



Axel Müller

Der Bergbau von metallischen Rohstoffen und mögliche Konsequenzen für den Stoffkreislauf der Erde

Vortrag auf dem GeoMUWA Herbsttreffen am 14.11. 2014

1. Einleitung

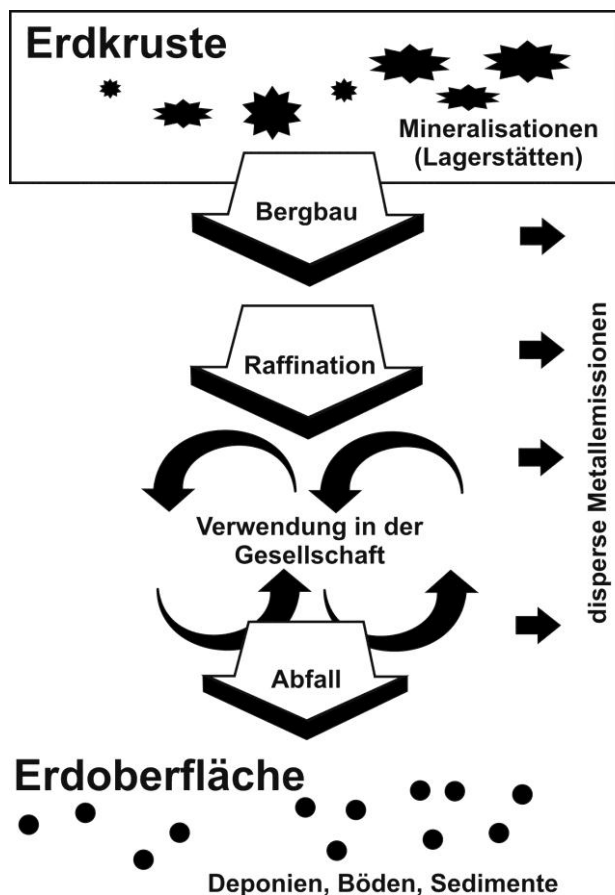
Bereits Karl Marx stellte fest, dass die menschliche Produktion immer ein Einwirken auf die Natur und damit ein Eingriff in den Stoffkreislauf der Erde ist. Die wachsende Bevölkerung verbunden mit steigendem Lebensstandard erfordert eine ständig steigende Warenproduktion. Gleichzeitig wird die stoffliche Zusammensetzung der Produkte immer komplexer. Der Bergbau (Gewinnung von natürlichen Mineralen) entstand aufgrund der gesellschaftlichen Notwendigkeit der Rohstoffbeschaffung und entwickelte sich mit der menschlichen Warenproduktion, anfänglich z.B. Steinwerkzeuge. Die Ursprünge des Metallbergbaus gehen in das Frühneolithikum zurück (ca. 10.000 Jahre; Wilsdorf, 1987). Über Jahrtausende beschränkten sich die verwendeten Metalle hauptsächlich auf Fe, Cu, Sn, Pb, Au und Ag. Heute werden z.B. allein für die Herstellung von Mobiltelefonen ca. 25 verschiedene Metalle benötigt (Müller, 2013). Der steigende Rohstoffbedarf erfordert eine immer intensivere und sich ausweitende Bergbautätigkeit trotz intensiver Bemühungen des Recyclings.

Der Bergbau, im diskutierten Fall der Bergbau von metallischen Rohstoffen (Erze), stellt einen komplexen Eingriff in den Stoffkreislauf der Erde dar. Das Beispiel des Metallbergbaus wurde gewählt, da der Abbau von Metallen weitaus mehr umweltbelastender ist, als der von nichtmetallischen Mineralien (Industriemineralen), obwohl das abgebaute Volumen von Industriemineralen das von Metallerzen um ein vielfaches übersteigt (e.g. USGS, 2014). Metallerze enthalten nur einen kleinen Anteil reinen Metalls, und Metalle kommen oft in chemischen Verbindungen mit Schwefel und gemeinsam mit toxischen Schwermetallen vor. Das Erz muss daher unter hohem Wasserverbrauch und mit Chemikalien behandelt werden, um die Metalle zu extrahieren. Beim Abbau entsteht je nach Schwefelgehalt saures Abwasser, das einen hohen Schwermetallgehalt aufweisen kann. Sulfide, Schwermetalle und Reste der verwendeten Chemikalien finden sich auch im Abraum und können durch Oberflächen- oder Grundwasser oder Wind über größere Entfernung transportiert werden.

Der bergbaubedingte Eingriff in den Stoffkreislauf der Erde und die damit verbundenen Emissionen können wie folgt zusammengefasst werden: (1) Morphologieänderung und Massenbewegung durch die Anlage von Tagebauen und Untertagebergwerken und Akkumulation von Abraum, Flotations- und Laugungsabfall in Halden und Tailings, (2) Großräumige Grundwasserabsenkung durch Trockenlegung der Gruben und Wasserverbrauch durch die Erzaufbereitung, (3) Verunreinigung des Grundwassers, (4) Staub- und Nanopartikelemission durch Abbau und Erzaufbereitung, (5) Produktion und Freisetzen der Gase CO, CO₂, CH₄, SO₂, NO, NO₂, (6) Lärm, (7) Freisetzung und Aktivierung von natürlich gebundenen Schadstoffen wie Pb, Hg, Ni, Cd, und As, und (8) Anreicherung großer Mengen toxischen Abfalls der Flotation, Cyanid- und Schwefelsäurelaugung. Man könnte annehmen, dass die genannten Eingriffe lokal auf die Umgebung der Tagebaue und Gruben begrenzt sind. Wenn man jedoch die Dimension des weltweit aktiven Bergbaus betrachtet, wird offensichtlich, dass die bergbaulichen Eingriffe einen globalen Effekt haben. Ronald J. Allan fasste die Problemstellung mit dem Satz zusammen: "In terms of effluents and wastes, mining is largely a local issue but one of global importance" (Allan, 1997).

Die natürliche Anreicherung der Metalle (Erzlagerstätten) in der oberen Erdkruste ist ein Resultat der chemischen Differenzierung der Erde und komplexer Wechselwirkungen zwischen Lithosphäre,

Atmosphäre und Biosphäre, die sich über Jahrtausende vollzogen haben. Dabei wurden auch toxische Substanzen in der Erdkruste fixiert, sodass die weitere Entwicklung der Biosphäre nicht mehr oder in geringerem Maße von diesen Substanzen beeinträchtigt wurde. Heutzutage werden die Anreicherungen innerhalb weniger Jahre abgebaut und somit dem natürlichen Kreislauf entzogen, teilweise aber auch wieder in die Biosphäre eingebracht. Im Produktionsprozess werden die Erze zu synthetischen Legierungen und Stoffen verarbeitet, die in der Regel in der Natur nicht vorkommen. Wenn diese Stoffe nicht recycelt werden und in den natürlichen Kreislauf gelangen, reagieren sie mit natürlichen Stoffen. Wie diese anthropogen verursachten chemischen Reaktionen und deren Reaktionsprodukte den langfristigen Stoffkreislauf beeinflussen, ist weitestgehend unbekannt. Auch das Wissen über die langfristigen Wirkungen von synthetischen Legierungen und Stoffen auf den menschlichen Organismus ist oft unzureichend, z.B. ob Aluminium gesundheitsschädigend ist oder nicht (e.g. Exley und House, 2012). Diese Herausforderungen werden am Ende dieser Studie ansatzweise diskutiert. Bergbau ist ein anthropogener Eingriff, der natürlich gebundene Metalle an die Umwelt freigibt. Dieser anthropogene Weg bzw. Kreislauf der Metalle vom Abbau natürlich angereicherter Lagerstätten bis zu ihrer Ablagerung in Abraumhalden, Tailings, Böden und Sedimenten ist in Abbildung 1 vereinfacht dargestellt (Salomons, 1995).



Momentan beschränken sich die Mediendiskussionen hauptsächlich auf die anthropogen verursachte Emission von CO₂ in die Atmosphäre und deren möglicher Einfluss auf das Klima. Diese Sicht einer möglichen Klimaänderung durch menschliche Aktivitäten erscheint jedoch sehr einseitig, allein wenn man die Dimensionen und Art der Eingriffe in den natürlichen Stoffkreislauf durch den Metallbergbau betrachtet. In Rahmen dieser Studie soll versucht werden, einige der Eingriffe und Emissionen des Metallbergbaus zu quantifizieren um die Dimension zu veranschaulichen.

Abbildung 1. Der anthropogene Kreislauf von Metallen ausgehend von der Gewinnung von Lagerstätten in der Erdkruste, bis zu ihrer Ablagerung als disperse Schadstoffe in Deponien, Böden und Sedimenten. Nach Salomons (1995).

2. Bergbauliche Massenbewegungen und Morphologieänderungen

Die Gewinnung von ökonomisch profitablen Metallerzen erfolgt entweder im oberflächigen Tagebau (über Tage) oder im Untertagebau (unter Tage). Ein Teil der Metallerze, wie zum Beispiel die Al-, Fe-, Ni- und Zr-Erze liegen als Lockergesteine vor (Bauxite, Laterite, Schwermineralsande), die in relativ

flachen und großflächigen Tagebauen, meist ohne Anwendung von Sprengtechnik abgebaut werden (Tabelle 1). Allein die Fläche, die jährlich durch den Bauxitabbau (Al-Erz) neu erschlossen wird, beträgt 40 bis 50 km² (Hydro, 2015). Ein Teil der Metallerze wird unter Tage abgebaut. Die Anlage einer Grube, ob über oder unter Tage, ist in jedem Fall ein Eingriff in das lokale Ökosystem, das durch das Roden von Wäldern, Errichtung von Infrastruktur und Aufbereitungsanlagen, Abpumpen und Entnahme von Grund- und Oberflächenwasser, Lagerung von Abraum und Abwässern und Emission von Staub und Lärm gestört wird.

Eine globale Abschätzung der oberflächigen Gesamtabbauf Flächen von Metallerzen ist nicht dokumentiert. Zahlen über die Gesamtmenge (Tonnage) der weltweit abgebauten Metallerze existieren ebenfalls nicht. In Tabelle 1 sind deshalb die abgebauten Erzmengen für Metalle und das Jahr 2013 überschläglich aus den produzierten Tonnagen der Reinmetalle (USGS, 2014) und den durchschnittlichen Metallgehalten in gewonnenen Erzen berechnet. Halb- (B, Si, Ge, As, Se, Sb, Te), Alkali- (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) und Erdalkalimetalle (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) sind in die Berechnung nicht einbezogen. Für die Berechnung mussten folgende Abschätzungen vorgenommen werden. Der durchschnittliche Abbauegehalt eines Metalls hängt von vielen Faktoren ab und ist für jede Lagerstätte unterschiedlich. Daher sind die angegebenen Werte Schätzungen, die auf zahlreichen Quellen beruhen. In einigen Fällen entspricht der durchschnittliche Abbauegehalt ca. 2,5-mal dem durchschnittlichen Mindestabbauegehalt (Cut-off Grade), der jedoch ebenfalls von Lagerstätte zu Lagerstätte variiert. Die errechneten Gesamttonnagen der Erze wurden mit der durchschnittlichen Dichte der kontinentalen Erdkruste (2,7 g/cm³) korrigiert, da die Dichte der reinen Metallprodukte höher ist, als die Dichte des entsprechenden Metallerzes. Die Tonnagen der aus Festgesteinen gewonnenen Erze wurden zusätzlich mit drei multipliziert, da das durchschnittliche Erz-/Abraumverhältnis 1:2 beträgt. Das Erz-/Abraumverhältnis (Stripping Ratio) für Tagebaubergbau von Metallerzen variiert zwischen 1:2 und 1:8, abhängig von den lokalen Bedingungen. Für den Untertageabbau ist das Verhältnis geringer, ca. 1:0,2. Der Abraum für Lockergesteinserze wurde vernachlässigt, da er in der Regel unter 1:0,5 liegt. Weiterhin wurde angenommen, dass die Metalle hundertprozentig aus den Erzen gewonnen wurden. In der Realität liegen die Gewinnungsgrade (Recovery) zwischen 30 und 90 %. Deshalb sind die angegebenen Gesamttonnagen als Minimumwerte zu betrachten. In Tabelle 1 sind ebenfalls die Durchschnittsgehalte der Metalle in der kontinentalen Erdkruste nach Rudnick und Gao (2005) aufgelistet, um das Verhältnis zu den durchschnittlichen Abbauegehalten zu veranschaulichen. Die so errechnete geförderte Metallerzmenge betrug für das Jahr 2013 8,1 Milliarden t, wobei 4,9 Milliarden t aus Festgestein und 3,2 Milliarden t aus Lockerstein gewonnen wurden. Bei einer angenommenen Dichte von 2,7 g/cm³ entspricht das 21,9 km³ Gestein.

Aus dem Volumen lässt sich theoretisch die Fläche, die von Tagebauen eingenommen wird, grob abschätzen. Bei einer durchschnittlichen Tagebautiefe von 200 m betrug die weltweite Erweiterung und Neuerschließung von Gruben im Jahr 2013 109 km². Die Zahl erscheint jedoch viel zu gering, wenn man die von Hydro (2015) veranschlagte Fläche für die jährliche Neuerschließung von Bauxitlagerstätten bis zu 50 km² betrachtet. Die Neuerschließung bedingt jedoch die Anlage von Abraumhalde, Abwassertailings, Aufbereitungsanlagen und Infrastruktur, die das Drei- bis Zehnfache des eigentlichen Grubenareales einnehmen. Man kann also von einer bergbaulichen Neuerschließungsfläche von mindestens 327 km² im Jahr 2013 ausgehen. Das entspricht etwa der Fläche der Stadt Dresden.

Eine weitere Schlussfolgerung, die aus dieser Massenberechnung gezogen werden kann, ist der globale Sprengstoffverbrauch für die Metallerzgewinnung aus Festgestein. Nimmt man einen spezifischen Sprengstoffverbrauch von 0,5 kg/m³ für leicht sprengbares Gestein an (Leins und Thum, 1970), dann beläuft sich der benötigte Sprengstoff für 13,2 km³ Festgestein auf 6,6 Million t.

Tabelle 1. Tonnageabschätzung der im Jahr 2013 weltweit gewonnenen Metallerze. Die einzelnen Parameter, die für die Berechnung der Gesamttonnagen verwendet wurden (durchschnittlicher Abbauegehalt, Metallproduktion, Dichte) sind im Text erklärt. REO – Seltene Erden-Metalloxide. n.d. – nicht dokumentiert.

Element	Durchschnittlicher Abbauegehalt des Metallerzes	Durchschnittlicher Gehalt in der oberen Erdkruste ¹	Anmerkungen	Bergbauliche Metallproduktion 2013 ²	Dichte	Erztonnage als Festgestein ohne Abraum	Festgesteinserztonnage inklusive Abraum	Erztonnage als Lockergestein ohne Abraum
	ppm	ppm		t	g/cm ³	t	t	t
Ag	350	0,053		26.000	10,5	19.121.355	57.364.065	-
Al	160.000	81.504	Gewinnung aus Bauxit (Lockergestein)	47.300.000	2,7	-	-	295.625.000
Au	8	0,0015		2.770	19,3	48.441.502	145.324.505	-
Bi	-	0,16	Nebenprodukt der Pb-, W- Gewinnung	7.600	9,8	-	-	-
Cd	-	0,09	Nebenprodukt der Zn- Gewinnung	21.800	8,6	-	-	-
Co	5.000	17,3	Nebenprodukt der Cu-, Ni- Gewinnung	120.000	8,9	-	-	-
Cr	180.000	92		26.000.000	7,2	70.416.667	211.250.000	-
Cu	8.000	28		17.900.000	8,9	691.261.798	2.073.785.393	-
Fe	400.000	39.176	80 % Gewinnung aus Lateriten und Lockergestein 20% Gewinnung aus Festgestein	2.950.000.000 (Fe-Erz)	7,9	590.000.000	1.770.000.000	2.360.000.000
Ga	-	17,5	Nebenprodukt der Bauxitverhüttung	280	5,9	-	-	-
Hg	5.000	0,05		1.810	13,6	73.318	219.955	-
In	-	0.056	Nebenprodukt der Zn- Gewinnung	770	7,3	-	-	-
Mn	350.000	774		17.000.000	7,2	28.839.286	86.517.857	-
Mo	2.000	1,1		270.000	10,3	35.587.573	106.762.718	-
Nb (Ta)	7.000 (400)	12 (0,9)	Vorwiegend Gewinnung aus Seifenlagerstätten (Lockergestein), Nebenprodukt der Sn- Gewinnung	51.000	8,6	-	-	2.322.364

Ni	10.000	47	70 % Gewinnung aus Lateriten (Lockergestein) 30% Gewinnung aus Festgestein	2.490.000	8,9	24.396.404	73.189.213	54.612.135
Pd	-	n.d.	Nebenprodukt der Cu-, Cr-, Ni-Gewinnung	211	12,0	-	-	-
Pb	80.000	17		5.400.000	11,4	20.107.895	60.323.684	-
Pt	300	0,0005	Nebenprodukt der Cu-, Cr-, Ni-Gewinnung	192	21,4	-	-	-
Re	-	0,0002	Nebenprodukt der Mo-Gewinnung	53	21,0	-	-	-
REO + Y ₂ O ₃	20.000	-		110.000	7,0	2.189.000	6.567.000	-
Sc	-	14	Nebenprodukt der Gewinnung verschiedener anderer Metalle	n.d.	3,0	-	-	-
Sn	16.000	2,1		230.000	7,3	5.461.712	16.385.137	-
Th	-	10,5	Nebenprodukt der REO-Gewinnung	n.d.	11,7	-	-	-
Ti als FeTiO ₃	30.000 in Sand, 300.000 in Festgestein	3.637 (Ti)	75% Gewinnung aus Schwermineralsand, 25% Gewinnung aus Festgestein	6.790.000	4,8	6.153.438	18.460.312	98.455.000
Ti als TiO ₂	10.000	3.637 (Ti)	Gewinnung aus Schwermineralsand	770.000	4,2	-	-	49.775.000
Tl	-	0,9	Nebenprodukt der Cu-, Pb- und Zn-Gewinnung	10	11,8	-	-	-
U	1.000	2,7		58.000	19,2	8.206.094	24.618.281	-
V	-	97	Nebenprodukt der Gewinnung verschiedener anderer Metalle	76.000	6,1	-	-	-
W	800	1,9		71.000	19,3	12.476.870	37.430.611	-
Zn	80.000	67		13.500.000	7,1	72.538.732	217.616.197	-
Zr (Hf)	2.000	193 (5,3)	Gewinnung aus Schwermineralsand	1.440.000	6,5	-	-	299.918.769
Summe						1.635.271.644	4.905.814.931	3.160.708.268

¹ – Daten von Rudnick und Gao (2005); ² – Daten von USGS (2014)

Eine unmittelbare Konsequenz der Anlage von Tagebauen und Untertagebergwerken ist die Absenkung des Grundwasserspiegels in der Umgebung der Gruben. Das Wasserabpumpen dient einerseits zur Trockenlegung der Gruben und andererseits werden große Wassermengen für die Staubbindung und Erzaufbereitung (z.B. Laugung, Flotation) verbraucht. Modern ausgerüstete Gruben können mittlerweile einen Teil des in die Aufbereitung eingespeisten Wassers recyceln. Problematisch ist jedoch nach wie vor der Grubenbetrieb in ariden Gebieten, wo der Wasserverbrauch oft höher ist, als das vor Ort zugängliche Wasser. Um das Problem zu lösen, baut derzeit, zum Beispiel, die Bergbaufirma Rio Tinto für den Betrieb der Rössing Urangrube in der Namib Wüste eine Meerwasserentsalzungsanlage in Swakopmund, von der über eine ca. 70 km lange Rohrleitung das benötigte Wasser zur Grube transportiert werden soll (Namibia Economist, 2014).

Folgen der Grundwasserabsenkung sind großräumige Geländeabsenkungen in der Grubenumgebung speziell im Lockergesteinsgebirge. Neben der Grundwasserabsenkung können Geländeabsenkungen, Erdbeben, Grubeneinbrüche (u.a. Pingen) und anthropogene Erdbeben durch das Entfernen von Vegetation, steilen Tagebauböschungen, und von zu großen und instabilen Grubenhöhlen unter Tage verursacht werden. Ein jüngstes Beispiel ist der 70-Millionen-m³ Erdbeben in der Bingham Canyon Grube in den USA am 10. April 2013 (Romero und Adams, 2013). Die Anlage von Gruben, Grundwasserabsenkung und die dadurch verursachten Geländeänderungen führen zu einer Störung des hydrologischen Zustandes, der auch nach der Rekultivierung von stillgelegten Bergwerken in der Regel nicht wieder hergestellt werden kann. Ehemalige Gebiete des Erzbergbaus sind für immer der Trinkwassernutzung entzogen, einmal durch die Störung der hydrologischen Verhältnisse aber vor allem durch gesundheitsschädigende Stoffe, die durch Bergbau und Erzanreicherung freigesetzt werden und in das Grundwasser gelangen, trotz vieler Schutzmaßnahmen, wie im Folgenden diskutiert wird.

3. Bergbaubedingte Stoffemissionen

Schmidt (2000) unterscheidet im Bergbau primäre, sekundäre und tertiäre Stoffemissionen, die Veränderungen des Stoffhaushaltes der Erde verursachen. Primäre Stoffemissionen entstehen unmittelbar durch die Bergbautätigkeit als Folge der Herauslösung von Rohstoffen und Nebengestein aus dem Gesteinsverband durch Bohren, Sprengen, Baggern, Brechen und Transport. Sekundäre Stoffbelastungen resultieren aus Aufbereitungs- und Verhüttungsprozessen der gewonnenen Rohstoffe und aus Emissionen abgelagerter Rückstände der Produktion (z. B. Haldenmaterial und Abwässer). Weitere Stoffausträge, sogenannte tertiäre, sind auf die Ansiedlungen infolge der örtlich vorherrschenden Bergbautätigkeit, den Verkehr und andere Industriezweige zurückzuführen. Die Stoffemission schließt auch die Emission der Gase CO, CO₂, SO₂, NO, NO₂, und CH₄ ein, auf die aber hier nicht näher eingegangen wird. Ausführungen über die globale, bergbaubedingte Gasemission finden sich unter anderem in Norgate und Haque (2010).

Beim Extrahieren, Transport und Aufbereiten (mahlen, sieben) der Erze werden kleine Gesteinsfragmente <75 µm in die Luft abgegeben. Die schwereren Partikel in der Regel >20 µm setzen sich in der Nähe der Emissionsquelle ab. Wind und Luftturbulenzen können den Absetzungszeitraum verzögern bzw. das Absetzungsgebiet vergrößern. Partikel <20 µm werden von der Luftzirkulation weit transportiert und können für eine längere Periode in der Luft verbleiben. Die Partikelgröße von inhalierbarem (alveolengängigem) Feinstaub ist <10 µm. Wie viel Feinstaub durch Bergbautätigkeit weltweit in die Atmosphäre emittiert wird, ist nicht dokumentiert. Feinstaub beeinflusst das Klima, wenn größere Mengen in höhere Luftschichten gelangen und er kann gesundheitsgefährdend sein, in Abhängigkeit seiner chemischen und strukturellen Zusammensetzung. Typische gesundheitsgefährdende Feinstoffe im Bergbau sind Quarz (SiO₂), Pb, As, Ni, Cd, U und Asbest. Langzeitliche Aussetzung der Bergarbeiter kann zu chronischen Lungenkrankheiten wie Silikose, Asbestose, Pneumokoniose oder zu Lungenkrebs führen. Im unmittelbaren Grubengelände konnte in den letzten Jahrzehnten aufgrund der getroffenen Maßnahmen zur Staubbindung und zum Atemschutz das Gesundheitsrisiko stark vermindert werden. Kritisch sind aber nach wie vor Staub- und Feinstaubbelastungen außerhalb der Grubengelände. Ein Beispiel ist die Evakuierung der chilenischen Bergarbeiterstadt Chuquicamata im Jahre 2004, wo aufgrund der hohen Belastung von teilweise giftigen Kupferoxid- und Sulfid-

haltigen Stäuben die Einwohner in die 15 km entfernte Stadt Calama umgesiedelt wurden, um das Gesundheitsrisiko der Menschen zu verringern. Die Stadt Chuquicamata befand sich 2 km von der gleichnamigen Kupfergrube entfernt. Der aus der Kupfergewinnung resultierende Staub war die Ursache für viele Erkrankungen, wie Staublungen, Asthma und einige Krebsarten. Aufgrund der Gefahr wurde um die Grube eine einwohnerfreie Zone mit einem Radius von 10 km geschaffen.

Ein Großteil der Metallerze kommt in der Natur als Sulfide vor (Tabelle 2). Um das sulfidische Erz anzureichern, wird es nach der Zerkleinerung (Brechen) mit Säuren, meist Schwefelsäure, oder mit Mikrobakterien (Bioleaching) aus dem Gestein gelaugt. Feinverteilt Gold wird vorwiegend mit alkalischem Cyanid (z.B. NaCN) gelaugt. Natriumcyanid ist ein starkes Gift, das sich in Kontakt mit Luft oder Wasser relativ schnell zersetzt. Das gebrochene Erz wird auf einer Fläche mit impermeabler Versiegelung ausgelegt. Anschließend wird es mit Säuren bzw. das Cyanid über Anlagen berieselt. Die ablaufenden, oxidierten, erzhaltigen Lösungen werden über Drainageanlagen aufgefangen und zur Aufbereitungsanlage geleitet und weiter angereichert. Der größte Kontaminationsgefahr besteht bei der Deponierung des gelaugten Gesteins, das noch 10 % bis 70% der ursprünglichen Metalle enthält und hochreaktiv ist, aufgrund der enthaltenen Chemikalien und der nicht vollständig oxidierten Sulfide. Flüssige Reste der Laugung und Flotation werden in Tailings (Abwasserseen) gespeichert und eingetrocknet. Die Halden des gelaugten Gesteins und die Tailings werden, im Idealfall, allseitig permanent abgedichtet, so dass keine toxischen Stoffe durch Auswaschung oder Wind in die Umgebung bzw. das Grundwasser gelangen können. Das ist jedoch in der Regel nicht der Fall, speziell in Schwellen- und Entwicklungsländern, wo Kontrollinstitutionen nicht funktionieren und die Grubenbetreiber sich nach dem Abbau der Verantwortung für Gruben- und Abraumssicherung und Rekultivierung oftmals entziehen. Ein besonders gravierendes Beispiel der Folgen der Deponierung von Erzabfällen ist die Panguna-Kupfermine in Papua Neu Guinea. Pro Tag wurden dort ca. 130.000 t Abraum und Laugungsabfälle in den Fluss Kaverong verbracht, ca. 600 Millionen t bis zur Stilllegung der Grube (Young, 1993). Die Verunreinigung durch Kupferoxide und toxische Metalle erstreckt sich bis in das 30 km entfernte, 700 ha große Mündungsdelta, wo insgesamt 1.800 ha des Flusssystemes Kaverong/Jaba kontaminiert sind.

Ein Vorteil der mikrobiellen Erzlaugung aus erzarmen Gesteinen ist z. B. die Verhinderung von Umweltkontaminationen durch saure und kupferhaltige Auswaschungen von Halden und Grubengewässern. Aber auch hier besteht das Problem für den Gewässerschutz und damit für die Umwelt, dass unkontrollierte mikrobielle Emissionen von unzureichend abgedichteten Halden ausgehen.

Der Umfang und Zustand der lokalen Kontamination durch saure Abwässer, die einen hohen Gehalt an Schwermetallen und Reste verwendeter Chemikalien aufweisen können, sind in zahlreichen Publikationen studiert und analysiert und relativ gut verstanden (e.g. Oertel, 2003 und Referenzen darin). Betrachtungen über die globalen Auswirkungen der bergbaubedingte Stoffemissionen, z.B. des Schwefelausstoßes, gibt es nur wenige (e.g. Thornton, 1996; Azcue, 1999).

Die größten Gas- und Staubemissionen werden durch die Schmelz- und Hüttenindustrie verursacht (e.g. Norgate und Haque, 2010), in denen die Metallkonzentrate zu reinen Metallen angereichert werden. Dieser Produktionsprozess ist gleichzeitig der energieintensivste aller Industriezweige. Auf die Stoffemissionen durch Schmelzwerke wird hier nicht näher eingegangen, da dieser Produktionsabschnitt nicht zum Bergbau gerechnet wird. Nur ein Beispiel sei hier genannt. Die Verhüttungs- und Schmelzwerke der russischen Nickelgrube Norilsk Nickel stehen für ca. 25% der russischen industriellen SO₂-Emission. Norilsk Nickel emittierte im Jahr 2009 rund 975.000 t Schwefel in die Atmosphäre (Bellona Foundation, 2010). Schwefelverbindungen zählen zu den gefährlichsten Schadstoffen in der Luft aufgrund ihrer negativen Auswirkungen auf die Umwelt, wie z.B. saurer Regen. Rund 96% des Schwefels in die Atmosphäre liegt in Form von SO₂ vor. Der Rest wird von Sulfaten, H₂S, CS₂, COS und anderen Verbindungen eingenommen (Info Mine Research Group, 2008). Bedingt durch die Verhüttungsprozesse gelangen in Norilsk neben SO₂ auch eine Reihe von Schwermetallen in die Atmosphäre, wie Ni, Cu, Co und As. Die Hauptverunreinigung kommt von Ni und Cu. Die meisten Schwermetalle liegen in der Atmosphäre in der Form von Stäuben und Aerosolen vor, aber auch in gasartiger Form. Die Metalle Pb, Cd, Cu und Zn bilden hauptsächlich Aerosole.

Tabelle 2. Natürliche vorkommende Erzminerale und deren synthetischen Produkte

Element	Natürlich vorkommende Erzminerale	Beispiele synthetischer Legierungen und Stoffe
Ag	Argentit Ag ₂ S, Spurenbestandteil in Galenit und gediegenem Gold	Ag, AgNO ₃ , Ag ₂ O, Ag ₂ CO ₃ , Ag ₃ PO ₄ , AgCN
Al	Gibbsit, Al(OH) ₃ , Boehmit AlO(OH)	Al, Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ , AlN, AlCl ₃ , AlMn, AlMg, AlMgMn, AlSi, AlSiMg, AlSiCu, AlMg, AlMgSi, AlCuTi, AlCuTiMg, AlCuMg, AlCuSiMn, AlMgSi, AlZnMg, AlZnMgCu, AlCuMgMn
Au	gediegen Au, AuAg	Au, AuAg, AuCu, AuAgCu, AuPd, AuPb
Bi	Bismuthinit Bi ₂ S ₃	Bi, BiFe, BiMn, BiCd, BiOCl, BiPbSn, BiCdPbSn
Cd	Substitution für Zn in Sphalerit ZnS	Cd, CdO, CdS, CdSe, AgCuZnCd
Co	Cobaltit CoAsS, Skutterudit CoAs ₃	Co, CoO, CoSO ₄ , CoCrMo, CoAl ₂ O ₄ , LiCoO ₂ ,
Cr	Chromit FeCr ₂ O ₄ .	Cr, FeCrSi, FeCrNiSiC, FeCrSiC, FeWCrC, Cr ₂ O ₃ , CrO ₂ , CoCr, NiCr, PbCrO ₄
Cu	Chalkopyrit CuFeS ₂ , Bornit Cu ₅ FeS ₄ , Covellit CuS, Chalcocit, Cu ₂ S, Malachit CuCO ₃ · Cu(OH) ₂ , Azurit 2CuCO ₃ · Cu(OH) ₂ , Kuprit Cu ₂ O, Chrysokoll CuSiO ₃ · 2H ₂ O, gediegen Cu	Cu, CuSn, CuZn, CuZnNi, CuAl, CuPb, CuSi, CuBe, NiCu, MnCu, CuZnAlSn, CuSO ₄ , CuO
Fe	Magnetit Fe ₃ O ₄ , Hematit, Fe ₂ O ₃ , Goethit FeO(OH), Siderit FeCO ₃ , Chamosit Fe ₂ Al ₂ SiO ₅ (OH) ₄	Fe, FeSi, Fe ₃ C, FeCrSi, FeCrNiSiC, FeMnSiC, FeMoCrC, FeSiC, FeCrSiC, FeWCrC, NiFe, FeMo, FeMoCu,
Ga	Spurenbestandteil in Bauxit	GaAs, GaN, GaInSn, V ₃ Ga, GaAl, AlGaAs, GaAsP, InGaN
Hf	Spurenbestandteil in Zirkon ZrSiO ₄	Hf, NiHf, TaHf, MoHf, WHf
Hg	Zinnober, HgS	Hg, AgZnCuInHgZn, NaHg
In	Spurenbestandteil in Sphalerit ZnS und Kassiterit SnO ₂	In, In ₂ O ₃ · SnO ₂ , InSn, InBi, InCd, InPb, InGaN, AlGaInP AgZnCuInHgZn,
Mn	Pyrolusit MnO ₂	Mn, FeMnSiC, MnCu, NiMn, MnO ₂ , MnCl ₂ , KMnO ₄ ,
Mo	Molybdenit MoS ₂	Mo, FeMo, FeMoCu, FeMoCrC, MoS ₂
Nb	Kolumbit FeNb ₂ O ₆	FeNb, NiNb, NiCrFeNbMoTiAl, Nb ₃ Ge
Ni	Pentlandit (Ni,Fe) ₉ S ₈	Ni, NiCrNbMo, NiCrFe, NiFe, NiCu, NiMo
Pd	Spurenbestandteil	Pd, PdCl ₂ , PdH _x
Pb	Galenit PbS	Pb, PbO, PbO ₂ , Pb ₃ O ₄ , PbSb, SnPb, PbSnSb, BiPbCdSn, C ₈ H ₂₀ Pb, 2 PbCO ₃ · Pb(OH) ₂ , Pb(N ₃) ₂
Pt	gediegenes Metall	Pt, PtIr, PtSi, PtRe, H ₆ Cl ₂ N ₂ Pt
Re	Spurenbestandteil in Molybdenit MoS ₂	NiCrFeRe, PtRe
REO+Y ₂ O ₃	Monazit CePO ₄ , Bastnäsit (Ce,La)CO ₃ F,	NdFeB, Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , Y ₂ O ₃ :Eu, Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce[Tb,Ga], BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu, (La-CeTb)PO ₄ , Tb _x Dy _{1-x} Fe ₂
Sc	Thortveitite (Sc,Y) ₂ Si ₂ O ₇	ScI ₃ , Sc ₂ O ₃ , AlLiSc
Sn	Kassiterit SnO ₂ , Stannit Cu ₂ FeSnS ₄	Sn, CuSn, SnPb, SnCuPb, SnSbCu, SnSbCuBi, CuAlZnSn, C ₁₂ H ₂₈ Sn, In ₂ O ₃ · SnO ₂ ,
Ta	Tantalit FeTa ₂ O ₆	Ta, Ta ₂ O ₅ , TaC
Th	Thorit ThSiO ₄	Th, ThO ₂ , Th(NO ₃) ₄
Ti	Ilmenit FeTiO ₃ , Rutil TiO ₂	Ti, TiO ₂ , TiAlV, Li ₂ TiO ₃ , TiAlSnZrMo
U	Uraninit U ₃ O ₈	U, U ₃ O ₈ , UO ₂ , UO ₃ , UF ₆
V	Roskoelit V-mica, Montroseit VO(OH), Substitution für Fe in Magnetit Fe ₃ O ₄	V, V ₂ O ₅ , FeV,
W	Wolframit FeWO ₄ , Scheelit CaWO ₄	W, WC, FeWCrC, K ₂ WO ₄ , NiWO ₄ , PbWO ₄
Zn	Sphalerit ZnS	Zn, CuZn, ZnO, ZnCl ₂ , ZnS, ZnAl, ZnAlCu, ZnSe
Zr	Zirkon ZrSiO ₄	Zr, ZrO ₂ , ZrNb, ZrSnFeNi

4. Beispiele für Auswirkungen naturfremder Legierungen und metallhaltiger Stoffe auf Umwelt und Menschen

Am Ende der Kette der Rohstoffproduktion steht die Bereitstellung künstlicher Metallegierungen und metallhaltiger Stoffe für die Industrieproduktproduktion. Die Mehrzahl dieser Legierungen und Stoffe kommen in der Natur nicht vor (Tabelle 2) und sind somit Fremdstoffe des natürlichen Stoffkreislaufes. Über nicht-recyclten Abfall und disperse Emissionen gelangen diese synthetischen Stoffe in den natürlichen Kreislauf und reagieren dort mit natürlichen Stoffen. Solange der Abfall in Müllhalden konzentriert und abgedichtet ist, unterliegen die Reaktionen weitestgehend einer Kontrolle und können eventuell als zukünftige Lagerstätten genutzt werden. Ein Großteil der Abfälle gelangt aber diffus in den Boden und die Atmosphäre und entzieht sich daher einer Kontrolle bzw. zukünftigen Nutzung. Durch die potentielle Zunahme der Anzahl und der Komplexität der produzierten synthetischen Stoffe in den letzten Jahrzehnten, fällt die Forschung mit der Untersuchung der Auswirkungen auf den natürlichen Stoffkreislauf und den menschlichen Organismus immer weiter zurück. Einige Herausforderungen können im Folgenden nur angerissen werden.

Technetium (Tc) ist ein in den letzten Jahrzehnten in zunehmenden Mengen, künstlich produziertes Element, insbesondere sein langlebiges, radioaktives Isotop Tc^{99} . Mehrere Tonnen Tc entstehen jährlich durch die Spaltung des Uranisotops ^{235}U in Atomreaktoren. Die bis zu Beginn des 21. Jahrhunderts künstlich hergestellte Gesamtmenge des Metalls liegt bei mehr als 78 t und damit weit über den natürlichen Tc-Vorkommen (Yoshihara, 1996). Bei oberirdischen Kernwaffentests wurden bis 1994 etwa 250 kg Tc in die Atmosphäre abgegeben. Der größte Teil des reaktorproduzierten Metalls ist radioaktiver Abfall, der langfristig und strahlungssicher gelagert werden muss, da das Isotop Tc^{99} eine Halbwertszeit von mehr als 200.000 Jahren hat. Aus dem Kernkraftwerk im britischen Sellafield wurden von 1995 bis 1999 etwa 900 kg des Metalls in die Irische See eingeleitet (Tagami, 2003), dass zum Beispiel bei Hummern aus der kontaminierten Irischen See nachgewiesen werden konnte und somit in die lokale Nahrungskette gelangte (Harrison und Phipps, 2001).

Fast die Hälfte der Weltjahresproduktion von Platin (Pt) und Palladium (Pd) wird für die Herstellung von Katalysatoren verbraucht. Beim Fahrzeugfahren werden entlang der Straßen kontinuierlich Spurenkonzentrationen von Pt und Pd ausgestoßen und abgelagert. Dies führt zu künstlichen Pt- und Pd-Konzentrationen in der Umgebung von Verkehrswegen, was eine extrem rasche Veränderung im Verhältnis zu der globalen Elementverteilung bewirkt. Pt und Pd wurden in der Natur durch eine ungewöhnliche Kombination von geologischen Prozessen in sehr wenigen Lokalitäten der Erde konzentriert. Selbst in diesen angereicherten Lokalitäten betragen die abbauwürdigen Konzentrationen dieser Edelmetalle nur wenige Millionstel (ppm). Jüngste Studien zeigen, dass sich die Pt- und Pd-Konzentrationen im Straßenstaub in der Umgebung von verkehrsreichen Kreuzungen oder Tunneln, den Konzentrationen in natürlichen, abbauwürdigen Lagerstätten annähern (Prichard, 2007). Diese anthropogene, disperse Umverteilung dieser sehr seltenen Metalle hat zur Folge, dass sie nicht wiedergewinnbar sind und sich einer zukünftigen Nutzung entziehen. Auswirkungen von Pt und Pd und deren Verbindungen auf Mensch und Umwelt, Pd ist leicht toxisch, sind wenig erforscht. Bekannt ist, z.B., dass Platin in den Wurzeln von Pflanzen nach der Aufnahme akkumuliert wird.

Im den nächsten Beispielen sind synthetische Legierungen und metallhaltige Stoffe diskutiert, die bewusst und direkt mit dem menschlichen Körper in Kontakt gebracht werden. Die gesundheitlichen Konsequenzen bei langfristigen Kontakt sind für viele eingesetzte Stoffe nicht ausreichend untersucht und daher umstritten. In der Kosmetik wird eine Vielzahl von neuartigen synthetischen, metallhaltigen Stoffen verwendet. Die kosmetische Anwendung dieser Stoffe ist in jedem Fall kritisch zu betrachten, da die Stoffe direkt auf der Haut aufgetragen werden und, wenn sie als Mikropartikel vorliegen, in den Körper eindringen können. Ein momentan viel diskutiertes Thema sind Aluminiumchloride in Deodorants. Die meisten Antitranspirante sowie ca. 80% aller Deodorants enthalten Aluminiumchlorid als schweißhemmenden Wirkstoff. Aluminiumchlorid ist in höheren Konzentrationen ein Nervengift (He und Strong, 2000). Hochdosiert beeinträchtigt Aluminium die Blut-Hirn-Schranke, kann die DNA beschädigen und besitzt negative epigenetische Effekte (Lankoff et al., 2006). Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) hat im Februar 2014 eine Stellungnahme veröffentlicht, aus der hervorgeht, dass die menschliche Haut vor allem durch Antitranspirantien viel mehr Aluminium auf-

nimmt als die EU-Vorgaben erlauben (Bundesinstitut für Risikobewertung, 2014). In diesen Zusammenhang wird auch ein möglicher Zusammenhang zwischen Aluminiumexposition und der Alzheimer Krankheit diskutiert. Bisher wurde aber kein Nachweis erbracht, dass eine Aluminiumbelastung durch die Nutzung von Antitranspirantien zu fortschreitender Demenz oder der Alzheimer Krankheit führt (Ehgartner, 2013). Die Problematik der Beweisführung und der Diskrepanz zwischen einem wissenschaftlichen Nachweis und einem juristischen Beweis hat z.B. Ginzburg (1991) ausführlich diskutiert. Ein deutliches Beispiel ist der Fall Plimer, dessen Klage gegen Kreationisten abgewiesen wurde, da wissenschaftliche Plausibilität keinen 100 prozentigen juristischen Nachweis darstellt.

Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung von Amalgam (AgSnCuInHgZn) als Zahnimplantat. Ein Zusammenhang zwischen Amalgamimplantaten und ernststen Gesundheitsbeschwerden in Folge von Quecksilberbelastung konnte bisher nicht belegt werden. Es wird jedoch eingeräumt, dass Menschen, die mehrere Zahnfüllungen mit verschiedene Metallen haben (Gold, Amalgam, Silber), möglicherweise erhöhten Quecksilberkonzentrationen ausgesetzt sind, da durch die elektrochemische Korrosion im Mund Quecksilberionen aus dem Amalgam freigesetzt werden können (Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte, 2005). Bei der Aufnahme von Quecksilber kann es zur Einlagerung von Quecksilber im Körper kommen, vor allem im Fettgewebe. Dies ermöglicht die neurotoxische Wirkung des Schwermetalls, denn Nervengewebe ist u. a. von Fett umgeben. Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) empfiehlt deshalb, bei Schwangeren und Nierengeschädigten auf die Verwendung von Amalgam zu verzichten.

In der Magnetresonanztomographie (MRT) werden seit zwei Jahrzehnten Gadolinium(Gd)-haltige Kontrastmittel für die Untersuchung von Patienten eingesetzt. Durch die Kontrastmittel werden Gefäße und Organe bei der MRT besser sichtbar gemacht. Die Kontrastmittel werden über die Nieren ausgeschieden. 1997 trat erstmals eine bis dahin unbekannte Krankheit auf, heute als nephrogene systemische Fibrose (NSF) bezeichnet, die in einem Zeitraum von zwei Tagen bis 18 Monaten nach der Gabe von Gadolinium-haltigen Kontrastmitteln, insbesondere Omniscan, auftrat (Grobner, 2006). NSF ist eine krankhafte Vermehrung des Bindegewebes von Haut, Muskulatur und in inneren Organen. Die Erkrankung ist sehr selten und tritt nur bei Patienten mit stark eingeschränkter Nierenfunktion auf. Sie verläuft fortschreitend und kann zu schweren Behinderungen und zum Tod führen. Mittlerweile sind die Gd-basierten Kontrastmittel Omniscan, Optimark, Magnevist als hoch riskant eingestuft (Statens Legemiddelverk, 2011). Auch wenn die Krankheit sehr selten ist, so stellt sie eine neue Reaktion des menschlichen Organismus auf einen synthetischen Stoff dar. Und hier besteht die eigentliche Herausforderung: Wenn nicht einmal die Auswirkungen neuer synthetischer Stoffe auf den menschlichen Organismus verstanden sind, wie sollen dann die Auswirkungen auf das komplexe natürliche System der Erde verstanden werden.

5. Ausblick

Bergbau, auch wenn er einen Eingriff in das lokale Ökosystem und einen Eingriff in den globalen Stoffkreislauf darstellt, ist absolut notwendig, um die Existenz der menschlichen Gesellschaft, das heißt die Produktion von Waren, zu gewährleisten. Um die bergbaulichen Eingriffe zu minimieren sind (1) eine ständige Verbesserung der Technologien in Bezug Erzausbeute (Gewinnungsgrad) und Energieeinsparung, (2) eine Trennung der Stoffkreisläufe im Grubenbereich von dem lokalen Ökosystem (Abdichten von Abraumhalden, Staub- und Abgasbindung, Recycling des Brauchwassers etc.) und (3) ein umfassendes Recyclingsystem erforderlich. Auch bei einem theoretischen Metallrecycling von 100% wird Bergbau immer notwendig sein, aufgrund der (1) stetig wachsenden Bevölkerung einhergehend mit steigendem Lebensstandard, (2) Veränderung der Technologien und die dazu benötigten Rohstoffe und (3) „Vernichtung“ von Rohstoffen durch disperse Emission, illegale Abfallentsorgung, Kernspaltung und Munitionsverbrauch.

Aus diesen Gründen ist eine generelle Akzeptanz des Bergbaus durch die Bevölkerung notwendig. In Entwicklungs- und Schwellenländern besteht im Allgemeinen diese Akzeptanz, da die Bergbautätigkeit Arbeitsplätze schafft und lokal eine Anhebung des Lebensstandards zur Folge hat. Gleichzeitig besteht aber in diesen Ländern oft der Konflikt, dass durch fehlende oder korrupte Institutionen die

Umwelt- und Sicherheitskontrolle der Gruben nicht dem Standard der westlichen Welt entspricht oder ganz ausbleibt. Auf der anderen Seite besteht in den entwickelten Industrieländern generell eine hohe Intoleranz gegenüber dem Bergbau. Die Ablehnung in der Bevölkerung steigt proportional mit steigendem Lebensstandard und sinkender Arbeitslosigkeit, nach dem Motto „Mining - not in my backyard“ (Bergbau – nicht in meinem Hinterhof). Ein Beispiel ist der lokale Protest gegen die geplante Rutilgrube Engebøfjellet in Westnorwegen (Blindheim, 2013). Dabei wäre es angesichts der gegenwärtigen geopolitischen Situation vernünftiger, Bergbau in entwickelten Industrieländer zu bevorzugen, wo eine gesellschaftliche Umwelt- und Sicherheitskontrolle erfolgt, anstatt in Entwicklungsländern unkontrollierten Bergbau zu intensivieren, um dort Rohstoffe billig und rücksichtslos auszubeuten mit unvorhersehbaren, langfristigen Folgen für Menschen und Umwelt.

Die aufgezeigten Beispiele demonstrieren, dass allein durch die globale Bergbautätigkeit der natürliche Stoffkreislauf irreversibel gestört ist. Besonders kritisch sind (1) die Emission von metall- und schwefelhaltigen Feinstaub, (2) die lokale Kontamination von Oberflächen- und Grundwasser und Böden, (3) die globale Umverteilung von radioaktiven Stoffen und (4) die Produktion von neuartigen synthetischen Legierungen und metallhaltigen Stoffen am Ende der Rohstoffverarbeitung, deren Auswirkungen auf Umwelt und Menschen unzureichend untersucht sind. Der Bergbau steht am Beginn der anthropogenen Stoffumverteilung. Um die zukünftigen Herausforderungen der Stoffumverteilung besser kontrollieren und steuern zu können, ist es notwendig, einen anthropogenen Stoffkreislauf zu schaffen und diesen weitestgehend vom natürlichen Stoffkreislauf zu trennen. Das heißt, erstens, dass die gewonnenen Rohstoffe und deren Produkte nahezu komplett und permanent recycelt werden und, zweitens, Abfälle konzentriert und abgedichtet gelagert werden, so dass sie nicht mit der Umwelt in Kontakt kommen und als zukünftige anthropogene Lagerstätten genutzt werden können. Die größte Herausforderung ist das Binden oder zumindest die Verminderung der emittierten Gase und Feinstäube. Neu geschaffene Legierungen und Stoffe sollten hinreichend auf Umweltverträglichkeit getestet werden bevor sie in der Massenproduktion verarbeitet werden. Eine prinzipiell bessere Alternative wäre, nur Stoffe zu verwenden, wie sie in der Natur vorkommen oder solche, die natürlichen Stoffen in ihren Eigenschaften ähneln.

Danksagung

Der Autor dankt Herrn Reinhard O. Greiling für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und dem Geologischen Dienst von Norwegen (NGU) für die Finanzierung dieser Studie.

Literatur

- Allan, R. J. (1997) Introduction: Mining and metals in the environment. *Journal of Geochemical Exploration* 58: 95-100.
- Azcue, J.M. (Ed.), (1999) *Environmental Impacts of Mining Activities*, Springer, Berlin.
- Bellona Foundation (2010) *Environmental challenges in the Arctic. Norilsk Nickel: The Soviet legacy of industrial pollution*. Bellona Foundation Report <<http://bellona.org/assets/sites/6/Norilsk-Nickel-The-Soviet-Legacy-of-Industrial-Pollution.pdf>> Abgerufen 05.01.2015.
- Blindheim A.M. (2013) Sier nei til gruve i Engebøfjellet. *Dagbladet* 13. März 2013. <<http://www.dagbladet.no/2013/03/13/nyheter/politikk/miljo/gruvedrift/innenriks/26193987/>> Abgerufen 05.01.2015.
- Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (2005) *Amalgam in der zahnärztlichen Therapie*. <http://www.zahnwissen.de/specials/Broschuere_Amalgame_2005.pdf> Abgerufen am 05.01.2015.
- Bundesinstitut für Risikobewertung (2014) *Aluminiumhaltige Antitranspirantien tragen zur Aufnahme von Aluminium bei*. Stellungnahme Nr. 007/2014 des BfR vom 26. Februar 2014

- <<http://www.bfr.bund.de/cm/343/aluminiumhaltige-antitranspirantien-tragen-zur-aufnahme-von-aluminium-bei.pdf>> Abgerufen 05.01.2015.
- Ehgartner, B. (2013) Morbus Alzheimer: Nach Jahren Auftrieb für die Aluminiumhypothese. Deutsches Ärzteblatt 110(6): A-222/B-208/C-208.
<<http://www.aerzteblatt.de/archiv/134394/Morbus-Alzheimer-Nach-Jahren-Auftrieb-fuer-die-Aluminiumhypothese>> Abgerufen 05.01.2015.
- Exley, C., House, E. R. (2012) Aluminium in the human brain. In: Wolfgang, L., Kozłowski, H. (Eds.) Metal Ions in Neurological Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S. 95-101.
- Lankoff, A., Banasik, A., Duma, A., et al. (2006) A comet assay study reveals that aluminum induces DNA damage and inhibits the repair of radiation-induced lesions in human peripheral blood lymphocytes. Toxicology Letters 161: 27–36.
- Ginzburg, C. (1991) Der Richter und der Historiker. Klaus Wagenbach, Berlin.
- Grobner, T. (2006) Gadolinium – a specific trigger for the development of nephrogenic fibrosing dermopathy and nephrogenic systemic fibrosis? Nephrology Dialysis Transplantation 21: 1104-1108.
- Harrison, J.D., Phipps A. (2001) Gut transfer and doses from environmental technetium. Journal of Radiology Protection 21: 9–11.
- He, B.P., Strong, M.J. (2000) A morphological analysis of the motor neuron degeneration and microglial reaction in acute and chronic in vivo aluminum chloride neurotoxicity. Journal of Chemical Neuroanatomy 17: 207–15.
- Hydro (2015) Bauxitabbau. <<http://www.hydro.com/de/Deutschland/uber-aluminium/aluminium-lebenszyklus/Bauxitabbau/>> Abgerufen 05.01.2015.
- Info Mine Research Group (2008) Die Untersuchung von Methoden, Techniken und Praktiken des Schwefelrecyclings in Russland (in Russisch).
<http://www.megaresearch.ru/files/demo_file/1766.pdf> Abgerufen 05.01.2015.
- Leins, W., Thum, W. (1970) Ermittlung und Beurteilung der Sprengbarkeit von Gestein auf der Grundlage des spezifischen Sprengenergieaufwandes. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, 2118.
- Müller, A. (2013) The chemistry of the mobile phones Nokia Nuron 5230, Nokia 5130 and Sony Ericsson W595. Norges Geologiske Undersøkelse Rapport 2013.026.
- Norgate, T., Haque N. (2010) Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. Journal of Cleaner Production 18: 266–274.
- Namibia Economist (2014) Rössing wants own desalination plant.
<<http://www.economist.com.na/headlines/5868-roessing-wants-own-desalination-plant>> Abgerufen 23.12.2014.
- Oertel, T. (2003) Untersuchung und Bewertung geogener und anthropogener Bodenschwermetallanreicherungen als Basis einer geoökologischen Umweltanalyse im Raum Eisleben-Hettstedt. Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg <<http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/03/03H191/prom.pdf>> Abgerufen 05.01.2015.
- Prichard, H. M. (2007) Natural and artificial platinum and palladium occurrences worldwide. In: Sammonds, P. R. and Thompson, J. M. T. (Eds.) Advances in earth science: from earthquakes to global warming. Royal Society Series on Advances in Science, Vol. 2. London, Imperial College Press, S. 273-291.
- Romero, M., Adams, A. (2013) Massive landslide stops production at Bingham Canyon Mine. Desert News 11. April 2013. <<http://www.deseretnews.com/article/865578042/Kennecott-confirms-significant-landslide-at-Bingham-Canyon-Mine.html?pg=all>> Abgerufen 05.01.2015.
- Rudnick, R.L., Gao, S. (2005) Composition of the continental crust. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (eds.) The crust. Treatise on geochemistry. Vol. 3. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- Salomons, W. (1995) Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration 52: 5-23.

- Schmidt, G. (2000) Umweltbelastung durch Bergbau – Der Einfluss von Halden des Mansfelder Kupferschieferbergbaus auf die Schwermetallführung der Böden und Gewässer im Einzugsgebiet Süßer See. Hallesche Studien zur Geographie Bd. 3, Halle.
- Schulte E.H., Scoppa P. (1987) Sources and behavior of technetium in the environment. *Science of the Total Environment* 64: 163-179.
- Statens Legemiddelverk (2011) Wichtige Sicherheitshinweise zum Kontrastmittel Gadolinium und nephrogener systemischer Fibrose (NSF). (in Norwegisch)
<http://www.legemiddelverket.no/Bivirkninger/helsepersonell-brev/helsepersonell-brev_utsendt/Documents/2011/MR-kontrastmidler%20004690_1_3.pdf> Abgerufen 05.01.2015.
- Tagami, K. (2003) Technetium-99 behaviour in the terrestrial environment – field observations and radiotracer experiments. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* 4: A1–A8.
- Thornton I. (1996) Impacts of mining on the environment; some local, regional and global issues. *Journal of Applied Geochemistry* 11: 355–361.
- USGS (2014) Commodity Statistics and Information.
<<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>> Abgerufen am 15.12.2014.
- Wilsdorf, H. (1987) Montanwesen – eine Kulturgeschichte. Edition Leipzig.
- Yoshihara, K. (1996) Technetium in the environment. In: Yoshihara, K., Omori, T. (Eds.) *Technetium and Rhenium – their chemistry and its applications*. Topics in Current Chemistry, Vol. 179, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Young, J. E. (1993) Umweltproblem Bergbau: Strategien gegen die Ausbeutung der Erde. *World-watch-Paper* Bd. 5. Wochenschau-Verlag. Schwalbach.

Adresse des Verfassers:

Geological Survey of Norway, P.O. 6315 Sluppen, 7491 Trondheim, Norwegen
Natural History Museum of London, Cromwell Road, London SW7 5 BD, Großbritannien
e-mail: Axel.Muller@ngu.no