

TEXTE

79/2020

Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik

Further development of policy options for an ecological raw materials policy

ÖkoRess II

Kurzfassung / Summary

TEXTE 79/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 32 310 0

FB000275/KURZ

Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik

Further development of policy options for an ecological raw materials policy

ÖkoRess II

Kurzfassung / Summary

von

Günter Dehoust, Andreas Manhart, Peter Dolega
Öko-Institut e.V.

Regine Vogt, Andreas Auberger, Claudia Kämper
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung

Pia von Ackern, Lukas Rüttinger
adelphi

Dr. Aissa Rechlin, Dr. Michael Priester
Projekt Consult GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 - Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Jan Kosmol

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, June 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik ÖkoRess II

In ÖkoRess II wird basierend auf den methodischen Arbeiten der Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes – UmSoRess und ÖkoRess I - eine Einschätzung der Umweltgefährdungspotenziale des Bergbaus für etwa 50 Rohstoffe erstellt und damit deren ökologische Rohstoffverfügbarkeit bewertet. Dazu wird die in ÖkoRess I vorgelegte Methode weiterentwickelt und angewandt.

Die Weiterentwicklung der Methode betrifft insbesondere den Parameter „Soziales Umfeld“, der abbilden soll, inwieweit in den Förderländern effektive Umweltschutzmaßnahmen zum Umgang mit den identifizierten Umweltgefährdungspotenzialen ergriffen werden. Hierzu werden ergänzend zu den vorliegenden Analysen aus UmSoRess 10 Rohstoff-Länder-Fallstudien erarbeitet und die Eignung von Governance-Indikatoren geprüft. Dabei hat sich der Environmental Performance Index (EPI) als am besten geeigneter Indikator herausgestellt.

Die Umweltgefährdungspotenziale der untersuchten Rohstoffe in Bezug auf ihre bergbauliche Gewinnung wurden anhand der geologischen Grundlagen, der üblicherweise eingesetzten Technologie, den natürlichen Umweltbedingungen, des sozialen Umfelds und den kumulierten Energie- und Rohstoffaufwänden der weltweiten Produktion bewertet. Die Ergebnisse werden für jeden Rohstoff als Factsheets und zusammenfassend in einer Übersichtsmatrix dargestellt. Die Ergebnisse werden diskutiert und ökologisch kritische Rohstoffe identifiziert.

Abstract: Further development of policy options for an ecological raw materials policy

In ÖkoRess II, based on the methodological work of the research projects of the Federal Environment Agency - UmSoRess and ÖkoRess I - an assessment of the environmental hazard potentials of mining for about 50 raw materials is prepared, thus assessing their environmental availability. To this end, the method presented in ÖkoRess I will be further developed and applied.

The further development of the method relates in particular to the parameter "social environment" which is intended to map the extent to which effective environmental protection measures are taken in the producer countries to deal with the identified potential environmental hazards. In addition to the existing analyses from UmSoRess, 10 case studies of raw material countries will be developed and the suitability of governance indicators will be examined. EPI has proven to be the most suitable indicator.

The ecological hazard potentials of the raw materials examined with regard to their extraction were assessed on the basis of the geological foundations, the technology normally used, the natural environmental conditions, the social environment and the cumulative energy and raw material demand of global production. The results are presented as fact sheets per raw material and summarised in an overview matrix. The results are discussed and environmentally critical raw materials are identified.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1 Zusammenfassung.....	10
1.1 Einführung.....	10
1.2 Ergebnisse.....	14
1.3 Handlungsempfehlungen.....	22
2 Summary.....	23
2.1 Introduction.....	23
2.2 Results.....	28
2.3 Recommendations.....	35
3 Quellenverzeichnis.....	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF	19
Abbildung 2:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF, Ausschnitt ohne Koks- und Eisenerz	20
Abbildung 3:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF.....	20
Abbildung 4:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF, Ausschnitt KEA _{global} bis zu 40 PJ/a and KRA _{global} bis zu 50 Mio t/a	21
Abbildung 5:	KEA _{global} aufgetragen über KRA _{global} – für Rohstoffe mit geringem GSMEF.....	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP)	13
Tabelle 2:	Bewertungsergebnisse gruppiert nach aUGP, EGov und GSMEF.....	16
Tabelle 3:	Rohstoffe mit hoher (fett) oder mittlerer bis hoher (normal) aUGP, gruppiert nach den Ergebnissen der klassischen Kritikalitätsbeurteilung durch die EC 2017	18

Abkürzungsverzeichnis

3T	Zinn, Wolfram und Tantal
ASM	Artisanal and small-scale mining/ Artisanal- und Kleinbergbau
AMD	Acid Mine Drainage
AZE	Alliance for Zero Extinction
aEHP	Aggregated environmental hazard potential
aUGP	Aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial
BGBI	Bundesgesetzblatt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CED (s. KEA)	cumulative energy demand
CRD (s. KRA)	cumulative raw material demand
CPI	corruption perception index
CRM	critical raw materials (kritische Rohstoffe)
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
EcoInvent 3.3	Datenbank
EGov	Environmental Governance (Umweltgouvernance)
EDI	Environmental Democracy Index
EHP (s. UGP)	Environmental Hazard Potentials
EITI	Extractives Industry Transparency Initiative
EPI	Environmental Performance Index
GaBi	Ganzheitliche Bilanz (Ökobilanz-Software)
GPI	Global Peace Index
GSMEF	global size of material and energy flows/ globale Größe der Material- und Energieflüsse
HDI	Human Development Index
HREE	Heavy rare earth elements (schwere seltene Erden)
ISEAL	International Social and Environmental Accreditation and Labeling Alliance
JRC	Joint Research Centre
ggü.	gegenüber
KEA (s. CED)	Kumulierter Energieaufwand
KRA (s. CRD)	Kumulierter Rohstoffaufwand
LREE	Light rare earth elements (leichte seltene Erden)
MRDS	Mineral Resources Data System
PGM	Platingruppenmetalle
SEF	Size of energy flow/ Größe der Energieflüsse
SMF	Size of material flow/ Größe der Stoffströme
UGP	Umweltgefährdungspotenzial
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
USGS	United States Geological Survey

3T	Zinn, Wolfram und Tantal
UNEP GRID	United Nations Environment Programme/Global Resource Information Database
UNEP-WCMC	United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre
WEEE (Directive)	Waste of Electrical and Electronic Equipment (Directive)
WGI	Worldwide Governance Indicators
WSI	Water Stress Index

1 Zusammenfassung

1.1 Einführung

Im Rahmen des Projekts ÖkoRes I (Dehoust et al. 2017) wurden Methoden zur Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen (UGP) sowohl von Bergwerken als auch von abgebauten Rohstoffen bezüglich ihrer bergbaulichen Gewinnung entwickelt. Das Folgeprojekt ÖkoRes II konzentriert sich auf das rohstoffbezogene Bewertungsschema, das auf eine Vielzahl von mineralischen Rohstoffen angewendet wurde. Insgesamt wurde eine Auswahl von 61 Rohstoffen oder Rohstoffgruppen bewertet. Die Auswahl basiert auf den Rohstoffen, deren Kritikalität im zweiten Bericht über kritische Rohstoffe für die EU untersucht worden ist (Europäische Kommission 2014/2015). Sie wurde, soweit möglich, mit der Kandidatenliste des dritten Berichts von 2017 (Europäische Kommission 2017) abgeglichen.

Eine weitere Forschungsfrage war die Identifizierung eines Governance-Indikators, der die Governance des Bergbausektors eines Landes in Bezug auf Umweltaspekte am besten widerspiegelt. Acht Indikatoren wurden an 23 Fallstudien getestet und in einer separaten Studie analysiert. Im Ergebnis wurde der Environmental Performance Index (EPI) als am besten geeigneter Index identifiziert.

Der rohstoffbezogene Ansatz berücksichtigt drei Ebenen, die sich auf das Umweltgefährdungspotenzial auswirken:

Zunächst werden im Bereich der Geologie die Voraussetzungen für saure Grubenwässer (Acid Mine Drainage, AMD), die Paragenese mit Schwermetallen und die Wahrscheinlichkeit einer radioaktiven Kontamination untersucht (Indikatoren 1-3). So stellen z. B. Rohstoffe, die überwiegend in sulfidischen Erzen vorkommen, ein höheres Umweltgefährdungspotenzial dar als Rohstoffe, die überwiegend in oxidischen sedimentären Erzen vorkommen.

Zweitens werden auf technologischer Ebene die Abbauprozesse und der Einsatz von Hilfsstoffen bewertet (Indikatoren 4-5). So stören z. B. Rohstoffe, die eher im Tagebau abgebaut werden, größere Flächen als Rohstoffe, die überwiegend unter Tage abgebaut werden.

In den ersten beiden Ebenen (Geologie und Technologie) wurden 57 Rohstoffe beschrieben und bewertet.

Drittens werden UGP, die aus der natürlichen Umwelt erwachsen, bewertet (Indikatoren 6-8). Dies bezieht sich auf die geografische Lage der Minenstandorte und untersucht Gefahrenpotenziale durch Überschwemmungen, Erdbeben, Erdbeben und Stürme. Wenn z. B. ein Großteil der Minen für einen bestimmten Rohstoff in Gebieten mit häufig auftretenden Überschwemmungen liegt, ist das Umweltgefährdungspotenzial für den Rohstoff eher hoch, da Überschwemmungen eine Ursache für Staudammausfälle sein können. Darüber hinaus wird bestimmt, ob sich die Minen in Gebieten mit hohem Wasserstress oder geringer Wasserverfügbarkeit (Wüsten) befinden und ob sich die Abbaugelände in Schutzgebieten befinden. Hinsichtlich der Indikatoren 6 bis 8 konnten 47 Rohstoffe nach intensiver Forschung bewertet werden. 42 von ihnen wurden direkt bewertet, fünf weitere Rohstoffe, Aluminium, Eisen, Tellur, Selen und Gallium, konnten nach dem eigentlichen Bewertungsschritt ihren Erzen oder Hauptmetallen zugeordnet werden.

Darüber hinaus wird die Umweltschutz-Regierungsführung in den Förderländern (EGov) auf der Grundlage des nach dem Produktionsanteil gewichteten Environmental Performance Index (EPI) der Länder bewertet. Wenn Rohstoffe weitgehend in Ländern mit schwacher Umweltregierungsführung abgebaut werden, ist es wahrscheinlicher, dass keine effektiven

Umweltschutzmaßnahmen ergriffen werden und sich die Umweltgefährdungspotenziale in Form von Umweltbelastungen manifestieren. Der EGov-Indikator konnte für 55 Rohstoffe berechnet werden.

Der Artisanal- und Kleinbergbau (ASM) stellt aus folgenden Gründen eine besondere Herausforderung für eine effektive Umweltschutz-Regierungsführung dar:

- ▶ Die große Anzahl und die isolierte Situation der Bergbaubetriebe,
- ▶ die enge Verknüpfung zwischen dem ASM-Sektor und der Armut,
- ▶ die Informalität vieler ASM-Betriebe,
- ▶ der Migrations-Charakter vieler Klein-Bergleute und ihrer Tätigkeiten (insbesondere im Hinblick auf alluviale Lagerstätten, d. h. für Gold, Farbedelsteine, Diamanten, Zinn, Wolfram und Tantal (3T) sowie Kies und Sand),
- ▶ die traditionelle und wahllose Verwendung von toxischen Substanzen, vor allem Quecksilber für die Amalgamierung von Golderzen,
- ▶ Mangel an Fachkräften sowohl auf der Seite der Bergleute als auch auf der Seite der staatlichen Institutionen sowie fehlende Mittel für systematische Bergbauinspektionen,
- ▶ die Beteiligung lokaler Eliten an der informellen Ausbeutung und damit ein begrenzter politischer Wille zur Anwendung von Sanktionen.

Einige dieser Aspekte führen zu einer schwachen Anwendung des einschlägigen rechtlichen und regulatorischen Rahmens. Insbesondere Umweltgesetze werden oft schwach umgesetzt, da sie als zusätzliche Kosten für die Bergleute angesehen werden. Da der identifizierte Governance-Indikator, der EPI, die allgemeine Umweltleistung eines Landes betrachtet, aber weder bergbauspezifisch noch ASM-spezifisch ist, werden ASM-bezogene Governance-Herausforderungen für ASM-relevante Rohstoffe in den Rohstoffprofilen beschrieben.

Dennoch unterscheiden sich die Herausforderungen an die Governance je nach gefördertem Rohstoff. Insbesondere nichtmetallische Mineralien sind in der Regel weniger problematisch als z. B. Gold oder 3T.

Weltweit vergleichbare Zahlen von ASM-Minengemeinschaften sind nicht vorhanden. Ein Grund dafür ist, dass die Definition von ASM und Kleinbergbau von Land zu Land unterschiedlich ist (Nach den Bergbaugesetzen definierte Kleinbetriebe in Peru oder Chile z. B. gelten in Bolivien als Großbetriebe). Darüber hinaus verwenden die Autoren von Studien zu ASM und Kleinbergbau unterschiedliche Definitionen. Die am häufigsten genannten Quellen für Daten über Produktionsanteile für verschiedene Ressourcen sind GEUS (2007), Dorner et al. (2012) und BGR (2007).

Schließlich beinhaltet die Methode zwei Indikatoren, die sich mit der Größenordnung der globalen Material- und Energieströme vom Abbau bis zur Raffination befassen, um die absolute physische Dimension der potenziellen Auswirkungen zu bewerten. Dazu werden die Indikatoren KEA (Kumulierter Energieaufwand; engl.: Cumulative Energy Demand [CED]) und KRA (Kumulierter Rohstoffaufwand; engl.: Cumulative Raw Material Demand [CRD]) verwendet. Die spezifischen Werte pro Tonne veredeltem Material werden mit der Weltproduktion (2014/15) multipliziert und stellen die Größe der Materialflüsse (SMF - Size of material flow) und die

Größe der Energieflüsse (SEF - Size of energy flow) auf globaler Ebene dar. Die Indikatoren SMF und SEF konnten für 52 Rohstoffe ermittelt werden.

Für die 47 Rohstoffe, die vollständig bewertet werden konnten, werden für einen ersten Überblick drei Gesamtergebnisse bereitgestellt:

- ▶ das aggregierte Umweltgefährdungspotenzial (aUGP), das die Indikatoren 1 bis 8 auf einer 5-stufigen Skala kombiniert: gering - gering bis mittel - mittel - mittel bis hoch - hoch,
- ▶ der Indikator für Umweltschutz-Regierungsführung (EGov), der durch den gewichteten EPI der Förderländer repräsentiert wird und im Sinne eines gefahrenverstärkenden oder -reduzierenden Faktors interpretiert werden kann,
- ▶ die globale Größenordnung der Material- und Energieflüsse (global size of material and energy flows [GSMEF]), die SMF und SEF kombiniert und über die globale Dimension der Rohstoffgewinnung und -produktion und damit einhergehende Umwelteinwirkungen informiert.

Die Ergebnisse werden diskutiert und Handlungsempfehlungen aufgeführt, die zeigen, wie die Bewertungsergebnisse genutzt werden können, um die Umweltauswirkungen des Bergbaus und der Materialnutzung zu reduzieren.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Bewertungsmethode nach ÖkoRess I, die bereits die Änderungen im Laufe der Verarbeitung von ÖkoRess II berücksichtigt¹.

¹ Vergleiche hierzu auch <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekoress-ii>.

Tabelle 1: Raster zur Bewertung von rohstoffbezogenen Umweltgefährdungspotenzialen (UGP)

		Indikator	Bewertung			
			Gering	Mittel	Hoch	
Geologie	UGP	1. Voraussetzungen für Acid Mine Drainage (AMD)	Geochemische Voraussetzungen für AMD sind nicht gegeben	Geochemische Voraussetzungen für AMD sind in Ansätzen gegeben	Geochemische Voraussetzungen für AMD sind gegeben	
		2. Vergesellschaftete Schwermetalle	Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. keine erhöhten Schwermetallkonzentrationen auf	Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. leicht erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf	Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. stark erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf	
		3. Vergesellschaftete radioaktive Stoffe	Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. geringe Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf	Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. leicht erhöhte Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf	Die Lagerstätten eines Rohstoffs weisen i.d.R. hohe Konzentrationen an Uran und/oder Thorium auf	
Technik		4. Gewinnungsmethode	Rohstoff wird überwiegend im Tiefbau gewonnen	Rohstoff wird überwiegend im Festgesteinstagebau gewonnen	Rohstoff wird überwiegend im Lockergesteinstagebau, Alluvialbergbau und/oder durch Dredging in Flüssen gewonnen	
		5. Einsatz von Hilfsstoffen	Standardmethoden der Gewinnung und Aufbereitung ohne chemische Hilfsstoffe	Standardmethoden der Gewinnung und Aufbereitung mit chemischen Hilfsstoffen	Standardmethoden von Gewinnung und Aufbereitung mit Einsatz toxischer Reagenzien und Hilfsstoffe	
Natürliches Umfeld		6. Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch	Rohstoffe mit Ergebnissen $\leq 25\%$ Quantil des zusammengeführten Auswertungsergebnisses der 42 auswertbaren Rohstoffe	Rohstoffe mit Ergebnissen $> 25\%$ und $\leq 75\%$ Quantil des zusammengeführten Auswertungsergebnisses der 42 auswertbaren Rohstoffe	Rohstoffe mit Ergebnissen $> 75\%$ Quantil des zusammengeführten Auswertungsergebnisses der 42 auswertbaren Rohstoffe	
		7. Water Stress Index (WSI) und Wüstengebiete				
		8. Ausgewiesene Schutzgebiete und AZE-Sites				
Soziales Umfeld		EGOV	9. Umweltgovernance in den wichtigsten Produktionsländern (EPI)	Gewichteter EPI der wichtigsten Produktionsländer des Rohstoffs $> 75\%$ Quantil	Gewichteter EPI der wichtigsten Produktionsländer des Rohstoffs $> 25\%$ und $\leq 75\%$ Quantil	Gewichteter EPI der wichtigsten Produktionsländer des Rohstoffs $\leq 25\%$ Quantil
Rohstoff-Wertschöpfungskette		GSMEF	10. Kumulierter Rohstoffaufwand der Weltproduktion (KRA_{global})	$\leq 25\%$ Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	$> 25\%$ Quantil und $\leq 75\%$ Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	$> 75\%$ Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind
			11. Kumulierter Energieaufwand der Weltproduktion (KEA_{global})	$\leq 25\%$ Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	$> 25\%$ Quantil und $\leq 75\%$ Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind	$> 75\%$ Quantil der 52 Rohstoffe für die Daten verfügbar sind

1.2 Ergebnisse

Die ÖkoRes-Methode bewertet Umweltgefährdungspotenziale (UGP; Environmental Hazard Potentials - EHP) und nicht die tatsächliche Schadstoffsituation. Die Ergebnisse geben Informationen über die Umweltaspekte des Bergbaus für jeden Rohstoff an, von denen im Normalfall jeder besondere Aufmerksamkeit und weitere Analysen verdient. Davon unabhängig können die Ergebnisse zur Priorisierung bei der weiteren Untersuchung der Umweltaspekte genutzt werden, indem zunächst ein besonderes Augenmerk auf die Aspekte gelegt wird, die ein hohes UGP aufweisen und danach auf die mit mittlerem UGP.

Der Indikator für Environmental Governance (EGov) soll die Wahrscheinlichkeit abbilden, dass Maßnahmen ergriffen werden, die tatsächliche Umweltschäden verhindern oder zumindest deren Ausmaß verringern. Die Indikatoren zur Größenordnung der Materialflüsse und Energieströme (SMF/SEF/GSMEF) liefern Informationen über die globale Dimension möglicher Schäden.

Es liegt eine qualitative Bewertung für 47 Rohstoffe vor, deren aggregiertes Ergebnis als Umweltdimension in Kritikalitätsanalysen nach dem Matrixkonzept verwendet werden kann. Im Folgenden werden die aggregierten UGP mit den Ergebnissen der EU-Kritikalitätsstudie von 2017 verglichen, die die Kritikalität beurteilt, indem sie Versorgungsrisiken und die Bedeutung für die EU-Wirtschaft bewertet (EC 2017). Die Achse der wirtschaftlichen Bedeutung aus der EU-Studie kann zusammen mit dem aggregierten UGP genutzt werden, um die von uns so definierte Ökologische Kritikalität zu bewerten. Aus der Perspektive anderer Länder oder Regionen, deren Industrien von anderen Rohstoffen abhängig sind, können sich abweichende Kritikalitätsbewertungen ergeben (Kosmol et al 2017).

Wenn der Schwellenwert der wirtschaftlichen Bedeutung von 2,8 für "kritisch" nach EC 2017 für einen Rohstoff überschritten wird und dem Rohstoff ein hohes oder mittleres bis hohes aUGP zugeordnet wird, wird der Rohstoff als ökologisch kritisch eingestuft.

Der Vergleich mit den nach EC 2017 als kritisch eingestuften Rohstoffen soll nicht den binären Ansatz der Klassifizierung von Rohstoffen als kritisch oder unkritisch unterstützen, der mehr oder weniger willkürlich Schwellenwerte für das Versorgungsrisiko und die wirtschaftliche Bedeutung festlegt. Vielmehr ist Kritikalität unserer Meinung nach ein relatives Konzept, was bedeutet, dass Kritikalitätsanalysen erlauben festzustellen, dass einige Rohstoffe mehr (oder weniger) kritisch sind als andere. Genauer gesagt, kann nur eine höhere oder geringere wirtschaftliche Bedeutung oder ein höheres oder geringeres Versorgungsrisiko bzw. in unserem Fall ein höheres oder geringeres aUGP identifiziert werden. Nach dem Konzept der klassischen Risikobewertung können dann relative Kritikalitätswerte durch multiplikative Verknüpfung von wirtschaftlicher Bedeutung und Angebotsrisiko bzw. aUGP abgeleitet werden (Glöser et al 2015).

Hier folgen wir dem binären Kritikalitätsansatz der EC 2017², um zu zeigen, dass die Bewertung der Ökologischen Kritikalität von Rohstoffen (wie oben definiert) zu teilweise anderen Ergebnissen führt als herkömmliche Kritikalitätsanalysen. Sie hebt Rohstoffe hervor, die aus umweltökonomischer und umweltpolitischer Sicht besonderer Aufmerksamkeit bedürfen.

Insgesamt werden 21 Rohstoffe mit einem hohen aUGP klassifiziert (vgl. Tabelle 1).

Vergleicht man diese Rohstoffe mit der Kritikalitätsbeurteilung aus EC 2017, so wird deutlich, dass nur 2 von 21 dieser Rohstoffe unter dem angegebenen Schwellenwert in Bezug auf die wirtschaftliche Bedeutung liegen. Es handelt sich um Gold und Rhenium, die daher in der

² Damit ist keine grundsätzliche Akzeptanz des binären Bewertungssystems verbunden.

klassischen Kritikalitätsbeurteilung weder als kritische Rohstoffe (CRM - critical raw materials) noch als ökologisch kritisch im definierten Sinne eingestuft werden. Die restlichen 19 Rohstoffe, die mit einem hohen aUGP klassifiziert wurden, werden daher nach unserer Definition als ökologisch kritisch eingestuft.

Die folgenden 11 Rohstoffe oder Rohstoffgruppen werden als ökologisch kritisch eingestuft und von der Europäischen Kommission (EC 2017) auch als CRM eingestuft: Antimon, Kobalt, Platin, Vanadium, Rhodium, Phosphatgestein, Palladium (als PGM), Indium, LREE, Wismut und Germanium.

Tabelle 2: Bewertungsergebnisse gruppiert nach aUGP, EGov und GSMEF

UGP-Indikatoren								GSMEF		Rohstoffe	(Aggregierte) Ergebnisse			Zusätzliche Informationen		
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	SMF	SEF		aUGP	EGov	GSMEF	M/B/C	ASM	AR
h	h	h	g	h	m	N	N	n	m	Antimon	h	h	m	M+B+C	ASM	< 1 %
h	h	h	m	h		g	m	m	m	Kobalt	h	h	m	M+B	ASM	< 5 %
h	h	m	m	h	g	h	m	m	m	Platin	h	h	m	M+B+C		< 10 %
m	h	h	m	h	m	m	m	m	m	Vanadium	h	h	m	M+B		< 5 %
h	h	m	m	h	g	h	m	m	m	Rhodium	h	h	g	C+B		< 20 %
h	h	m	m	h	h	h	m	h	h	Kupfer	h	m	h	M		< 5 %
h	m	h	m	h	m	m	h	h	h	Gold	h	m	h	M+B	ASM	< 5 %
g	m	h	h	h	m	m	m	h	h	Phosphatgestein	h	m	h	M		< 5 %
h	h	m	g	h	m	m	m	m	h	Zink	h	m	h	M		< 1 %
h	h	m	m	h	g	m	m	m	m	Palladium	h	m	m	C+B		< 30 %
h	h	m	m	h	m	m	m	m	g	Indium	h	m	m	B		< 1 %
h	h	m	m	h	m	m	m	m	m	Blei	h	m	m	M+C		< 1 %
g	m	h	m	h	h	m	g		m	LREE	h	m	m	M+C		< 5 %
h	h	m	m	h	m	h	m	h	m	Molybdän	h	m	m	M+B		< 1 %
h	h	m	m	h	m	m	h	m	m	Silber	h	m	m	M+C+B	ASM	< 5 %
h	h	m	m	h	m	m	G	G	g	Bismut	h	m	g	B		< 1 %
h	h	m	h	h	h	h	m	g	G	Selen	h	m	g	B		< 5 %
h	h	m		h	h	h	m	g	g	Tellur	h	m	g	B		< 5 %
h	h	m	m	m	m	g	h	h	h	Nickel	h	g	m	M		< 15 %
h	h	m	h		h	g	h	G	G	Germanium	h	G	g	B		< 10 %
m	h	m	m	h	h	h	G	g	g	Rhenium	h	G	g	B		< 5 %
g	m	h	m	h	h	G	g	m	m	HREE	h-m	h	m	M+C		< 1 %
g	m	m	h	h	m	m	m	h	h	Aluminium	h-m	m	h	M		< 1 %
g	g	g	m	h	h	m	h	m	h	Borate	h-m	m	m	M		0 %
g	m	m	h	h	m	m	m	g	g	Gallium	h-m	m	g	B		< 1 %
g	m	h	m	h	h	G	G	G	g	Scandium	h-m	m	g	B		< 10 %
g	g	h	m	h	g	h	m	G	g	Beryllium	h-m	g	g	M+B	ASM	< 5 %
g	m	hh	m	h	g	g	h	g	m	Niobium	h-m	g	m	M		< 1 %
g	G	g	h	h	m	m	h	m	m	Silikatsand	h-m	g	m	M		0 %
g	h	m	g	m	m	h	M	h	h	Chrom	m	h	h	M	ASM	0 %

UGP-Indikatoren								GSMEF		Rohstoffe	(Aggregierte) Ergebnisse			Zusätzliche Informationen		
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	SMF	SEF		aUGP	EGov	GSMEF	M/B/C	ASM	AR
m	m	m	h	g	m	g	M	h	m	Zinn	m	h	h	M	ASM	< 1 %
g	g	g	m	h	h	h	G	m	m	Magnesium	m	h	m	M		0 %
g	m	h	m	g	g	m	H	m	h	Mangan	m	h	m	M	ASM	0 %
g	m		h	m	m	m	M	h	m	Bauxit	m	m	h	M		< 1 %
m	m	m	m	m	m	m	H	h	h	Eisen	m	g	h	M		< 1 %
m	m	m	m	m	m	m	H	h	m	Eisenerz	m	g	h	M		< 1 %
g		h	h	g	g	g	H	h	h	Titan	m	g	h	M		< 1 %
g	g	g	m	m	h	h	M	m		Gips	m	m	m	M	ASM	0 %
g	g	g	m	g	h	h	M	m	h	Magnesit	m	m	m	M		0 %
g	g	m	h	m	h	m	G	g	g	Lithium	m	g	g	M		0 %
	m	h	m	g	g	g	M	m	m	Tantal	g-m	h	m	C	ASM	0 %
g	g	g	g	m	g	h	M	m	m	Flussspat	g-m	m	m	M	ASM	0 %
m	m	m	g	m	m	g	G	m	m	Wolfram	g-m	m	m	M	ASM	< 5 %
g	g	g	g	m	m	m	M	g	g	Graphit	g	h	g	M	ASM	< 5 %
g	g	g	m	m	m	m	G	h	h	Kokskohle	g	m	h	M		0 %
g	g	g	g	m	g	m	M	h	h	Kaliumcarbonat	g	g	h	M		0 %
g	g	g	m	g	g	m	G	m	m	Kaolin & Kaolinit	G	g	m	M		0 %

- 1. Voraussetzungen für saure Grubenwässer, Acid Mine Drainage (AMD)
- 2. Vergesellschaftete Schwermetalle
- 3. Vergesellschaftete radioaktive Stoffe
- 4. Gewinnungsmethode
- 5. Einsatz von Hilfsstoffen
- 6. Störfallgefahr durch Überschwemmung, Erdbeben, Stürme, Hangrutsch
- 7. Wasser Stress Index (WSI) und Wüstengebiete
- 8. Ausgewiesene Schutzgebiete und Alliance for Zero Extinction (AZE) sites
- SMF Size of material flow (Größenordnung der Materialflüsse)
- SEF Size of energy flow (Größenordnung der Energieflüsse)
- UGP Umweltgefährdungspotenzial
- aUGP Aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial
- EGov Environmental governance (Umweltschutz-Regierungsführung)
- GSMEF Global size of material and energy flows (Globale Größenordnung d. Material- und Energieflüsse)

- ASM Artisanal/small-scale mining (Artisanal-/Kleinbergbau)
- AR Anteil von Bergbaugebieten in der Arktik
- HREE Schwere Seltene Erden/Heavy rare earth elements
- LREE Leichte Seltene Erden/Light rare earth elements

- H** Hohes UGP
- m-h** Mittleres bis hohes UGP
- M** Mittleres UGP
- g-m** Geringes bis mittleres UGP
- g** Geringes UGP

M/B/C Haupt-/Main (M), Koppel-/Co- (C) oder Neben-/By (B) -produkt. **Fett** und unterstrichen stellen den größten Anteil dar. '+' zeigt, dass der Rohstoff als M, B, und/oder C gefördert wird

Hinzu kommen 8 Rohstoffe mit einem mittleren bis hohen aUGP. Die HREE (Heavy rare earth elements), die auch in Bezug auf EGov schlecht bewertet wurden, und Aluminium, das auch einen hohen GSMEF-Wert hat, fallen hier auf. Mit Ausnahme von Aluminium und Quarzsand werden alle diese Rohstoffe und Gruppen auch als CRM bezeichnet. Aluminium liegt wirtschaftlich gesehen über dem Schwellenwert der EU und kann daher als ökologisch kritisch eingestuft werden (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Rohstoffe mit hoher (fett) oder mittlerer bis hoher (normal) aUGP, gruppiert nach den Ergebnissen der klassischen Kritikalitätsbeurteilung durch die EC 2017

Klassifizierung als CRM und Bewertung als ökologisch kritisch	Nicht als CRM klassifiziert, sondern als ökologisch kritisch bewertet	Nicht als CRM klassifiziert und nicht als ökologisch kritisch bewertet
Antimony , Beryllium, Bismuth , Borates, Cobalt , Gallium, Germanium , HREE, Indium , LREE, Niobium, Palladium (als PGM) , Phosphate rock , Platinum , Rhodium , Scandium, Vanadium	Aluminium, Copper, Lead, Molybdenum, Nickel, Silver, Selenium, Tellurium, Zinc	Gold, Rhenium, Silica sand

Zum einen steht das Umweltgefährdungspotenzial für sich allein und stellt ein wichtiges Argument dar, um bergbaulich gewonnene Rohstoffe in den Fokus von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft zu rücken und die mit der Gewinnung dieser Rohstoffe verbundenen ökologischen Auswirkungen effektiv zu reduzieren. In diesem Sinne unterstreichen die Ergebnisse der ÖkoRess-Bewertung die Umweltrelevanz von Aluminium, Kupfer, Gold, Blei, Molybdän, Nickel, Rhenium, Quarzsand, Silber, Selen, Tellur und Zink, die von der EC nicht als kritische Rohstoffe eingestuft werden (vgl. Tabelle 3).

Darüber hinaus kann ein hohes aUGP auch das allgemeine Versorgungsrisiko erhöhen. Nicht nur Faktoren wie eine hohe Konzentration der Produktion in einigen Ländern und politische Instabilität in diesen Ländern können zu Versorgungsengpässen bei diesen Rohstoffen führen. Negative ökologische Auswirkungen können auch dazu führen, dass die Akzeptanz für den Bergbau bei Bevölkerung und Politik schwindet und so die Fortführung oder Eröffnung neuer Bergwerke erschwert wird und die Rohstoffverfügbarkeit entsprechend abnimmt (ökologische Rohstoffverfügbarkeit).

Andererseits können geringe Anforderungen an die Einhaltung von Umweltstandards – zumindest kurzfristig - zu höheren Gewinnen für Bergbauunternehmen führen, da weniger Aufwand zum Schutz der Umwelt erforderlich ist. Werden die potenziellen Schäden für die Umwelt und die Anwohner weniger intensiv untersucht, können die Genehmigungsverfahren auch einfacher und schneller sein.

Langfristig kann jedoch mit hoher Sicherheit davon ausgegangen werden, dass das allgemeine Versorgungsrisiko durch schlechtes Umweltmanagement und Umweltverschmutzung sowie durch bergbauliche Schäden steigt:

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Umweltauswirkungen einerseits zu einer vorübergehenden oder dauerhaften Schließung von Standorten und andererseits zu Schwierigkeiten bei der Erforschung oder Genehmigung neuer Standorte führen können. Die Beurteilung, dass ein Rohstoff eine hohe Umweltrelevanz in Bezug auf seine Minenproduktion aufweist, wird nicht nur durch das Umweltgefährdungspotenzial, sondern auch durch andere Faktoren beeinflusst. Wir gehen von folgender Annahme aus: Je schlechter die Umweltschutz-Regierungsführung (Environmental Governance, EGov) in den Hauptproduktionsländern eines Rohstoffs ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Regierung oder die Bergbauunternehmen

ausreichende Maßnahmen ergreifen, um potenzielle Gefahren wirksam zu kontrollieren und Umweltschäden zu vermeiden oder zu reduzieren. Unter diesem Gesichtspunkt rücken die Rohstoffe Antimon, Kobalt, Platin, Vanadium, Rhodium und die HREE-Gruppe in den Fokus, da hier ein schlechter EGov auf ein hohes oder mittleres bis hohes aUGP trifft. Die wichtigsten Produktionsländer, die zu einer schlechten EGov-Klassifizierung dieser Rohstoffe führen, sind China, die DR Kongo und Südafrika.

Ein weiterer Indikator für die absolute physische Dimension möglicher Umweltschäden ist der Umfang der globalen Produktion und der damit verbundenen Material- und Energieflüsse. Diese beiden Aspekte wurden zu Global size of material and energy flows (GSMEF) zusammengefasst.

Rohstoffe mit einem hohen aUGP, schlechtem EGov und hohem GSMEF wurden nicht identifiziert. Ein hohes aUGP in Kombination mit einem hohen GSMEF zeigt Kupfer, Gold, Phosphatgestein und Zink, zusätzlich zeigt Aluminium einen mittleren bis hohen aUGP in Kombination mit einem hohen GSMEF (siehe auch Tabelle 2).

Die Zahlen in Abbildung 1 bis Abbildung 5 zeigen die Werte für KEA_{global} (Kumulierter Energieaufwand) der einzelnen untersuchten Rohstoffe und Gruppen, aufgetragen über die Werte KRA_{global} (Kumulierter Rohstoffaufwand). Die Farben der Punkte, die für die einzelnen Rohstoffe stehen, zeigen das jeweilige Ergebnis der Auswertung für das UGP (siehe auch Legende Tabelle 2). Da nicht alle Rohstoffe in einem Diagramm übersichtlich dargestellt werden können, wurden je nach GSMEF-Klassifizierung drei Darstellungen gewählt.

Abbildung 1: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF

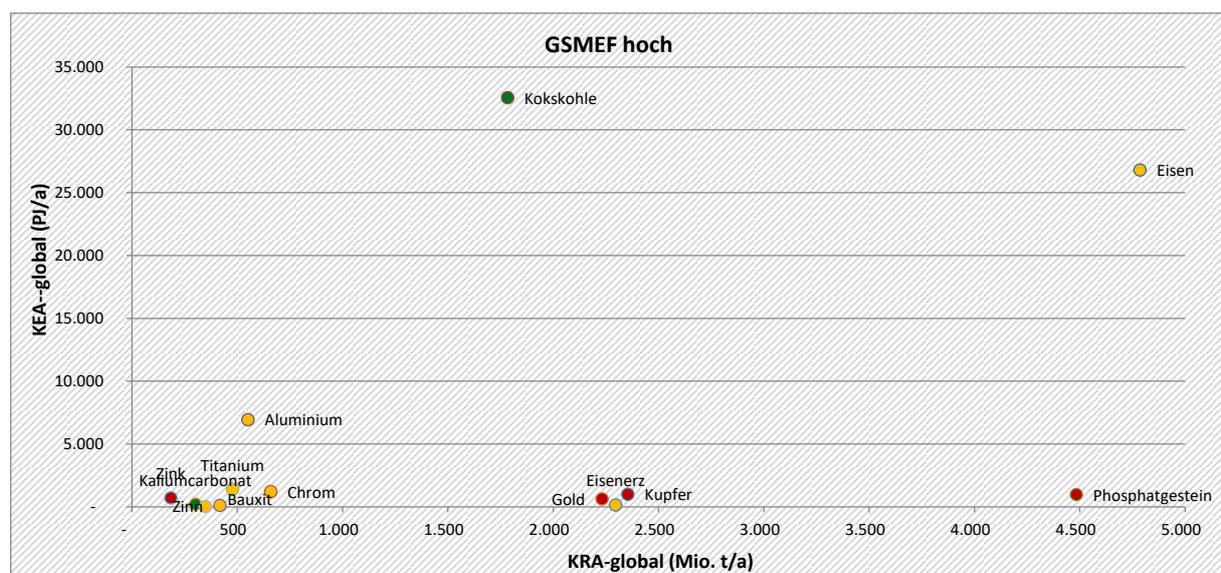
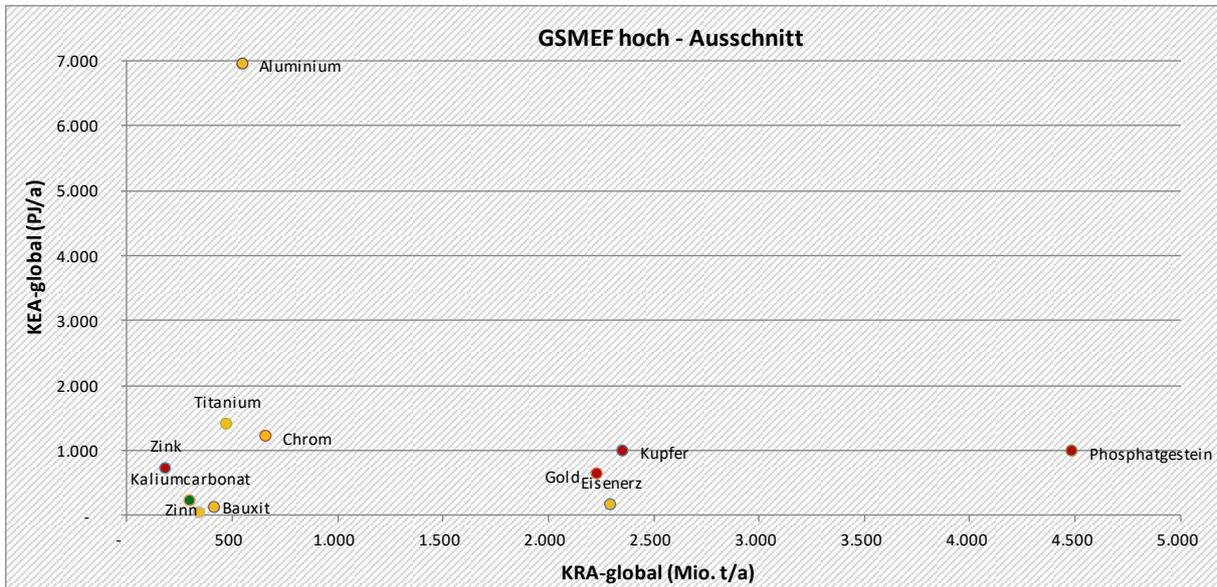


Abbildung 1 bis Abbildung 5 enthalten Informationen über den globalen Rohstoff- und Energieaufwand zur Verarbeitung der Rohstoffe. Die Produktionsmengen betreffen sowohl den KRA_{global} als auch den KEA_{global} . Niedrige Erzgehalte (und entsprechend hohe Bergbauabfallmengen) erhöhen den KRA_{global} , komplexe Verarbeitungsverfahren insbesondere den KEA_{global} , aber auch den KRA_{global} eines Rohstoffs aufgrund der benötigten Primärenergieträger.

Abbildung 1 zeigt zum Beispiel, dass die Verarbeitung von Eisenerz zu Eisen sowohl den KRA_{global} als auch den KEA_{global} deutlich erhöht. Bei Bauxit, das zu Aluminium weiterverarbeitet wird, ist der Anstieg nicht ganz so hoch.

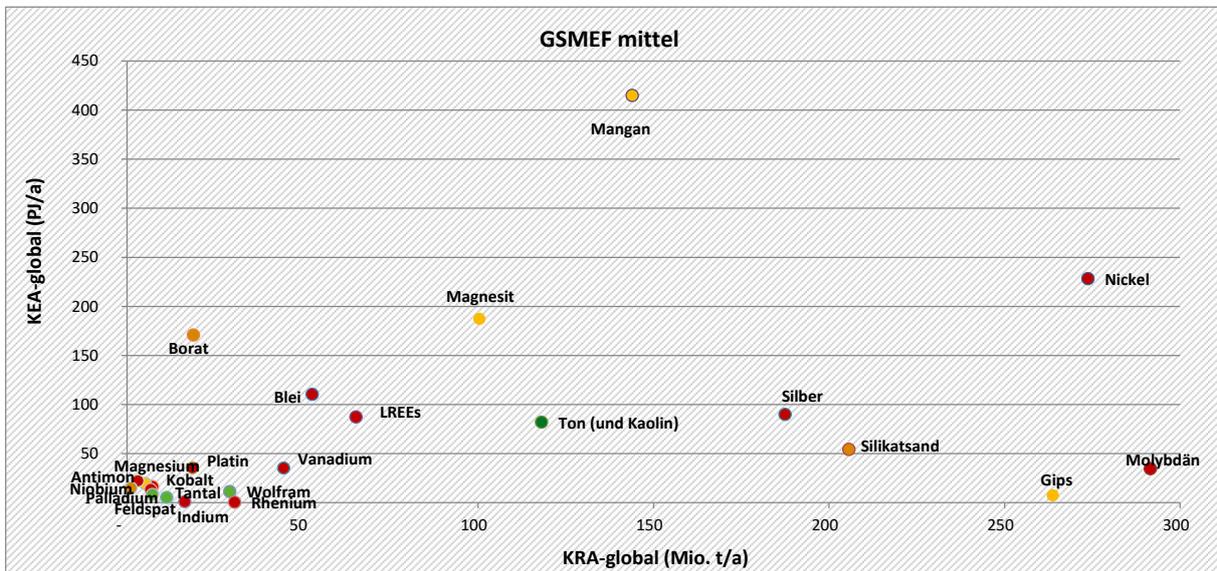
Kokskohle, der Rohstoff mit dem höchsten KEA_{global} , hat ein geringes aUGP-Rating. In der Gruppe der Rohstoffe mit einem hohen GSMEF zeigen Gold, Kupfer und Phosphatgestein hohe aUGP-Werte (s. Abbildung 2).

Abbildung 2: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit hohem GSMEF, Ausschnitt ohne Kokskohle und Eisen



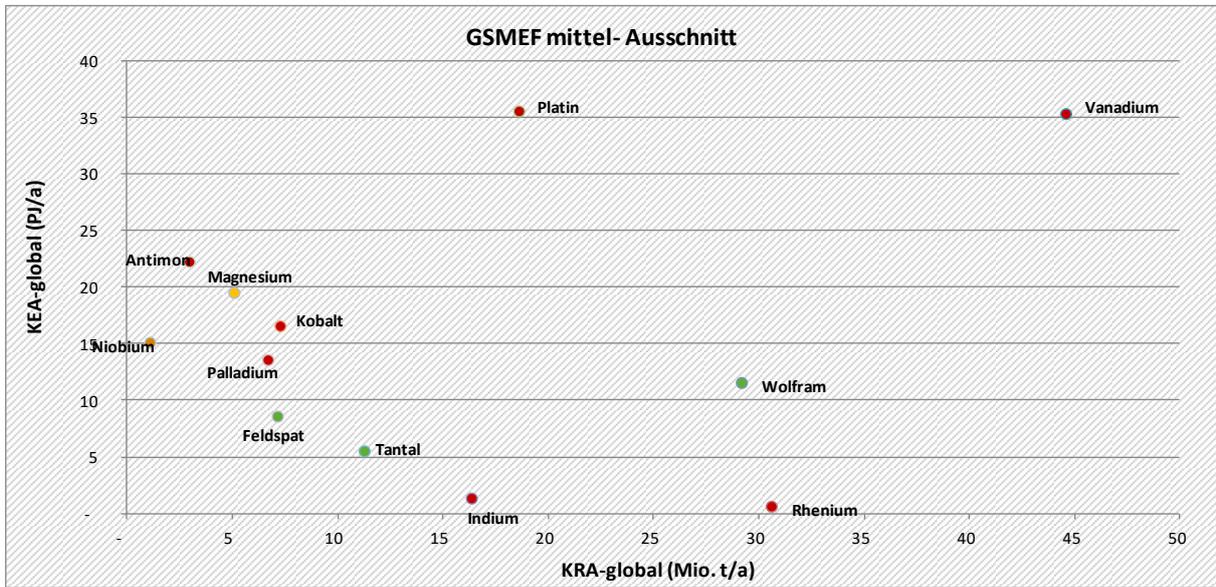
Um die Platzierung der Rohstoffe mit hohem GSMEF, aber nur geringem bis mittlerem KEA_{Global} besser zu erkennen, zeigt Abbildung 3 einen Ausschnitt aus Abbildung 2 ohne die beiden Rohstoffe Kokskohle und Eisen.

Abbildung 3: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF



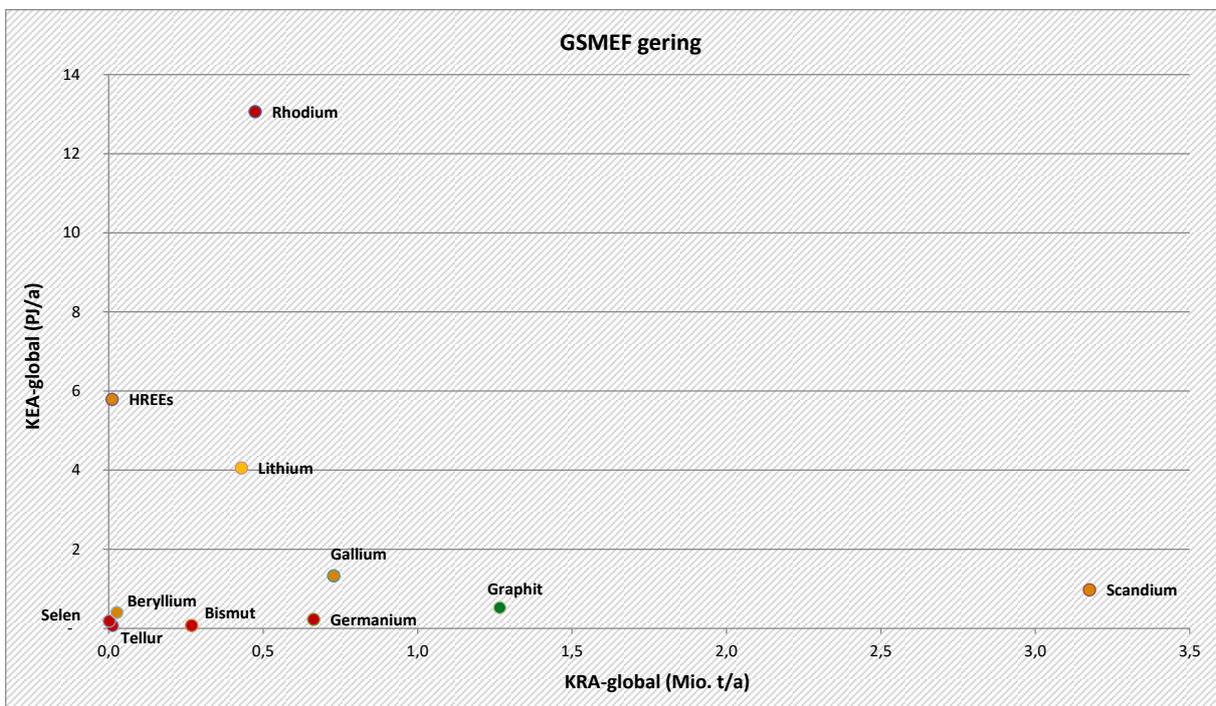
In der Gruppe der Rohstoffe mit einem mittleren GSMEF weist Mangan den höchsten KEA_{global} -Wert auf, während Molybdän, Nickel und Gips die höchsten KRA_{global} -Werte aufweisen. Mangan und Gips mit einem mittleren aUGP, Nickel und Molybdän mit hohem aUGP bewertet. Blei, LREE und Silber weisen einen KEA_{global} von rund 100 Millionen PJ/a auf und wurden mit einem hohen aUGP bewertet (siehe Abbildung 3). Da sich eine große Anzahl von Rohstoffen im geringen KRA_{global} - und KEA_{global} -Bereich befindet, haben wir diesen Abschnitt in Abbildung 4 erweitert.

Abbildung 4: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit mittlerem GSMEF, Ausschnitt KEA_{global} bis zu 40 PJ/a and KRA_{global} bis zu 50 Mio t/a



Rhodium hat den höchste KEA_{global} und Scandium den höchsten KRA_{global} in der Gruppe der Rohstoffe mit geringem GSMEF. Mit Ausnahme von Graphit und Lithium weisen alle Rohstoffe mit einem geringen GSMEF einen hohen oder mittleren bis hohen aUGP auf.

Abbildung 5: KEA_{global} aufgetragen über KRA_{global} – für Rohstoffe mit geringem GSMEF



Bei der Frage, welche Rohstoffe für Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf einen umweltgerechten und sicheren Abbau und Bemühungen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und des Recyclings am dringendsten in den Blick genommen werden sollten, ist es von entscheidender Bedeutung, ob die Rohstoffe überwiegend als Haupt- oder Nebenprodukte gewonnen werden. Bei Rohstoffen mit hohem aUGP, die nur oder überwiegend als Neben- oder

Koppelprodukte gewonnen werden, sind auch die jeweiligen Hauptprodukte des Extraktionsprozesses zu berücksichtigen.

Von den Rohstoffen, die selbst kein hohes oder mittleres bis hohes aUGP aufweisen, stehen zusätzlich nur Eisen (in Bezug auf Vanadium) und Wolfram (in Bezug auf Wismut) als Hauptprodukte im Fokus, weil sie für die Herstellung von Neben- und Koppelprodukten relevant sind, die mit einem hohen aUGP bewertet werden. Insbesondere bei den Rohstoffen, die ausschließlich oder überwiegend als Hauptprodukt gewonnen werden³, müssen Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltbelastungen und zur Erhöhung des Recyclings (wo möglich) ergriffen werden, nämlich bei Aluminium, Beryllium, Boraten, Kupfer, Nickel, Niob, Phosphatgestein, Quarzsand und Zink.

Dies bedeutet nicht, dass Rohstoffe mit hohem oder mittlerem bis hohem aUGP, die nur als Nebenprodukte gewonnen werden, nicht berücksichtigt werden sollten. Bei diesen müssen jedoch immer die Hauptprodukte mitbeachtet werden. Dies gilt beispielsweise für Selen und Tellur, bei denen das Hauptprodukt Kupfer mitbetrachtet werden muss.

1.3 Handlungsempfehlungen

Zu den **Handlungsempfehlungen im Bereich der Gewinnung von und Versorgung mit Rohstoffen aus Bergwerken** zählen die Verknüpfung der umwelt- mit der rohstoffpolitischen Debatte, die Priorisierung von Rohstoffen, die Festlegung rohstoffspezifischer Ziele und Maßnahmen, Umwelt- und entwicklungsorientierte Rohstoffpartnerschaften, langfristige Lieferbeziehungen und Abnahmegarantien, Partnerschaften zwischen Bergbau und verarbeitender Industrie, Standards, Fokus auf Auswirkungen, Verteilung der Mehrkosten entlang globaler Wertschöpfungsketten, Berücksichtigung der globalen Marktveränderungen bei der Internalisierung der Umweltkosten, Transparenzinitiativen und Sorgfaltspflichten, Unterstützung der Partnerländer im Bereich der umweltorientierten Rohstoffpolitik und die Berücksichtigung von Umweltaspekten als Kriterium für die Formalisierung von ASM (Artisanal- und Kleinbergbau; Artisanal and small-scale mining).

Im Rahmen von **Handlungsempfehlungen im Bereich Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Rohstoffsubstitution** werden Ansätze zur Unterstützung der Materialeffizienz im Bergbau und in der Aufbereitung, Priorisierung von Produkten und Produktgruppen als Grundlage für Beiträge zu einer Kreislaufwirtschaft, Verlängerung der Dauer und Intensität der Nutzung ausgewählter Produktgruppen, Förderung von Design-for-Recycling, Verbesserung der Rahmenbedingungen für Investitionen in innovative Recycling-Technologien und der Ausschluss in Bezug auf die Substitution aufgeführt.

Als **weiterer Forschungsbedarf** wird die Verbesserung der Anwendung von Geodaten und Verknüpfung von Datenbanken über Bergbauaktivitäten und eine Weiterentwicklung der ÖkoRes-Methode benannt.

³ Vergleiche hierzu auch die ausführliche Ergebnisdarstellungen in den UBA-Texten 80/2020: Environmental Criticality of Raw Material (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials>).

2 Summary

2.1 Introduction

Within the project ÖkoRess I (Dehoust et al. 2017) methodologies to evaluate Environmental Hazard Potentials (EHP) of both mine sites and mined raw materials have been developed. The follow-up project ÖkoRess II focuses on the raw material-related evaluation scheme which has been applied to a wide range of mineral raw materials. In total a selection of 61 raw materials or raw material groups have been assessed. The selection is based on the raw materials examined in the criticality assessment for the European Commission in 2014 (European Commission 2014/2015). As far as possible, it was compared with the candidate lists of the new edition of this criticality assessment published in 2017 (European Commission 2017). A further research question was to identify a governance indicator which reflects best a country's mining sector governance with regard to environmental aspects. Eight indicators were tested on 23 case studies. In result, published in a separate study (ÖkoRess II 2019 b⁴), the Environmental Performance Index (EPI) was recognized as best suited.

The raw material-related approach takes into account three levels that have an impact on the Environmental Hazard Potential:

Firstly, within the area of geology, the likelihood of radioactive contamination, paragenesis with heavy metals and potential for Acid Mine Drainage (AMD) are investigated (indicators 1-3). E.g. raw materials that tend to occur in sulphidic ores pose a higher Environmental Hazard Potential than raw materials occurring in oxidic sedimentary ores.

Secondly, in the technology level the mining method and the use of auxiliary substances are assessed (indicators 4-5). E.g. raw materials that are more likely to be mined in open-pit operations disturb larger surface areas than raw materials mainly mined underground. In the first two levels, 57 raw materials were described and evaluated.

Thirdly, EHP that emanate from the natural environment are assessed (indicators 6-8). This relates to the geographic location of the mine sites and investigates hazard potentials due to floods, landslides, earthquakes and storms. E.g. if a majority of mines for a certain raw material are located in areas with frequently occurring floods, the Environmental Hazard Potential for the raw material is more likely to be high, since floods can be a cause of tailing dam failures. Moreover it is determined whether mines are located in areas with a high water stress or low water-availability (deserts), and if mining sites are located in protected areas. With regard to indicators 6 to 8, 47 raw materials could be evaluated after intensive research. 42 of them were evaluated directly, five further raw materials, aluminium, iron, tellurium, selenium and gallium, could be assigned to their ores or main metals after the actual evaluation step.

In addition, the environmental governance (EGov) is assessed based on the weighted EPI according to the production share of the producing countries. If raw materials are mined to a large extent in countries with weak environmental governance, it is more likely that the Environmental Hazard Potentials are not properly managed and the likelihood for the occurrence of environmental impacts is higher. The EGov indicator could be calculated for 55 raw materials.

Artisanal and small-scale mining (ASM) bears a special governance risk. The most relevant reasons leading to this risk are:

⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/comparative-analysis-of-case-studies-for-mining>

- ▶ The large number and isolated situation of operations,
- ▶ the close linkage between the ASM sector and poverty,
- ▶ the informality of many ASM operations,
- ▶ the migratory nature of many artisanal miners and their operations (especially with regard to alluvial deposits, i.e. for gold, coloured gemstones, diamonds, tin, tungsten and tantalum (3T), as well as gravel and sand),
- ▶ the traditional and indiscriminate use of toxic substances, i.e. mercury for the amalgamation of gold ores,
- ▶ shortcomings with respect to skilled staff on, both, the miners as well as the state institutions' side together with a lack of means for systematic mine inspections,
- ▶ the involvement of local elites in the informal exploitation and consequently a limited political will to apply sanctions.

Some of these aspects lead to weak application of the pertinent legal and regulatory framework. Particularly environmental laws are often weakly implemented as they are considered as additional costs to the miners. As the identified Governance Indicator, the EPI, looks at the general environmental performance of a country, but is neither mining specific nor ASM specific, the raw material profiles specify ASM-related governance challenges for ASM relevant resources.

Nevertheless governance challenges differ according to the exploited commodity. Especially non-metallic minerals are generally less problematic than for instance gold or the 3T.

Globally agreed numbers of ASM mining communities are non-existent. One reason is the fact that the definition of ASM and small-scale mining (SSM) differ from country to country (Small-scale operations in Peru or Chile according to the mining codes for instance would be considered large scale in Bolivia). In addition the authors of studies on ASM and SSM apply different definitions. The most cited sources for data on production shares for different resources are GEUS (2007), Dorner et al. (2012) and BGR (2007).

Lastly, the method includes two indicators addressing the size of global material and energy flows from mining to refining in order to assess the absolute physical dimension of probable impacts. For this inventory data for the indicators Cumulative Energy Demand (CED) and Cumulative Raw Material Demand (CRD) are used. The specific values per ton of refined material are multiplied by the world production (2014/15) and depict the size of material flows (SMF) and the size of energy flows (SEF) on a global level. The indicators SMF and SEF could be determined for 52 raw materials.

The indicator results of the 47 fully evaluated raw materials are then aggregated⁵ and three final results are provided for each raw material:

- ▶ the aggregated environmental hazard potential (aEHP), which combines the indicators 6 to 8 on a 5-level scale: low – low to medium – medium – medium to high – high EHP,

⁵ The description of the concrete procedure for combining the individual results of the indicators examined is shown in the general report on ÖkoRes II.

- ▶ the environmental governance indicator represented by the weighted EPI, which can be used in the sense of a risk enhancing or risk reducing factor,
- ▶ the global size of material and energy flows (GSMEF), which combines the SMF and SEF and provides information about the global dimension of raw material mining and production.

Results are discussed and lists of recommended measures for action which show how the results of the evaluations can be used to reduce the environmental impact of mining and material use.

Table 1 shows an overview of the evaluation method according to ÖkoRess I, which already takes into account the changes made in the course of processing ÖkoRess II⁶.

⁶ See <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekoress-ii>.

Table 1: Scheme for the evaluation of raw material-related environmental hazard potentials (EHP)

		Indicator	Evaluation			
			Low	Medium	High	
Geology	EHP	1. Pre-conditions for AMD	Geochemical preconditions for AMD do not exist	Geochemical preconditions for AMD exist in part	Geochemical preconditions for AMD exist	
		2. Paragenesis with heavy metals	The deposits usually have no elevated heavy metal concentrations	The deposits usually have slightly elevated heavy metal concentrations	The deposits usually have strongly elevated heavy metal concentrations	
		3. Paragenesis with radioactive substances	The deposits usually have low uranium and/or thorium concentrations	The deposits usually have slightly elevated uranium and/or thorium concentrations	The deposits usually have elevated uranium and/or thorium concentrations	
Technology		4. Mine type	Commonly extracted in underground mines	Commonly extracted from solid rock open pit mines	Commonly extracted from alluvial or unconsolidated sediments and/or dredging in rivers	
		5. Use of auxiliary substances	Standard extraction & processing methods without auxiliary chemicals	Standard extraction & processing methods using auxiliary chemicals	Standard extraction & processing methods using toxic reagents and auxiliary chemicals	
Natural environment		6. Accident hazards due to floods, earthquakes, storms, landslides				
		7. Water Stress Index (WSI) and desert areas	≤ 25 % quantile of the combined assessment result of the 42 raw materials with sufficient data availability	> 25 % quantile and ≤ 75 % quantile of the combined assessment result of the 42 raw materials with sufficient data availability	> 75 % quantile of the combined assessment result of the 42 raw materials with sufficient data availability	
		8. Designated protected areas and AZE sites				
Social environment		EGOV	9. Environmental governance in major production countries (EPI)	Weighted EPI of the most important producing countries of the raw material > 75 % quantile	Weighted EPI of the most important producing countries of the raw material > 25 % and ≤ 75 % quantile	Weighted EPI of the most important producing countries of the raw material ≤ 25 % quantile
Raw Material Value Chain			GSMIEF	10. Cumulated raw material demand of global production (CRD _{global})	≤ 25 % quantile of the 52 raw materials for which data are available	> 25 % quantile and ≤ 75 % quantile of the 52 raw materials for which data are available
		11. Cumulated energy demand of global production (CED _{global})		≤ 25 % quantile of the 52 raw materials for which data are available	> 25 % quantile and ≤ 75 % quantile of the 52 raw materials for which data are available	> 75 % quantile of the 52 raw materials for which data are available

2.2 Results

The ÖkoRes method evaluates environmental hazard potentials (EHP) and not the actual pollution situation. The indicator for Environmental Governance (EGov) aims to depict the probability that measures are taken that prevent the realization of the EHP in form of actual environmental damage. The indicators on the size of material and energy flows (SMF/SEF/GSMEF) provide information on the global dimension of possible damages. The results therefore provide information on environmental aspects of mining for each raw material that deserves special attention and further analysis.

This is a qualitative assessment for 47 raw materials whose aggregated result can be used as an environmental dimension within the matrix type criticality framework. In the following, the aggregated EHP are compared with the results of the EU Criticality Study of 2017 which assesses criticality by assessing supply risks and importance for the EU economy (EC 2017). The economic importance axis of the EU study can be used to assess environmental criticality which we defined as such (The results can be significantly different when assessing other countries or regions whose industries rely on other raw materials).

If the Economic Importance threshold 2.8 for "critical" is exceeded for a raw material and the raw material is assigned a high or medium to high aEHP, the raw material is classified as environmentally critical.

The comparison with the raw materials classified as critical according to EC 2017 is not intended to express our support for the binary approach of classifying raw materials as critical or non-critical by arbitrarily defining thresholds for supply risk and economic importance. Rather, in our opinion, criticality is a relative concept which means that criticality analyses allow to state that some raw materials are more (or less) critical than others. To be more precise, only a higher or lower economic importance or a higher or lower supply risk, respectively in our case, a higher or lower aEHP, can be identified. Following the concept of classical risk assessment, relative criticality scores can then be derived by multiplicatively linking economic importance and supply risk respectively aEHP (Glöser et al 2015).

Here we follow the debatable, binary criticality approach of EC 2017 in order to show that assessing the environmental criticality of raw materials (as defined above) leads to partially different results than conventional criticality analyses. It highlights raw materials which deserve special attention from an environmental economics and environmental policy perspective.

In total, 21 raw materials are classified with a high aEHP (cf. Table 2).

Comparing these raw materials to the EC criticality assessment (EC 2017), it becomes obvious that only 2 out of these 21 commodities are located below the specified threshold with regard to Economic Importance. These are gold and rhenium, which are therefore neither classified as Critical Raw Materials (CRMs) in the classic criticality assessment nor as ecologically critical in the defined sense. The remaining 19 raw materials, which were classified with a high aEHP, are therefore classified as environmentally critical according to our definition.

The following 11 commodities or groups: Antimony, cobalt, platinum, vanadium, rhodium, phosphate rock, palladium (as PGM), indium, LREE, bismuth and germanium are classified as environmentally critical and are also classified as CRMs by European Commission (EC 2017).

Table 2 Assessment results grouped by aEHP, EGov und GSMEF

EHP Indicators								GSMEF		Raw materials	Aggregated results			Supplementary information		
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	SMF	SEF		aEHP	EGov	GSMEF	M/B/C	ASM	AR
h	h	h	l	h	m	l	l	l	m	Antimony	h	h	m	M+B+C	ASM	< 1 %
h	h	h	m	h	l	l	m	m	m	Cobalt	h	h	m	M+B	ASM	< 5 %
h	h	m	m	h	l	h	m	m	m	Platinum	h	h	m	M+B+C		< 10 %
m	h	h	m	h	m	m	m	m	m	Vanadium	h	h	m	M+B		< 5 %
h	h	m	m	h	l	h	m	m	m	Rhodium	h	h	l	C+B		< 20 %
h	h	m	m	h	h	h	m	h	h	Copper	h	m	h	M		< 5 %
h	m	h	m	h	m	m	h	h	h	Gold	h	m	h	M+B	ASM	< 5 %
l	m	h	h	h	m	m	m	h	h	Phosphate rock	h	m	h	M		< 5 %
h	h	m	l	h	m	m	m	m	h	Zinc	h	m	h	M		< 1 %
h	h	m	m	h	l	m	m	m	m	Palladium	h	m	m	C+B		< 30 %
h	h	m	m	h	m	m	m	m	l	Indium	h	m	m	B		< 1 %
h	h	m	m	h	m	m	m	m	m	Lead	h	m	m	M+C		< 1 %
l	m	h	m	h	h	m	l		m	LREE	h	m	m	M+C		< 5 %
h	h	m	m	h	m	h	m	h	m	Molybdenum	h	m	m	M+B		< 1 %
h	h	m	m	h	m	m	h	m	m	Silver	h	m	m	M+C+B	ASM	< 5 %
h	h	m	m	h	m	m	l	l	l	Bismuth	h	m	l	B		< 1 %
h	h	m	h	h	h	h	m	l	l	Selenium	h	m	l	B		< 5 %
h	h	m		h	h	h	m	l	l	Tellurium	h	m	l	B		< 5 %
h	h	m	m	m	m	l	h	h	h	Nickel	h	l	m	M		< 15 %
h	h	m	h		h	l	h	l	l	Germanium	h	l	l	B		< 10 %
m	h	m	m	h	h	h	l	l	l	Rhenium	h	l	l	B		< 5 %
l	m	h	m	h	h	l	l	m	m	HREE	h-m	h	m	M+C		< 1 %
l	m	m	h	h	m	m	m	h	h	Aluminium	h-m	m	h	M		< 1 %
l	l	l	m	h	h	m	h	m	h	Borates	h-m	m	m	M		0 %
l	m	m	h	h	m	m	m	l	l	Gallium	h-m	m	l	B		< 1 %
l	m	h	m	h	h	l	l	l	l	Scandium	h-m	m	l	B		< 10 %
l	l	h	m	h	l	h	m	l	l	Beryllium	h-m	l	l	M+B	ASM	< 5 %
l	m	hh	m	h	l	l	h	l	m	Niobium	h-m	l	m	M		< 1 %
l	l	l	h	h	m	m	h	m	m	Silica sand	h-m	l	m	M		0 %
l	h	m		m	m	h	m	h	h	Chromium	m	h	h	M	ASM	0 %

EHP Indicators								GSMEF		Raw materials	Aggregated results			Supplementary information		
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	SMF	SEF		aEHP	EGov	GSMEF	M/B/C	ASM	AR
m	m	m	h	l	m	l	m	h	m	Tin	m	h	h	M	ASM	< 1 %
l	l	l	m	h	h	h	l	m	m	Magnesium	m	h	m	M		0 %
l	m	h	m	l	l	m	h	m	h	Manganese	m	h	m	M	ASM	0 %
l	m		h	m	m	m	m	h	m	Bauxite	m	m	h	M		< 1 %
m	m	m	m	m	m	m	h	h	h	Iron	m	l	h	M		< 1 %
m	m	m	m	m	m	m	h	h	m	Iron ore	m	l	h	M		< 1 %
l		h	h	l	l	l	h	h	h	Titanium	m	l	h	M		< 1 %
l	l	l	m	m	h	h	m	m		Gypsum	m	m	m	M	ASM	0 %
l	l	l	m		h	h	m	m	h	Magnesite	m	m	m	M		0 %
l	l	m	h	m	h	m	l	l	l	Lithium	m	l	l	M		0 %
	m	h	m	l	l	l	m	m	m	Tantalum	l-m	h	m	C	ASM	0 %
l	l	l	l	m	l	h	m	m	m	Fluorspar	l-m	m	m	M	ASM	0 %
m	m	m	l	m	m	l	l	m	m	Tungsten	l-m	m	m	M	ASM	< 5 %
l	l	l	l	m	m	m	m	l	l	Graphite	l	h	l	M	ASM	< 5 %
l	l	l	m	m	m	m		h	h	Coking coal	l	m	h	M		0 %
l	l	l	l	m	l	m	m	h	h	Potash	l	l	h	M		0 %
l	l	l	m	l	l	m	l	m	m	Kaolin clay	l	l	m	M		0 %

- 1. Pre-conditions for acid mine drainage (AMD)
- 2. Paragenesis with heavy metals
- 3. Paragenesis with radioactive substances
- 4. Mine type
- 5. Use of auxiliary substances
- 6. Accident hazards due to floods, earthquakes, storms, landslides
- 7. Water Stress Index (WSI) and desert areas
- 8. Designated protected areas and Alliance for Zero Extinction (AZE) sites
- SMF Size of material flow
- SEF Size of energy flow
- EHP Environmental hazard potential
- aEHP Aggregated environmental hazard potential
- EGov Environmental governance
- GSMEF Global size of material and energy flows
- M/B/C Main (M), co- (C) or by (B)-product. **Fat** and underlined represents the largest share (e.g. **B**). '+' indicates that the raw material is mined as M, B, and/or C

- ASM Artisanal and small-scale mining
- AR Share of mining sites in the arctic region
- HREE Heavy rare earth elements
- LREE Light rare earth elements

h	High EHP
m-h	Medium to high EHP
m	Medium EHP
l-m	Low to medium EHP
l	Low EHP

In addition there are the 8 raw materials with a medium to high aEHP. The HREE, which were also poorly rated with regard to EGov, and aluminium, which also has a high GSMEF stand out here. With the exception of aluminium and quartz sand, all of these raw materials and groups are also classified as CRMs. Aluminium is above the threshold value of the EU in terms of economic importance and can therefore be classified as environmentally critical (cf. Table 3).

Table 3 Raw materials with high (bold) or medium to high (normal) aEHP, grouped according to the results of the classical criticality assessment by EC 2017

Classified as CRM and evaluated as being environmentally critical	Not classified as CRM but evaluated as environmental critical	Not classified as CRM and not evaluated as environmental critical
Antimony, Beryllium, Bismuth, Borates, Cobalt, Gallium, Germanium, HREE, Indium, LREE, Niobium, Palladium (als PGM), Phosphate rock, Platinum, Rhodium, Scandium, Vanadium	Aluminium, Copper, Lead, Molybdenum, Nickel, Silver, Selenium, Tellurium, Zinc	Gold, Rhenium, Silica sand

On the one hand, the ecological hazard potential stands on its own and represents an important argument for putting raw materials into the focus of politics, business, science and society in order to effectively reduce the ecological impacts associated with the extraction of these raw materials. In this sense, the results of the ÖkoRes assessment also highlight the environmental relevance of Aluminium, Copper, Gold, Lead, Molybdenum, Nickel, Rhenium, Silica sand, Silver, Selenium, Tellurium and Zinc, which are not classified as critical raw materials by EC (cf. Table 3).

In addition, a high potential for environmental hazards can also significantly increase general supply risks. Not only factors such as a high concentration of production in some countries and political instability in these countries can lead to supply bottlenecks for these raw materials. Negative ecological impacts can also cause acceptance by the population and politicians to dwindle, making it more difficult to continue or open new mines and reducing the availability of raw materials accordingly (environmental raw material availability).

On the other hand, low requirements for compliance with environmental standards can - at least in the short term - lead to higher profits for mining companies because less effort is required to protect the environment. Where the potential damage to the environment and local residents is examined less intensively, approval procedures may also be simpler and faster.

In the long term, however, it can be assumed with a high degree of certainty that the general supply risk will increase as a result of poor environmental governance and pollution and damage caused by mining:

Experience has shown that environmental impacts can lead to the temporary or permanent closure of sites, on the one hand, and to difficulties in exploring or approving new sites, on the other. The assessment that a raw material shows a high environmental relevance with regard to its mine production is influenced not only by the environmental hazard potential but also by other factors. We assume that the worse the environmental governance (EGov) in the main production countries of a raw material is, the lower the probability that sufficient measures are taken by the government or mining companies, to effectively control potential hazards and avoid or reduce environmental damage. From this point of view, the raw materials antimony, cobalt, platinum, vanadium, rhodium and the HREE group come into focus, as here a poor EGov meets a high or medium to high aEHP. The most important producing countries leading to the poor EGov classification of these raw materials are China, DR Congo and South Africa.

A further indication of the physical dimension of possible environmental damage is the additional inclusion of global production and the extent of the associated material flows and primary energy consumption. These two aspects were combined to form the Global size of material and energy flows (GSMEF).

Raw materials with a high aEHP, poor EGov and high GSMEF were not identified. A high aEHP in combination with a high GSMEF shows copper, gold, phosphates rock and zinc, additionally aluminium shows a medium to high aEHP in combination with a high GSMEF (see also Table 3).

The figures (Figure 2 - Figure 4) show the CED-global of the individual raw materials and groups investigated, plotted over the CRD-global. The colours of the dots which stand for the individual raw materials, show the respective result of the evaluation for the EHP (see also legend Table 2). Since all raw materials cannot be displayed clearly in one graph, three representations were chosen, depending on the GSMEF classification.

Figure 1 CED-global plotted over CRD-global - for the raw materials with high GSMEF

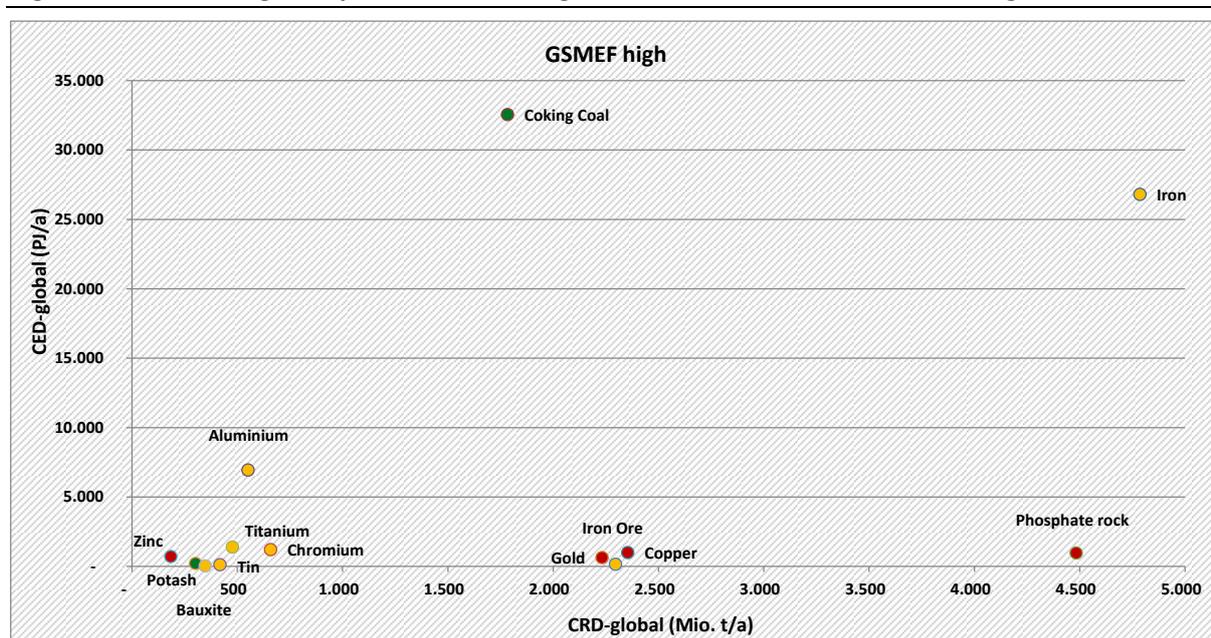
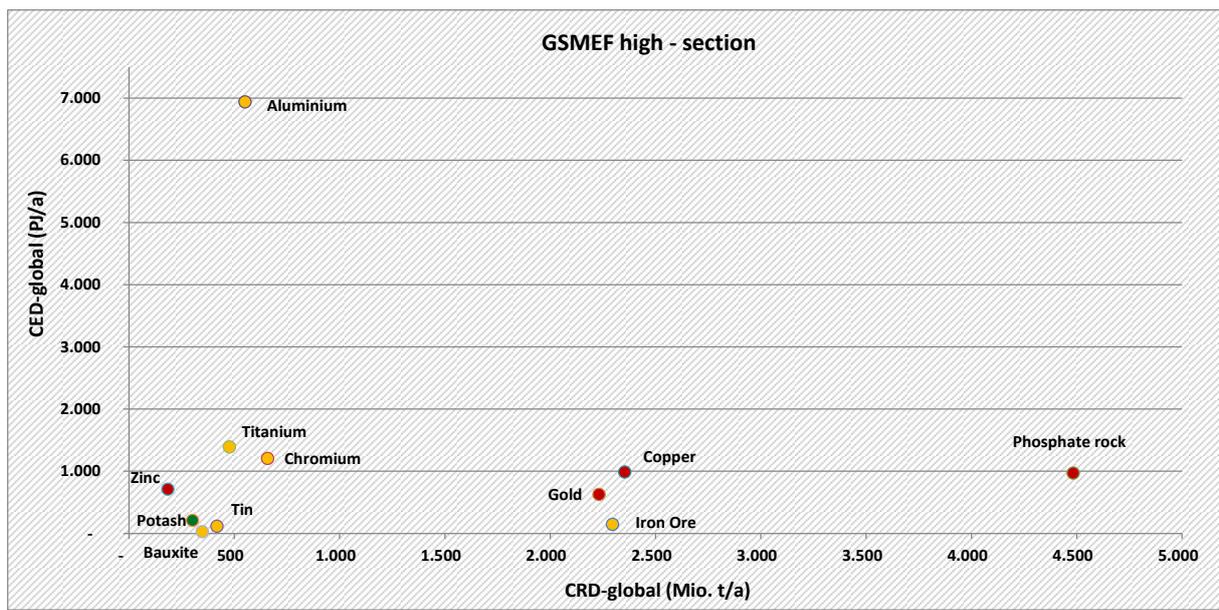


Figure 2-Figure 4 include information on the global material and the global energy required to process the raw materials. The production quantities affect both the global CRD and the global CED. Low ore contents (and correspondingly high mining waste amounts) increase the global CRD, complex processing methods in particular the global CED, but also the global CRD of a raw material due to the primary energy sources required.

Figure 2 shows, for example, that the processing of iron ore into iron significantly increases both the global CRD and the global CED. In the case of bauxite, which is further processed into aluminium, the increase is not quite as high.

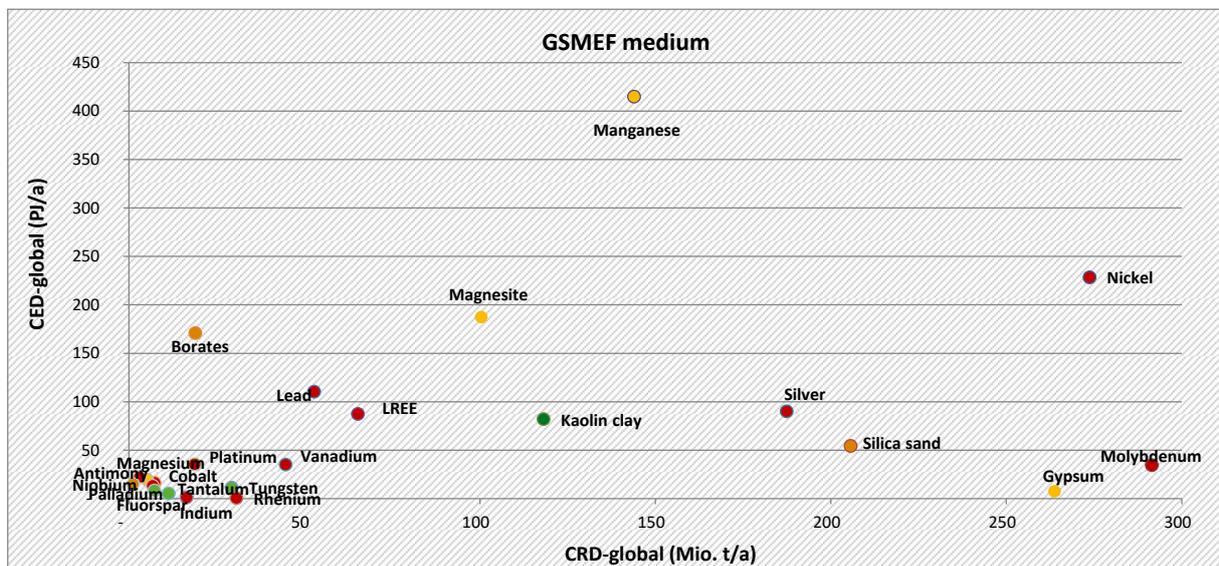
Coking coal, the raw material with the highest global CED, has a low aEHP rating. In the group of raw materials with a high GSMEF, high aEHP is found in gold, copper and phosphate rock (see Figure 2).

Figure 2 CED-global plotted over CRD-global - for the raw materials with high GSMEF, Section without Coking Coal and Iron



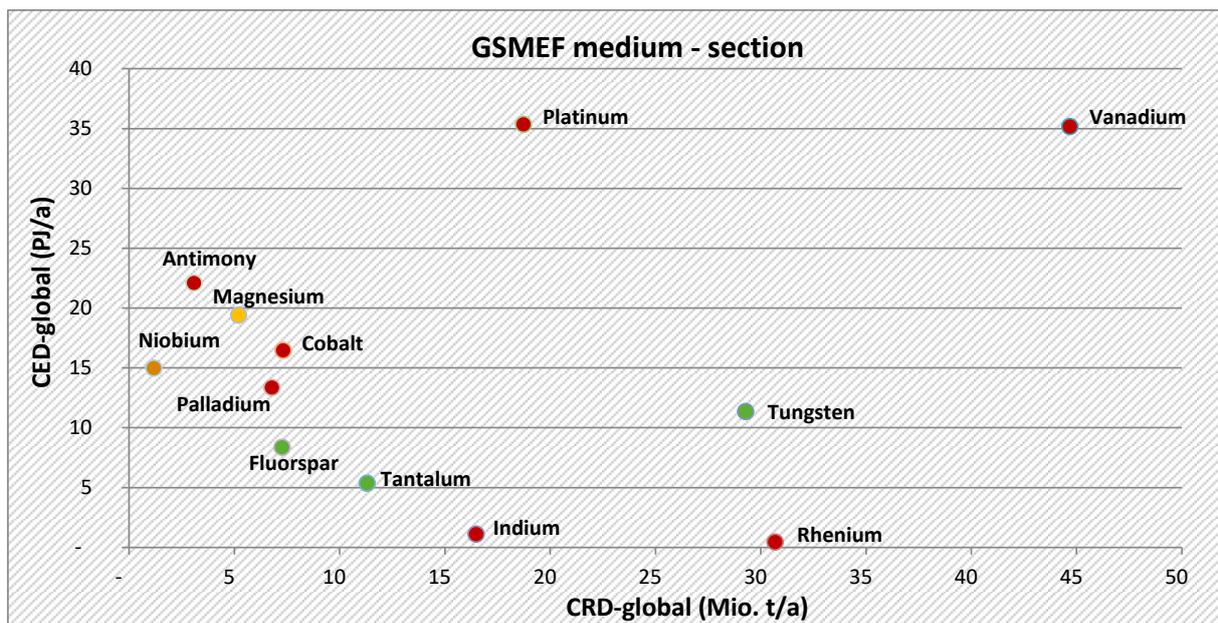
In order to better recognize the placement of the raw materials with high GSMEF but only medium to low CED-global, Figure 3 shows a section from Figure 2 without the two raw materials coking coal and iron.

Figure 3 CED-global plotted over CRD-global - for the raw materials with medium GSMEF



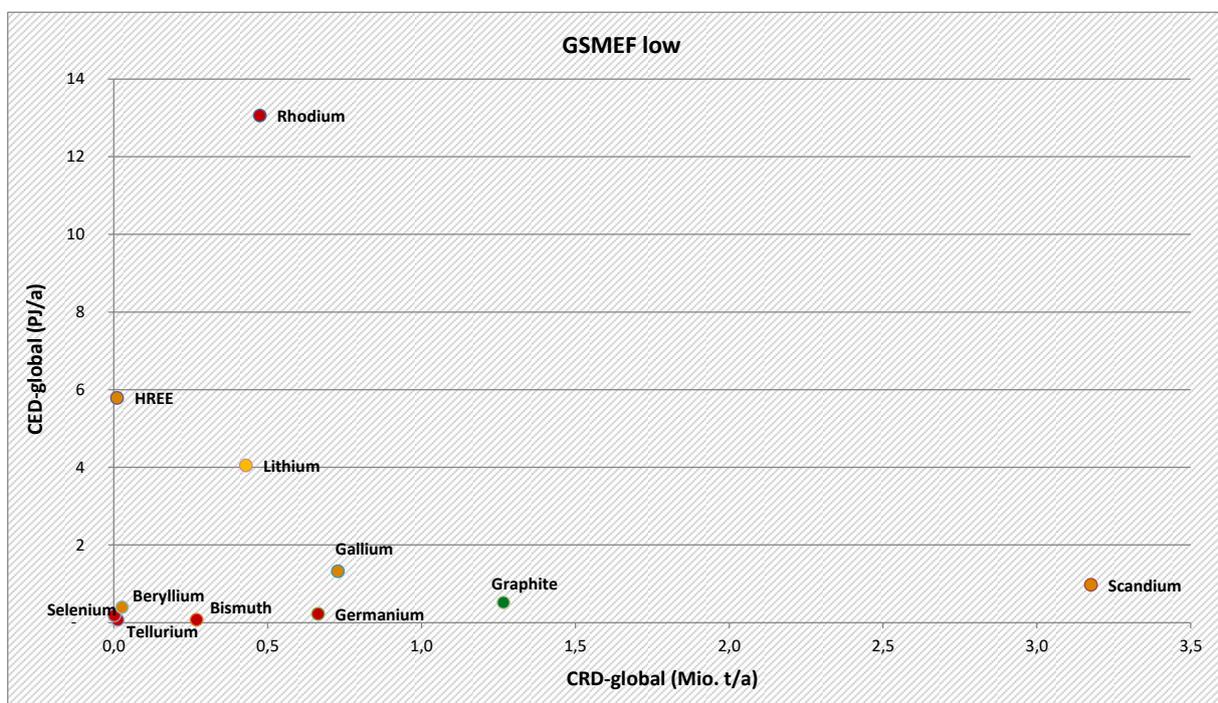
In the group of commodities with a medium GSMEF, manganese has the highest global CED, while molybdenum, nickel and gypsum have the highest global CRD values. Manganese and gypsum were rated average aEHP, nickel and molybdenum high aEHP. Lead, LREE and silver were also rated at around 100 million PJ/a by global CED in conjunction with a high aEHP (see Figure 4). Since a large number of raw materials are located in the low CRD-global and CED-global range, the presentation here is confusing. For this reason we have enlarged this section in Figure 5.

Figure 4 CED-global plotted via CRD-global - for raw materials with middle GSMEF, section CED-global up to 40 PJ/a and CRD-global up to 50 million t/a



Rhodium has the highest global CED and scandium the highest global CRD in the group of raw materials with low GSMEF. With the exception of graphite and lithium, all raw materials with a low GSMEF have a high or medium to high aEHP.

Figure 5 CED-global plotted over CRD-global - for the raw materials with low GSMEF



Concerning the question which raw materials should be the most urgently targeted for optimisation measures with regard to environmentally sound and safe mining and efforts to improve resource efficiency and recycling, it is of decisive importance whether the raw materials are primarily extracted as main or by-products. For raw materials with high aEHP, which are only or predominantly obtained as byproducts or coproducts, the respective main products of the extraction process must also be taken into account.

Table 3 shows that of the raw materials which do not have a high or medium to high aEHP themselves, only iron in relation to vanadium and tungsten in relation to bismuth are additionally in the focus of attention as main products that are relevant for the production of by-products and coproducts which are valued with a high aEHP. On the other hand, the list in Table 3 shows that especially for the raw materials that are exclusively or predominantly obtained as the main product, steps must be taken to reduce the environmental hazard potentials and to increase recycling (where possible), namely for aluminium, beryllium, borates, copper, nickel, niobium, phosphate rock, silica sand and zinc.

This does not mean that raw materials with high or medium to high aEHP, which are only obtained as by-products, should not be considered. With these, however, the situation of the main products must always be taken into account. This applies, for example, to selenium and tellurium whose environmental hazard potential cannot be improved without taking into account the situation with copper.

2.3 Recommendations

Among the **recommendations for action in the field of extraction and supply of raw materials from mines** are the linking of the environmental and raw material policy debate, prioritisation of raw materials, raw material-specific objectives and measures, environmental and development-oriented raw material partnerships, long-term supply relationships and purchase guarantees, partnerships between mining and processing industries, Standards, focus on impacts, additional costs along the raw material value chain, consideration of global market changes in the internalisation of environmental costs, transparency initiatives and due diligence, support of partner countries in the area of environmentally oriented raw materials policy and consideration of environmental aspects as criteria for formalising ASM.

In the context of **recommendations on possible measures for material efficiency, recycling management and raw material substitution**, approaches to support material efficiency in mining and processing, prioritisation of products and product groups as a basis for contributions to recycling management, extension of the duration and intensity of the use of selected product groups, promotion of design-for-recycling, improvement of the framework conditions for investments in innovative recycling technologies and exclusion with regard to substitution are listed.

Further research needs include improving the use of geodata and linking databases on mining activities and further developing the ÖkoRess method.

3 Quellenverzeichnis

Bernewitz, M. W. (1943): Handbook for Prospectors, Mc Graw Hill, New York

BGR (2007): Zertifizierte Handelsketten im Bereich mineralischer Rohstoffe , Projektstudie, Hannover, Available at:

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Studie_Zertifizierte_Handelsketten.pdf?__blob=publicationFile&v=2

BGR (2013): Phosphat - Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit, Internet:

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4

BGR (2017a): Cobalt from the DRC – Potential, Risks and Significance for the Global Cobalt Market (translated, original in German). Commodity Top News v. 53, Hannover; Available from:

https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo_en.pdf?__blob=publicationFile&v=6

BGR (2017b): Nickel - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Available from: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_ni.pdf?__blob=publicationFile&v=3

https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_ni.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BGR (2018): Deutschland – Rohstoffsituation 2017, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Available from: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BGS (2016) British Geological Survey: World Mineral Production 2010-14. Keyworth, Available from: <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3084>

Bodle et al. (2019): International Governance for Environmentally Sound Supply of Raw Materials - Policy options and recommendations; UBA-Projekt, Available from:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2378/dokumente/161110_uba_flyer_rohstoffe_engl_screen.pdf (25.07.2019)

British Geological Survey (2016): World Mineral Production 2010-14. Keyworth, Internet: <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=3084> (04.07.2019)

British Geological Survey (2011): Mineral Planung Factsheet – Potash. Internet: <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1367> (21.11.2018).

Buchert et al. (2007): Verbesserung der Edelmetallkreisläufe – Analyse der Exportströme von Gebraucht-Pkw und Elektro(nik)geräten am Hamburger Hafen, FKZ 363 01 133, Buchert, M.; Hermann, A.; Jenseit, W.; Stahl, H.; Öko-Institut, B. Osyguß, Hamburg; C. Hagelüken (Umicore Precious Metals Refining, Hanau); Publisher Umweltbundesamt

Buchert et al. (2015): Global circular economy of strategic metals – best-of-two-worlds approach (Bo2W), Buchert, M.; Dittrich, S.; Manhart, A.; Mehlhart, G.; Merz, C.; Schleicher, T., Öko-Institut e.V. in Kooperation mit Johnson Controls; Umicore; VAC; CEDARE & City Waste Recycling, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin

Cissarz, A. (1965): Einführung in die allgemeine und systematische Lagerstättenlehre. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

Cissarz, A. (1965): Einführung in die allgemeine und systematische Lagerstättenlehre, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Cochilco 2014a: Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería, Cochilco, Santiago de Chile, Noviembre 2014

Cochilco 2014b: Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2014-2025; Informe DE 23/2014, Santiago de Chile, 2014
British Geological Survey (2011): Mineral Planning Factsheet – Potash. Internet: <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1367> (21.11.2018).

Degreif/Buchert (2017): Rohstoffwende Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft, Müll und Abfall 11/2017

Dehoust, G. et al. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I), TEXTE 87/2017 des Umweltbundesamt, Dessau

Dorner, Ulrike; Franken, Gudrun; Liedtke, Maren and Sievers, Henrike (2012): Artisanal and Small-Scale Mining (ASM), Working Paper Nr.19, Available at: http://www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_chapter7.pdf

European Commission (2010): Critical Raw Materials as EU Level

European Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU - Non-Critical Raw Materials Profiles [cited 2016 Nov 15]. Available from: <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/7422/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>.

European Commission (2015): Report on Critical Raw Materials for the EU - Critical Raw Materials Profiles [cited 2016 Nov 15]. Available from: <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11911/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>.

European Commission (2017a): Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Non-critical Raw Materials Factsheets. Internet: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (14.11.2018).

European Commission (2017b): Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Critical Raw Materials Factsheets. Internet: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> 14.11.2018).

GEUS (2007): Geological Service of Denmark and Greenland (ed.): Small-scale gold mining in developing countries, Ggeoviden, Copenhagen, Available at: <https://zdoc.site/small-scale-gold-mining-in-developing-countries-geus.html>

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte 01/2012, Dessau, 2012.

Glöser et al (2015): Raw material criticality in the context of classical risk assessment, Resources Policy Vol 44, June 2015

Graedel et al. (2012): Graedel, T. E.; Barr, R.; Chandler, C.; Chase, T.; Choi, J.; Christofferson, L.; Friedlander, E.; Henly, C.; Jun, C.; Nassar, N. T.; Schechner, D.; Warren, S.; Yang, M. & Zhu, C.: Methodology of Metal Criticality Determination. Environmental Science & Technology 46 (2) 2012, S. 1063–1070.

Graedel et al. (2015): Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Nuss, Philip, Reck, Barbara K.: Criticality of metals and metal-loids. Proceedings of the National Academy of Sciences 112 (14), 2015, S. 4257–4262.

Gunn, G. Hrsg. (2014): Critical Metals Handbook (Gunn, G. Hrsg). Keyworth

Hua, L. (2011): The Situation of NORM in Non-Uranium Mining in China. China National Nuclear safety Administration. Internet: <http://www.icrp.org/docs/Liu%20Hua%20NORM%20in%20Non-Uranium%20Mining%20in%20China.pdf>, (aufgerufen am 22.01.2016).

- IRTC (2018): Criticality and Circular Economy: IRTC on October 9, 2018, in Tokyo. Internet: <https://irtc.info/criticality-and-circular-economy/> (retrieved 30.11.2018) European Commission (2014). Report on Critical Raw Materials for the EU - Non-Critical Raw Materials Profiles [cited 2016 Nov 15]. Available from: <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/7422/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>.
- Johnstone, S.J. (1954): Minerals for the Chemical and Allied Industries. Chapman & Hall LTD. London
- Joint Research Center (JRC) (2018): Raw Materials Information System (RMIS). <http://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=rm-profiles#/Aluminium> (12.11.2018).
- Kosmol, J., et al. (2017). The Critical Raw Materials Concept: Subjective, multifactorial and ever-developing Factor-X: Challenges, Implementation Strategies and Examples. M. Angrick, A. Burger and H. Lehmann. Berlin, Springer: 1-20.
- Manhart (2013): E-waste country study Ethiopia, Manhart, A. in Zusammenarbeit mit Amara, T.; Belay, M., Öko-Institut e.V. in Kooperation mit PAN Ethiopia, United Nations University (UNU)
- Manhart et al. (2014): Regulatorische Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im IT-Sektor, Manhart, A.; Graulich, K.; Fischer, C.; Schleicher, T., Öko-Institut e.V.
- Manhart et al. (2016): The Lead Recycling Africa Project [Standards für Bleihüllen: Für eine starke Umweltbewegung in Afrika] Manhart, A.; Degreif, S.; Schleicher, T.; in Zusammenarbeit mit Amara, T.; Kuepouo, G. und Mng'anya, S.; Öko-Institut e.V. in Kooperation mit PAN Ethiopia; CREPD Cameroon & AGENDA Tanzania; 2016
- Manhart et al. (2019): Concepts for sustainable solid waste management – E-waste Expert Pool, Manhart, A.; Prakash, S. in Zusammenarbeit mit Deubzer, O.; Kühr, R.; Magalini, F.; Schluep, M.; Smith, E., Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn in Kooperation mit Öko-Institut e.V.; World Resources Forum; Sofies SA & United Nations University (UNU) (in progress)
- Manhart/Prakash. (2017): Ghanaian-German Financial Cooperation (FC): Sound disposal and recycling of electrical and electronic equipment – Feasibility Study for the preparation of a new FC project, Öko-Institut e.V. in cooperation with Sustainable Ghana Ltd. (2017)
- Manhart/Schleicher (2015): An efficient & effective e-waste collection system for Ethiopia – Consultancy Service for UNIDO within the E-Waste Management Project in Ethiopia (EWAMP), Manhart, A.; Schleicher, T. in Zusammenarbeit mit Amara, T.; Belay, A.; Genet, Z., Öko-Institut e.V. in Kooperation mit PAN-Ethiopia, United Nations Industrial Development Organisation (UNIDO)
- Melcher, F. und P. Buchholz (2014): Germanium In: Critical Metals Handbook (Gunn, G. Hrsg). Keyworth
- Nassar, N. T., Graedel, T. E., Harpe, E.M. (2015a): By-product metals are technologically essential but have problematic supply. In: Science Advances 03 Apr 2015: Vol. 1, no. 3, e1400180 DOI: 10.1126/sciadv.1400180
- Nassar, N.T.; Graedel, T.E.; Harper, E.M. (2015b): Supplementary Materials for By-product metals are technologically essential but have problematic supply. In: Sci Adv. 1 (2015)
- Nuss, P.; Eckelman, M. (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. In: PLoS ONE 9(7): e101298. doi:10.1371/journal.pone.0101298
- Oehme et al. (2017): Strategies against obsolescence Ensuring a minimum product lifetime and improving product service life as well as consumer information, UBA-Position//November 2017, Internet: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_position_obsoleszenz_engl_bf.pdf
- Paul Ramdohr, Hugo Strunz (1978): Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie. Thieme
- Philipsborn, H. von (1967): Tafeln zum Bestimmen der Minerale nach äußeren Kennzeichen, 2. Aufl., Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Prakash et al. (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“, UBA-Texte 11/2016, Internet: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf

Prior et al. (2011): Prior T., Giurco D., Mudd G., Mason L., Behrisch J.: Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. In: Global Environmental Change. Vol. 22, No.3 (2011), S. 577–587.

Ramdohr, P. (1975): Die Erzminerale und ihre Verwachsungen, 4. Aufl., Akademie-Verlag, Berlin

Ramdohr, P.; Strunz, H. (1978): Klockmann's Textbook of Mineralogy

Reichl et al. (2016) Reichl, C.; Schatz, M.; Zsak, G.: World Mining Data, Volume 31, Wien, Internet: <http://www.wmc.org.pl/sites/default/files/WMD2017.pdf>

Rüttinger, L. et al. (2017): Verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung? Herausforderungen, Perspektiven, Lösungsansätze -Zusammenfassung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Ansätze zur Reduzierung von Umweltbelastung und negativen sozialen Auswirkungen bei der Gewinnung von Metallrohstoffen (UmSoRes)“, Texte 66/2017 des Umweltbundesamt, Dessau

Schneiderhöhn, H. (1961): Lehrbuch der Erzlagerstättenkunde, Erster Band: Die Lagerstätten der magmatischen Abfolge, Gustav Fischer, Jena

Schneiderhöhn, H. (1962): Erzlagerstätten. Gustav Fischer, Stuttgart

Schrijvers et al. (2019): A review of methods and data to determine raw material criticality, Internet: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100023>

Schüler et al. 2017): European Policy Brief, Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE), No. 02/2017

Schwarz-Schampera, U. (2014): Indium In: Critical Metals Handbook (Gunn, G. Hrsg). Keyworth

Steger et al. (2019): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität, UBA Texte 34/2019

Taggart, A. F. (1953): Handbook of Mineral Dressing - Ores and Industrial Minerals. Wiles & Sons. New York.

Trippi, M.H.; Belkin, H.E.; Dai, Shifeng, Tewalt, S.J.; and Chou, C.J. (2014): USGS compilation of geographic information system (GIS) data representing coal mines and coal-bearing areas in China. Internet: <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1219/> (01/2018)

UNEP (2011). Recycling Rates of Metals - A Status Report (of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel)

UNEP (2013). Metal Recycling - Opportunities, limits and infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel [online]. Available at:

<http://www.unep.org/resourcepanel/publications/metalrecycling/tabid/106143/default.aspx>United States

Geological Survey (2018a): Minerals Yearbook. Volume I. Metals and Minerals. Internet: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/minerals-yearbook-metals-and-minerals> (01/2018)

United States Geological Survey (2018b): Minerals Yearbook. Volume III. Area Reports: International. Internet: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/international-minerals-statistics-and-information> (01/2018)