abgedichteten Deponien eingelagert. Aus der Trübe setzen sich die als Dispersion vorliegenden Hydroxide und Silikate ab und es bildet sich auf der Oberfläche der Deponie ein freier Wasserspiegel. Von dort wird das Wasser, das u.a. noch Natronlauge enthält, wiederverwertet.

Wenn die Einlagerungskapazität der Deponie erreicht ist, wird die Deponie mit einer Tragschicht aus grobkörnigen Bergematerial – falls vorhanden – und einer wasserstauenden Ton- oder Lehmschicht abgedeckt. Der darauf aufgebrachte Mutterboden wird rekultiviert. Es gibt auch erfolgreiche Versuche, den Rotschlamm nach Maßnahmen zur Bodenverbesserung direkt zu bepflanzen.

Ein früher übliches Verfahren war die Entsorgung des Rotschlammes mit Hilfe von Rohrleitungen in Flüsse, Seen und Ästuare oder die Verklappung ins Meer. Diese Technik wird heutzutage von den großen Alumina-Produzenten kaum noch angewendet. In Griechenland und Frankreich findet diese Entsorgung allerdings weiterhin statt.

Die kurzfristige Gefährlichkeit des Rotschlammes beruht in erster Linie auf dem Gehalt an ätzender Natronlauge. Eine langfristige Schädlichkeit ergibt sich aus dem Gehalt an giftigen Schwermetallen, die in erster Linie von Herkunft und mineralogischer Zusammensetzung des Bauxits abhängig ist. Schwermetalloxide und -hydroxide sind im basischen Milieu allerdings nur sehr schwer löslich. Deponierter Rotschlamm enthält etwa 1 % an löslichen Schwermetallhydroxiden.

Die mögliche Nutzung des Rotschlammes für andere Zwecke wird bereits seit längerem erforscht, um die Reststoffmengen der Tonerdeerzeugung zu verringern. Allerdings werden größere Mengen an Rotschlamm derzeit nirgends nutzbringend verwendet. Eine gewisse Einsetzbarkeit von Rotschlamm, der mit Schwefelsäure umgesetzt wurde, gibt es als Flockungsmittel in Kläranlagen sowie als alkalische Basisabdichtung für sauerwassergenerierende Deponien. Allerdings machen die genannten Anwendungen höchstens 1 % – 5 % des bei der Tonerdeerzeugung generierten Rotschlammes aus.

Bei der Laugung werden auch die Elemente Scandium, Gallium, Phosphor und Titan sowie die Seltenen Erden Elemente im Rotschlamm angereichert. Gelegentlich werden Scandium und Gallium als Beiprodukte der Tonerdeerzeugung aus den Aluminatlaugen des Bayerprozesses durch Elektrolyse, fraktionierte Fällung oder mit Chelatreakagenzien gewonnen.

5.2 Umweltaspekte der Aluminiumhütte

Einsatzstoffe und Energie

Für die Erzeugung von 1 t Primäraluminium werden durchschnittlich rd. 2 t Tonerde, 370 kg Koks und 116 kg Teerpech für die Anodenherstellung, 15 – 30 kg synthetischer Kryolith sowie rd. 13 – 15 MWh elektrische Energie benötigt. Das entspricht in etwa dem jährlichen Stromverbrauch von drei bis vier 4-Personenhaushalten in Deutschland. Alleine der Verbrauch an elektrischer Energie für die globale Aluminiumproduktion würde ca. 37,5% des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs ausmachen, der 2018 rd. 2.500 TWh betrug.

Die Produktion von primärem Aluminium aus Tonerde findet in Aluminiumhütten statt, die vor allem in China und Ländern mit günstigen Energiequellen liegen (Tab. 1).

Fluoridemissionen

Das wahrscheinlich größte Emissionsproblem der Aluhütten stellen die Emissionen von Fluoriden dar, die aus dem für die Elektrolyse erforderlichen geschmolzenen Kryolith und anderen Aluminiumfluoriden stammen, und die, über den zentralen Schornstein der Hütte, in die Umwelt gelangen können. Je nach verwendeter Anodentechnologie (Söderberg, Prebake, Prebake + Söderberg) lagen die Emissionen 2017 zwischen 0,6 – 1,7 kg Fluorid/t Aluminium. Die Emissionen können durch den Einsatz von Abgaskontrollsystemen, verbesserten Verfahren der Beschickung der Elektrolysezellen sowie Verbesserung der Anodentechnologie reduziert werden. Die Fluoridemissionen aus modernen Schmelzhütten werden jedoch nicht als ein hohes Gesundheitsrisiko für den Menschen eingestuft.

Treibhausgase

Kleine Mengen des hochpotenten Treibhausgases PFC (perfluorierte Kohlenwasserstoffe) können durch Prozessstörungen, die man Anodeneffekt nennt, verursacht werden. Die Größe der Anodeneffekte ist vom eingesetzten Verfahren sowie von dem Stand der Hütentechnologie abhängig. Mittels guter Produktionssysteme soll dieser Anodeneffekt so gering wie möglich gehalten werden. Die durchschnittliche, als Treibhausgas wirksame Emission an PFC wird in CO₂-Äquivalent (CO₂e) angegeben. Als Treibhausgas ist ein PFC-Molekül rd. 6.500-fach potenter als ein CO₂-Molekül. Der Anteil der PFC an den gesamten Treibhausgasemissionen der Aluminiumhütte betragen rund 5%.

Prozessbedingt entsteht durch die Oxidation des Anodenmaterials CO₂ als weiteres Treibhausgas. Pro Tonne Primäraluminium werden zwischen 0,42 und 0,45 t Anodenmaterial verbraucht, was theoretisch einer Produk-

Tabelle 1: Die wichtigsten Länder für die Primäraluminiumproduktion 2017 [4].

Rang	Land	Mio.t	Anteil
1	China	32,3	55,2%
2	Russland	3,7	6,4%
3	Kanada	3,2	5,5%
4	VAE	2,7	4,6%
5	Indien	2,0	3,5%
6	Australien	1,5	2,5%
7	Norwegen	1,3	2,1%
8	Bahrain	1,0	1,7%
9	Saudi-Arabien	0,9	1,6%
10	Island	0,9	1,5%
	übrige Länder	9,1	15,5%
	gesamt	58,5	100%

tion von rund 1,6 t CO₂ je Tonne Aluminium entspricht. Weltweit verursachte die Primäraluminiumproduktion (durch den Einsatz von Wärme- und elektrischer Energie sowie von Kohlenstoff als Reduktionsmittel) in 2017 Treibhausgasemissionen von rd. 1,08 Mrd. t CO₂e, was einer spezifischen Emission von rd. 18 t CO₂e je t Aluminium entspricht [5]. Zum Vergleich: die jährliche CO₂-Emission pro Kopf in Deutschland liegt bei 7,9 t. Das Treibhausgaspotenzial hängt dabei besonders von der jeweiligen Energieversorgung der Hütte ab. So wird in Norwegen und Island v. a. Strom aus Wasserkraft eingesetzt, die ein geringes Treibhausgaspotential hat.

Indirekte Auswirkungen auf die Umwelt und die Bevölkerung durch die Aluminiumerzeugung sind durch Stauseen für die Energiegewinnung möglich, da in vielen Hüttenstandorten die erforderliche elektrische Energie durch Wasserkraft gedeckt wird. Beispiele hierfür sind in Zentralasien, Westafrika, Nordeuropa und Südamerika zu finden. In China und Mozambique wird einigen Aluminiumhütten ein zu nachlässiger Umgang mit dem Einhalten der Luftemissionsstandards vorgeworfen [12].

5.3 Soziale und sozioökonomische Bedeutung

Im Vergleich zu anderen Metallrohstoffen weist die Primäraluminiumproduktion den größten Anteil an der Wertschöpfung in der Weiterverarbeitung bzw. Verhüttung auf, während es bei Bunt- und Edelmetallen der Bergbau ist. Der Gesamtwert des Primäraluminium betrug 2018 rd. 118 Mrd. USD, der der Tonerde rd. 57 Mrd. USD und der des Bauxits nur rd. 11 Mrd. USD. Da Bauxit ein Massenrohstoff ist, ist

der Kostenanteil für Kapitalinvestitionen und Energie bei der Weiterverarbeitung und Aluminiumerzeugung relativ hoch. Allerdings nimmt der anteilige Wert der Bauxitproduktion in der Wertschöpfung immer weiter zu. Betrug er 1999 nur rund 6,4% des Produktionswertes des Aluminiums, so machte er 2017 schon 9% aus. Auch die Kosten der Tonerdeherstellung sind weiter zunehmend. 1999 betrug sie noch 27% und 2017 bereits 40% der Gesamtwertschöpfung. Rund 50% der Wertschöpfung entfielen 2017 auf Transport und Herstellung des Rohaluminiums in Hütten. Unter Berücksichtigung, dass der nominelle Aluminiumpreis seit den 1960er Jahren nahezu unverändert geblieben ist, ist diese Verschiebung der Wertschöpfungsanteile vor allem auf die energieeffizienteren Hüttenprozesse sowie die Skaleneffekte beim Massengütertransport zurückzuführen.

Tonerderaffinerien und Schmelzhütten liegen meist in der Nähe günstiger Energiequellen (Island, Norwegen, Bahrain, Russland, Australien), da die Weiterverarbeitung sehr energieintensiv ist und die Energiekosten 20–40% der Gesamtkosten ausmachen, oder sie befinden sich in der Nähe der Abnehmer in den stark industrialisierten Ländern (EU, Nordamerika, China). Aufgrund der ausgewogenen wirtschaftlichen Entwicklung in diesen industrialisierten Ländern und Regionen ist hier die Bedeutung des Aluminiumsektors für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung eher als gering anzusehen.

5.4 Governance

Die Governance-Aspekte bei der Bauxitweiterverarbeitung bis zum Aluminiummetall sind eng mit der Bergbauseite der Produktionskette verknüpft, da die großen Aluminiumproduzenten in der Regel direkt oder indirekt Eigentümer der Vorkette sind bzw. durch Lieferverträge einen starken Einfluss auf den Up-Stream-Sektor nehmen können. Fragen der Konflikte um den Abbau sowie der vergleichsweise hohe Energieeinsatz in der Aluminiumproduktion stehen auch weltweit im Fokus der kritischen Öffentlichkeit, der Regierungen sowie der Endabnehmer (Original Equipment Manufacturer, OEM). Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Aluminiumproduzenten, insbesondere diejenigen, die der Aluminium Stewardship Initiative (ASI) verpflichtet sind, im Sinne von Transparenz und Produktionsstandards zumindest in Europa, Nord- und Südamerika, Russland sowie China und Australien eine Vorreiterrolle im Rohstoffsektor haben. Von den weltweit rund 85 größeren Tonerdefabriken und 150 Aluminiumhütten sind derzeit 57 Verarbeitungsbetriebe nach den ASI-Standards zertifiziert.

6 QUELLENACHWEIS

- [1] GESAMTVERBAND DER ALUMINIUMINDUSTRIE GDA (2018) Aluminiumabsatzmärkte in Deutschland, <http://www.aluinfo.de/absatzmaerkte.html> [Stand 25.5.2020].
- [2] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2019) BGR Rohstoffsituationsbericht 2018, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2018.pdf?blob=publicationFile&v=5 [Stand 25.5.2020].
- [3] ZEPF HP (1997) Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix: Hochleistungswerkstoffe. Expert Verlag, Tübingen.
- [4] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2019) Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover. [Stand 02.12.2019].
- [5] NORSK HYDRO (2018) <https://www.hydro.com/en-DE/sustainability/environment/climate/> [Stand 25.5.2020].
- [6] BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (1998), BGR-Studie: Stoffmengenflüsse und Energiebedarf Aluminium (Sonderhefte Reihe H - Geol. Jahrb., Heft 2) ISBN 978-3-510-95824-5.
- [7] FFE-FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT (2018), CO₂-Verminderung in der Primäraluminiumherstellung https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720_Energiegewende_in_der_Industrie/CO2-Verminde-rung_in_der_Prim%C3%A4raluminiumherstellung.pdf [Stand 25.5.2020].
- [8] UNEP-PNUE-REPORT (2011) Recycling Rates of Metals <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8702> [Stand 25.5.2020].
- [9] INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, <http://recycling.world-aluminium.org/review/global-metal-flow/> [Stand 02.12.2019].
- [10] NorskHydro (2018), <https://www.hydro.com/en-DE/sustainability/environment/climate/> [Stand 25.5.2020].
- [11] GOULD SF (2011) Does postmining rehabilitation restore habitat equivalent to that removed by mining? A case study from the monsoonal tropics of northern Australia Wildlife Research 38(6):482-490.
- [12] ENVIRONMENTAL JUSTICE ATLAS (2020) <https://ejatlas.org> [Stand 02.12.2019].

[13] EITI EXTRACTIVE INDUSTRY TRANSPARENCY INITIATIVE (2018), ITIE Guinee, Rapport ITIE 2016, <https://www.itiedoc-guinee.org/wp-content/uploads/2018/08/180724B-1.pdf> [Stand 25.5.2020].

[14] WORLD BANK GROUP (2018) Worldwide Governance Indicators. <https://info.worldbank.org/governance/wgi/> [Stand: 20.05.2020].

[15] RESOURCE GOVERNANCE INDEX (2017). <https://resourcegovernance.org/> [Stand 23.04.2020].

[16] WORLD OF ALUMINIUM <http://primary.world-aluminium.org/aluminium-facts/raw-materials> 2012 [Stand 25.5.2020].

[17] KUCKSHINRICHS W, MARTENS, PN (2003), Resource Oriented Analysis CRC525 Studie Aluminium, Bericht Forschungszentrum Jülich und RWTH Aachen, http://juser.fz-juelich.de/record/35109/files/Materie_17.pdf?version=1 [Stand 25.5.2020].

[18] NITI AAYOG AND MINISTRY OF MINES (2019) Indian strategy on resource efficiency –aluminium, https://niti.gov.in/writereaddata/files/document_publication/StrategyOnResourceEfficiency_0.pdf [Stand 25.5.2020].

[19] POHL WL (1992), W. & W.E. Petrascheck's Lagerstättenlehre – Eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzen, E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

[20] AUSTRALIAN GOVERNMENT (2016) Mine Rehabilitation, Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-04/lpsdp-a-guide-to-leading-practice-sustainable-development-in-mining-handbook-english.pdf> [Stand 25.5.2020].

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

Autoren:

Jürgen Vasters und Gudrun Franken

Layout:

Jolante Duba

Titelfoto:

© VRD – Fotolia

Stand:

Juli 2020

DOI:

10.25928/5p9f-2x31